

Учет влияющих факторов при поверке установок с радионуклидными источниками нейтронного излучения

Рассмотрены проблемы формирования полей нейтронов с использованием радионуклидных источников нейтронов. Проведены теоретические оценки вклада в значения величин плотности потока нейтронов, кермы и амбиентного эквивалента дозы рассеянного нейтронного излучения при различных условиях применения источников нейтронов. Определены коэффициенты для расчета значений различных величин на разных расстояниях от источника с использованием измеренных значений величин на определенных расстояниях от источника. Приведены значения средних энергий для спектров нейтронов, получаемых с использованием радионуклидных источников нейтронов. При передаче единиц величин установкам, предназначенным для поверки средств измерений нейтронного излучения в условиях "открытой геометрии" и коллимированного пучка нейтронов, следует учитывать влияние таких факторов, как: способы передачи единиц величин, размер, толщина и материал стен помещения, в котором размещается установка, толщина и материал стенок помещения, условия размещения установки в помещении, ослабление и накопление нейтронного излучения окружающим воздухом, влияние влажности и плотности воздуха, размер поглощающего конуса, тип используемого нейтронного источника, энергетическая зависимость чувствительности, изотропия чувствительности и стабильность средств передачи единиц величин (компаратора). Для целей поверки средств измерений нейтронного излучения рекомендовано использовать установки с контейнером-коллиматором.

Ключевые слова: поверка установок нейтронного излучения, радионуклидные нейтронные источники, рассеянное нейтронное излучение, поля нейтронного излучения, коллимированное поле нейтронного излучения.

П.Ф.Масляев (Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, п.Менделеево, Московская обл.)

Для поверки средств измерений различных величин, характеризующих нейтронное излучение, с использованием радионуклидных источников нейтронов, применяются установки, позволяющие создавать различные поля нейтронного излучения: поле нейтронов в условиях «открытой геометрии», т.е. когда в поле излучения около источника отсутствуют рассеивающие объекты, и в условиях коллимированного поля нейтронов, когда источник раз-

мещается в контейнере-коллиматоре. Формирование полей нейтронов радионуклидных источников при использовании коллиматоров нейтронов и в условиях «открытой геометрии» рассмотрено в работе [1].

Установки с радионуклидными источниками нейтронов могут использоваться для передачи единиц следующих величин: потока (c^{-1}), плотности потока ($cm^{-2} \cdot c^{-1}$), мощности поглощенной дозы (Гр/с), мощности амбиентного эквивалента дозы (Зв/с), индиви-

дуального эквивалента дозы (Зв).

В общем случае измеряемая величина H_R на расстоянии R на установке определяется как:

$$H_R = H_{100} \cdot \left(\frac{100}{R}\right)^2 \times K_{HR} \cdot B \cdot e^{-\mu(R-100)} \cdot e^{-t/T_0}, \quad (1)$$

где H_{100} – значение измеряемой величины на расстоянии 100 см; R – расстояние в см от источника до чувствительного центра средства измерений; K_{HR} – коэффициент, учитывающий вклад в значе-

ние измеряемой величины рассеянного стенами излучения; V – фактор накопления; μ – коэффициент ослабления в см^{-1} ; T_0 – период полураспада нейтронного источника (как правило, в месяцах или годах); t – время, прошедшее с даты поверки установки (в тех же единицах, что и T_0).

В случае «открытой геометрии» N_{100} определяется на расстоянии 100 см как разность результатов измерений без конуса и с конусом.

Плотность потока нейтронов использовалась в качестве нормируемой величины в соответствии с санитарными правилами № 333-60. При этом устанавливались предельные допустимые уровни (ПДУ) плотности потока нейтронов различных энергий, как это указано в табл.1.

ПДУ для широкого спектра нейтронов ПДУш рассчитывается по формуле:

$$\text{ПДУ}_ш = \frac{1}{\sum_i \frac{P_i}{\text{ПДУ}_{mi}}}, \quad (2)$$

где ПДУ_{mi} – ПДУ для нейтронов с энергией, приведенной в табл.1; P_i – относительная доля нейтронов данной энергии, при этом $\sum_i P_i = 1$.

Хотя выпускались средства измерений плотности потока нейтронов (КРАН, РН-3, РУС-4 и др.), реально воспользоваться формулой (2) **было невозможно**.

С другой стороны, плотность потока нейтронов широко используется при контроле работы ядерно-физических установок, и для передачи единицы плотности потока нейтронов используется поверочная схема, возглавляемая ГЭТ 51-80 (Государственный первичный специальный эталон единиц плотности потока нейтронов и флюэнса нейтронов для ядерно-физических установок).

