

К-636

ЛЯП



3172/4-74

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

P16 - 10647

М.М. Комочков

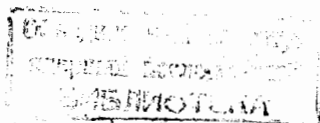
НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ
ДОЗИМЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЙ
НА УСКОРИТЕЛЯХ

Дубна 1977

P16 - 10647

М.М. Комочков

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ
ДОЗИМЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЙ
НА УСКОРИТЕЛЯХ



Некоторые вопросы дозиметрии излучений на ускорителях

Выполнена оценка состояния развития наиболее распространенных методов и средств дозиметрии, предназначенных для установления степени радиационного риска на ускорителях заряженных частиц. За основу оценки принята достоверность результатов, получаемых с помощью этих средств, в сравнении с рекомендациями Международной комиссии по радиационным единицам (МКРЕ). Неопределенность распределения поглощенной дозы как функции линейной передачи энергии (ЛПЭ), измеряемая тканеэквивалентным пропорциональным счетчиком, оставляет открытым вопрос об уровне достоверности эквивалентной дозы H в поле частиц высоких энергий и промежуточных нейтронов. Установление точности результатов измерения H рекомбинационным дозиметром также нуждается в дальнейших исследованиях функции чувствительности прибора от ЛПЭ-излучения. Измерения энергетических распределений частиц дают возможность наиболее полно интерпретировать получаемые результаты, однако точность величин H существенно ниже рекомендуемых МКРЕ.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Some Aspects of Accelerator Radiation Dosimetry

Estimation of state of wide-spread methods and instruments for radiation protection purposes on accelerators of charged particles has been performed. It was based on reliability of results obtainable with these instruments in comparison with the recommendations of the International Commission on Radiation Units (ICRU). Uncertainty of absorbed dose distribution as a function of linear energy transfer (LET) measured by tissue-equivalent proportional counter leaves the problem of level of reliability of the dose equivalent in the field of high-energy particle and intermediate neutrons. Evaluating the accuracy of results of measurements by means of recombination dosimeter also needs further study on instrument responsibility versus LET-radiation. Measurement of particle energy distribution provides the possibility to interpret comprehensively obtained data, accuracy of H , however, being below the value recommended by ICRU.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

ВВЕДЕНИЕ

Достоверность измерения радиационных величин, предназначенных для установления степени радиационного риска, продолжает оставаться предметом многих работ. В соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиационным единицам /МКРЕ/^{1,2} точность определения эквивалентной дозы H , сопоставимой с предельно допустимыми величинами, составляет $\pm 30\%$.

При выполнении дозиметрического контроля, в частности, на ускорителях, возникает необходимость в ответах на следующие основные вопросы:

- В какой степени в настоящее время возможно следовать рекомендации МКРЕ о точности измерения эквивалентной дозы H ?

- Каким способом установить достоверность измерения H различными средствами?

- Какой метод измерения H может дать наиболее достоверные результаты и возможность более полной их интерпретации?

Последняя часть вопроса обусловлена необходимостью правильного осмысления результатов градуировки рабочих средств измерений эквивалентной дозы с помощью наиболее достоверных средств в типичных полях излучений ускорителей.

В настоящей работе предпринимается попытка найти ответы на поставленные вопросы путем рассмотрения состояния развития наиболее распространенных к настоящему времени методов и средств дозиметрии.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ЛИНЕЙНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Этот метод определения эквивалентной дозы реализуется с помощью сферического тканезквивалентного пропорционального счетчика ^{/3/} или в сочетании его с тканезквивалентной ионизационной камерой ^{/4/}. Методу измерения с помощью пропорционального счетчика присущ ряд особенностей:

- Допущение о постоянстве или незначительном изменении линейной передачи энергии /ЛПЭ/ по всей длине трека заряженной частицы внутри чувствительного объема счетчика ^{/5,6/}.

- Идеализация формы распределения амплитуд импульсов для данной ЛПЭ ^{/5,6/}.

- Сложность использования при фантомных измерениях ^{/2/}, которые необходимы в поле излучений высокой энергии и промежуточных нейтронов, для достижения рекомендуемой МКРЕ точности.

- Ограниченный динамический диапазон по мощности дозы ^{/2/}.

- Проблема правильной интерпретации результатов измерений при наличии неконтролируемых аппаратурных погрешностей, а также при длительных измерениях в отсутствие информации о компонентном и энергетическом составе излучений в точке измерения.

Остановимся кратко на первой особенности с целью оценить погрешности или рамки применимости метода.

