

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P16-86-491

В.Н.Бучнев, М.М.Комочков, Ю.В.Мокров

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
И ПОГРЕШНОСТИ НЕКОТОРЫХ ДОЗИМЕТРОВ
НЕЙТРОНОВ**

1986

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Энергетическая зависимость чувствительности $\epsilon(E)$ средства измерений, используемого в качестве дозиметра нейтронов, является одной из важнейших характеристик, определяющих его применимость в радиационном контроле нейтронов широкого энергетического диапазона. На рис. 1 и 2 сплошной линией показаны зависимости $\epsilon(E)$, построенные по результатам работ [1-3]. На рис. 2 штрихпунктиром

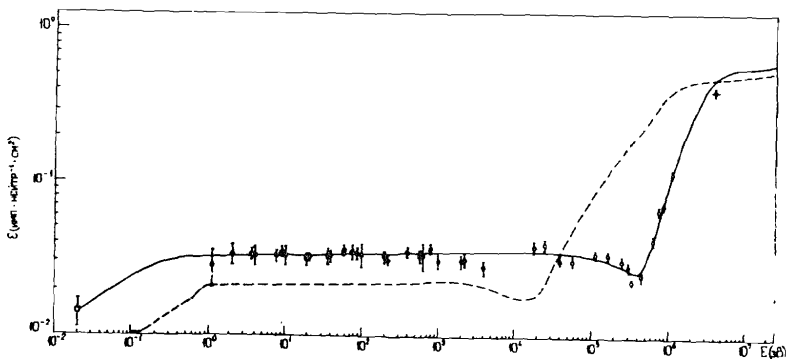


Рис. 1. Зависимость чувствительности дозиметра ДН-А-1 от энергии.

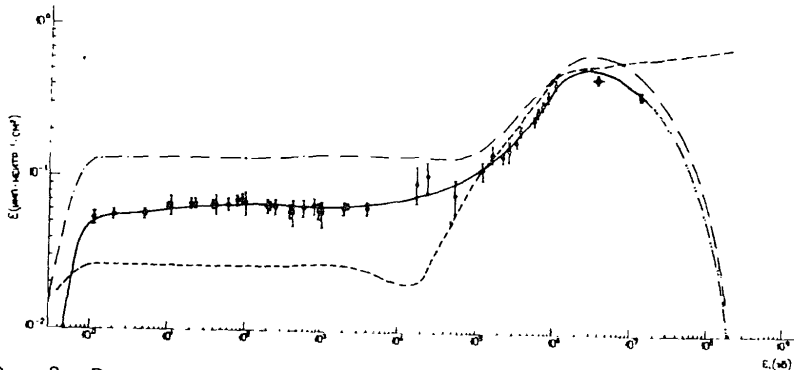


Рис. 2. Зависимость чувствительности дозиметра СНМ-14 с комбинированным замедлителем от энергии.

показана зависимость $\epsilon(E)$ для счетчика СНМ-14 с комбинированным замедлителем без кадмиевой прослойки внутри, построенная также на основании экспериментальных результатов работ [1-3]. При энергиях выше 14 МэВ $\epsilon(E)$ построены с использованием значений чувствительности сферы Боннера диаметром 25,4 см/см. [5], норми-

рованных к чувствительности прибора при энергии 14 МэВ. Это обосновано тем, что толщина замедляющего слоя комбинированного замедлителя и сферы Боннера диаметром 25,4 см примерно одинакова, а наличие кадмиевой прослойки, как это показано в /3/, мало влияет на ход $\epsilon(E)$ при энергиях нейтронов даже до 1 МэВ. У прибора ДН-А-1 при энергии выше 1 МэВ зависимость $\epsilon(E)$ построена на основании данных /4/, нормированных для чувствительности при энергии 1 МэВ к данным /2/.

На этих же рисунках пунктиром показаны зависимости чувствительности $\epsilon'(E)$ гипотетических дозиметров, соответствующие зависимости от энергии максимальной удельной эквивалентной дозы h_m . Для нейтронов (Pu-Be)-источника гипотетические зависимости имеют такую же чувствительность ϵ_{PuBe} , как и у исследуемых дозиметров. Зависимости $\epsilon'(E)$ рассчитаны по формуле

$$\epsilon'(E) = \frac{\epsilon_{PuBe} \cdot h_m(E)}{h_{PuBe}}, \quad /1/$$

где h_{PuBe} - значение h_m для нейтронов (Pu-Be)-источника, равное $3,6 \cdot 10^{-6} \text{Зв} \cdot \text{см}^2$ /по ГОСТ 25935-83/. Значения $h_m(E)$ рассчитывались для различных энергий по аппроксимации, предложенной в работе /6/.

