

P16-2010-38

М. А. Грызинский*, Н. Гольник*, М. Зельчинский*,
А. Г. Молоканов, С. В. Швидкий

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
КАЧЕСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОТОННОМ ПУЧКЕ
С ПОМОЩЬЮ РЕКОМБИНАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

*Институт атомной энергии, Отвоцк-Сверк, Польша

Грызинский М. А. и др.

P16-2010-38

Определение коэффициента качества излучения
в протонном пучке с помощью рекомбинационной камеры

Параметры качества излучения в реальных условиях протонной лучевой терапии, а также вклад частиц с высокими значениями линейной передачи энергии (ЛПЭ) в дозиметрические характеристики клинических протонных пучков с энергией 170 МэВ экспериментально изучались с использованием ионизационной рекомбинационной камеры типа KR-13. Электроды этой камеры изготовлены из тканеэквивалентного материала, содержащего по весу 10,5 % водорода, 86 % углерода и 3,5 % азота, газ наполнения — этан под давлением 0,7 МПа.

Определен вклад частиц с высокой ЛПЭ в поглощенную дозу в пучке протонов. Этот вклад составляет $d_2 = (30,8 \pm 3) \%$ в расширенном пике Брэгга.

Коэффициент качества излучения в области пика Брэгга составил $Q = (4 \pm 0,4)$ и $(1,6 \pm 0,2)$ Зв/Гр на входе пучка.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Gryzinski M. A. et al.

P16-2010-38

Determination of the Radiation Quality Factor
at the Proton Beam with a Recombination Chamber

Radiation quality factor at the real session on proton therapy and the contribution of the high LET particles to dosimetric characteristics of the 170 MeV clinical proton beam were experimentally studied using ionization recombination chamber KR-13. Chamber electrodes were elaborated of tissue-equivalent material containing 10.5% hydrogen, 86% carbon and 3.5% nitrogen in weight filled with ethane at pressure of 0.7 MPa.

The contribution of high LET particles to absorbed dose has been determined. It was $d_2 = (30.8 \pm 3)\%$ in the spread out Bragg peak.

Radiation quality factor in the region of the Bragg peak was $Q = (4 \pm 0.4)$ Sv/Gy and at the entrance was $Q = (1.6 \pm 0.2)$ Sv/Gy.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Поглощенная доза в опухоли и в окружающих тканях является наиболее важным дозиметрическим параметром при лучевой терапии. В кабине протонной лучевой терапии ЛЯП ОИЯИ поглощенная доза обычно определяется с помощью ионизационной камеры, наполненной атмосферным воздухом. Для определения воздействия протонного пучка на клетки необходимо учитывать особенности воздействия излучения с высоким значением линейной передачи энергии (ЛПЭ) [1, 6].

В данной работе в качестве детектора поглощенной дозы была использована ионизационная рекомбинационная камера типа KR-13 [2] с электродами, изготовленными из тканеэквивалентного материала, содержащего по весу 10,5 % водорода, 86 % углерода и 3,5 % азота, наполненная этаном (20 % водорода, 80 % углерода) под давлением 0,7 МПа. Тканеэквивалентность камеры позволяет избежать или, по крайней мере, значительно уменьшить ошибку измерения дозы за счет недостаточного содержания водорода в стенках и в газе стандартно применяемой ионизационной камеры по сравнению с процентным содержанием водорода в ткани. Это касается, прежде всего, составляющей дозы, формируемой нейтронами, вкладом которых нельзя пренебречь, особенно в пике Брэгга и за пиком. Рекомбинационная камера позволяет определить энергию ионообразования W в газе камеры в конкретной точке исследуемого поля излучения, что также способствует повышению точности определения поглощенной дозы. Энергия ионообразования (точнее, отношение энергии ионообразования в исследуемом поле излучения к энергии ионообразования в поле стандартного гамма-излучения, в котором проводится градуировка камеры, W_γ) является функцией параметров качества излучения, определяемых отношением токов рекомбинационной камеры при нескольких (минимум двух) значениях напряжения, прикладываемого к камере [1, 3, 4].