Допущение о незначительном изменении ЛПЭ вдоль трека заряженной частицы сужает диапазон измерения по энергиям и компонентам излучения, либо вносит погрешности в результаты. Так, например, МКРЕ считает ^{/1,2/}, что сферический пропорциональный счетчик предназначен для абсолютных измерений поглощенной дозы быстрых нейтронов как функции ЛПЭ в диапазоне энергий от 0,2 до 14 МэВ; измеряемый диапазон ЛПЭ - от 3 до 100 кэВ/мкм. Сущность ограничения применимости счетчика по нижней границе энергии нейтронов заключается в том, что для значительной или основной

части протонов отдачи их пробеги соизмеримы или меньше средней хорды сферического счетчика. Игнорирование этого обстоятельства приводит к погрешностям; по данным работы ^{/7/} для нейтронов с энергией 50 кэВ ошибки измерения оцениваются фактором 2.

Рис. 1 иллюстрирует распределения поглощенной дозы по ЛПЭ при облучении тканезквивалентной среды нейтронами с энергией 2 МэВ ^{/8/}. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что спектр зависит от размеров выбранного объема. Более детальный анализ этого обстоятельства сделан в работе ^{/9/}; часть результатов из работы ^{/9/} представлена на рис. 2. Здесь \bar{Y} - среднее значение линейной энергии, определено как

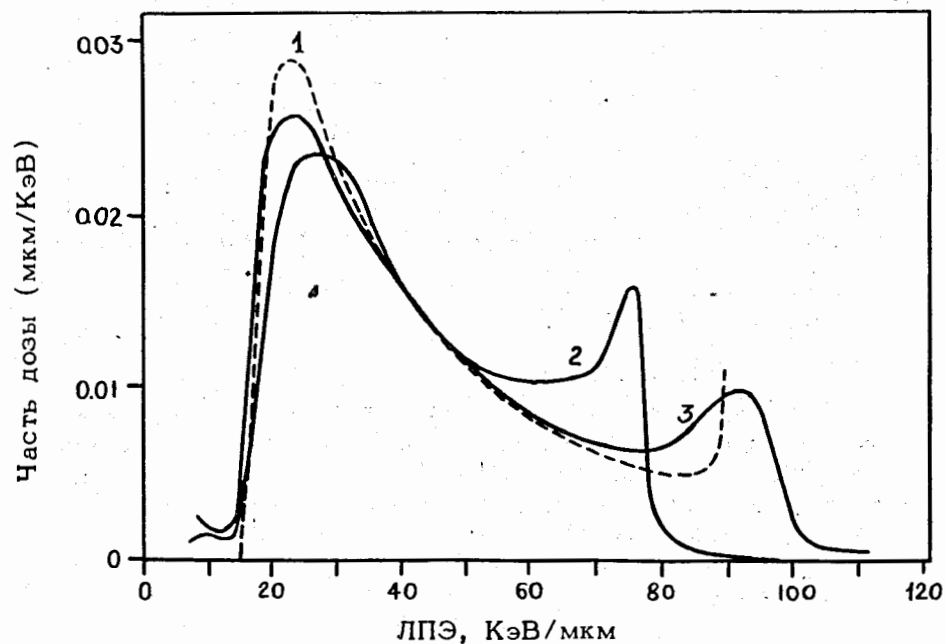


Рис. 1. Сравнение рассчитанных и измеренных зависимостей поглощенной дозы от ЛПЭ для нейтронов с энергией 2 МэВ в тканезквивалентной среде: 1 - расчет, 2 - эксперимент /диаметр сферы 3 мкм/; 3 - эксперимент /диаметр сферы 0,75 мкм/.

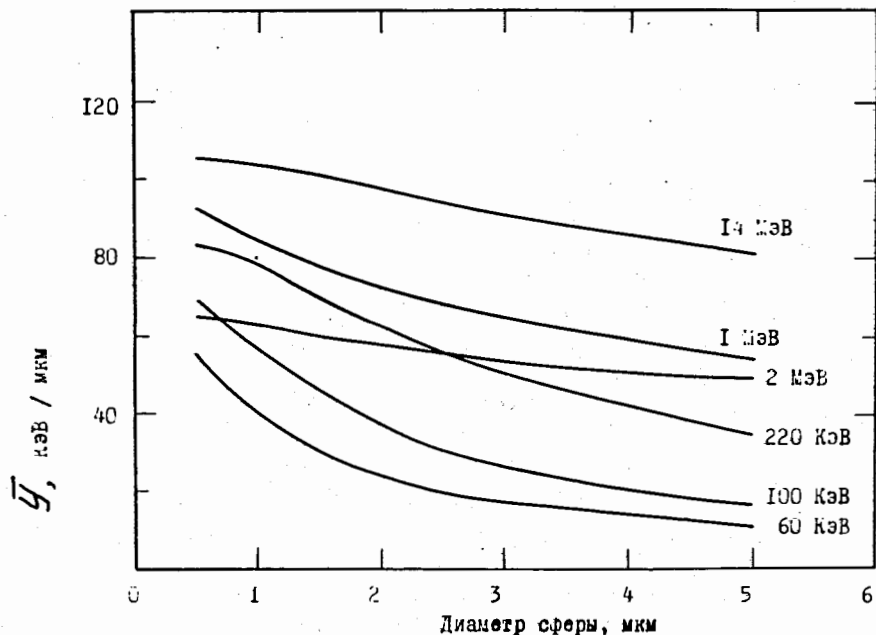


Рис. 2. Зависимость среднего значения линейной энергии \bar{Y} , взвешенной по переданной энергии, от диаметра сферического объема для различных энергий нейтронов.