В соответствии с действующими в настоящее время Нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009, нормируемой величиной является эффективная доза. Для контроля значений эффективной дозы введены операционные величины: амбие-

Табл.1. ПДУ плотности потока нейтронов различных энергий.

Вид нейтронного излучения	Энергия излучения	Предельно допустимая плотность потока, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Тепловые нейтроны	0,025 эВ	750
Медленные нейтроны	0,1 эВ	550
Промежуточные нейтроны	5 кэВ	640
Промежуточные нейтроны	20 кэВ	310
Промежуточные нейтроны	0,1 МэВ	90
Промежуточные нейтроны	0,5 МэВ	33
Быстрые нейтроны	10 МэВ	20
Очень быстрые нейтроны	200 МэВ	10

нтный эквивалент дозы (при контроле радиационной обстановки) и индивидуальный эквивалент дозы (для контроля радиационной безопасности персонала). В настоящее время используются измерители амбиентного эквивалента дозы (ДКС-96, РУС-У8, МКС-01Р и др.), измерители индивидуального эквивалента дозы (ДВГН-01, ДВС-01С и др.). Передача единиц этих величин осуществляется в соответствии с поверочной схемой, возглавляемой ГЭТ 117-2010 (Государственный первичный эталон единиц мощности поглощенной дозы и мощности эквивалента дозы нейтронного излучения).

Таким образом, в области радиационной безопасности и контроля радиационной обстановки дифференциальная энергетическая плотность потока нейтронов используется в настоящее время как **вспомогательная величина** для расчета величины амбиентного эквивалента дозы и индивидуального эквивалента дозы с использованием коэффициентов перехода от флюэнса нейтронов определенной энергии к значению эквивалента дозы нейтронов той же энергии, приведенных в публикации 74 МКРЗ. Передача единицы плотности потока нейтронов радионуклидных нейтронных источников осуществляется в соответствии с поверочной схемой, возглавляемой ГЭТ 10-81 (Государственный первичный эталон единиц потока и плотности потока нейтронов).

Знание потока нейтронного излучения из радионуклидного источника также, как и активности радиоактивного вещества, важно, например, при продаже нейтронного радионуклидного источника. Расчет плотности потока нейтронов может быть проведен с использованием потока нейтронного излучения Q на расстоянии R от источника как Q/R^2 , однако при этом также следует учитывать вклад рассеянного излучения. Как правило, поток нейтронного излучения из радионуклидного нейтронного источника определяется путем сравнения с потоком нейтронов эталонного источника с помощью "всезолнового" ("длинного") счетчика нейтронов, энергетическая за-

висимость чувствительности которого приведена на рис.1 (взято из работы [2]).

На рис.1 видно, что с целью достижения наименьшей погрешности в качестве эталонного нейтронного источника следует использовать источник того же типа, что и поверяемый.

При передаче единиц величин установкам, предназначенным для поверки средств измерений нейтронного излучения, следует

учитывать влияние следующих факторов:

- способы передачи единиц величин;
- размер, толщину и материал стен помещения, в котором размещается установка;
- толщину и материал стенок помещения;
- условия размещения установки;
- ослабление и накопление нейтронного излучения окружающим воздухом, влияние влажности и плотности воздуха;
- размеры и тип поглощающего конуса;
- тип используемого нейтронного источника;
- энергетическую зависимость чувствительности, изотропию чувствительности и стабильность средств передачи единиц величин (компаратора).

Способы передачи единиц величин. ISO рекомендует [4] значения коэффициентов перехода от флюенса упомянутых нейтронных источников к значениям амбиентного эквивалента дозы, основанные на данных публикации 74 МКРЗ. В этом случае необходимо проводить две серии измерений: в отсутствие поглощающего конуса и с использованием поглощающего конуса, что увеличивает, таким образом, время измерений более чем в два раза. Если исключено влияние рассеянного в помещении излучения, а также учтено ослабление излучения воздухом и накопление излучения в воздухе, то должен соблюдаться «закон обратных квадратов», т. е. значе-

ние K_{HR} , рассчитывается как:

$$K_{HR} = ((H_{R6к} - H_{Rcк}) / (H_{1006к} - H_{100cк})) / (100/R)^2, \quad (3)$$

где R – расстояние от источника в см; $H_{R6к}$, $H_{Rcк}$ – плотность потока, измеренная без поглощающего конуса и с конусом на расстоянии R от источника, соответственно; $H_{1006к}$, $H_{100cк}$ – плотность потока, измеренная без поглощающего конуса и с конусом, соответственно, на расстоянии 100 см.

