

## СООТНОШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ И АМБИЕНТНОЙ ДОЗ НЕЙТРОНОВ В ПОЛЯХ ИЗЛУЧЕНИЯ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ОИЯИ

*С. В. Гусева, Е. Н. Лесовая, Г. Н. Тимошенко*<sup>1</sup>

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Вопросы соотношения между нормируемыми и операционными величинами в дозиметрии ионизирующего излучения до сих пор остаются в сфере внимания специалистов. Для практики радиационного контроля в ОИЯИ в связи с очень большим разнообразием полей нейтронов на ядерно-физических установках актуален вопрос о том, всегда ли AMBIENTная доза нейтронов является консервативной оценкой эффективной дозы, в терминах которой устанавливаются дозовые пределы. В настоящей работе исследуется соотношение между расчетными значениями эффективной и AMBIENTной доз нейтронов, полученными на основе представительного набора спектров нейтронов, измеренных в ОИЯИ с помощью многосферного спектрометра нейтронов. Показано, что в «жестких» полях нейтронов измерение AMBIENTной дозы нейтронов не может служить критерием для подтверждения соблюдения установленных дозовых пределов.

The radiation fields at the JINR nuclear facilities are various and variable. Therefore, for the JINR radiation control practice the question about correlation between effective and ambient doses of neutrons is very important. The ambient dose has to be conservative estimation of the effective dose for all neutron fields. Ten neutron spectra in widest energy range (measured by a multisphere spectrometer) were selected for the numerical comparison of ambient and effective doses. It was shown that in “hard” neutron fields the measurement of ambient doses by the dosimeters cannot ensure the rationing dose limit declared in the term of effective dose.

PACS: 87.55.dk

Для целей нормирования облучения людей существует понятие эффективной эквивалентной дозы ( $E$ ). Она используется для оценки полученной человеком дозы и подтверждения соблюдения установленных пределов доз, а также для прогнозирования дозовой нагрузки при планировании работы. Понятие эффективной дозы было введено для оценки риска отдаленных стохастических эффектов у персонала и населения при облучении малыми дозами.  $E$  есть расчетная доза не для индивидуума, а для условного человека при заданных условиях облучения. На практике  $E$  не является измеримой величиной (как и эквивалентная доза) и не может использоваться при радиационном контроле с

---

<sup>1</sup>E-mail: tim@jinr.ru

помощью дозиметров. Для консервативной (завышенной) оценки эффективной дозы  $E$  используются операционные величины, которые однозначно определяются через физические характеристики поля излучения в точке измерения и максимально приближены к нормируемым величинам (но с некоторым запасом).

Основной операционной величиной является амбиентный эквивалент дозы (амбиентная доза). Амбиентный эквивалент дозы  $H^*(d)$  — эквивалент дозы, который создается в шаровом фантоме МКРЕ из тканеэквивалентного вещества диаметром 30 см на глубине  $d$  (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленному и однородному, т. е. амбиентный эквивалент дозы  $H^*(d)$  — это доза, которую получил бы человек, если бы он находился в том месте, где проводится измерение дозиметром. Единица амбиентной дозы, как и эффективной дозы, — зиверт (Зв). Типичным значением  $d$  для проникающего излучения (в частности нейтронов) является 10 мм. Такая амбиентная доза обозначается  $H^*(10)$  и служит для контроля эффективной дозы с помощью стационарного (зонного) и оперативного дозиметрического контроля. Амбиентная доза является, в принципе, измеримой, и дозиметры излучений откалиброваны в единицах измерения  $H^*(10)$ .

