

C349
3-507



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

М. Зельчинский

1374

РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ
ПРОНИКАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1963

С 349

3-507

РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ
ПРОНИКАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1772
вр.
Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Основными факторами, характеризующими вредное действие проникающего излучения, являются энергия, поглощенная в единице массы ткани, и относительная биологическая эффективность (ОБЭ) излучения. Энергия излучения, поглощенная в одном грамме вещества (т.е. поглощенная доза излучения), измеряется в радах и может быть определена для смешанного (многокомпонентного) проникающего излучения широкого спектра с помощью ионизационных или калориметрических методов. Для определения ОБЭ Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) рекомендует исходить из линейной потери энергии (ЛПЭ) вдоль треков частиц в ткани^{/1/}. Определяемый таким образом коэффициент назван рекомендованной ОБЭ^{/2/}. Зависимость рекомендованной ОБЭ, η , от ЛПЭ, θ , можно приблизительно аппроксимировать уравнением:

$$\eta = \frac{(1 + a) \theta^*}{1 + a \theta^*} \quad \text{при } \theta^* \geq 1, \quad (1)$$

где $\theta^* = \theta / \theta_0$ - относительная ЛПЭ,

$\theta_0 = 3,5$ кэВ/мк,

$a = 0,038$ - постоянная.

Для определения рекомендованной ОБЭ в полях смешанного проникающего излучения обычно бывает недостаточно одного измерения - следует либо определить состав и спектр излучения; либо найти распределение ионизации, производимой излучением, по ЛПЭ^{/3/}. В ряде случаев, например в дозиметрии излучения ускорителей высоких энергий, состав и спектр рассеянного излучения настолько сложен и непостоянен, что не представляется возможным производить длительные сложные измерения спектра, а приходится пользоваться некоторым постоянным заведомо завышенным значением ОБЭ, что приводит к излишним ограничениям в допустимом рабочем времени.

В диссертации рассматривается ряд физических процессов, зависящих от ЛПЭ. Показывается возможность определения рекомендованной ОБЭ, не прибегая к измерениям спектра. Для практического использования как наиболее подходящее избрано явление колонной рекомбинации в газе тканеэквивалентной ионизационной камеры.

Заряженные частицы, поступающие в камеру или возникающие в камере в процессе облучения, оставляют вдоль своих треков колонки или сгустки ионизированных молекул. При достаточно высокой напряженности электрического поля все ионы собираются электродами камеры. Если же напряженность поля невелика - часть ионов успевает рекомбинировать. При повышенном давлении у многих газов

рекомбинация наступает в основном между ионами, принадлежащими одной колонке или ступке. Этот тип рекомбинации называется колонной рекомбинацией. Эффективность собирания ионов, т.е. отношение тока ионизационной камеры к току насыщения в случае колонной рекомбинации не зависит от мощности поглощенной дозы, но зависит от ЛПЭ частиц. Эту особенность используем для определения ЛПЭ и рекомендованной ОБЭ ионизирующих частиц. Соответственно преобразуя теоретическую формулу Яффе^{/4/}, можно выразить эффективность собирания ионов f в случае колонной рекомбинации как:

$$f = \frac{1}{1 + m\theta^*}, \quad (2)$$

где m — коэффициент, зависящий от параметров газа и от напряженности электрического поля.

Определим условия, при которых измеренная эффективность собирания ионов однозначно соответствует рекомендованной ОБЭ смешанного излучения.

Пусть дано некоторое распределение дозы, поглощенной в тканеэквивалентной ионизационной камере, по ЛПЭ ионизирующих частиц, $\delta(\theta)$. Примем, что энергия, идущая на образование одной пары ионов, постоянна. Тогда распределение заряда $q(\theta)$, образованного частицами с различной удельной ионизацией, будет пропорционально распределению поглощенной дозы:

$$q(\theta) = k\delta(\theta),$$

и соответственно полный заряд в камере Q пропорционален поглощенной дозе:

$$Q = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} q(\theta) d\theta = kD,$$

где D — поглощенная доза, k — коэффициент пропорциональности, θ_{\min} и θ_{\max} — соответственно минимальная и максимальная удельные ионизации в спектре ионизирующих частиц. В дальнейшем пределы интегрирования будут опускаться. Если рекомбинация ионов в камере колонная, то заряд, собранный электродами камеры, представится как

$$Q' = \int f(\theta) q(\theta) d\theta,$$

где $f(\theta)$ — эффективность собирания ионов из колонок с удельной ионизацией θ .