При учете вклада рассеянного излучения значение K_{HR} должно равняться единице. В этом случае для перехода от флюенса нейтронов источника можно использовать коэффициенты, приведенные в стандарте ISO [4], усредненные для спектров этих нейтронных источников.

ISO рекомендует использовать «открытую геометрию» с применением следующих источников нейтронов [3]: ^{241}AmB (период полураспада – 432 года, средняя энергия – 2,72 МэВ), $^{241}\text{AmBe}$ (период полураспада – 432 года, средняя энергия – 4,16 МэВ), ^{252}Cf (период полураспада – 2,65 года, средняя энер-

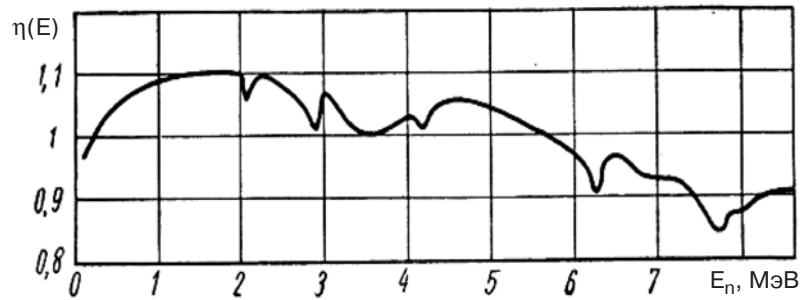


Рис. 1. Зависимость относительной чувствительности "всеволонового" ("длинного") счетчика от энергии нейтронного излучения.

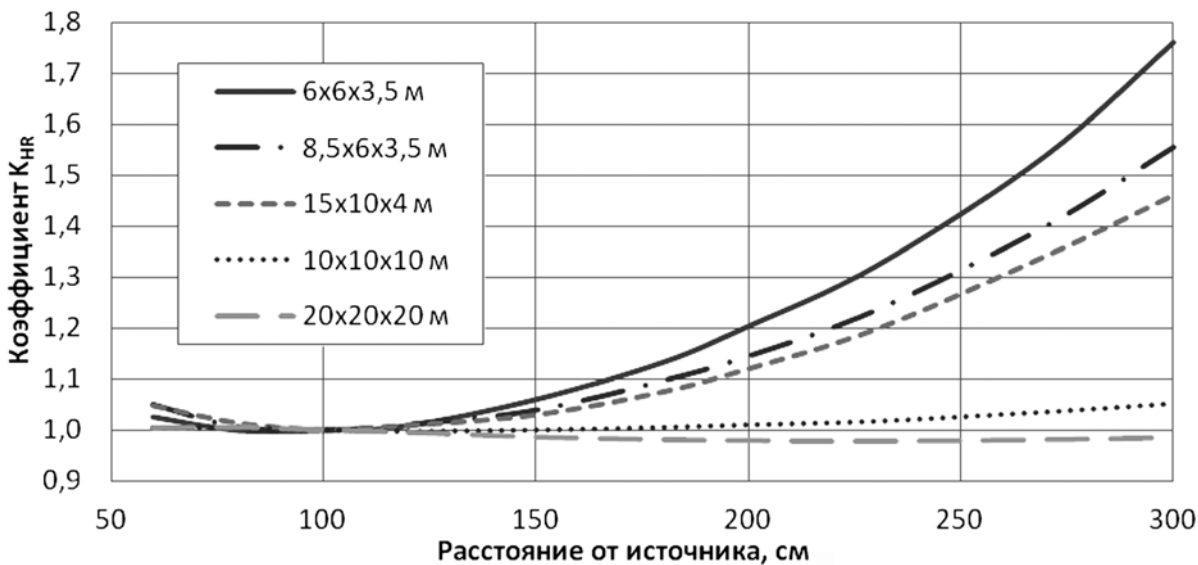


Рис. 2. Зависимость значений K_{HR} в условиях "открытой геометрии" для помещений различного размера.