Определение параметров качества излучения при лучевой терапии важно не только для определения более точного значения энергии ионообразования или значения некоторых других дозиметрических величин [4], но и потому, что параметры качества излучения связаны с относительной биологической эффективностью (ОБЭ) излучения и, если имеется достаточно данных, могут позволить предсказать ОБЭ для конкретных облучений.

Целью работы является определение тканевой дозы и параметров качества излучения в реальных условиях лучевой терапии протонами с энергией 170 МэВ, проводимой в настоящее время на фазотроне ЛЯП ОИЯИ.

1. ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ

В данной работе под термином «параметры качества излучения» понимаются физические величины, независимые от мощности дозы, а зависящие от распределения ионизации и поглощенной энергии в микрообъемах вдоль треков ионизирующих частиц. Одним из таких параметров является неограниченная ЛПЭ (L_∞, L), посредством которой определяется коэффициент качества излучения (Q), используемый при рассмотрении радиационной вредности излучения при малых дозах.

Не менее важными параметрами качества излучения являются:

- ограниченная ЛПЭ (L_Δ), относящаяся к отдельному треку, и ее средние значения ($L_{\Delta T}, L_{\Delta D}$ — трековая и дозовая) для всех треков;
- линейная (ограниченная и неограниченная) плотность ионизации (v);
- линейная энергия (y_d);
- функция близости (T_x) [5];
- эффективное расстояние между положительными и отрицательными ионами в треке.

Ряд параметров качества, определяемых с помощью рекомбинационных методов, рассматривается в следующем разделе.

2. РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

Дозиметрические рекомбинационные методы определения параметров качества и эквивалентной дозы излучения основаны на использовании явления локальной рекомбинации ионов в треках частиц, ионизирующих газ рекомбинационной камеры (РК). Рекомбинационные камеры — это обычно тканезэквивалентные ионизационные камеры, наполненные газом, содержащим углеводороды при давлении нескольких сот килопаскалей. Локальная (начальная) рекомбинация ионов в таких камерах преобладает над объемной рекомбинацией. Вольт-амперная характеристика (характеристика насыщения) РК зависит от близости ионов в треках частиц, ионизирующих газ камеры, т. е. от качества излучения.

Ряд параметров качества излучения определяется через эффективность собирания ионов в данной РК, помещенной в поле исследуемого излучения (f) и в поле стандартного гамма-излучения (f_γ); обычно это гамма-излучение

^{137}Cs или ^{60}Co . Таким параметром является, например, индекс локальной рекомбинации (μ):

$$\mu = \frac{(1-f)f_\gamma}{f(1-f_\gamma)}. \quad (1)$$

Это выражение следует непосредственно из общей формулы, представляющей собой зависимость эффективности собирания ионов (при локальной рекомбинации) от близости ионов, представляемой параметром μ .

Для частиц, образующих треки с постоянной ЛПЭ (точнее, с постоянной близостью ионов), параметр μ является постоянной величиной, не зависящей от напряжения, прикладываемого к электродам камеры, от давления газа (в определенных пределах) и т.п. Для такого излучения μ является мерой относительной ограниченной ЛПЭ (L_Δ) с линейным ограничением 0,07 мкм H_2O , что соответствует энергетическому ограничению $\Delta = 500$ эВ [7]. Термин «относительная ЛПЭ» здесь касается отношения к средней ограниченной ЛПЭ стандартного гамма-излучения.

Для смешанного излучения или для излучения, создающего широкий спектр ЛПЭ в газе камеры, μ зависит от напряжения и поэтому не отражает просто и непосредственно качество излучения одним значением. Удобным параметром в случае смешанного излучения является рекомбинационный параметр качества (РПК) Q_R [4, 7], определяемый формулой

$$Q_R = (1-f)/(1-f_\gamma). \quad (2)$$

При напряжении, обеспечивающем $f_\gamma \approx 0,96$, Q_R является хорошим приближением коэффициента качества согласно рекомендациям Международной комиссии по радиологической защите МКРЗ-1977 [8]. Если при этом $Q_R \leq 5$, этот параметр также достаточно хорошо (с точностью, вполне приемлемой в защите от излучения) описывает коэффициент качества согласно рекомендациям МКРЗ-2007 [9, 10].