В России энергетическая зависимость эффективной дозы нейтронов  $E$  на единичный флюенс (удельной дозы) определена в «Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» [1] для двух геометрий облучения человека — изотропного (ИЗО) и переднезаднего (ПЗ), поскольку значение  $E$  сильно зависит от углового распределения падающего на человека излучения. Значения удельной  $E$  из НРБ-99/2009 совпадают со значениями, предложенными Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ, «Публикация 74» [2]) в 1997 г. и подтвержденными в «Публикации 119» в 2012 г. [3]. В публикациях МКРЗ значения эффективной дозы для случая ПЗ-облучения человека декларированы до энергии 180 МэВ, а для случая ИЗО-облучения — до энергии 20 МэВ. К сожалению, верхняя энергетическая граница декларируемой в НРБ-99/2009 зависимости как для случая ИЗО-, так и для ПЗ-облучения составляет лишь 20 МэВ, в то время как на ускорителях спектры нейтронов могут простираются до гораздо больших значений энергии. Амбиентная доза нейтронов в «Публикации 74» МКРЗ декларирована до энергии 201 МэВ, что тоже недостаточно. Значения удельных  $E$  и  $H^*(10)$  для нейтронов с энергиями до 1 ГэВ приведены в работе [4]. Все указанные выше энергетические зависимости удельных доз представлены на рис. 1.

Ядерно-физические установки ОИЯИ (ускорители разных типов и импульсный реактор на быстрых нейтронах) генерируют при своей работе первичное и вторичное излучение широкого энергетического диапазона и сложного компонентного состава. Для ускорителей характерны значительные вариации характеристик радиационных полей, их изменения в пространстве и во времени из-за большого количества различных режимов работы ускорителей, разнообразия используемых мишеней, а также перераспределения потерь пучков при выводе и транспортировке. Энергетический диапазон полей излучения на ускорителях весьма широк и ограничивается сверху энергией ускоренных частиц. Компонентный состав полей излучения работающего ускорителя также меняется в зависимости от условий их формирования и включает в себя гамма-кванты, нейтроны и различные заряженные частицы. Основным дозообразующим компонентом радиации при работающих ускорителях являются нейтроны. Поля излучения реактора состоят из нейтронов широкого спектра энергий и гамма-квантов. Таким образом, основной объем

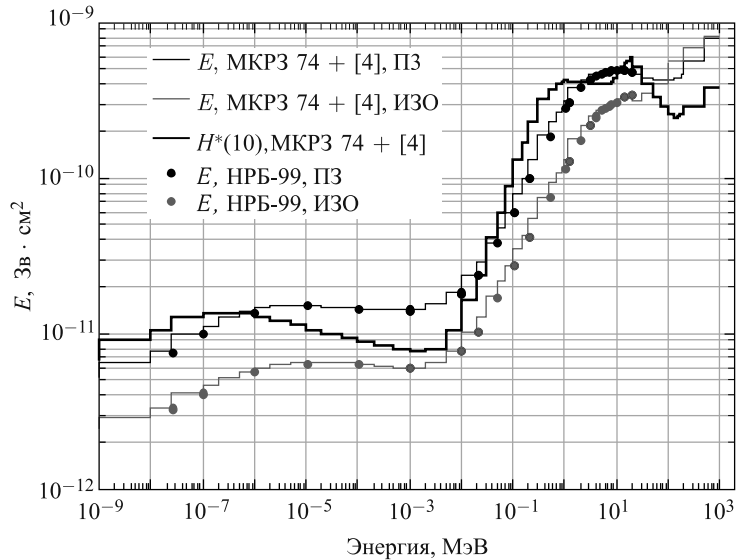


Рис. 1. Энергетические зависимости удельной эффективной дозы нейтронов для ПЗ- и ИЗО-облучения в соответствии с «Публикацией 74» МКРЗ и НРБ-99/2009, а также энергетическая зависимость амбиентной дозы нейтронов в «Публикации 74» МКРЗ

стационарного и оперативного контроля на ядерно-физических установках связан с измерением доз нейтронов широкого диапазона энергий.