2. ПОГРЕШНОСТИ ПРИБОРОВ

Уже из сравнения $\epsilon(E)$ и $\epsilon'(E)$ видно, что при использовании исследуемых приборов в качестве дозиметров будут возникать погрешности, обусловленные ходом $\epsilon(E)$, причем величины погрешностей будут зависеть от спектра нейтронов в месте измерения. Поэтому возникла необходимость оценить расчетным путем значения этих погрешностей для имеющихся в наличии наиболее типичных спектров нейтронов за защитой ядерно-физических установок ОИЯИ. При этом сравнивались значения эквивалентной дозы H_n , которую в поле со спектром $\Phi(E)$ зарегистрировал бы прибор с чувствительностью $\epsilon(E)$, с действительным значением эквивалентной дозы H_g . Величины H_n рассчитывались по формуле

$$H_n = \frac{h_{PuBe}}{\epsilon_{PuBe}} \int_{E_1}^{E_2} \epsilon(E) \cdot \Phi(E) dE, \quad /2/$$

где E_1 и E_2 - границы энергетического диапазона спектра нейтронов. Действительные значения эквивалентной дозы H_g рассчитывались как значения эквивалентной дозы $H(d)$ в максимуме глубинного распределения в тканезквивалентном фантоме при падении на него нейтронов со спектром $\Phi(E)$, т.е. в качестве H_g выбира-

лось максимальное значение из величин $H(d_1)$, рассчитанных по формуле

$$H(d_1) = \int_{E_1}^{E_2} H(E, d_1) \Phi(E) dE, \quad /3/$$

где $H(E, d_1)$ - эквивалентная доза как функция энергии нейтронов E и глубины d_1 в фантоме - взята из работы /7/ / i изменяется от 1 до 7 для глубин от 0,5 до 29,5 г/см²/.

Использование эквивалентной дозы H_g , рассчитанной с учетом глубинных распределений доз в фантоме, корректнее, чем определение ее по формуле

$$H = \int_{E_1}^{E_2} h_m(E) \cdot \Phi(E) dE, \quad /4/$$

т.к. в последнем случае H_g была бы явно выше по сравнению с $H(d)$ вследствие использования $h_m(E)$. Как показывают расчеты, это завышение не больше 30% для всех используемых спектров.

В расчетах использовались спектры за защитой установок ОИЯИ, как измеренные авторами, так и взятые из литературы. Эти спектры многообразны, они отличаются условиями формирования /защита, падающее на нее излучение и т.п./, энергетическим диапазоном и другими характеристиками. В настоящей работе спектры характеризуются средней энергией \bar{E} , определенной по энергетическому распределению флюенса нейтронов.

Использованные в расчетах спектры можно разделить на несколько групп:

1/ жесткие спектры за сплошными защитами ускорителей и экспериментальных каналов вывода пучков - \bar{E} лежит в диапазоне от нескольких до 100 МэВ, вклад в полную эквивалентную дозу нейтронов / H / от нейтронов с энергией выше 20 МэВ (H_2) составляет 30-70%;

2/ мягкие спектры многократно рассеянного излучения за защитами ускорителей с проемами и в экспериментальных помещениях - \bar{E} в диапазоне от десятков кэВ до нескольких МэВ, вклад H_2 в H составляет не более 10%;

3/ спектры за защитой импульсных реакторов - \bar{E} не превышает 1 МэВ.

Для оценки погрешности приборов в диапазоне энергий от нижней границы чувствительности E_1 до $E_2 = 20 \cdot \text{МэВ}$ рассчитывался коэффициент K_1 :

$$K_1 = \frac{H_g}{H_n}, \quad /5/$$

причем в формулах /2/ и /3/ для ДН-А-1 $E_1 = 10^{-2}$ эВ, для СМ-14 с комбинированным замедлителем $E_1 = 0,4$ эВ.