Эффективность собирания ионов (f) в формуле (1) обычно можно заменить относительной эффективностью (f'), определяемой отношением тока РК при напряжении U не к току насыщения, а к непосредственно измеряемому току при максимальном напряжении (U_s), прикладываемом к электродам камеры:

$$f'(U) = \frac{i(U)}{i(U_s)}. \quad (3)$$

Численное значение параметра качества, определяемого посредством относительных эффективностей собирания ионов:

$$Q'_R = (1-f')/(1-f'_\gamma). \quad (4)$$

При $f'_\gamma = 0,96 \pm 0,01$ значение этого параметра лишь незначительно отличается от Q_R .

Величины f и f_γ в формулах (1) и (2), а также f' и f'_γ в формуле (4) касаются эффективности собирания ионов только в процессе локальной рекомбинации ионов. Объемная рекомбинация, как и другие процессы, влияющие на собирание ионов (как, например, обратная диффузия ионов, существенная при напряжениях, не превышающих 10 В), если имеют место, должны быть учтены посредством введения соответствующих поправок.

При радиобиологических исследованиях, а также для целей лучевой терапии одного параметра качества (например, Q_R или средняя ЛПЭ) обычно недостаточно для того, чтобы предсказать ОБЭ смешанного излучения. Больше информации дает распределение дозы по ЛПЭ или, по крайней мере, вклад дозы, создаваемый частицами отдельно с низкой и высокой ЛПЭ. Такую информацию можно получить рекомбинационными методами, в которых измеряется ток РК при нескольких (от 3 до 20) значениях напряжения, прикладываемого к камере.

Рекомбинационный микродозиметрический метод (РММ) [11] и экстраполяционный рекомбинационный метод (ЭРМ) [12] были использованы в этой работе. РММ позволяет найти распределение дозы по μ (или ограниченной ЛПЭ) в нескольких пределах (до семи). Метод основан на подборе вклада дозы в рассматриваемых пределах ЛПЭ анализируемого смешанного излучения так, чтобы формула (1) выполнялась с возможно лучшей точностью для токов камеры, измеренных при всех прикладываемых напряжениях. Подбор осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения.

ЭРМ является более простым методом, полагающим, что исследуемое смешанное излучение состоит только из двух составляющих — низкой и высокой ЛПЭ. Метод позволяет определить вклад частиц с низкой ЛПЭ в ионизацию газа и поглощенную дозу смешанного излучения (d_1) и грубо оценить среднее значение относительной ЛПЭ (точнее, значение индекса локальной рекомбинации) для частиц с высокой ЛПЭ (d_2). Зная вклад обеих составляющих d_1 и $d_2 = 1 - d_1$, а также значение индексов локальной рекомбинации обеих составляющих $\mu_1 \approx 1$ и μ_2 , можно оценить ряд других дозиметрических параметров излучения, что будет представлено в пятом разделе этой работы. ЭРМ основан на графическом представлении функции $y(x)$ и подборе значения индекса локальной рекомбинации (μ_2) так, чтобы зависимость $y(x)$ представлялась возможно близко прямой линии, причем

$$y = f'/f'_\gamma, \quad (5)$$

$$x = [1 + (1 - f_\gamma)\mu_2]^{-1}. \quad (6)$$

Выступающая в выражении (6) абсолютная эффективность собирания ионов в поле гамма-излучения (f_γ) может быть найдена методом экстраполяции обратного значения f'_γ как функции обратного напряжения. Пересечение прямой $y(x)$ с осью y определяет вклад относительной ионизации, создаваемой частицами с низкой ЛПЭ.