$$\bar{Y} = \frac{\int_0^{\infty} y^2 f(y) dy}{\int_0^{\infty} y f(y) dy}, \quad /1/$$

где $y = E/\bar{d}$ - энергия, переданная в объеме маленькой сферы /счетчика/, которая выделена в тканезквивалентной среде, облучаемой нейтронами, \bar{d} - средняя хорда сферы; $f(y)$ - функция распределения величин y , нормированная так, что

$$\int_0^{\infty} f(y) dy = 1. \quad /2/$$

Как видно из рис. 2, зависимость \bar{Y} от диаметра сферы /счетчика/ имеет место в большей или меньшей степени для всех рассмотренных энергий нейтронов; наличие этой информации дает возможность оценить погрешности измерения распределения ЛПЭ и эквивалентной

дозы из-за изменения ЛПЭ вдоль трека в чувствительном объеме сферического счетчика. С ростом пробегов заряженных частиц изменения ЛПЭ вдоль трека становятся меньшими. Поэтому применимость счетчика для измерения эквивалентной дозы можно определять по соотношению диаметра счетчика и пробегов заряженных частиц в среде, в которой расположен чувствительный объем счетчика. Оценку применимости счетчика можно также делать по соотношению вклада стенки и газа счетчика в измеряемую величину; общие соображения об оценке вклада газа даны в работе^{/10/} в поле излучений ускорителей на высокие энергии до 80% эквивалентной дозы может быть обусловлено нейтронами высоких энергий $> 20 \text{ МэВ}$ /11,12/. Последние передают энергию ткани в значительной степени через тяжелые фрагменты ядерных расщеплений^{/13/} имеющих небольшие пробеги. В этой связи при измерении спектров ЛПЭ в поле излучения высоких энергий также могут иметь место существенные погрешности. Количественную оценку этих погрешностей оценить в настоящее время не представляется возможным из-за отсутствия доступных данных о спектрах замедляющихся заряженных частиц.

Таким образом, вопрос о достоверности измерения эквивалентной дозы с помощью пропорционального счетчика в поле излучения ускорителей нельзя считать решенным удовлетворительно. Об этом, на наш взгляд, говорят и результаты измерений дифференциальных распределений поглощенной дозы на протонном синхротроне^{/14/}, которые трудно понять и интерпретировать.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ И ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА КАЧЕСТВА РЕКОМБИНАЦИОННЫМ ДОЗИМЕТРОМ

Метод, как известно^{/15/}, основан на том, что в специально сконструированной тканезквивалентной ионизационной камере можно подобрать с помощью напряжения

на электродах такой режим рекомбинации ионов, который в сочетании с режимом насыщения дает возможность воспроизводить величины, близкие по своим значениям к коэффициенту качества при различных ЛПЭ. На рис. 3 сравниваются зависимости коэффициента качества и реакции такой дифференциальной камеры от ЛПЭ ¹⁶. Как видно из рисунка, при соответствующей градуировке можно получить удовлетворительное воспроизведение коэффициента качества с помощью дифференциальной рекомбинационной камеры; только в области низких ЛПЭ показания такого прибора существенно ниже рекомендуемых величин. В связи с тем, что кривая чувствительности камеры получена путем расчета и является, по мнению автора работы ¹⁶, предполагаемой, а градуировка камеры выполняется с источниками, имеющими в основном сплошной спектр ЛПЭ, целесообразна