В зависимости от режима работы установок и механизма формирования поля излучения непосредственно за защитой или на расстоянии от установок энергетические спектры нейтронов могут значительно различаться. Так, например, за боковой защитой каналов пучков высокоэнергетических ускорителей (и тем более за лобовой защитой) в спектрах нейтронов может присутствовать большое число нейтронов высокой энергии (так называемые «жесткие» спектры). В то же время на тех же ускорителях в геометриях, близких к лабиринту, могут формироваться поля многократно рассеянных нейтронов низкой энергии. За боковыми защитами ускорителей, ускоряющих частицы до сверхвысоких энергий, нейтронов с энергией более 500 МэВ практически нет, что связано с тем, что средние поперечные импульсы вторичных частиц почти перестают расти при таких энергиях первичных частиц. Четкой (формальной) границы между «жесткими» и «мягкими» спектрами не существует, но можно использовать в качестве критерия значение средней энергии нейтронов в спектре или отношение флюенса нейтронов с энергией более 20 МэВ к полному флюенсу нейтронов ( $\Phi_{>20}/\Phi_{\text{tot}}$ ). Поля нейтронов с  $\Phi_{>20}/\Phi_{\text{tot}}$  менее 5% относят к «мягким», поля с более высоким отношением — к «жестким». На практике даже в наиболее «жестких» полях за лобовой защитой (ловушкой пучка) отношение  $\Phi_{>20}/\Phi_{\text{tot}}$  не превышает 40–50%.

Измерения спектров нейтронов широкого энергетического диапазона в различных местах и при различных режимах работы установок были выполнены с помощью многосферного спектрометра нейтронов (спектрометра Боннера). Для повышения информативности спектрометра в области высоких энергий нейтронов использовались углеродные активационные детекторы. В силу широкого диапазона энергии спектры нейтронов удобно представлять в единицах летаргии  $\Phi(E) \times E$ . Полная систематизация измеренных

в ОИЯИ за многие годы спектров нейтронов выполнена в работе [5]. Форма спектров нейтронов определяется физикой процессов взаимодействия нейтронов разных энергий с веществом, причем механизмы взаимодействия различаются очень сильно, а вероятность взаимодействия нейтронов с веществом резко растет с уменьшением энергии. В спектрах (в разных соотношениях) могут присутствовать тепловые ( $10^{-8}$ – $10^{-7}$  МэВ), промежуточные, испарительные нейтроны (0,5–10 МэВ), а в «жестких» спектрах проявляется накопление каскадных (50–200 МэВ) нейтронов.

Для проверки соотношения амбиентной и эффективной доз нейтронов в полях излучения установок ОИЯИ были отобраны 10 спектров, представляющих весь диапазон варируемости полей нейтронов, от наиболее «мягких» до самых «жестких». Для каждого поля был оценен преимущественный вид облучения в них персонала (ПЗ или ИЗО). В табл. 1 приведено краткое описание условий формирования каждого спектра, средняя энергия нейтронов и условия облучения персонала. Вид отображенных спектров в единицах летаргии  $\Phi(E) \times E$  представлен на рис. 2.

Расчет эффективных доз (в геометриях облучения ИЗО и ПЗ) и амбиентных доз нейтронов производился путем свертки спектров нейтронов  $\Phi(E)$  с соответствующими энергетическими зависимостями удельных доз (рис. 1). Результаты расчета эффективных и амбиентных доз нейтронов по всем десяти отобраным спектрам приведены в табл. 2. Там же представлены отношения значений амбиентной и эффективной доз ( $H^*(10)/E$ ). Погрешности восстановления спектров нейтронов не учитывались. Видно, что диапазон изменения этого отношения в спектрах нейтронов ОИЯИ варьируется от 2,84 до 0,8,

