

P16-2023-24

Ю. В. Мокров<sup>1,2,\*</sup>, В. М. Волков<sup>1</sup>, С. В. Морозова<sup>1</sup>,  
Д. В. Серухин<sup>1</sup>, В. Ю. Щеголев<sup>1,2</sup>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ОТКЛИКА АЛЬБЕДНОГО ИНДИВИДУАЛЬНОГО  
ДОЗИМЕТРА НЕЙТРОНОВ **ДВГН-01**  
В ПОЛЕ УСКОРИТЕЛЯ **ДЦ-280**  
ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ЕГО ПОКАЗАНИЙ

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

\* E-mail: mokrov@jinr.ru

Мокров Ю. В. и др.

P16-2023-24

Экспериментальное исследование отклика альбедного индивидуального дозиметра нейтронов ДВГН-01 в поле ускорителя ДЦ-280 для коррекции его показаний

В работе представлены результаты экспериментального исследования отклика альбедных индивидуальных дозиметров нейтронов ДВГН-01 комплексов АКИДК-301 и АКИДК-302 с целью коррекции их показаний.

Коррекция показаний ДВГН-01 проводилась с помощью поправочных коэффициентов, которые определялись по результатам измерений с помощью шаровой альбедной системы при ее облучении в восьми точках на ускорителе ДЦ-280: в зале ускорителя в районе радиационного монитора и перед защитной дверью из зала ускорителя, в кабинах вывода пучка (помещения 113 и 115) и в комнате постоянного пребывания персонала на втором этаже вблизи ускорителя. Полученные значения коэффициентов хорошо согласуются с коэффициентами, полученными ранее на ускорителях ЛЯР и используемыми в настоящее время в индивидуальном дозиметрическом контроле персонала лаборатории.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2023

Mokrov Yu. V. et al.

P16-2023-24

Experimental Research of the Response of the Albedo Individual Neutron Dosimeter DVGН-01 in the Field of the Accelerator DC-280 to Correct Its Readings

The paper presents the results of an experimental research of the response of albedo individual neutron dosimeters DVGН-01 of the AKIDK-301 and AKIDK-302 complexes in order to correct their readings.

Correction of the DVGН-01 readings was carried out using correction coefficients, which were determined by the results of measurements using a spherical albedo system when it was irradiated at eight points on the DC-280 accelerator: in the accelerator hall near the radiation monitor and in front of the protective door from the accelerator hall, in the beam output cabins (rooms 113 and 115) and in a permanent staff room on the second floor near the accelerator. The obtained values of the coefficients are in good agreement with the coefficients obtained earlier on the FLNR accelerators and currently used in individual dosimetric control of laboratory personnel.

The investigation has been performed at the Department of Radiation Safety of JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2023

## ВВЕДЕНИЕ

Индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) персонала ЛЯР по нейтронному излучению проводится с помощью индивидуальных альбедных дозиметров ДВГН-01 комплексов АКИДК-301 и АКИДК-302 [1], работа которых основана на регистрации отраженных от тела персонала так называемых альбедных нейтронов. Альбедные дозиметры имеют ряд преимуществ по сравнению с использованными ранее в ИДК фотоэмульсионными дозиметрами. Однако их основным недостатком является зависимость показаний от спектра (энергии) падающих на тело и дозиметр нейтронов. Это обусловлено энергетической зависимостью чувствительности (ЭЗЧ) таких дозиметров, которая существенно отличается от требуемой для дозиметра зависимости чувствительности от энергии нейтронов, как показано на рис. 1. Здесь сплошной линией показана зависимость от энергии амбиентного эквивалента дозы на единичный флюенс нейтронов, а пунктиром — чувствительность альбедного дозиметра.

Поэтому при использовании таких дозиметров в полях нейтронов различной энергии необходимо корректировать их показания. Отношение действительного значения индивидуального эквивалента дозы к показанию

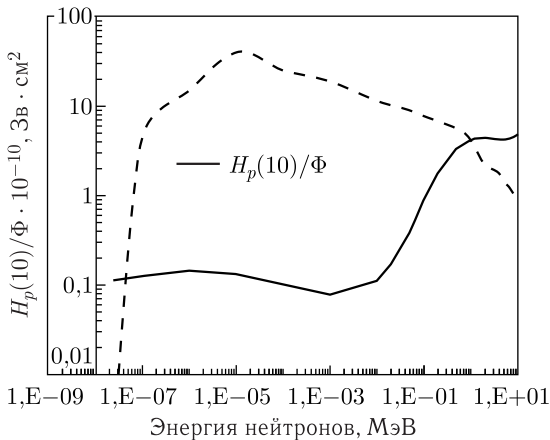


Рис. 1. ЭЗЧ альбедного дозиметра (АД) и зависимость индивидуального эквивалента дозы на единичный флюенс  $H_p(10)/\Phi$  от энергии нейтронов