ЭРМ в принципе не требует применения компьютерных технологий и может быть осуществлен дозиметристом с обычной квалификацией.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Пучок протонов с энергией 170 МэВ направлялся на плоскую РК (KR-13), помещенную между пластинами из оргстекла, исполняющими роль фантома. Перед плитами на пучке устанавливался гребенчатый фильтр, расширяющий пик Брэгга до 2 см на уровне 90 % максимальной дозы (рис. 1). Максимум дозы приходился между электродами камеры.

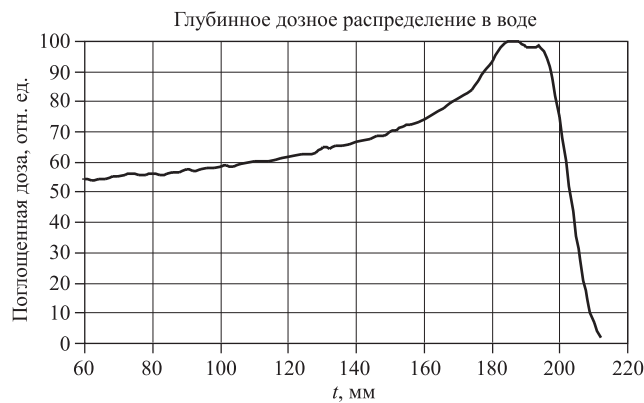


Рис. 1. Глубинное дозное распределение протонного пучка

Для мониторинга возможных изменений уровня мощности дозы в процессе измерений использовалась вторая РК, с более высокой чувствительностью. Эта камера была установлена в поле рассеянных протонов. К электродам мониторинговой камеры подводилось постоянное напряжение 330 В.

Напряжение, подводимое к электродам рабочей РК, периодически изменялось от 10 до 2000 В. Во время измерений подавалось поочередно 16 значений напряжения при положительной полярности и столько же при отрицательной. Как источник напряжения был использован высокостабильный управляемый выпрямитель типа High Voltage Power Supply-1904. Измерительный электрод РК подключался через 15-метровый электрометрический кабель на вход электрометрического усилителя с полной отрицательной обратной связью. Между входной и выходной клеммами усилителя подключалось внешнее рабочее сопротивление $R = 965 \text{ МОм} (\pm 0,4 \%)$. Параллельно сопротивлению подключалась емкость $C = 10 \text{ нф}$ с целью обеспечения достаточной постоянной времени ($RC = 10 \text{ с}$) для усреднения. Напряжение с выхода электрометра

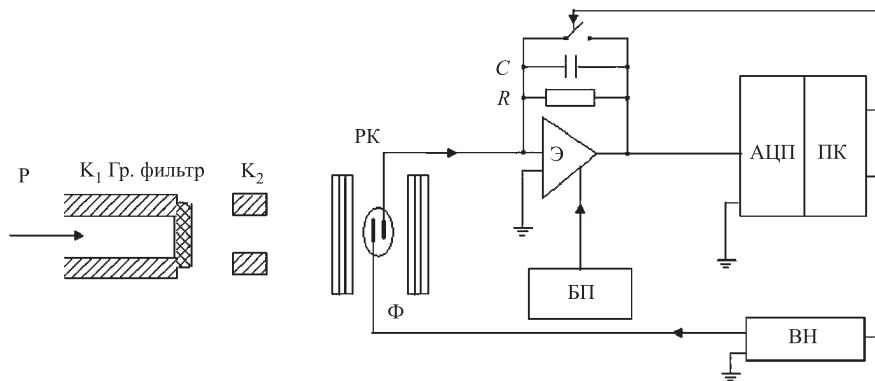


Рис. 2. Принципиальная схема измерений: Р — пучок протонов 170 МэВ; Гр. фильтр — гребенчатый фильтр; K_1 — коллиматор; K_2 — чистовой коллиматор; РК — рекомбинационная камера; Ф — фантом; Э — электрометр; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПК — персональный компьютер; ВН — источник высокого напряжения; БП — блок питания электрометра (± 14 В)

подавалось через плату аналого-цифрового преобразователя на персональный компьютер (рис. 2).