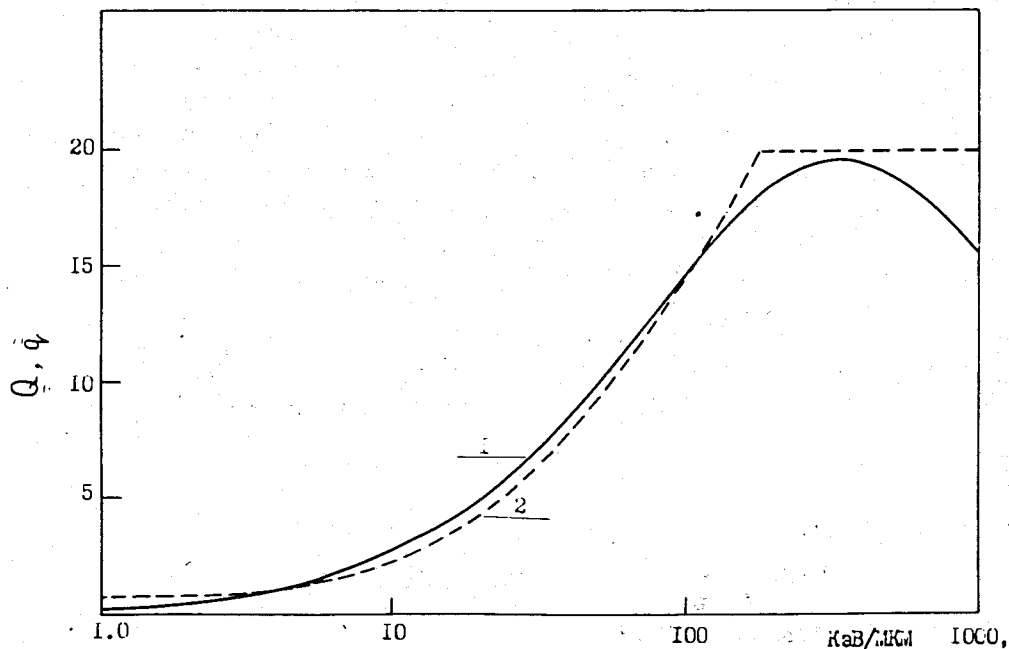


Рис. 3. Зависимости ожидаемой чувствительности рекомбинационной камеры q и коэффициента качества излучения Q от линейной передачи энергии: 1 - ожидаемая чувствительность, 2 - коэффициент качества.

дальнейшая проверка чувствительности как функции ЛПЭ для установления достоверности результатов. Уточнение функции чувствительности рекомбинационной камеры можно выполнить двумя путями. Первый предусматривает выполнение градуировки с моноэнергетическими пучками заряженных частиц, ЛПЭ которых практически не меняется по чувствительному объему камеры. Второй путь предусматривает применение для градуировки набора источников с различными, но известными спектрами ЛПЭ; решая систему уравнений Фредгольма, как это делается, например, при восстановлении спектров нейтронов ¹⁷, можно восстановить функцию чувствительности рекомбинационной камеры.

Как и в случае с пропорциональным счетчиком, применение рекомбинационной камеры для измерения максимальной эквивалентной дозы предполагает фантомные измерения. Это оказывается крайне затруднительным, а подчас и невозможным в настоящее время в поле излучения с уровнями порядка предельно допустимых величин, т.к. размеры камеры становятся соизмеримы с размерами фантома. Возможности интерпретации результатов измерений рекомбинационным дозиметром оказываются еще более ограниченными, чем пропорциональным счетчиком, т.к. результатами измерений являются интегральные величины - поглощенная доза и средний коэффициент качества.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ФЛЮЕНСА ЧАСТИЦ

В соответствии с определением ^{1,2}, эквивалентная доза излучений через энергетическое распределение флюенса заряженных частиц $\Phi_i(E)$ i -го сорта устанавливается с помощью следующего выражения:

$$H_i = \frac{c}{\rho} \int_0^{\infty} \Phi_i(E) L_{\infty, i}(E) Q_i(E) dE. \quad /3/$$

Здесь $\frac{c}{\rho} \Phi_i(E) L_{\infty,i}(E)$ - не что иное как дифференциальное распределение поглощенной дозы по энергии, ρ - плотность ткани, c - постоянная перехода от одних единиц энергии к другим.

Таким образом, измерив энергетические распределения различного сорта частиц, при наличии данных о $L_{\infty,i}$ можно установить значения N_i и их суммарную величину $N = \sum N_i$. При измерении Φ_i в воздухе значения N_i будут относиться лишь к маленькому кусочку ткани. Для определения максимальной эквивалентной дозы /МЭД/ необходимо измерить Φ_i в тканезквивалентном фантоме; при определенных условиях достаточной информацией для определения МЭД может быть спектрально-угловое распределение флюенса заряженных частиц в воздухе.

Описываемый метод измерения N практически не реализован из-за технических трудностей и, в частности, из-за того, что большая часть дозы, как правило, приходится на заряженные частицы с малыми пробегами.

Проще измерять энергетическое распределение проникающего излучения и, в частности, нейтронов, которые являются в большинстве случаев лидирующим компонентом, определяющим прохождение излучения в среде. При некоторых условиях информация о спектре лидирующего компонента /нейтронов/ за защитой дает возможность приближенно установить распределение эквивалентной дозы в фантоме и тем самым определить МЭД. Такими условиями являются:

- Наличие информации об угловом распределении нейтронов и условия облучения фантома.