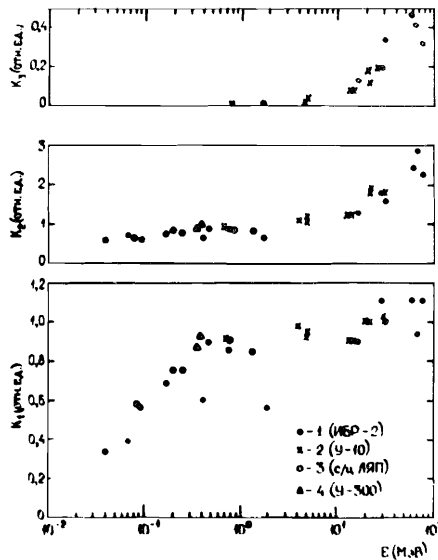
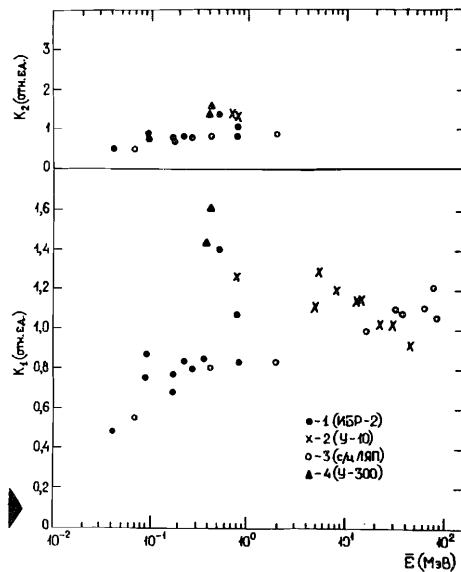


Рис. 3. Отношение эквивалентной дозы нейтронов к отклику дозиметра СМН-14 с комбинированным замедлителем.

Рис. 4. Отношение эквивалентной дозы нейтронов к отклику дозиметра ДН-А-1.



Так как исследуемые приборы используются и в полях излучений, где эквивалентная доза нейтронов с энергией ниже 20 МэВ H_1 составляет лишь часть полной дозы нейтронов H , представляет интерес оценить, какую часть полной дозы H регистрируют приборы в таких полях. Эта оценка сделана с помощью коэффициента K_2 , рассчитанного по формуле, аналогичной /5/, при энергии E_2 , равной максимальной энергии спектра, и $E_1 = 10^{-2}$ эВ для СМН-14 в комбинированном замедлителе. Для ДН-А-1 такая оценка в жестких спектрах на ускорителях затруднительна, так как в них присутствуют заряженные частицы, регистрируемые прибором, спектр которых неизвестен. Чувствительность прибора к этим частицам также неизвестна. Так, оценки K_1 , проведенные для жестких спектров по формуле /5/ и аналогичной, в которой вместо H_n использованы показания прибора, помещенного в точку измерения с данным спектром, показывают, что во втором случае величины K_1 меньше определенных по формуле /5/ в 2-3 раза. Поэтому для ДН-А-1 оценки K_2 проводились лишь для мягких спектров на ускорителях.

Прибор СМН-14 с комбинированным замедлителем часто используется в трехкомпонентном методе определения полной эквивалентной дозы $H^{18/}$ как дозиметр нейтронов с энергией ниже 20 МэВ. Так как прибор чувствителен и при энергиях нейтронов выше

20 МэВ, была сделана оценка завышения им дозы H_1 с помощью коэффициента K_3 , определенного как отношение

$$K_3 = \frac{H_{n2}}{H_{n1}},$$

/6/

где H_{n2} - эквивалентная доза, рассчитанная по формуле /2/ для $E_1 = 20$ МэВ, и E_2 , равной максимальной энергии спектра; H_{n1} - то же для $E_1 = 0,4$ эВ, $E_2 = 20$ МэВ. Значения коэффициентов K_1 , K_2 и K_3 представлены на рис. 3 и 4 для различных спектров нейтронов, характеризующихся \bar{E} .

Для оценки влияния кадмиевого экрана внутри комбинированного замедлителя на чувствительность были рассчитаны значения K_1 по формуле для замедлителя без кадмия. Эти значения представлены на рис. 5, где для сравнения приведены также значения K_1 из рис. 3 для замедлителя с кадмием. На рис. 5 представлены также отношения K'_1 эквивалентной дозы H_n , рассчитанной в диапазоне энергий от 0,4 эВ до 20 МэВ для замедлителя с кадмием, к эквивалентной дозе, рассчитанной по той же формуле для замедлителя без кадмия.