Посредством компьютера переключались напряжения, подводимые к электродам камеры, обнулялось рабочее сопротивление при переключениях, проводилась запись показаний электрометра в память компьютера начиная с 120-й секунды после подключения очередного напряжения 40 раз. Каждые 5 с делался расчет среднего значения тока при каждом напряжении и определялось статистическое отклонение. В то же самое время проводился компьютерный отсчет показаний мониторинговой камеры посредством такого же электрометра, с такой же постоянной времени (10 с). Периодически (вручную) записывались также показания пультного прибора измеряющего ток протонного пучка, что частично повторяло мониторингование, но давало также возможность отнести измеряемую мощность поглощенной дозы в пучке протонов к единице тока пучка, выводимого из ускорителя.

Измерения с целью определения РПК проводились также перед фантомом.

За несколько суток перед измерением на пучке протонов, а также через несколько суток после этих измерений проводилась градуировка рабочей РК в стандартном поле гамма-излучения изотопа ^{60}Co и измерялась характеристика насыщения РК. Так, значения чувствительности камеры (A), как и характеристика насыщения в поле гамма-излучения, оказались такими же в обоих измерениях в пределах погрешности измерений ($\pm 0,4\%$ для чувствительности и $\pm 0,2\%$ для характеристики f'_γ).

Чувствительностью камеры здесь названо отношение тока камеры к мощности дозы (D_t), поглощенной в тканеэквивалентных электродах камеры, помещенной в стандартном поле гамма-излучения:

$$A = i(U_s)/(D_t)_\gamma. \quad (7)$$

Численное значение чувствительности камеры KR-13 $A = 30,37$ нА/Гр · мин⁻¹. Абсолютное значение эффективности собирания ионов при напряжении 2000 В, найденное методом экстраполяции: $f_\gamma(U_s) = 0,9976$.

Непосредственно из этих характеристик можно определить приблизительное значение РПК, согласно формуле (4), используя относительные эффективности собирания ионов при напряжении $U = 100$ В (при котором $f'_\gamma = 0,957$). Полученные значения: $Q'_R = 3,18$ в пике Брэгга и $Q'_R = 1,53$ на входе пучка в фантом.

Абсолютное значение тока камеры (при напряжении 2000 В) составило 17,1 нА при интенсивности ускоренных протонов, соответствующей току 1 мкА выведенного пучка.

4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗМЕРЕНИЙ

Средние значения токов РК анализировались в соответствии со стандартным отклонением и были, при нескольких напряжениях, изменены после отбрасывания отдельных отсчетов, чрезмерно отклоняющихся от средней. Такие нетипичные отклонения имели место при срыве или при резком изменении интенсивности пучка. Вводились поправки, учитывающие абсолютное значение рабочего сопротивления, ненулевого показания электрометров при отключенном пучке за счет сдвига нуля на выходе электрометра и за счет темнового тока РК. Темновой ток мониторинговой камеры возрастал в процессе измерений; это можно объяснить излучением, создаваемым активацией углерода в фантоме ($T_{\text{ут}} \approx 20$ мин). Вводимая поправка иногда достигала 3% и могла повлиять на погрешность определения параметров качества излучения. Темновой ток рабочей РК был пренебрежимо мал (меньше чем 0,01%) при измерениях в пучке протонов, но учитывался ($\approx 0,5\%$) при измерениях в поле гамма-излучения, при наивысшем напряжении. Влияние поляризационных эффектов практически нивелировалось, пользуясь средним абсолютным значением токов при положительном и отрицательном напряжении. Самая большая процентная разница абсолютных значений токов при положительном и отрицательном напряжении имела место при самом низком напряжении (10 В) и составляла 3%.