дозиметра (поправочный коэффициент) в зависимости от спектра (энергии) нейтронов может колебаться от 0,05 до 2,0 в реальных спектрах за защитой установок ОИЯИ. Все это вызывает необходимость использовать поправочные коэффициенты к показаниям таких дозиметров в полях установок ОИЯИ для правильного определения доз облучения персонала, работающего на этих установках. Коррекция показаний ДВГН-01 проводится с помощью поправочных коэффициентов, на которые умножаются показания дозиметров. В последние годы работы по определению поправочных коэффициентов проводились на ядерно-физических установках как в ОИЯИ, так и в других научных центрах, см., например, [2–5]. В них было показано, что значения поправочных коэффициентов существенно зависят от спектров нейтронов в месте использования дозиметров. Из рис. 1 видно, что в диапазоне энергий нейтронов от  $10^{-7}$  до 1 МэВ показания дозиметра будут превышать значения дозы облучения. При этом степень завышения зависит от энергии нейтронов и может достигать 100 раз, а при энергии выше 1 МэВ показания дозиметра будут занижены.

В настоящей работе экспериментально исследован отклик дозиметра ДВГН-01 в полях ускорителя ДЦ-280 в 8 точках измерения и представлены результаты определения поправочных коэффициентов с помощью шаровой альбедной системы.

## 1. ШАРОВАЯ АЛЬБЕДНАЯ СИСТЕМА

Шаровая альбедная система состоит из полиэтиленового шара диаметром 25,4 см (10 дюймов), на поверхности которого располагаются симметрично относительно центра шесть дозиметров ДВГН-01. В центре шара находится слайд ДВГН-01, который размещается в шаре с помощью полиэтиленовой вставки. Внешний вид шаровой альбедной системы показан на рис. 2.

Среднее значение показаний шести ДВГН-01, расположенных на поверхности шара, позволяет моделировать условия изотропного облучения ДВГН-01 на фантоме (теле человека), когда облучение происходит равномерно со всех сторон. Это обосновано тем, что ЭЗЧ ДВГН-01 на поверхности шара и на эллиптическом тканеэквивалентном фантоме, наиболее близким к телу человека, отличаются незначительно. Выбор изотропной геометрии обусловлен тем, что такой вид геометрии облучения наиболее адекватно отражает реальную геометрию при облучении персонала, если неизвестно точно, в какой геометрии произошло облучение. Это связано с тем, что облучение персонала происходит, как правило, в помещении при преобладающем вкладе рассеянного от стен, пола и потолка излучения. Кроме того, персонал во время работы перемещается, что делает его облучение более изотропным.

Слайд ДВГН-01 в центре шара предназначен для оценки с помощью его показаний эффективной дозы нейтронов при изотропном облучении (ISO) и амбиентного эквивалента дозы в передне-задней геометрии облучения (ПЗ) при направленном излучении, когда оно перпендикулярно падает

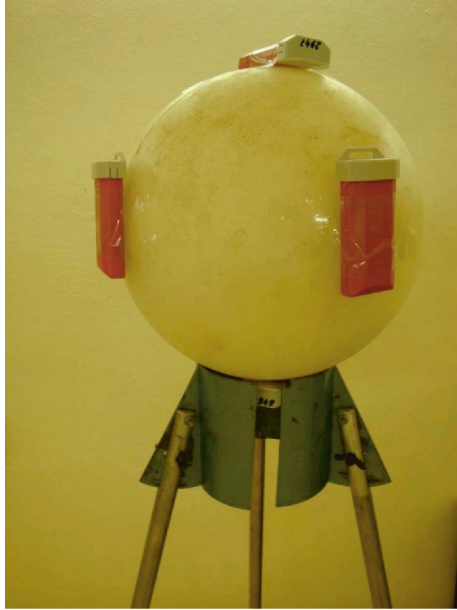


Рис. 2. Внешний вид шаровой альбедной системы

на переднюю поверхность фантома, на которой располагается дозиметр. Отношение показания слайда в центре шара  $H_c$  к усредненному показанию 6 дозиметров ДВГН-01 на поверхности шара  $H_s$  может служить оценкой жесткости спектра нейтронов — с ростом энергии нейтронов оно растет. При использовании шаровой альбедной системы для коррекции показаний ДВГН-01 со значениями этого отношения для различных низкоэнергетических полей нейтронов однозначно связаны значения поправочных коэффициентов.