Измеренная эффективность собирания данного смешанного излучения:

$$f = \frac{Q'}{Q} = \frac{\int f(\theta) \delta(\theta) d\theta}{\int \delta(\theta) d\theta}. \quad (3)$$

Соответствующая этой эффективности собирания ионов средняя удельная ионизация может быть определена из уравнения (2) и подставлена в уравнение (1):

$$\eta' = \frac{(1-f)(1+a)}{mf + a(1-f)}. \quad (4)$$

Мерой биологической опасности является так называемая биодоза D_6 . Согласно рекомендациям МКРЗ, биодоза смешанного излучения определяется суммой произведений поглощенных доз на соответствующие ОБЭ:

$$D_6 = \int \delta(\theta) \eta(\theta) d\theta,$$

а относительная биологическая эффективность смешанного излучения

$$\eta = \frac{D_6}{D} = \frac{\int \delta(\theta) \eta(\theta) d\theta}{\int \delta(\theta) d\theta}. \quad (5)$$

Для того, чтобы измеримая величина η' (4) была равна искомой рекомендованной ОБЭ η (5) для любого спектра $\delta(\theta)$, должно выполняться тождество:

$$\frac{\int \frac{\theta}{1+a\theta} \delta(\theta) d\theta}{\int \delta(\theta) d\theta} = \frac{\int \frac{\theta}{1+m\theta} \delta(\theta) d\theta}{\int \frac{1+a\theta}{1+m\theta} \delta(\theta) d\theta}. \quad (6)$$

Это уравнение тождественно выполняется при $m = a$. При этом

$$\eta = M(1-f), \quad (7)$$

где $M = \frac{a+1}{a} = 27$.

Выполнение требования $m = a$ не представляет трудностей, так как m изменяется от 0 до ∞ при изменении напряженности электрического поля. Существует такая напряженность поля, при которой рекомендованная ОБЭ смешанного проникающего излучения пропорциональна относительному количеству ионов, рекомбинирующих в колонках в газе тканеэквивалентной ионизационной камеры, независимо от состава и спектра ионизирующих частиц. Величина этой напряженности может быть найдена экспериментальным путем, при облучении камеры потоками частиц, создающих различный, но известный спектр ЛПЭ.

Экспериментально проверка возможности использования изложенного принципа в дозиметрии проникающего излучения производилась с помощью двойной ионизационной камеры (рис. 1), наполненной смесью пропан-бутан-воздух. Давление смеси 5 атмосфер. Пропорция смеси, чистота газа и давление не являются критичными для создания условий колонной рекомбинации. Газ, наполняющий камеру, должен иметь относительно невысокий коэффициент диффузии, должен легко образовывать отрицательные ионы и быть достаточно тканеэквивалентным. Одновременно используются 5 электродов камеры для полного собирания ионов и 5 других электродов для собирания ионов в режиме рекомбинации (в ненасыщенном режиме). Одновременность измерений позволяет определять ЛПЭ излучения, интенсивность которого непостоянна во времени.

На рис. 2 представлены характеристики эффективности собирания ионов в описанной камере для нескольких различных излучений. Независимость от мощности дозы и различие эффективности собирания ионов от ЛПЭ излучения свидетельствует о преобладании колонной рекомбинации. Спад характеристики при больших мощностях поглощенной дозы свидетельствует о наличии в этой области рекомбинации ионов, принадлежащих разным колонкам, т.е. о наличии объемной рекомбинации. Этот фактор ограничивает применение рекомбинационного метода при мощностях поглощенной дозы, превышающих несколько рад/час.