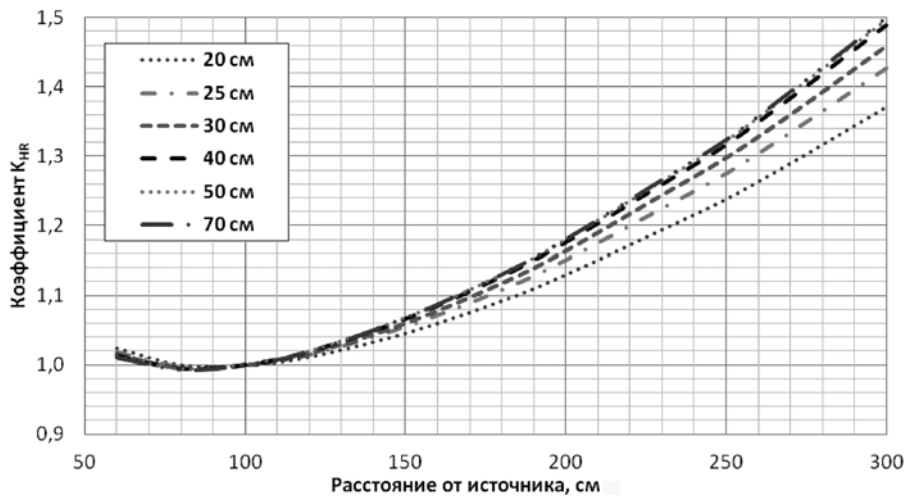


Рис. 3. Зависимость значений K_{HR} для помещения $8,5 \times 6 \times 3,5$ м с различной толщиной стены.

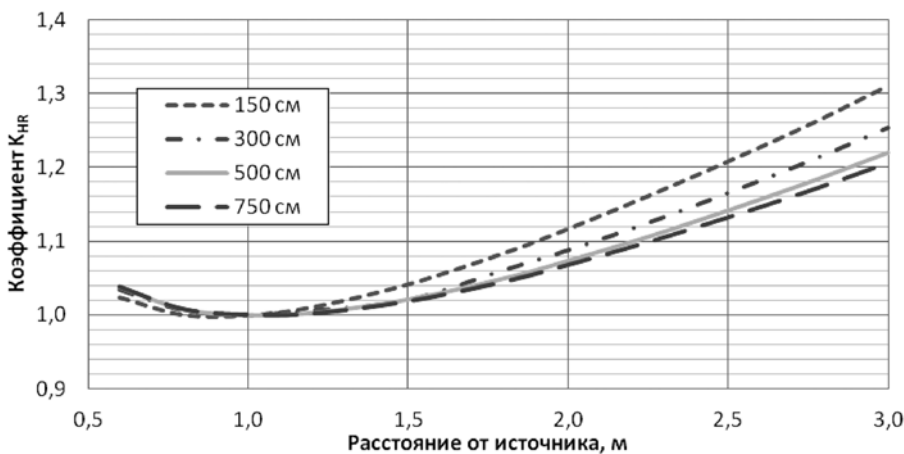


Рис. 4. Зависимость значений K_{HR} от положения установки относительно стены.

гия – 2,13 МэВ) и ^{252}Cf , размещенный в сфере диаметром 30 см, заполненной тяжелой водой (период полураспада – 2,65 года, средняя энергия 0,55 МэВ).

Размер, толщина и материал стен помещения, в котором размещается установка. Плотность потока нейтронов на данном расстоянии от источника изменяется в зависимости от помещения, в котором размещается источник.

На рис. 2 приведены зависимости изменений значений коэффициентов K_{HR} , на которые нужно умножить значение разности плотности потока на расстоянии 1 м, измеренные без поглощающего конуса и с конусом, чтобы получить значение плотности потока на расстоянии R для помещений различных размеров. Коэффициенты K_{HR} рассчитаны методом Монте-Карло для условий «открытой геометрии» при следующих значениях характеристик помещения: толщина стен 40 см, материал стен – бетон с плотностью 2 г/см^3 . На рис. 2 видно, что не учтены зна-

чений этих коэффициентов при использовании переходных коэффициентов, рекомендованных ISO, может привести к погрешности **более 50 %** на расстоянии 300 см от источника для помещения размером $8,5 \times 6 \times 3,5$ м.

На рис. 3 показаны зависимости коэффициента K_{HR} от расстояния от источника при разных толщинах стен. При толщинах стен более 40 см кривые практически совпадают. При изменении толщины стен от 20 см до 50 см значение коэффициента K_{HR} меняется на **более чем 9 %** на расстоянии 300 см для помещения размером $8,5 \times 6 \times 3,5$ м.

Условия размещения установки. Установка может размещаться различным образом относительно стен. На рис. 4 видно, что изменение значения коэффициента

K_{HR} в зависимости от изменения расстояния установки от одной из стен помещения размером $15 \times 15 \times 4$ м из бетона с плотностью 2 г/см^3 толщиной 50 см на расстоянии 300 см от источника, может составить **более 12 %**.

В табл. 2 приведены изменения значений некоторых величин и показания ДКС-96 (компаратора) на расстоянии 100 см от источника при смещении установки от 750 см до 150 см от стены (нормированы на расстояние от стены 750 см).