Таблица 1. Характеристики отобранных спектров нейтронов на установках ОИЯИ

Номер спектра	Краткое описание	Диапазон условий измерения спектра	Средняя энергия, МэВ	Класс спектра	Преимущественные условия облучения
1	Фазотрон ЛЯП, лабиринт в цокольном этаже	$10^{-8}$ –20	$1,16 \cdot 10^{-3}$	«Мягкий»	ИЗО
2	МЦ400 ЛЯР, за дверью Д21	$10^{-8}$ –20	0,208	«Мягкий»	ИЗО
3	МЦ400 ЛЯР, за дверью Д20	$10^{-8}$ –20	0,304	«Мягкий»	ИЗО
4	Фазотрон ЛЯП, за защитой с проемами	$10^{-8}$ –60	0,431	«Мягкий»	ИЗО
5	ИБР-2, пучок № 2 за защитой	$10^{-8}$ –10	0,394	Промежуточный	ИЗО
6	Источник $^{252}\text{Cf}$ в помещении	$10^{-8}$ –10	0,871	Промежуточный	ИЗО
7	Фазотрон ЛЯП, в простенке между защитой ускорителя и ЯСНАПП	$10^{-8}$ –500	12,1	«Жесткий»	ПЗ
8	Фазотрон ЛЯП, на обваловке северной стены корпуса	$10^{-8}$ –500	36,7	«Жесткий»	ПЗ
9	Фазотрон ЛЯП, за защитной стеной лаборатории № 2	$10^{-8}$ –500	73,8	«Жесткий»	ПЗ
10	Нуклотрон ЛФВЭ, боковая защита канала пучка в корпусе № 205	$10^{-8}$ –500	55,3	«Жесткий»	ПЗ

причем наблюдается явная корреляция между величиной этого отношения и «жесткостью» спектров нейтронов. Тот факт, что для «жестких» спектров нейтронов отношение становится меньше 1, означает, что в этих полях AMBIENTная доза нейтронов уже не является консервативной оценкой эффективной дозы. Таким образом, радиационный контроль дозиметрами, показания которых декларированы в терминах AMBIENTной дозы