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость отношения токов камеры от рекомендованной ОБЭ излучения. Линейность режима, т.е. выполнение требования $\eta' = \eta$ для смешанного излучения, удовлетворительна и имеет место при напряженности электрического поля $E = 75$ в/см. Вольтамперные характеристики камеры представлены на рис. 4. Сравним характеристики 3 и 2, снятые для нейтронного излучения и смешанного $\alpha + \gamma$ излучения. Оба типа излучений имеют одинаковую рекомендованную ОБЭ. Эффективность собирания ионов в линейном режиме (при $E = 75$ в/см) тоже одинакова для обоих излучений. Однако в нелинейной области рекомбинации ($E \neq 75$ в/см) характеристики расходятся. Этот факт можно использовать для определения вклада в дозу отдельных компонент смешанного излучения.

В диссертации рассмотрены способы применения рекомбинационного метода в различных условиях облучения^{15/}. Приводятся результаты измерений радиационной опасности на пучках^{16/} и в поле рассеянного излучения ускорителей Объединенного института ядерных исследований. Производится анализ ошибок и ограничений метода^{17/}. Величина общей ошибки в определении рекомендованной ОБЭ оценивается в 30%, ошибка в определении поглощенной дозы - 25% (в поле смешанного проникающего излучения неизвестного состава и спектра).

Установка для определения радиационной опасности, использующая рекомбинационный метод, состоит из двойной тканезквивалентной ионизационной камеры, двухканального электрометра, дифференциального вольтметра и схемы деления напряжений. Ток камеры, работающей в режиме насыщения, измеряется электрометром и является мерой мощности поглощенной дозы. Разность измеряемых токов является мерой количества рекомбинирующих ионов и, в случае линейности режима, пропорциональна мощности биодозы излучения. Отношение токов является мерой рекомендованной ОБЭ.

Рекомбинационный метод по сравнению с другими методами определения радиационной опасности имеет следующие преимущества:

1) определение радиационной опасности смешанного проникающего излучения с помощью единого датчика;

- 2) неограниченность верхнего предела энергии измеряемого излучения;
- 3) непосредственный отсчет биодозы;
- 4) непосредственный отсчет рекомендованной ОБЭ;
- 5) возможность непрерывного контроля радиационной опасности излучения, количественно и качественно изменяющегося во времени;
- 6) значительное сокращение времени (по сравнению с другими методами), требуемого для определения радиационной опасности излучения с неизвестным составом и спектром;
- 7) возможность оценки распределения дозы по ЛПЭ частиц;
- 8) простота, относительно малые габариты и относительно низкая стоимость используемой аппаратуры.

В качестве недостатков метода следует отметить:

- 1) сравнительно узкий диапазон мощности дозы, при которой рекомбинационный метод может применяться;
- 2) недостаточно высокую точность;
- 3) невозможность определения поверхностной биодозы, что ограничивает применение метода для определения радиационной опасности малопроникающей радиации;
- 4) высокие требования к стабильности питающих напряжений и измерительных цепей.

В диссертации рассмотрены пути к частичному устранению вышеизложенных недостатков.

В настоящее время применение рекомбинационной методики целесообразно: 1) в дозиметрии излучения ускорителей высоких энергий; 2) при определении радиационной опасности новых, неисследованных источников радиации; 3) при определении глубинной рекомендованной ОБЭ как в пучках известных частиц, так и для пучков неизвестного состава; 4) при измерении биодозы излучения, состав и спектр которого не определен или непостоянен во времени (например, при запуске реакторов, при наладке ускорителей и т.п.).

Л и т е р а т у р а ^{х)}

1. Рекомендации Международной комиссии по защите от излучений. ИЛ, Москва, 1958.
2. М.Зельчинский. Ожидаемая относительная биологическая эффективность излучения и способы ее определения. "Радиобиология" (в печати).
3. H.H. Rossi. Specification of Radiation Quality. Rad. Res., 10, N5, 522 (1959).
4. G. Jaffe. Physic. Zs., 30, 849 (1929).
5. М. Зельчинский. Рекомбинационный метод определения линейного переноса энергии (ЛПЭ) смешанного излучения. Доклады Международного симпозиума по детекции, дозиметрии и стандартизации нейтронов. Доклад SM-36/14. Харуэлл, 1962.
6. М. Зельчинский. Экспериментальное определение рекомендованной относительной биологической эффективности нейтронов высоких энергий. Доклад на Международном симпозиуме по биологическому действию нейтронов. Вена, 1963.
7. М. Зельчинский. Использование явления колонной рекомбинации для определения относительной биологической эффективности излучения. Nukleonika, 7, N3, 175 (1962).