- Наличие информации о глубинном распределении N для моноэнергетических нейтронов или коэффициентах перехода от флюенса нейтронов с данной энергией к МЭД; в последнем случае можно установить лишь верхний предел значения суммарной максимальной эквивалентной дозы.

- Выполнение неравенства $R \ll \lambda$, где R - пробег заряженных частиц, образуемых нейтронами, флюенс которых имеет длину релаксации λ в ткани. При $R \sim \lambda$

следует учитывать заряженные частицы, выходящие из защиты; в противном случае величина N будет искажена и, как правило, занижена. При этом следует иметь в виду, что установление дозы от нейтронов и заряженных частиц в одной и той же точке, где измерялись /или рассчитывались/ флюенсы этих компонентов, не имеет смысла. Это, в частности, важно при определении дозы в маленьком кусочке ткани или подобном ткани веществе /детектор излучения/. Последнее обстоятельство нередко игнорируется, что является причиной неправильной интерпретации получаемых результатов и предметом дискуссий.

Измерения спектров нейтронов, методика их восстановления и результаты, полученные на ускорителях, рассмотрены в работах /11,18/. Из этих работ можно заключить, что достоверность восстановления спектров нейтронов в настоящее время еще не отвечает рекомендациям по точности измерения эквивалентной дозы /1,2/. Дальнейшее улучшение степени достоверности энергетических распределений флюенса нейтронов может быть сделано, например, путем введения дополнительных детекторов в области быстрых нейтронов и частиц высоких энергий. Другой возможностью увеличить точность результатов измерений является введение дополнительной информации о поглощенной дозе, полученной с помощью тканезквивалентной ионизационной камеры. Достоверность поглощенной дозы, измеренной ионизационной камерой D_k , как правило, выше достоверности поглощенной дозы, установленной по спектру частиц; в этом случае спектр частиц может быть отнормирован по D_k , что приведет к улучшению точности N .

Все изложенные особенности и несовершенства метода в совокупности с результатами измерений показывают, что неопределенность установления поглощенной и эквивалентной доз, а также МЭД путем измерения и восстановления энергетических распределений флюенса частиц, видимо, несколько ниже, чем для пропорционального счетчика и рекомбинационного дозиметра. Однако решающим преимуществом первого является несравненно большая возможность интерпретации показаний

различных детекторов и приборов, применяемых и предназначенных для дозиметрии; основанием этому служит большой набор ядерно-физических констант, связанный с флюенсом частиц или с его функцией энергетического распределения.

4. РЕАКЦИЯ ДЕТЕКТОРОВ КАК МЕРА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ

Метод определения эквивалентной дозы путем измерения реакции одного или нескольких детекторов нашел наиболее широкое применение при контроле за радиационной обстановкой или степени облучения персонала. Успех реализации этого метода основан на удачном подборе детекторов, которые, как правило, должны отвечать следующим требованиям: простоте обращения, надежности воспроизведения данных, дешевизне, точности установления эквивалентной дозы при изменениях состава поля излучения.

Наибольшее распространение для контроля радиационной обстановки на ускорителях получили ионизационные камеры, детекторы медленных нейтронов в замедлителях и углеродсодержащий детектор, в котором используется реакция $^{12}\text{C}(\chi, \chi n)^{11}\text{C}$ для регистрации излучения типа χ .

Контроль степени облучения персонала нейтронами, а также частицами высоких энергий опирается на фотоэмульсионный метод /5.23,24/. В последние годы он частично вытесняется термолюминесцентным методом или методом, основанным на регистрации следов повреждений в тонких пленках из различных веществ /6.25/. Рассмотрим особенности применения этих детекторов и, в частности, вопросы градуировки и интерпретации их показаний.

Детекторы для контроля радиационной обстановки. В этом случае применяют, как правило, сочетание трех типов детекторов /19-22/, упомянутых выше. Ионизационные камеры служат для измерения поглощенной дозы гамма-излучения и заряженного компонента $D_{\gamma+z}$,

детектор тепловых и медленных нейтронов в замедлителе - для измерения эквивалентной дозы нейтронов с энергией до 10-15 МэВ N_n и углеродсодержащий детектор - для измерения эквивалентной дозы адронов N_a с энергией более 20 МэВ. При этом принимается, что полная эквивалентная доза является суммой этих трех компонентов:

$$H = D_{\gamma+z} + N_n + N_a \quad /4/$$

Степень приближения зависит в основном от трех факторов - поля излучения, средств измерения и градуировки средств измерения. Зависимость от поля излучения обусловлена главным образом отсутствием возможности выполнять фантомные измерения названными выше детекторами. Для того чтобы свести к минимуму неоднозначность интерпретации результатов измерения из-за этой причины, группа специалистов из нескольких центров выступила с предложением оценивать радиационный риск через эквивалентную дозу на поверхности фантома в условиях его двухстороннего облучения /26/, как следствие этого, - принимать коэффициенты перехода от флюенса нейтронов к эквивалентной дозе на поверхности фантома, как стандартные величины. Основанием для такого допущения является тот факт, что в большинстве случаев максимальная эквивалентная доза не превышает поверхностную дозу более чем на несколько десятков процентов /27/. Упрощая измерение H , этим предложением можно поставить под сомнение одну из основных рекомендаций МКРЕ об установлении радиационного риска через максимальную глубинную дозу в теле человека или в фантоме.