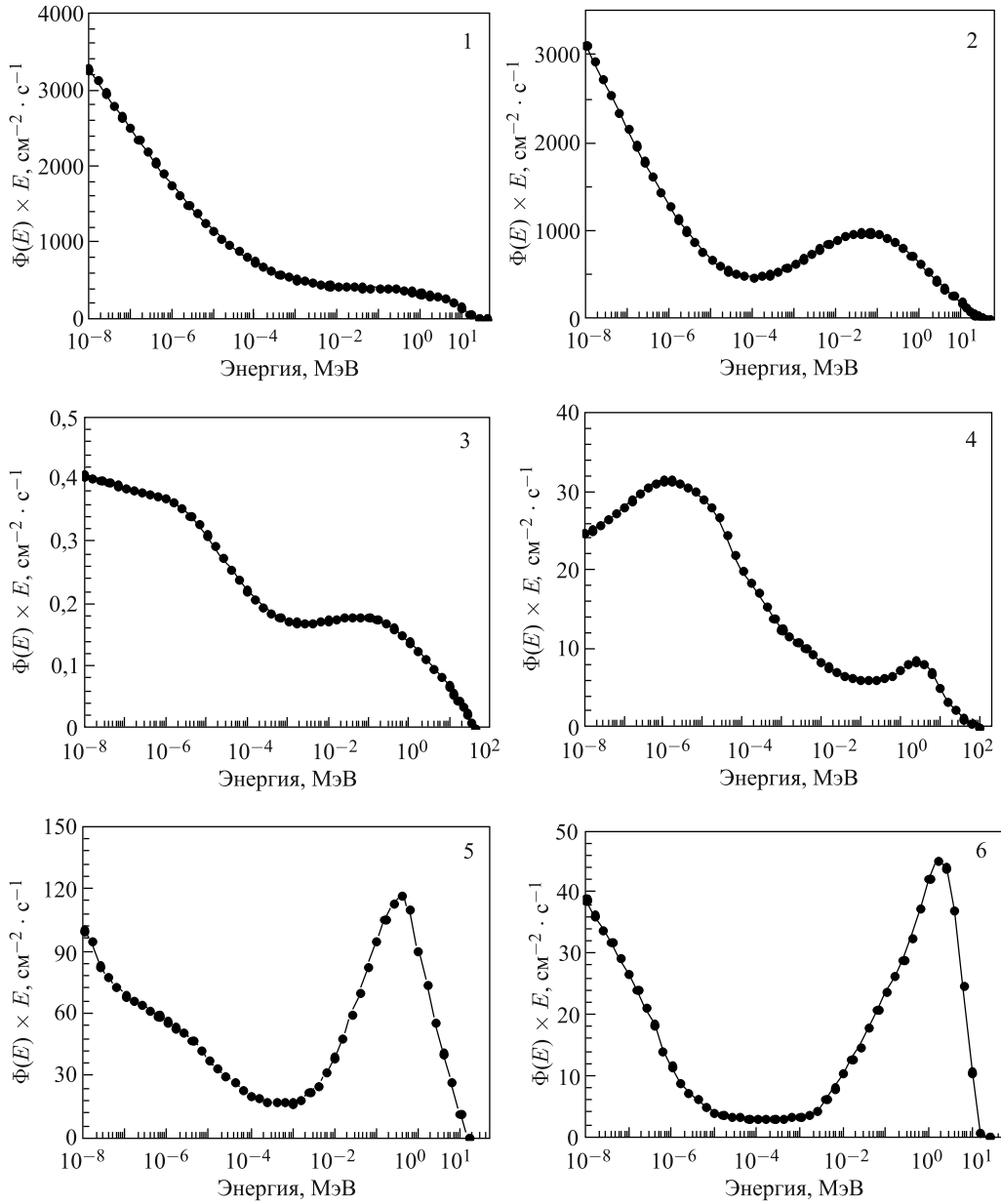


Рис. 2. Спектры нейтронов из табл. 1

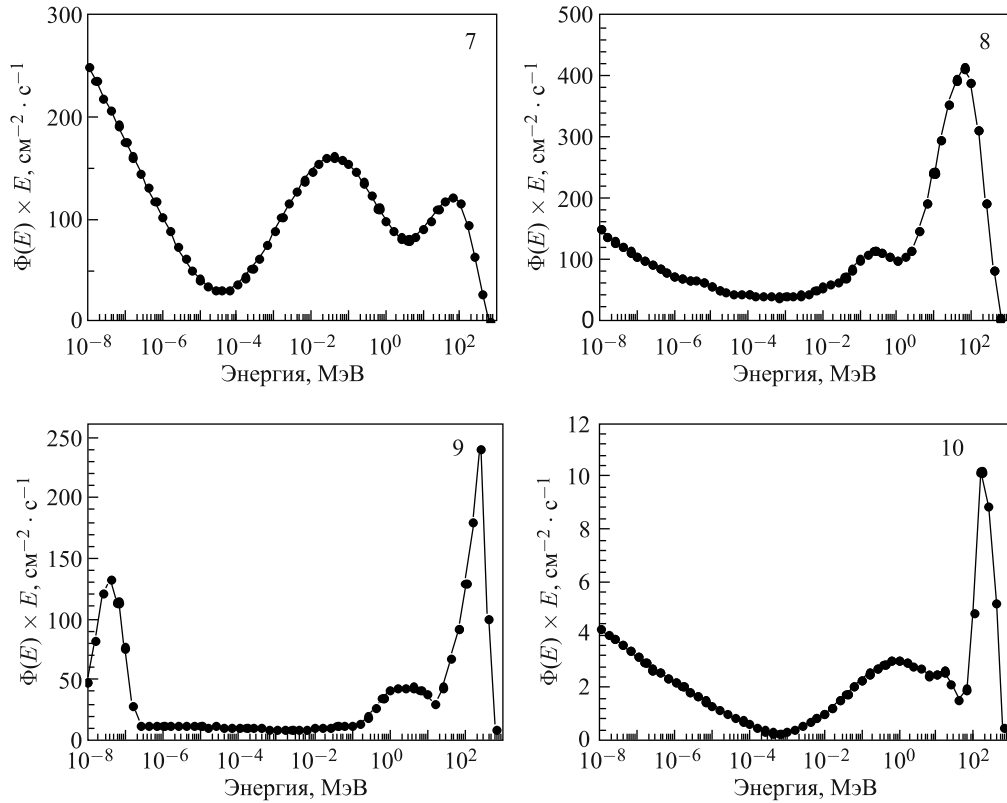


Рис. 2. Окончание

Таблица 2. Значения эффективной и ambientной доз нейтронов, рассчитанные для спектров на рис. 2