2.1. Погрешности счетчика СМН-14 с комбинированным замедлителем

Эквивалентная доза нейтронов H_n в диапазоне энергий от 0,4 эВ до 20 МэВ, определенная по показаниям прибора, в основном превышает значения наиболее достоверной дозы H_g в этом же диапазоне энергий. Это превышение может достигать коэффициента 3 для мягких спектров со средней энергией в сотые и десятые доли МэВ. Но, как правило, оно составляет меньшую величину. Так, для 90% рассмотренных спектров на реакторах и циклотронах ЛЯР / $\bar{E} \leq 1$ МэВ/ коэффициент K_1 лежит в диапазоне от 1,0 до 0,6 и может быть принят равным $0,8 \pm 0,2/$. Для 90% рассмотренных спектров на синхротроне ЛВЭ и синхроциклотроне ЛЯП он лежит в диапазоне от 1,1 до 0,8 и может быть принят равным $0,9 \pm 0,2/$.

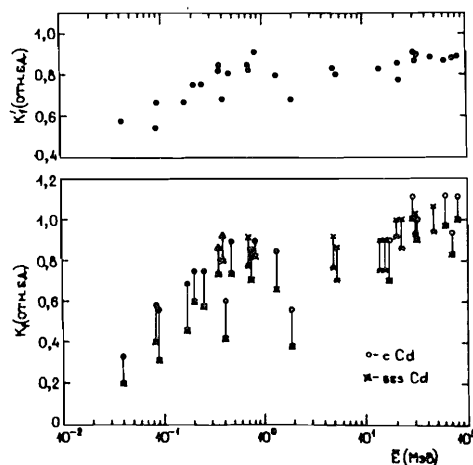
Таким образом, на ускорителях и реакторах ОИЯИ для большинства полей нейтронов, в которых проводится радиационный контроль с помощью прибора СМН-14 с комбинированным замедлителем, коэффициент K_1 может быть принят равным $0,9 \pm 0,2/$, т.е. для получения эквивалентной дозы нейтронов в диапазоне энергий от 0,4 эВ до 20 МэВ показания прибора нужно умножить на этот коэффициент и при определении погрешности результата измерений учесть погрешность K_2 , которую можно принять равной 20%.

Если измерения проводятся в полях излучений, где условия формирования спектра нейтронов и средней энергии \bar{E} близки к тем, для которых проводились сравнения и расчет K_1 , то при определении результата измерений можно пользоваться более точными значениями K_1 , показанными на рис. 3.

Более тщательно и критически следует подходить к интерпретации результатов измерений с помощью прибора в полях с мягкими спектрами, где превышение N_n над N_g составляет, как правило, не более 1,7 раза, но может доходить для отдельных спектров до 3.

Анализ коэффициента K_2 из рис. 3 показывает, что в полях за защитой ускорителей частиц высоких энергий /ЛВЭ и ЛЯП/, где вклад N_2 в N превышает 30%, эквивалентная доза, определенная с помощью счетчика СММ-14 с комбинированным замедлителем, составляет от половины до трети /для очень жестких спектров/ полной дозы нейтронов - коэффициент K_2 достигает значения 2 или 3. Для "жестких" спектров синхроциклотрона ЛЯП среднее значение $K_2 = /1,9 \pm 0,6/$, для синхрофазотрона ЛВЭ $K_2 = /1,5 \pm 0,4/$. Для "мягких" спектров этих ускорителей, соответственно, $K_2 = /0,70 \pm 0,10/$ и $/1,0 \pm 0,10/$.

Рис. 5. Отношение эквивалентной дозы нейтронов к показаниям дозиметра СММ-14 с комбинированным замедлителем /с кадмием и без кадмия/.



Необходимо отметить, что счетчик СММ-14 с комбинированным замедлителем по своей конструкции, что подтверждается также ходом зависимости $\epsilon(E)$, не является дозиметром нейтронов в диапазоне энергий выше 20 МэВ. Поэтому по его показаниям с помощью коэффициента K_2 можно проводить лишь оценку полной эквивалентной дозы нейтронов во всем существующем за защитой ускорителей диапазоне энергий нейтронов.