Ослабление и накопление нейтронного излучения окружающим воздухом, влияние влажности и плотности воздуха. Для оценки коэффициента ослабления излучения проведены расчеты в предположении отсутствия стен, взаимодействия излучения в цилиндре, площадь которого равнялась площади детектора, перпендикулярной падающему излучению (геометрия «узкого пучка»). Для оценки фактора (коэффициента) накопления излучения проведены рас-

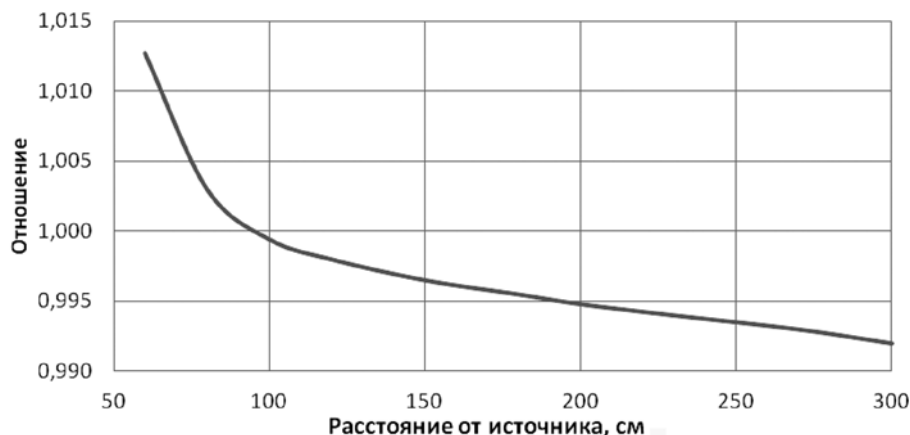


Рис.5. Отношение плотности потока в воздухе с влажностью 80 % при температуре 20 °С к плотности потока в воздухе с влажностью 0 % при температуре 20 °С.

четы в предположении отсутствия стен, взаимодействия излучения во всем помещении (геометрия «широкого пучка»). При этом коэффициент ослабления определялся как отношение плотности потока с воздухом к плотности потока без воздуха в геометрии «узкого пучка», а фактор накопления как отношение плотности потока с воздухом к плотности потока без воздуха в геометрии «широкого пучка».

Эти данные представлены в табл.3.

Из табл.3 следует, что ослабление плотности потока нейтронов от источника $^{238}\text{PuBe}$ на расстоянии 300 см от источника в помещении $10 \times 10 \times 10$ м составляет **примерно 2 %**, а **накопление – 3,95 %**.

Табл.2. Зависимости некоторых величин и показаний компаратора от расстояния между установкой и стеной.

Расстояние от стены, см	Значение величины (нормировано на 750 см)			
	Плотность потока	АЭД	Керма	Показания компаратора ДКС-96
150	1,00849	1,00310	1,00226	1,00304
300	1,00264	1,00071	1,00049	1,00068
500	1,00055	1,00010	1,00007	1,00010
750	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000

Табл.3. Результаты расчетов коэффициента ослабления и фактора накопления.

Расстояние от источника, см	60	100	150	200	250	300
Коэффициент ослабления плотности потока PuBe источника	1,0000	0,9982	0,9949	0,9902	0,9857	0,9802
Размер помещения, м	Фактор накопления					
6×5×3,5	1,0040	1,0084	1,0138	1,0186	1,0228	1,0265
8,5×6×3,5	1,0040	1,0086	1,0142	1,0194	1,0242	1,0288
10×10×10	1,0046	1,0101	1,0174	1,0248	1,0321	1,0395
20×20×20	1,0048	1,0105	1,0185	1,0268	1,0353	1,0442
30×30×30	1,0048	1,0107	1,0188	1,0274	1,0362	1,0455
50×50×50	1,0048	1,0108	1,0191	1,0277	1,0368	1,0464

Влажность воздуха способствует ослаблению и накоплению нейтронов.

На рис.5 представлена зависимость отношения плотности потока в воздухе с влажностью 80 % к плотности потока в воздухе с влажностью 0 % при одинаковой температуре 20 °С. Как видно на рис.5, это отношение **не превышает 1,3 %** для помещения $8,5 \times 6 \times 3,5$ м.