Для 23 спектров за защитой ЯФУ ОИЯИ в работе [3] были рассчитаны отношения  $H_c/H_s$  и соответствующие им значения поправочных коэффициентов  $K_H$ (ПЗ) для индивидуального эквивалента дозы в передне-задней геометрии и  $K_E$ (ISO) для эффективной дозы в изотропной геометрии.

Зависимость значений поправочных коэффициентов от отношения  $H_c/H_s$  для низкоэнергетических спектров аппроксимирована следующими формулами:

$$K_E(\text{ISO}) = 0,297 \left( \frac{H_c}{H_s} \right)^{1,264}, \quad (1)$$

$$K_H(\text{ПЗ}) = 0,209 \left( \frac{H_c}{H_s} \right)^{1,131}. \quad (2)$$

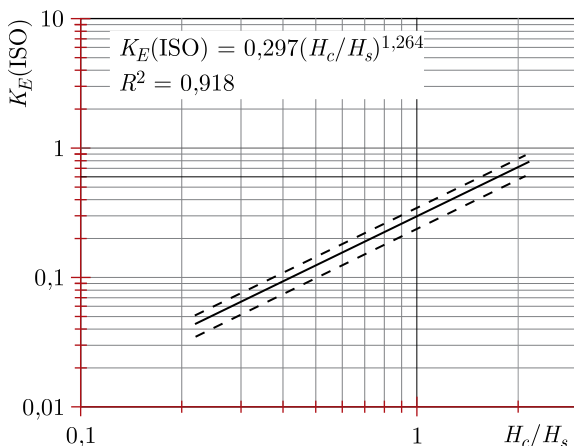


Рис. 3. Зависимость поправочного коэффициента  $K_E(\text{ISO})$  от отношения  $H_c/H_s$

На рис. 3 в качестве примера сплошной линией показана соответствующая аналитическая зависимость для  $K_E(\text{ISO})$ , пунктиром — коридор неопределенности, в который входит 85 % точек, соответствующих низкоэнергетическим спектрам. Ширина коридора неопределенности составляет  $\pm 20\%$  от значений, определенных по формуле (1).

## 2. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ НА УСКОРИТЕЛЕ ДЦ-280

В ОИЯИ завершено создание и начата эксплуатация циклотрона ДЦ-280 — базовой установки по синтезу сверхтяжелых элементов. Планируемые интенсивности ускоренных ионов средних масс составляют до 10 мкА частиц. Энергии ускоренных ионов могут варьироваться в диапазоне 4–8 МэВ/нуклон. При ускорении, выводе из циклотрона, транспортировании ускоренного пучка ионов до физической установки и на самой установке происходит взаимодействие ионов с элементами конструкции циклотрона, каналов транспортировки и самой установки. При этих взаимодействиях образуется ионизирующее излучение, в том числе и нейтроны. Энергетический спектр образовавшихся нейтронов сходен со спектром нейтронов деления.

План ускорителя ДЦ-280 и точки расположения шаровой альбедной системы при измерениях показаны на рис. 4.

Точки 1 и 4 располагались в зале ускорителя: точка 1 в районе ускорителя, точка 4 перед защитной дверью из зала ускорителя.

Точки 2, 3, 5 и 6 располагались в физкабине ускорителя (помещение 115) за защитами разной толщины и на разном расстоянии от места взаимодействия пучка с мишенью.

Точка 2 располагалась за более толстой защитой.