Существенной поправки требовал учет объемной рекомбинации ионов, которая при самом низком напряжении и высокой интенсивности протон-

ного пучка превышала локальную рекомбинацию, используемую для определения параметров качества излучения рекомбинационными методами. С целью уменьшения значения поправок, касающихся объемной рекомбинации ионов, а также с целью более точного определения этих поправок были проведены добавочные измерения характеристик насыщения РК при 8-кратно пониженной интенсивности протонного пучка по сравнению с основными измерениями, проводимыми при такой интенсивности, которая применяется при облучении пациентов; в данной работе — при токе протонного пучка $i_p \approx 1,7$ мкА.

Относительная эффективность собирания ионов в процессе локальной рекомбинации находится по формуле

$$f'(U) = \frac{i(U)}{i(U_s)} \frac{f_0(U_s)}{f_0(U)} \frac{M(U_s)}{M(U)}, \quad (8a)$$

где $M(U)$ — средний ток мониторной камеры в то время, когда к рабочей камере было приложено напряжение U ; $M(U_s)$ — средний ток мониторной камеры, когда на рабочей РК было напряжение $U_s = 2000$ В; $f_0(U)$ — эффективность собирания ионов в процессе объемной рекомбинации ионов при напряжении U ; $f_0(U_s) \approx 1,00$ — эффективность собирания ионов в процессе объемной рекомбинации при напряжении $U_s = 2000$ В.

Эффективности $f_0(U)$ определялись согласно теоретическим формулам. Эти формулы различаются для импульсного излучения и для излучения, постоянного во времени. Критерием импульсности является сопоставление периода повторения импульсов (T) с временем собирания ионов на электродах камеры. Для излучения, создаваемого фазотроном ОИЯИ, $T = 4$ мкс, а длительность импульса измерения составляет 30 мкс. Время собирания ионов зависит от напряжения, прикладываемого к камере. С точки зрения объемной рекомбинации ионов в рабочей РК (KR-13, с междуэлектродным расстоянием 1,75 мм) излучение фазотрона можно считать постоянным во времени при напряжениях меньше 60 В и импульсным — при напряжениях выше 160 В.

Для постоянного во времени излучения эффективность собирания ионов в процессе объемной рекомбинации определяется формулой [13]

$$f_0 = \left(1 + \frac{ai}{U^2}\right)^{-1}. \quad (8б)$$

Выступающий в этой формуле коэффициент a зависит от давления и состава газа и от междуэлектродного расстояния ионизационной камеры. Для рабочей РК (KR-13) значение этого коэффициента было найдено экспериментально в поле излучения изотопа ^{137}Cs : $a = 16,36$ В²/нА.

При импульсном излучении f_0 зависит от среднего значения тока i (усреднение за период повторения импульсов (T)) и при $f_0 \geq 0,85$ определяется формулой [14]

$$f_0 = \left(1 + \frac{bT_i}{U}\right)^{-1}. \quad (9)$$

Коэффициент b связан с коэффициентом a :

$$b = \frac{ak_+}{4d^2}, \quad (10)$$

где k_+ — подвижность ионов в газе камеры; d — междуэлектродное расстояние.

Для расчета эффективности собирания ионов в процессе объемной рекомбинации, а затем и расчета f' (касающейся только локальной рекомбинации), согласно формуле (7), при напряжениях $U \leq 50$ В использовалась формула (8), при $U \geq 170$ В — формула (9), а при напряжениях 70–150 В проводился расчет по обеим формулам и принималось среднее значение f_0 .

Зависимость относительной эффективности собирания ионов в процессе локальной рекомбинации ионов в расширенном пике Брэгга протонного пучка (f') от напряжения, прикладываемого к камере, представлена на рис. 3 в соответствии с относительной эффективностью для стандартного гамма-излучения. Эти характеристики являются исходными данными для определения параметров качества исследуемого излучения с помощью ЭРМ и РММ. При самом низком напряжении (10 В) поправка, касающаяся объемной рекомбинации, была настолько велика даже при пониженной интенсивности пучка, что существенно могла повлиять на точность определения f' при этом напряжении. Поэтому f' (10 В) не рассматривалось при использовании РММ.