Номер спектра	Расчетная эффективная доза $E$ (ПЗ), пЗв	Расчетная эффективная доза $E$ (ИЗО), пЗв	Расчетная ambientная доза $H^*(10)$ , пЗв	$H^*(10)/E$
1	—	$1,85 \cdot 10^7$	$2,62 \cdot 10^7$	1,42
2	—	$4,35 \cdot 10^5$	$1,13 \cdot 10^6$	2,59
3	—	$1,14 \cdot 10^2$	$2,70 \cdot 10^2$	2,37
4	—	$8,00 \cdot 10^3$	$1,71 \cdot 10^4$	2,13
5	—	$4,26 \cdot 10^4$	$1,21 \cdot 10^5$	2,84
6	—	$2,36 \cdot 10^4$	$5,77 \cdot 10^4$	2,44
7	$3,16 \cdot 10^5$	—	$3,12 \cdot 10^5$	0,99
8	$7,29 \cdot 10^5$	—	$6,78 \cdot 10^5$	0,93
9	$2,40 \cdot 10^5$	—	$1,92 \cdot 10^5$	0,80
10	$1,20 \cdot 10^4$	—	$1,03 \cdot 10^4$	0,86

нейтронов, не может гарантированно обеспечить непревышение установленных в терминах эффективной дозы пределов доз для населения и персонала.

Следует отметить, что эта проблема специфична лишь для научных центров, обладающих высокоэнергетическими ускорителями частиц. Вторая часть этой проблемы со-

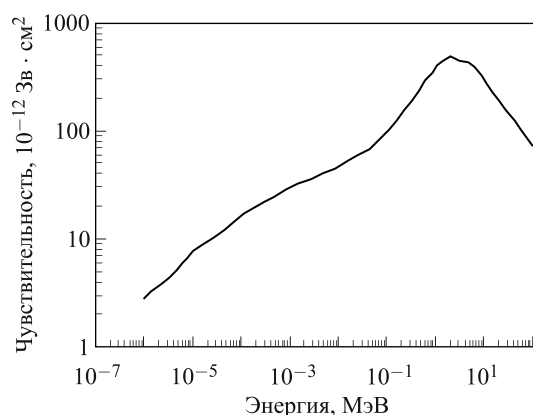


Рис. 3. Функция чувствительности блока детектирования нейтронов БДКН-96

стоит в том, что в России лицензированные средства радиационного контроля нейтронов обладают рабочим диапазоном энергии до 20 МэВ, хотя, в принципе, эти приборы очувствлены и к нейтронам более высоких энергий. Поэтому данные дозиметры не способны корректно измерить даже амбиентную дозу нейтронов в «жестких» полях со значительным вкладом высокоэнергетических нейтронов.

Для оценки адекватности показаний приборов радиационного контроля (в терминах амбиентной дозы) в полях нейтронов ядерно-физических установок ОИЯИ был взят базовый прибор оперативного контроля — дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоком детектирования нейтронов БДКН-96. В блоке в качестве детектора медленных нейтронов используется пропорциональный  $^3\text{He}$ -счетчик. В работе [6] представлена функция чувствительности блока БДКН-96, рассчитанная по программе транспорта излучений в веществе методом Монте-Карло MCNP4A (рис. 3).