Размеры и тип поглощающего конуса. Влияние размера и типа поглощающего конуса на значение коэффициента K_{HR} показано на рис.6. Один из конусов представляет собой усеченный конус, изготовленный из полиэтилена с 5 % бора, имеет длину 50 см. Раствор конуса составляет 22 градуса (K-22). Второй конус из того же материала имеет те же размеры, но раствор конуса 17 градусов (K-17). Третий тип конуса является составным и состоит из двух усеченных конусов: один конус длиной 20 см состоит из железа, второй, являющийся продолжением первого, изготовлен из полиэтилена с 5 % бора.

На рис.6. видно, что для помещений размером $8,5 \times 6 \times 3,5$ м на расстоянии 300 см от источника значение коэффициента K_{HR} **составляет 1,56**, для усеченного конуса из полиэтилена с 5 % бора оно будет равно **1,38**, а для составного конуса с железом – **1,32**.

Конус используется только в условиях «открытой геометрии», и при этом следует иметь в виду, что

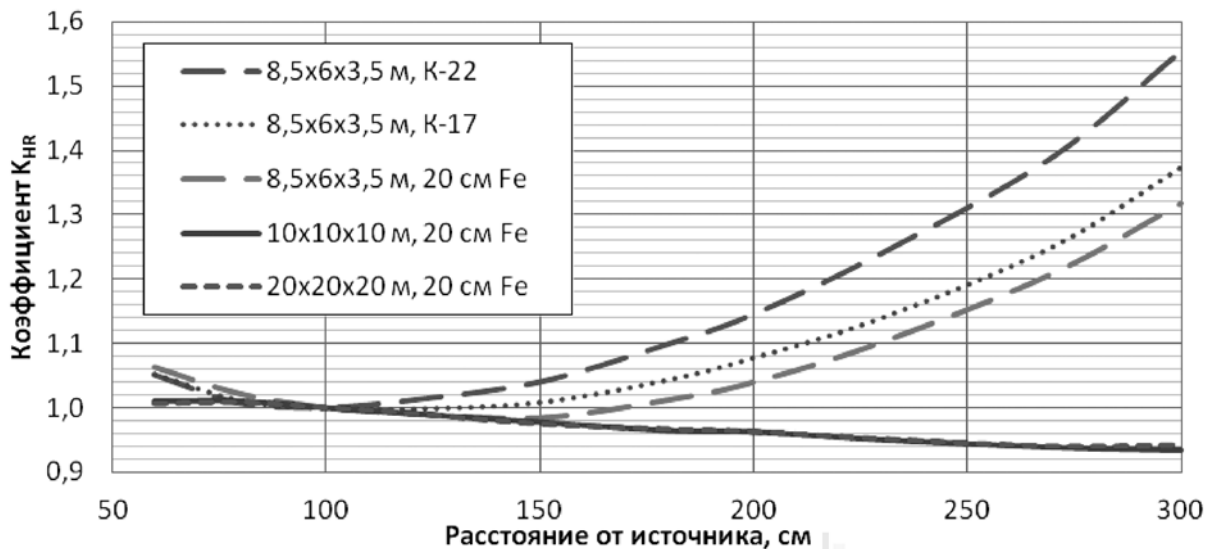


Рис. 6. Зависимость $K_{нр}$ для плотности потока нейтронов от размеров и типа конуса и размеров помещений.