Наиболее совершенную форму, на наш взгляд, метод измерения эквивалентной дозы по трем компонентам приобрел в ЦЕРНе /21,22/. Достоверность метода и средств измерения может быть оценена с помощью данных табл. 1. При этом следует иметь в виду, что коэффициент перехода от флюенса адронов с энергией более 20 МэВ к эквивалентной дозе принимался равным $2,78 \cdot 10^{-8}$ бэр/адрон/см². Эта величина является

Таблица 1

Эквивалентная доза излучения, измеренная различными методами

№: ЦЕРБЕРУС III:	:Рекомендационная : камера		:Пропорциональный счетчик					
	$\frac{H(>20 \text{ МэВ})}{\text{в частях}}$	$\frac{H_{\gamma+\beta}}{H, \text{ мБэр/час}}$	Q	$\frac{H, \text{ мБэр/час}}$	Q			
1. 0,46	0,44	0,10	17,5±0,8	4,6±0,2	15,2±0,4	5,2±0,5	22,2±1,2	4,5±0,2
2. 0,35	0,54	0,11	38,0±1,5	4,0±0,2	36,5±0,4	5,6±0,5	47,0±1,6	4,5±0,1
3. <0,01	0,95	0,05	45,2±2,9	8,6±0,6	40,6±3,4	9,7±0,5	34,9±0,7	7,6±0,2
4. 0,06	0,75	0,19	22,8±1,3	3,4±0,2	17,0±1,1	3,4±0,9	15,3±0,5	2,2±0,1

наименьшей из принятых в различных лабораториях коэффициентов перехода ²⁸/табл. 2/. Правильный выбор коэффициентов перехода от флюенса адронов с энергией более 20 МэВ к Н /E > 20 МэВ/ может быть сделан лишь при градуировке данной системы детекторов в поле излучения с известным глубинным распре-

Таблица 2

Коэффициенты перехода К от флюенса к эквивалентной дозе для углерода.

№ Организации, III условия	К		
	$10^8 \text{ бэр/адрон/см}^2$	$\frac{\text{мБэр/адрон}}{\text{час см}^2 \text{с}}$	
1. Рекомендация МКРЗ для нейтронов 400 МэВ	6,94	0,25	
2. Лаборатория им. Резерфорда	7,72	0,28	
3. Брукхейвенская национальная лаборатория	6,94	0,25	
4. ИЭВЭ, Серпухов	6,46	0,23	
5. ОИИ, Дубна	5,05	0,18	
6. ЦЕРН	принято	2,78	
	измерено	1,74±0,99	0,05±0,14
	\bar{K}	2,78	0,10
7. ОК - Ридж			
расчет для нейтронов 400 МэВ	5,32	0,19	

делением эквивалентной дозы. Измерения этого коэффициента в условиях, близких к условиям на поверхности фантома, дают величины, среднее значение которых

$\sim 0,1 \frac{\text{мБэр/ч}}{\text{нейтрон/см}^2 \text{с}}$ Эта величина несколько меньше величины поверхностной дозы, которую можно ожидать

на основе данных о глубинных распределениях N для моноэнергетических нейтронов $^{29/}$ в случае типичных спектров за защитой ускорителей /см., напр., $^{11/}$.

Сравнения средств дозиметрии, выполненные недавно $^{12/}$ в Беркли и Стенфорде, показали, что величина эквивалентной дозы, измеренная различными средствами, отличается до ~2,5 раз. В той же работе отмечено, что коэффициенты качества излучения, измеренные на протонном синхротроне в Брукхейвене, отличаются друг от друга на 50% или более.

Детекторы для индивидуального контроля. В этой области дозиметрии наибольшее распространение получили детекторы на основе ядерных эмульсий - ИФКн $^{24,30/}$, термолюминесцентные детекторы ТЛД $^{6,25/}$ и детекторы следов радиационных повреждений ДСРП $^{6,25/}$ На рис.4