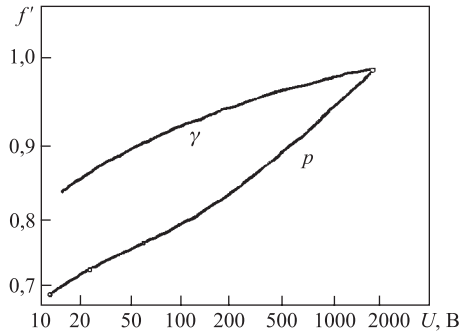


Рис. 3. Относительная эффективность собирания ионов в РК KR-13: γ — в поле стандартного гамма-излучения; p — в расширенном пике Брэгга протонов

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА И ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ С ПОМОЩЬЮ ЭРМ И РММ

На рис. 4 представлена зависимость $y(x)$, согласно равенствам (5) и (6), для трех значений параметра μ_2 . Как видно, при $\mu_2 = 50$ эта зависимость представляется выпуклой, при $\mu_2 = 5$ — вогнутой. Это свидетельствует о

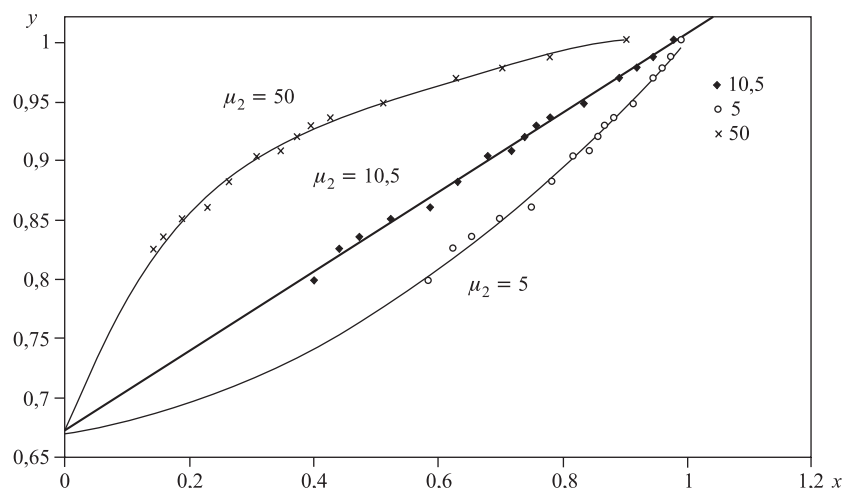


Рис. 4. Определение вклада частиц с низкой ЛПЭ с помощью ЭРМ

том, что если исследуемое излучение считать состоящим только из двух составляющих (с низкой и высокой ЛПЭ), то индекс локальной рекомбинации составляющей с высокой ЛПЭ μ_2 имеет значение между $\mu_2 = 5$ и $\mu_2 = 50$. Оказалось, что для исследуемого излучения невозможно найти такое значение параметра μ_2 , при котором $y(x)$ представлялось бы точно прямой линией. Этот факт частично связан с неточностью определения значения $f'(U)$ в этой работе, а также отражает грубость приближения спектра ЛПЭ исследуемого излучения как состоящего только из частиц с двумя значениями μ . Фактически составляющая с высокой ЛПЭ имеет довольно широкий спектр. Описание этого спектра единым значением μ_2 является приближением, однако не лишенным смысла.

Как видно из рис. 4, при $\mu_2 = 10,5$ зависимость $y(x)$ можно считать линейной. Значение $\mu_2 = 10,5$ отражает эффективную ЛПЭ исследуемого излучения (с точки зрения локальной рекомбинации ионов) для второй составляющей поглощенной дозы (с высокой ЛПЭ).

Поступая согласно принципам ЭРМ [12], определяем ряд дозиметрических параметров исследуемого излучения в пике Брэгга.