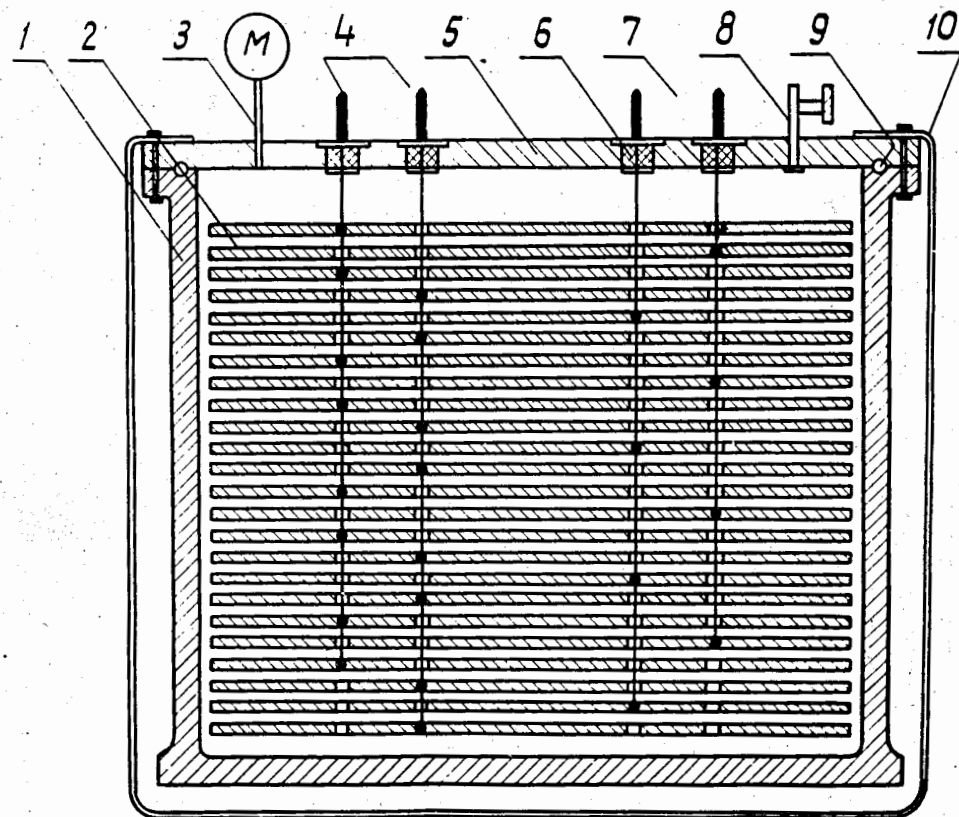


Рис. 1. Схематическое изображение двойной рекомбинационной камеры.
 1 - стенка камеры, оргстекло; 2 - электроды, оргстекло; 3 - манометр;
 4 - выводы питающих электродов; 5 - крышка; 6 - изоляторы, фторопласт;
 7 - выводы измерительных электродов; 8 - впускной кран; 9 - уплотнение,
 резина; 10 - защитный кожух безопасности.

^{х)} Основное содержание диссертации опубликовано в работах ^{15/} и ^{17/}.
 Авторское свидетельство по теме диссертации: класс 21g 1801, 1963 г.
 (М. Зельчинский, Способ определения эффективной удельной ионизации излучения).