Показания дозиметра-радиометра в отобранных полях нейтронов (1–10) были получены путем свертки энергетической зависимости чувствительности прибора в диапазоне от 1 эВ до 100 МэВ со спектрами нейтронов. Вне этого диапазона энергий чувствительность прибора принималась равной нулю. Это не вносит больших искажений в

**Таблица 3. Сравнение показаний дозиметра-радиометра ДКС-96 с блоком детектирования нейтронов БДКН-96 в полях нейтронов 1–10 с амбиентной дозой нейтронов**

Номер спектра	Доза по ДКС-96 с блоком БДКН-96, пЗв	Расчетная амбиентная доза $H^*(10)$ по спектру, пЗв	Отношение показаний ДКС-96 к амбиентной дозе
1	$6,08 \cdot 10^7$	$2,62 \cdot 10^7$	2,32
2	$1,05 \cdot 10^6$	$1,13 \cdot 10^6$	0,93
3	$2,49 \cdot 10^2$	$2,70 \cdot 10^2$	0,92
4	$1,50 \cdot 10^4$	$1,71 \cdot 10^4$	0,88
5	$1,15 \cdot 10^5$	$1,21 \cdot 10^5$	0,95
6	$5,56 \cdot 10^4$	$5,77 \cdot 10^4$	0,96
7	$2,30 \cdot 10^5$	$3,12 \cdot 10^5$	0,74
8	$3,65 \cdot 10^5$	$6,78 \cdot 10^5$	0,54
9	$1,05 \cdot 10^5$	$1,92 \cdot 10^5$	0,55
10	$6,55 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^4$	0,63

результаты сравнения, так как нейтроны с энергией менее 1 эВ фактически не дают вклада в дозу, а нейтроны с энергией более 100 МэВ весьма мало даже в «жестких» спектрах. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Видно, что измерения ambientной дозы нейтронов с помощью данного дозиметра-радиометра дают заниженные результаты практически во всех отобранных полях нейтронов, причем в «жестких» полях показания прибора в 1,5–2 раза меньше расчетного значения ambientной дозы. Таким образом, по ряду причин дозы нейтронов, измеренные прибором оперативного контроля, сильно недооценены по сравнению с нормируемыми величинами (эффективными дозами) в «жестких» полях нейтронов, и применять данный дозиметр в «жестких» полях нейтронов без введения коррекции его показаний нельзя.

Среди радиометров-дозиметров нейтронов, выпускаемых зарубежными производителями, есть несколько приборов, имеющих рабочий диапазон энергий нейтронов до 1 ГэВ и более. Все они основаны на использовании гетерогенных замедлителей нейтронов — полиэтилена с конвертером сверхбыстрых нейтронов из тяжелых металлов (сталь, медь, свинец, вольфрам). Хорошим детектором нейтронов сверхвысоких энергий является WENDI-2 с вольфрамовой вставкой внутри полиэтиленового замедлителя, разработанный в Лос-Аламосской национальной лаборатории США [7]. Его функция чувствительности имеет подъем в области энергий более 20–30 МэВ, что соответствует поведению энергетической зависимости удельной эффективной дозы нейтронов. Введение в практику радиационного контроля подобного прибора для измерений в очень «жестких» полях нейтронов позволит, при условии его лицензирования и корректной градуировки, решить проблему дозиметрии нейтронов очень высоких энергий на ускорителях ОИЯИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.6.1.2523+09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2009.
2. ICRP Publication 74. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation // Intern. Commission on Radiol. Protection. 1997.
3. ICRP Publication 119. Compendium of Dose Coefficients Based on ICRP Publication 60 // Intern. Commission on Radiol. Protection. 2012. V. 41, Suppl. 1.
4. *Pelliccioni M.* Overview of Fluence-to-Effective Dose and Fluence-to-Ambient Dose Equivalent Conversion Coefficients for High-Energy Radiation Calculated Using the FLUKA Code // Rad. Protection Dosimetry. 2000. V. 88, No. 4. P. 279–297.
5. *Бескровная Л. Г., Горошкова Е. А., Мокров Ю. В.* Исследование адекватности показаний альбедного дозиметра ДВГН-01 дозам облучения персонала в полях нейтронного излучения ядерно-физических установок ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 3(159). С. 347–363.
6. *Алексеев А. Г., Лебедев В. Н.* Исследование методических вопросов использования индивидуальных дозиметров нейтронов альбедного типа. Препринт ИФВЭ ОРИ 2003-8. Протвино, 2003.
7. <http://www.thermoscientific.com>

Получено 20 июня 2014 г.