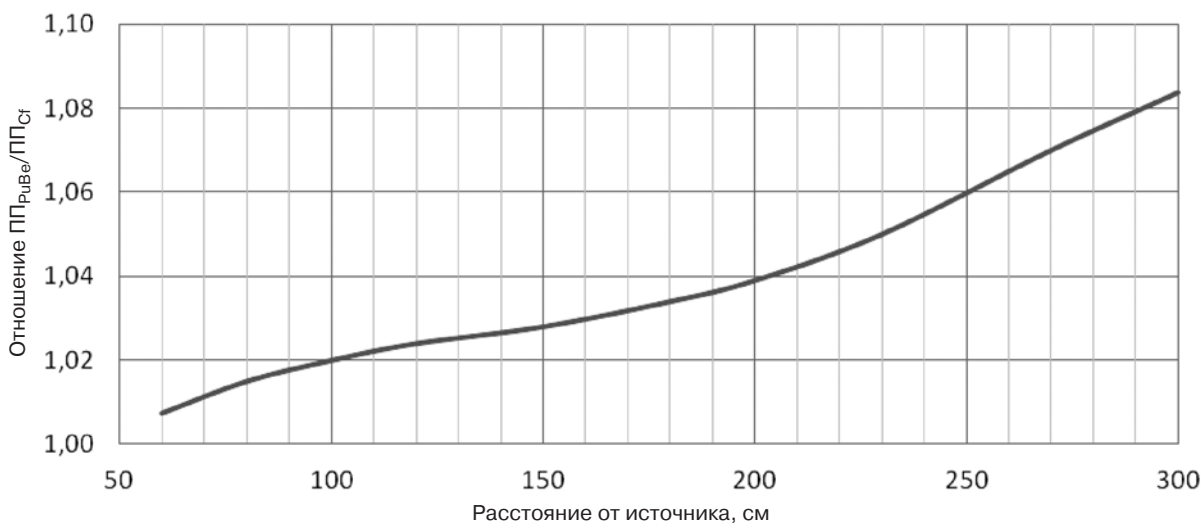


Рис. 7. Отношение значений плотности потока для разных источников ПП ($^{238}\text{PuVe}$)/ПП(^{252}Cf).

это приводит к ограничению на размер блока детектирования и расстояние его от источника нейтронного излучения.

Тип используемого нейтронного источника. Очевидно, что вклад рассеянного в помещении нейтронного излучения будет зависеть от типа нейтронного источника. На рис. 7 показано отношение плотности потока (ПП) рассеянного нейтронного излучения от стен в помещении для источников $^{238}\text{PuVe}$ и ^{252}Cf .

На рис. 7 видно, что вклад рассеянного нейтронного излучения на расстоянии от источника 300 см для различных источников отличается **примерно на 8 %** в помещении 8,5x6x3,5 со стенами из бетона плотностью 2 г/см³ толщиной 50 см.

Максимальный поток выпускаемых в России радионуклидных нейтронных источников составляет: $5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ – для источников типа $^{238}\text{PuVe}$ и порядка $1 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ – для источников спонтанного деления на основе Cf-252. Для целей поверки средств измерений нейтронного излучения радионуклидные источники спонтанного деления на основе Cf-252, как правило, не используются из-за малого периода полураспада, поэтому для целей поверки средств измерений нейтронного излучения рекомендуется использовать $^{238}\text{PuVe}$ источник, размещенный в контейнере-коллиматоре. При этом следует иметь в виду, что AMBIENTНЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ ДОЗЫ применяется для контроля радиационной обстановки, в том числе, на рабочих местах, где всегда присутствует рассеянное излучение.

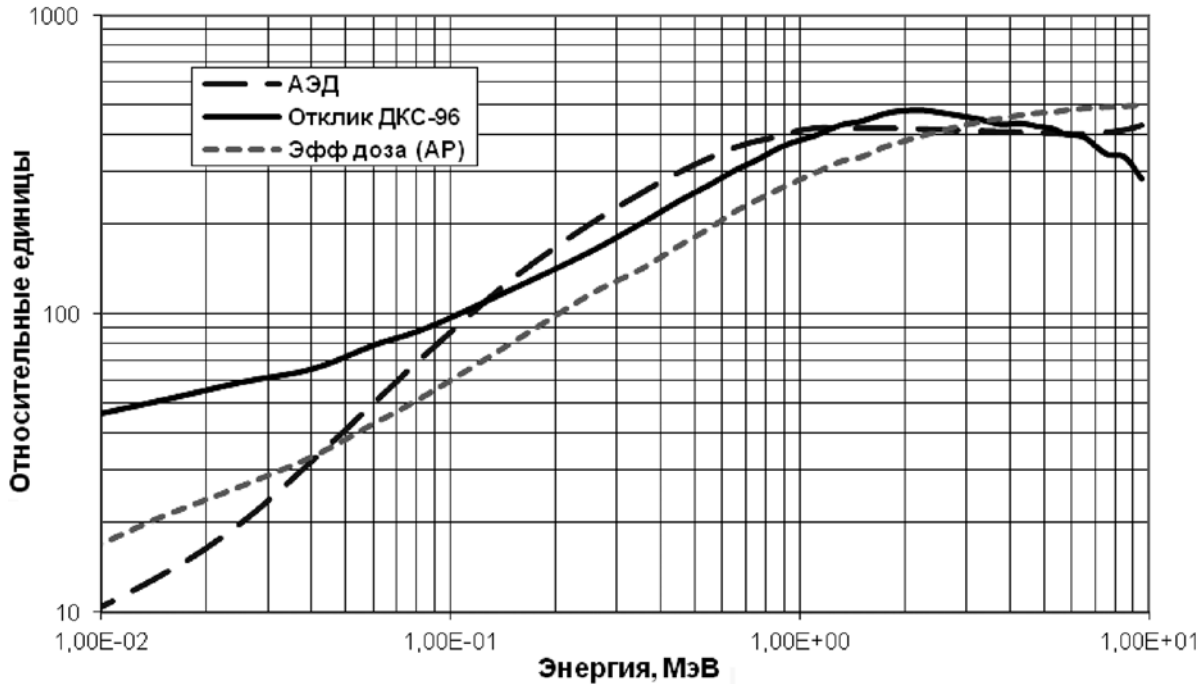


Рис. 8. Зависимость чувствительности ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96, зависимость значений амбиентного эквивалента дозы (АЭД) эффективной дозы от энергии нейтронов.