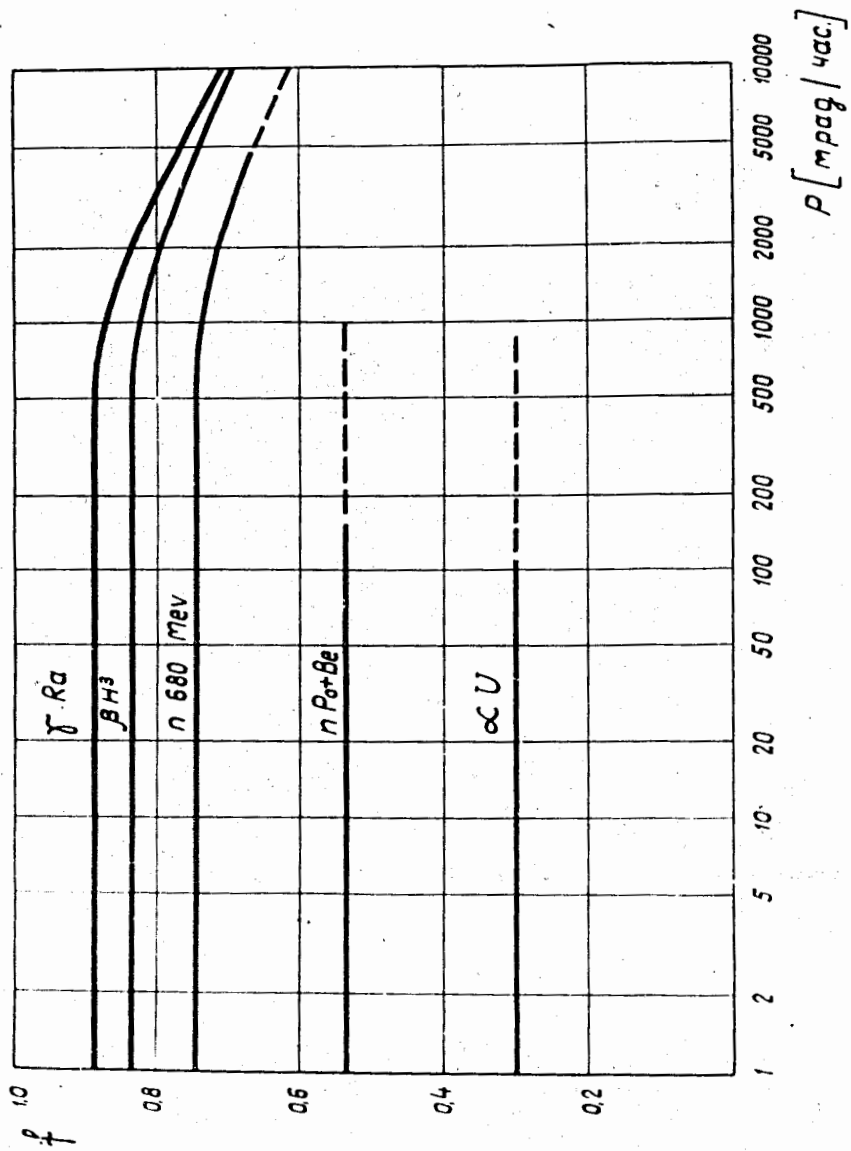


Рис. 2. Эффективность собирания ионов в рекомбинационной камере при напряженности поля 10 в/см, как функция мощности дозы излучения.