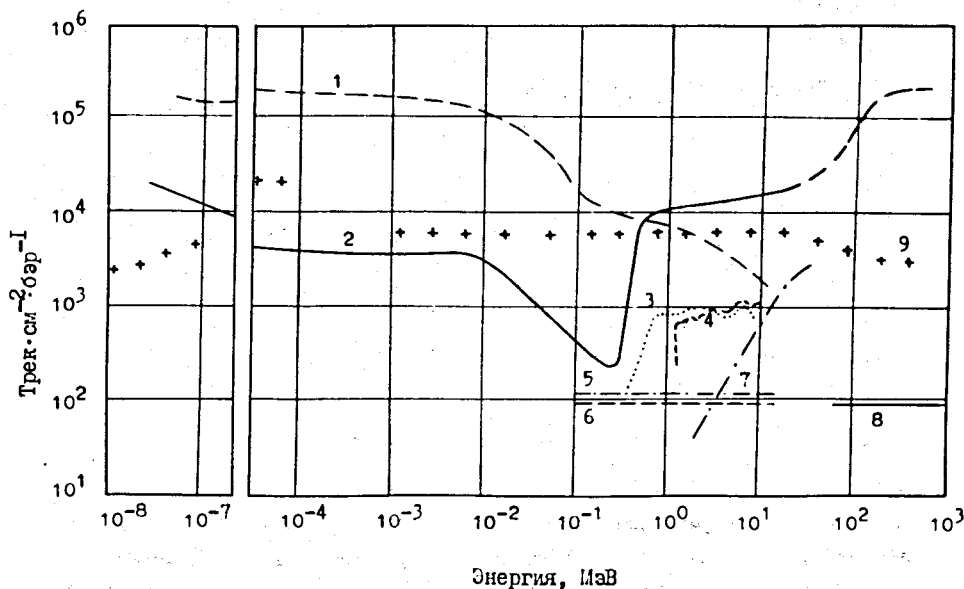


Рис. 4. Функции чувствительности детекторов: 1 - ^6LiF , 2 - ИФКн, 3 - ^{237}Np , 4 - ^{232}Th , 5 - ^7Li /средняя/, 6 - ^{232}Th /средняя/, 7 - ^7LiF , 8 - Bi , 9 - система дозиметров альбедного типа.

сравниваются чувствительности всех трех типов детекторов. Чувствительность термолюминесцентного детектора нейтронов ^6Li альбедного типа /кривая 1/ заимствована из работы $^{31/}$ при энергиях менее 1 МэВ, а при больших энергиях - из работы $^{32/}$. Функция чувствительности детектора ИФКн /кривая 2/ до энергии 14 МэВ описана в работе $^{24/}$, а свыше 14 МэВ - результат оценки на основе данных $^{33/}$. Кривые 3,4 и 7 заимствованы из $^{5/}$ и $^{34/}$, соответственно. Чувствительность ТЛД выражали в числе "эквивалентных треков" на единицу площади и на 1 бэр. Эквивалентность устанавливали, исходя из того, что минимальная эквивалентная доза, измеряемая ИФКн, - 20 мбэр, а минимальная поглощенная доза гамма-излучения, измеряемая ТЛД, - 10 мрад при чувствительности к тепловым нейтронам 80 Р/бэр. Данные, представленные цифрами 5,6,8, выражают отношения плотностей следов повреждений в пленках при использовании радиаторов из ^7Li , ^{232}Th , соответственно, к эквивалентной дозе быстрых нейтронов /линии 5 и 6/ и эквивалентной дозе нейтронов с энергией более 20 МэВ /линия 8/ $^{35/}$. Кривая 9 до энергии 14 МэВ заимствована из работы $^{36/}$, а свыше 14 МэВ - результат оценки на основе данных работы $^{37/}$.

Данные рис. 4 свидетельствуют о том, что ни один отдельно взятый детектор не обладает удовлетворительной функцией чувствительности. Лишь их сочетание, возможно, решит проблему измерения индивидуальной дозы нейтронов с рекомендуемой точностью $^{2/}$ и достаточной чувствительностью. На наш взгляд, перспективным является сочетание пары ^6Li , ^7Li с ядерной фотозмульсией в одном дозиметре. Снятием показаний только с пары ТЛД можно ограничиться при дозах, меньших предельно допустимых величин, т.к. рекомендуемая точность при этом невысока $^{2/}$. При дозах, сравнимых с предельно допустимыми или выше, установление их величин необходимо проводить по данным, считываемым как с фотозмульсии $^{22,36,37/}$, так и с ТЛД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Состояние развития наиболее распространенных методов и средств дозиметрии излучений на ускорителях, кратко рассмотренное в настоящей работе, позволяет сделать следующие выводы.

Точность измерения величин эквивалентной дозы, достигнутая в настоящее время, ниже величин, рекомендованных МКРЕ, в полях излучений, где эквивалентная доза сопоставима с предельно допустимыми величинами. Это приводит к необходимости совершенствовать методы и средства измерения с целью повышения достоверности результатов. Уровень достоверности в настоящее время оценивают путем сличения результатов, полученных различными методами и средствами, при этом само сличение является способом повышения точности измерений. О полях излучений, в которых проводят сличения, не имеется достаточной информации для правильной и однозначной интерпретации результатов. В этой связи представляется целесообразным создание эталонного источника излучений с энергиями частиц и квантов по крайней мере до сотен МэВ с известным энергетическим и угловым разрешением флюенса. Такой источник мог бы стать основой стандартизации в дозиметрии излучений на ускорителях. Вряд ли без такого источника можно указать на метод или средства, с помощью которых можно наиболее точно измерять эквивалентную и поглощенную дозы.