Чтобы погрешность установки соответствовала требованиям поверочной схемы ГОСТ Р 8.803-2012, необходимо при поверке установки значения K_{HR} рассчитывать методом Монте-Карло с учетом влияющих факторов.

Энергетическая зависимость чувствительности, изотропия чувствительности и стабильность средств передачи единиц величин (компаратора).

Учитывая, что энергетическая зависимость чувствительности и изотропия чувствительности средств измерений нейтронного излучения не удовлетворительны, при поверке установок следует уделить особое внимание выбору компаратора.

Энергетическая зависимость чувствительности относительно поверяемой величины должна быть минимальной, т. к. это напрямую входит в погрешность поверки.

Учет изотропии чувствительности должен быть осуществлен одинаковым размещением компаратора на поверяемой установке и эталонной установке, от которой передается единица величины.

Для этих целей целесообразно использовать средства измерений нейтронного излучения со сферическим замедлителем, например, ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96, зависимость чувствитель-

ности которого от энергии нейтронов представлена на рис. 8.

Стабильность компаратора должна быть **не хуже 1 %** в течение времени поверки и подготовки к ней.

Выводы.

1. При применении поверочных установок «открытой геометрии», размещенных в не очень больших помещениях (размером менее $15 \times 6 \times 4$ м), следует иметь в виду, что конус экранирует часть стен помещения, поэтому разность результатов измерений без конуса и с конусом не соответствует результатам, относящимся к излучению только нейтронного источника.

2. Применение установок «открытой геометрии» при поверке средств измерений плотности потока нейтронов, размещенных в не очень больших помещениях, без учета вклада рассеянного излучения может привести к существенному превышению погрешности, допустимой поверочной схемой ГОСТ 8.031-82.

3. При поверке средств измерений амбиентного эквивалента дозы применение установок «открытой геометрии», размещенных в не очень больших помещениях, с использованием коэффициентов перехода ISO, без учета рассеянного излучения не допустимо.

4. При поверке средств измерений поглощенной дозы (кермы) и эквивалента дозы нейтронного излучения рекомендуется использовать коллимированное поле нейтронного излучения, создаваемое контейнером-коллиматором, аналогичны контейнеру-

коллиматору, применяемому в установке УКПН-1М.

5. В качестве компаратора при поверке в коллимированном поле нейтронного излучения рекомендуется использовать ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96.

Литература

1. П.Ф.Масляев. Формирование полей нейтронов от радионуклидных источников нейтронов. АНРИ №4(71), 2012. С.32-38.
2. И.А.Ярицына, Ю.В.Иванов, О.Л.Андреев. Нейтронные измерения. М.: Издательство стандартов, 1973.
3. ISO 8529-1 Reference neutron radiations – Part 1: Characteristics and methods of production.
4. ISO 8529-3 Reference neutron radiations – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence.

The Account of Influencing Factors at Checking Installations with Radionuclide Sources of Neutron Radiation

Maslyayev Peter (The All-Russia scientific research institute physicotechical and radio engineering measurements, Mendeleevo, Russia)

Abstract. By transfer of units of sizes to the installations intended for checking of means of measurements of neutron radiation in conditions of "open geometry" and collimated a beam of neutrons, it is necessary to take into account influence of the following factors: ways of transfer of units of sizes, the size, thickness and a material of walls of a room in which installation, thickness and a material of walls of a room, a condition of accommodation of installation in a room, easing and accumulation of neutron radiation by air, influence of humidity and density of air is placed, the size of absorbing cone, type of a used neutron source, power dependence of sensitivity, изотропия sensitivity and stability of means of transfer of units of comparator. For the purposes of checking of means of measurements of neutron radiation it is recommended to use installations with the container – collimator.

Key words: *Checking of installations of neutron radiation, radionuclide neutron sources, absent-minded neutron radiation, fields of neutron radiation, collimated a field of neutron radiation.*

П.Ф.Масляев (к.т.н., с.н.с., нач.лаб.) – Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, п.Менделеево, Московская обл.

Контакты: тел.: +7 (495) 660-17-44; e-mail: maslyayev@vniiftri.org.