Превышение измеренной с помощью прибора эквивалентной дозы N_n нейтронов с энергией до 20 МэВ над N_g за счет чувствительности прибора при энергии нейтронов выше 20 МэВ, как правило, незначительно. Так, величина K_3 в большинстве случаев не превышает $0,2 \div 0,3$ и лишь для очень жестких спектров за сплошной защитой синхроциклотрона ЛЯП /точка 1/ может достигать 0,4.

Наличие кадмиевой прослойки внутри комбинированного замедлителя улучшает характеристики прибора как дозиметра нейтронов, как это видно из рис. 5. Так, в полях со средней энергией спектра нейтронов \bar{E} ниже 10 МэВ, где $N_n > N_g$ для энергий до 20 МэВ, использование кадмия в замедлителе уменьшает это различие, причем, как видно из рис. 5, влияние кадмия тем сильнее, чем ниже \bar{E} . В полях, где $N_n < N_g$ / $\bar{E} > 10$ МэВ/ наличие кадмия в замедлителе приводит к уменьшению $N_g - N_n$ и даже к некоторому, до 10%, превышению N_n над N_g .

Представляет интерес сравнение величин N_n , рассчитанных по формуле /2/ и непосредственно измеренных прибором. Такое сравнение было проведено для некоторых точек измерений за защитой ускорителя ЛВЭ. Оно показало, что рассчитанные значения N_n в диапазоне энергий от 0,4 эВ до максимальной границы спектра меньше эквивалентной дозы, определенной по показаниям прибора, и это различие не превышает 25%.

2.2. Погрешности прибора ДН-А-1

Эквивалентная доза N_n нейтронов с энергией до 20 МэВ при измерениях за защитой ускорителей и реакторов с помощью прибора ДН-А-1, как видно из рис. 4, может быть как больше, так и меньше действительного значения N_g . Для 90% рассмотренных спектров величина K_1 лежит в диапазоне от 0,6 до 1,4, т.е. не выходит за пределы основной погрешности ДН-А-1, равной 40%. Среднее значение K_1 при этом равно 1,0. Для 80% спектров K_1 лежит в диапазоне от 1,3 до 0,7.

Редкие случаи значительного отличия N_n от N_g / K_1 лежит около 0,5-0,6 или около 1,6/ в полях с мягкими спектрами объясняются характером зависимости $\epsilon(E)$ при данных \bar{E} .

Для измерений за защитой реакторов K_1 может быть принят равным $/1,1 \pm 0,3/$, для ускорителей - $/1,0 \pm 0,2/$. При измерениях в реальных полях на ускорителях с заметным вкладом N_2 в N /более 5%/ показания прибора ДН-А-1, как уже отмечалось, выше рассчитанной по формуле /2/ величины N_n за счет регистрации заряженных частиц. По этой причине оценка той части полной дозы нейтронов N , которую регистрирует ДН-А-1 в полях ускорителей, проведена лишь для полей со средней энергией спектра нейтронов $\bar{E} < 5,0$ МэВ и вкладом N_2 в N меньше 10%. Как видно из рис. 4, в этом случае K_2 лежит в диапазоне от 0,5 до 1,5, т.е. величина N_n может составлять от 0,7 до 2 значений N_g .

3. ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты экспериментального определения при различных энергиях нейтронов чувствительностей используемых в радиационном контроле за защитой ускорителей и реакторов ОИЯИ дозиметров нейтронов ДН-А-1 и СММ-14 в комбинированном замедлителе. По этим результатам построены энергетические зависимости чувствительностей $\epsilon(E)$ этих дозиметров.

С помощью полученных зависимостей $\epsilon(E)$ и известных /взятых из литературы или измеренных авторами/ спектров нейтронов за защитой ускорителей и реакторов ОИЯИ были оценены расчетным путем погрешности, с которыми дозиметры измеряют эквивалентную

дозу нейтронов. Счетчик СНМ-14 с комбинированным замедлителем с достаточной для дозиметрии хронического облучения точностью /30%/ может быть использован в качестве дозиметра нейтронов с энергией от 0,4 эВ до 20 МэВ. Причем, как правило, показания прибора при этом завышены по сравнению с действительным значением эквивалентной дозы. При использовании прибора в полях с большим вкладом в дозу сверхбыстрых нейтронов возможно дополнительное завышение показаний до 40% за счет регистрации этих нейтронов.