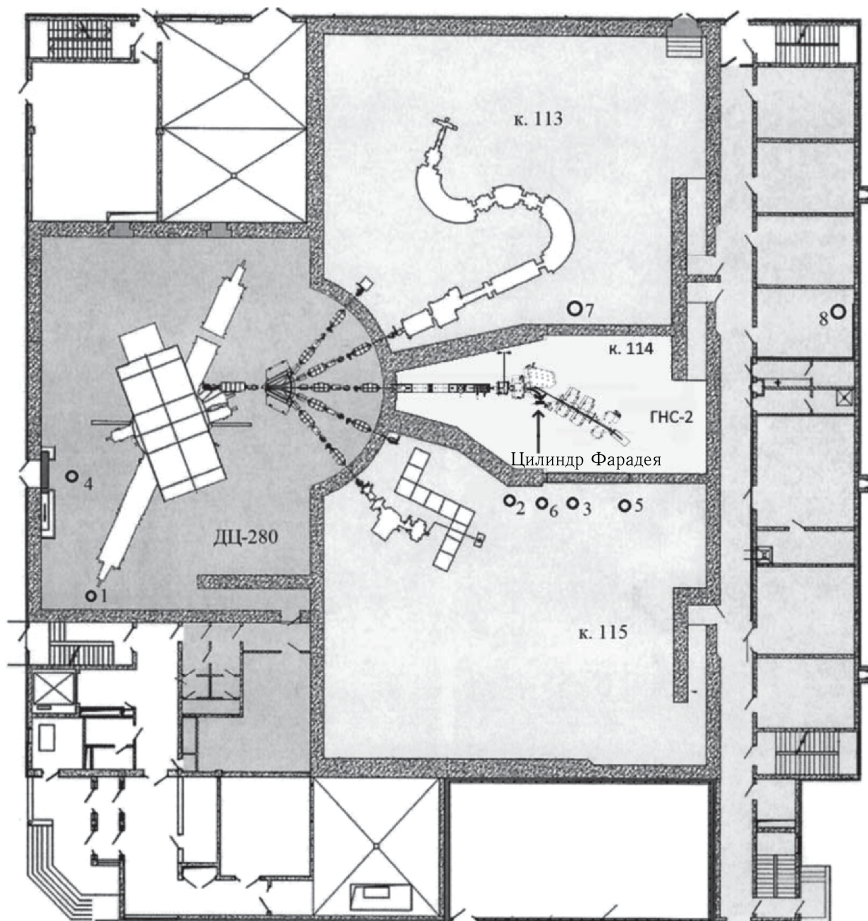


Рис. 4. План ускорителя и расположение точек измерения

Точки 3, 5 и 6 располагались за менее толстой защитой. В этих точках спектр нейтронов более жесткий, чем в точке 2.

Точка 7 располагалась в помещении 113. Точка 8 находилась на втором этаже в помещении рядом с лестницей напротив помещения 114. На рис. 4 показана проекция этой точки на первом этаже. В этом помещении находится постоянное место работы нескольких человек персонала.

Измерения в точках 1–4 были получены ранее в 2021 г. [6].

Энергия ускоренного пучка  $^{48}\text{Ca}$  составляла около 5,5 МэВ/нуклон, пучок выводился в газонаполненный сепаратор ГНС-2. Интенсивность пучка с  $A = 48$  достигала значений  $(3-5) \cdot 10^{13}$  част./с. Основные потери пучка происходили в помещении физкабины ГНС-2 на медном цилиндре Фарадея, принимающем непрореагировавший на мишени первичный

пучок ионов ( $\sim 99\%$ ). При работе ускорителя в зале циклотрона и в помещении 114 персонал не может находиться, а в смежных помещениях с залом циклотрона и работающей физической кабиной (помещения 113 и 114) возможно временное присутствие персонала.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений представлены в таблице.

Место измерений	$H_{\max}$ , мЗв	$H_s$ , мЗв	$H_c$ , мЗв	$\frac{H_c}{H_s}$	$H^*(10)$	$K_E(\text{ISO})$	$K_E(\text{ISO})$ [4]	$K_{\text{из}} = \frac{A+B}{A}$	$K_H(\text{ПЗ})$
Точка 1	2,85	2,43	1,34	0,55	0,79	0,14	0,12	1,71	0,11
Точка 2	1,05	0,78	0,55	0,70	0,32	0,19	0,15	1,33	0,14
Точка 3	1,33	0,81	0,89	1,10	0,52	0,33	0,26	1,20	0,23
Точка 4	16,51	13,20	7,94	0,60	4,68	0,15	0,13	1,61	0,12
Точка 5	5,26	3,51	5,27	1,21	3,10	0,37	0,29	1,29	0,26
Точка 6	6,62	4,09	5,27	1,29	3,10	0,41	0,32	1,24	0,28
Точка 7	0,96	0,85	0,87	1,02	0,51	0,31	0,24	1,4	0,21
Точка 8	0,70	0,43	0,26	0,60	0,16	0,16	0,13	1,92	0,12

Здесь  $H_{\max}$  — максимальное значение показаний ДВГН-01 на шаре,  $H_s$  — усредненное значение показаний 6 дозиметров ДВГН-01, расположенных на шаре,  $H_c$  — показание слайда в центре шара системы.