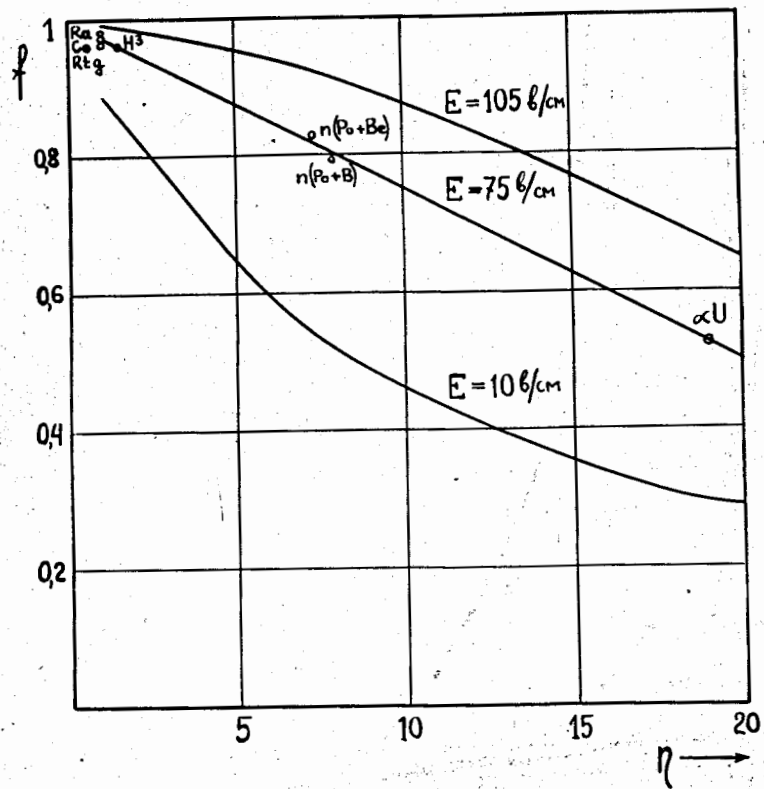


Рис. 3. Экспериментальная зависимость эффективности собирания ионов от рекомендованной ОБЭ ионизирующих частиц.

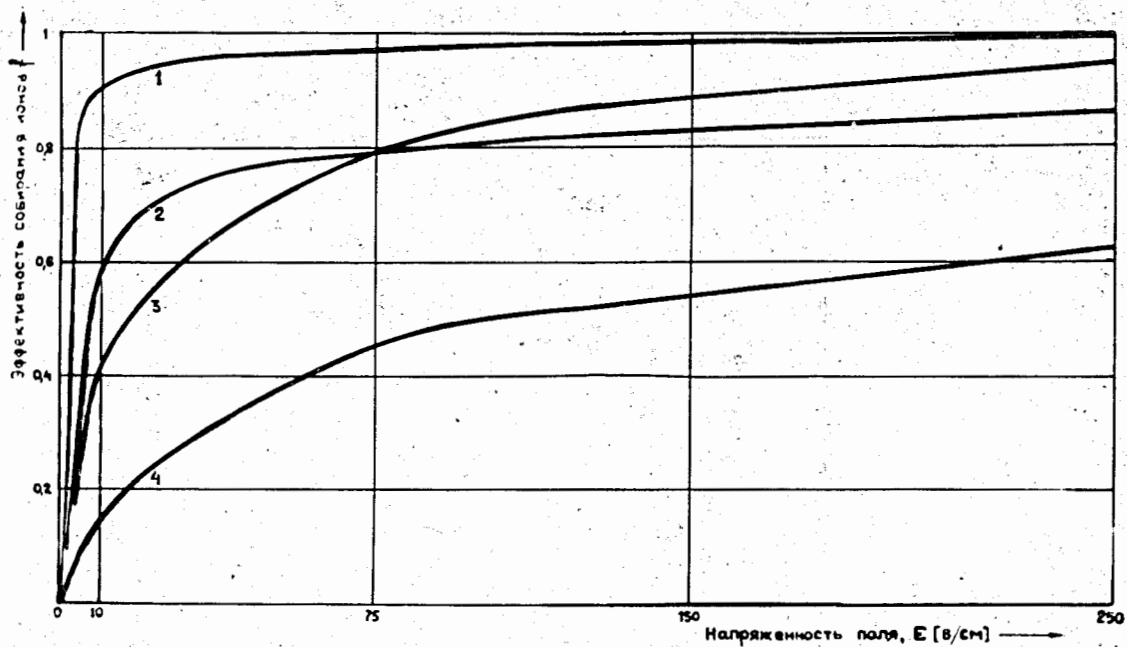


Рис. 4. Вольтамперные характеристики камеры.

1) γ - излучение ($\eta = 1$); 2) $\alpha + \gamma$ - излучение ($\eta = 7,3$); 3) нейтронное излучение ($\eta = 7,3$); 4) α - излучение ($\eta = 19$).