Прибор ДН-А-1 в пределах своей основной погрешности, составляющей 40%, может использоваться в качестве дозиметра эквивалентной дозы нейтронов с энергией ниже 20 МэВ. Однако показания прибора в полях за защитой ускорителей частиц высоких энергий могут превышать достоверное значение эквивалентной дозы за счет регистрации сверхбыстрых нейтронов и заряженных частиц, например, протонов. Как показывают данные /8/ и результаты измерений, выполненные авторами в некоторых местах за защитой ускорителей, это превышение может быть в 2 раза. Расчетная оценка его не сделана из-за отсутствия данных о зависимости $\epsilon(E)$ при энергии нейтронов выше 20 МэВ и о чувствительности прибора к заряженным частицам.

С использованием полученных в настоящей работе результатов по показаниям исследованных приборов можно оценить эквивалентную дозу нейтронов во всем значимом за защитой ускорителей диапазоне энергий.

Погрешность определения с помощью исследованных приборов эквивалентной дозы нейтронов в диапазоне до 20 МэВ может быть уменьшена при наличии информации об условиях формирования поля излучения в точке измерения, жесткости или мягкости спектра, его средней энергии, вкладе в дозу сверхбыстрых нейтронов. Для многих мест измерений такая информация может быть получена по результатам настоящей работы без знания спектра нейтронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бучнев В.Н. и др. ОИЯИ, РЗ-85-428, Дубна, 1985.
2. Комочков М.М., Мокров Ю.В. ОИЯИ, РЗ-86-184, Дубна, 1986.
3. Бучнев В.Н. и др. ОИЯИ, Р16-85-802, Дубна, 1985.
4. Голованов М.А. и др. В кн.: Труды СНИИП, Атомиздат, М., 1964, вып.1, с.36-43.
5. ICRU, Report 28, December, 1978.
6. Алейников В.Е., Бескровная Л.Г. ОИЯИ, 16-82-89, Дубна, 1982.
7. Белогорлов Е.А. и др. Препринт ИФВЭ, 80-117, Серпухов, 1980.
8. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-6790, Дубна, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 июля 1986 года.

Бучнев В.Н., Комочков М.М., Мокров Ю.В.
Энергетические зависимости чувствительности
и погрешности некоторых дозиметров нейтронов

P16-86-491

При различных энергиях нейтронов представлены результаты экспериментального определения чувствительности используемых в радиационном контроле за защитой ускорителей и реакторов ОИЯИ дозиметров нейтронов ДН-А-1 и СНМ-14 в комбинированном полиэтиленовом замедлителе. Построены энергетические зависимости чувствительности дозиметров. С помощью построенных зависимостей и известных спектров нейтронов за защитой ускорителей и реакторов ОИЯИ расчетным путем оценены погрешности, с которыми дозиметры измеряют эквивалентную дозу нейтронов. Прибор СНМ-14 с комбинированным замедлителем с достаточной точностью 30% может быть использован в качестве дозиметра нейтронов в диапазоне энергий от 0,4 эВ до 20 МэВ. Прибор ДН-А-1 в пределах своей основной погрешности, равной 40%, может использоваться как дозиметр эквивалентной дозы нейтронов с энергией ниже 20 МэВ. Представлены результаты, с помощью которых по показаниям приборов можно оценить эквивалентную дозу нейтронов во всем значимом диапазоне энергий за защитой ускорителей.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Buchnev V.N., Komochkov M.M., Mokrov Yu.V.
Energy Dependences of Sensitivity and Errors
of Some Neutron Dosimeters

P16-86-491

The results of experimental determination of sensitivities of DN-A-1 device and SNM-14 slow neutron counter with a combined polyethylene moderator at various neutron energies used in radiation control behind the shielding of JINR accelerators and reactors are presented. Energy dependences of sensitivities of these dosimeters are constructed. The obtained sensitivities and known neutron spectra around JINR nuclear physical installations permit to evaluate the errors of dosimeters at measuring the neutron equivalent dose in the fields with these spectra. SNM-14 with a combined moderator could be used as a neutron dosimeter with a 30% accuracy in 0.4 eV upto 20 MeV energy range. The error of DN-A-1 at 20 MeV energy is 40%. The results on evaluation of neutron equivalent dose over essential neutron energy range are presented.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986