Значения поправочных коэффициентов рассчитаны по приведенным выше формулам (1) и (2) по полученным отношениям  $H_c/H_s$ . Изотропность поля излучения в точке измерения оценивалась с помощью коэффициента  $K_{\text{из}}$ , определяемого как отношение  $(A+B)/A$ , где  $A$  — максимальное показание ДВГН-01 на шаре,  $B$  — показание ДВГН-01 на стороне, противоположной той, где наблюдается максимальное значение показаний. Коэффициент  $K_{\text{из}}$  используется в полях нейтронов с энергией меньше 20 мЗв для оценки изотропности поля излучения: близость его к единице говорит о направленности излучения со стороны максимального значения ( $A$ ), близость к двум говорит о более изотропном излучении. Значения AMBIENTного эквивалента дозы  $H^*(10)$  определялись по показаниям  $H_c$  слайда дозиметра, расположенного в центре шара, по формуле  $H^*(10) = H_c \cdot 0,59$ , где 0,59 — градуировочный коэффициент слайда в центре шара, определенный по источнику нейтронов из Pu-Be на поверочной установке. В таблице приведены также значения коэффициентов  $K_E(\text{ISO})$ , рассчитанных по формуле, предложенной в работе [4].

### 4. ВЫВОДЫ

На основании представленных результатов можно сделать следующие выводы.

1. В соответствии со значениями отношений  $H_c/H_s$  спектры нейтронов в точках измерений в основном можно отнести к низкоэнергетическим, которые характеризуются этим отношением меньше или в районе единицы



и средними энергиями спектра нейтронов менее 1 МэВ. Это позволяет использовать в полях с такими спектрами шаровую альбедную систему для определения поправочных коэффициентов для ДВГН-01. Небольшое исключение составляют точки 3, 5 и 6, в которой отношение незначительно превышает единицу. Это говорит о большей жесткости спектра в этих точках, что подтверждается и условиями его формирования — эти точки находятся за более тонкой защитой в сравнении с точкой 2 и ближе к месту потерь пучка. Такой вывод можно сделать и из сравнения поправочных коэффициентов — они должны увеличиваться с ростом средней энергии спектра нейтронов.

2. В соответствии со значениями коэффициента изотропности поле нейтронов в большинстве точек измерения ближе к направленному со стороны ускорителя. Хотя в некоторых точках (1, 4, 8) оно приближается к изотропному, что характерно для полей нейтронов, где угловое распределение излучения во многом определяется рассеянными в помещении нейтронами.

3. Полученные значения поправочных коэффициентов для ДЦ-280 в точках 1, 2, 4, 8 хорошо согласуются со значениями поправочных коэффициентов для низкоэнергетических спектров на установках ЛНФ и ЛЯР, где значения поправочных коэффициентов не превышают 0,16. При этом значения поправочных коэффициентов, определенные ранее для полей излучения на У-300 и МЦ-400 ЛЯР [3], находятся в диапазоне от 0,05 до 0,16. Исключение составляют точки 3, 5 и 6, в которой спектр более жесткий, чем в других точках, о чем сказано выше.

4. Значения поправочных коэффициентов  $K_E(ISO)$ , определенных по формуле (1), довольно хорошо согласуются с коэффициентами, определенными по формуле работы [4]: для каждой точки отличие от среднего значения не превышает 10%.

5. Приведенные в таблице значения поправочных коэффициентов для полей, в которых возможно пребывание персонала во время работы ускорителя, подтверждают правомерность использования предложенного в работе [3] для персонала ЛЯР значения поправочного коэффициента, равного 0,15. Особенно наглядно это подтверждается значением поправочного коэффициента в точке 8, которая находилась в помещении постоянного пребывания персонала.

6. Близость значений поправочных коэффициентов  $K_E(ISO)$  и  $K_H(ПЗ)$  говорит о корректности использования операционной величины — индивидуального эквивалента дозы для определения нормируемой величины — эффективной дозы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Комплекс автоматизированный индивидуального дозиметрического контроля АКИДК-301. Руководство по эксплуатации. Ангарск, 2007.
2. Мокров Ю. В., Морозова С. В. Использование шаровой альбедной системы для коррекции показаний альбедных дозиметров в полях нейтронного излучения фазотрона ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 2(186). С. 219–232.

3. *Мокров Ю. В. и др.* Коррекция показаний альбедных дозиметров на МЦ400 ЛЯР с помощью шаровой альбедной системы и сравнение с другими методами коррекции // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 6(190). С. 1243–1255.
4. *Санников А. В. и др.* Препринт ИФВЭ 2008-1 ОРИ, 2008.
5. *Мокров Ю. В. и др.* Сообщение ОИЯИ Р16-2018-36. Дубна, 2018.
6. *Мокров Ю. В. и др.* Сообщение ОИЯИ Р16-2021-25. Дубна, 2021.

Получено 17 мая 2023 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 26.05.2023.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,59. Тираж 100 экз. Заказ № 60665.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)