Автор весьма признателен В.И.Иванову, В.Е.Алейникову и М.И.Салацкой за полезные советы и замечания при подготовке настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Radiation Quantities and Units. ICRU Report 19, and Radiation Protection Instrumentation and its Application, ICRU Report 20, 1971.*
2. *Радиационная безопасность. Величины, единицы, методы и приборы. Под ред. И.Б.Кеурим-Маркуса. Атомиздат, М., 1974.*

3. Rossi H.H., Rosenzweig W. *Radiology, 1955, 64, p.404; Radiation res., 1955, 2, p.417.*
4. Яновский А.П. и др. *Измерительная техника, 1976, №3, с.53.*
5. Patterson H.W., Thomas R.H. *Accelerator Health Physics. Academic Press, New York and London, 1973.*
6. Иванов В.И. *Курс дозиметрии. Атомиздат, М., 1970.*
7. Baum J.W. e.a. *Health Phys., 1970, 19, p.813.*
8. Rossi H.H. *Nucl. News, 1971, 14, 11, p.53.*
9. Caswell R.S., Coyne J.J. *Proc. of the "First Symposium on Neutron Dosimetry and Biology and Medicine". Part 1, EUR 4869, d-f-e, Luxemburg, 1972.*
10. Аглинцев К.К. *Дозиметрия ионизирующих излучений. Госиздат, М., 1957.*
11. Алейников В.Е. и др. *ОИЯИ, Р16-9870, Дубна, 1976.*
12. McCaslin J.B. e.a. *Preprint LBL-5265, Berkeley, 1976.*
13. Alsmiller R.G. e.a. *Nucl. Science and Engin., 1970, 42, p.367.*
14. Golovachik V.T. e. *Proc. of the "International Conference on Protection Against Accelerator and Space Radiation". CERN, Geneva, Switzerland, April 26-30, 1971. CERN 71-16, 1971, p.431.*
15. Zielczynski M. *"Neutron Dosimetry", part II, IAEA, 1963, p.397.*
16. Sullivan A.H. *In^{14/} p. 415.*
17. Алейников В.Е. и др. *В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, "Наука", М., 1975, т.2, с.240.*
18. Thomas R.H. *"Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes". Proc. of a Symposium, Vienna, 11-15 December, 1972. IAEA, 1973, p.327.*
19. Алейников В.Е. и др. *В работе^{18/} т.2, с.363.*
20. Бородин В.Е. и др. *Сообщение ИФВЭ, ОРИ 74-131, Серпухов, 1974.*
21. Sullivan A.H. *"Second International Conference on Accelerator Dosimetry and Experience". SLAC, Stanford, California, November 5-7, 1969, CONF-691101, USA, p. 625.*
22. Hofert M., Nielsen M. *Intern. Report. HP-75-142, CERN, Geneva, 1975.*
23. Комочков М.М., Салацкая М.И. *В работе^{17/}, с. 215.*
24. Комочков М.М., Салацкая М.И. *ОИЯИ, Р16-9780, Дубна, 1976.*
25. Becker K. *Solid State Dosimetry. CRC Press, Cleveland, Ohio, 1973.*

26. Stevenson G.R. e.a. In ¹⁸ v. 1, p.177.
27. Shaw K.B. e.a. Health Phys., 1969, 17, p.459.
28. Hofert M. e.a. Preprint CERN HS/HP/003, Geneva, 1976.
29. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 21, Pergamon Press, Oxford, 1971.
30. Krishnamoorthy P.H. e.a. In ¹⁸ v. 2, p.343.
31. Harvey J.R. e.a. In ¹⁸ v. 2, p.199.
32. Alsmiller R.G., Jr., Barish J. Health Phys., 1974, 26, p.13.
33. Алейников В.Е. и др. В работе ^{14/} с. 282.
34. Momeni M.H. Health Phys., 1974, 27, p.217.
35. Tymons B.J. e.a. Report DI/HP/168, CERN, Geneva, 1973.
36. Piesch E., Burghardt B. In ¹⁸ v. 2, p.31.
37. Hofert M. e.a. Report CERN, HS/HP/004, Geneva, 1976.
38. Бискупчук А.М. и др. Препринт ИФВЭ ЛРИ 76-136, Серпухов, 1976.
39. Комочков М.М. и др. ОИЯИ, 13-10188, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 мая 1977 года.