1) Экстраполируя $y(x)$ до $x = 0$, на оси y находим вклад частиц с низкой ЛПЭ в токе камеры при напряжении $U_s = 2000$ В:

$$\Gamma_s = y(0) = 0,673. \quad (11)$$

2) Наклон прямой ЭРМ:

$$N = \Delta y / \Delta x = 0,334. \quad (12)$$

3) Вклад частиц с низкой ЛПЭ ($L \leq 3,5$ кэВ/мкм, $L < 20$ кэВ/мкм) в ионизации газа:

$$\Gamma = \Gamma_s / (\Gamma_s + N) = 0,668. \quad (13)$$

4) Эффективность собирания ионов частиц с высокой ЛПЭ при максимальном напряжении ($U_s = 2000$ В):

$$f_2(U_s) = \frac{f_1(U_s)}{f_1(U_s) + [1 - f_1(U_s)]\mu_2} = 0,975; \quad (14)$$

причем известно, что эффективность собирания ионов для всех частиц с низкой ЛПЭ практически одинакова:

$$f_1(U) = f_\gamma(U). \quad (15)$$

Равенство (15) касается всего диапазона напряжений, прикладываемых к РК.

5) Эффективность собирания ионов обеих составляющих при максимальном напряжении:

$$f(U_s) = \Gamma f_1(U_s) + (1 - \Gamma)f_2(U_s) = 0,99. \quad (16)$$

6) Средний РПК частиц с высокой ЛПЭ

$$(Q_R)_2 = \frac{\mu_2}{1 + 0,04(\mu_2 - 1)} = 7,61. \quad (17)$$

7) Средний РПК излучения в пике Брэгга

$$Q_R = \Gamma + (1 - \Gamma)(Q_R)_2 = 3,19. \quad (18)$$

Как и следовало ожидать, полученное значение Q_R лишь незначительно отличается от значения Q'_R , найденного непосредственно из относительных характеристик насыщения.

8) Относительная энергия образования пары ионов в газе РК [3] частицами с высокой ЛПЭ:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{W_2}{W_\gamma} = 1 + 0,008 [(Q_R) - 1] = 1,053. \quad (19)$$

9) Средняя относительная энергия ионообразования (обеих составляющих) излучения в пике Брэгга:

$$\frac{W}{W_\gamma} = \left[\Gamma + (1 - \Gamma) \frac{W_1}{W_2} \right]^{-1} = 1,017. \quad (20)$$

10) Эффективная ЛПЭ составляющей с высокой ЛПЭ:

$$L_2 = \mu L_0 W_1/W_2 = 38,7 \text{ кэВ/мкм.} \quad (21)$$

11) Коэффициент качества (согласно актуальным рекомендациям МКРЗ) составляющей с высокой ЛПЭ:

$$Q_2 = 0,32L_2 - 2,2 = 10,2 \text{ Зв/Гр.} \quad (22)$$

12) Полный коэффициент качества (обеих составляющих) излучения в расширенном пике Брэгга

$$Q = \Gamma + (1 - \Gamma)Q_2 = 4,04 \text{ Зв/Гр.} \quad (23)$$

13) Мощность поглощенной дозы в тканеэквивалентном материале электродов камеры рассчитывалась по формуле

$$D_t = \frac{i(U_s) W f_\gamma(U_s)}{A(U_s) W_\gamma f(U_s)} \quad (24)$$

и в расширенном пике Брэгга оказалась равной 0,577 Гр/мин при токе выведенных протонов 1 мкА. Значение мощности дозы в мягкой ткани можно принять таким же, как в тканеэквивалентном материале, т. е. определяемое формулой (24).

14) Вклад частиц с низкой ЛПЭ в поглощенную дозу

$$d_1 = D_1/D_2 = \Gamma W_2/W = 0,692. \quad (25)$$

15) Вклад частиц с высокой ЛПЭ

$$d_2 = 1 - d_1 = 0,308. \quad (26)$$

При анализе характеристики насыщения $f'(U)$ и $f_\gamma(U)$ с помощью РММ получены процентные вклады (в поглощенную дозу) частиц с низкой ЛПЭ — 67 %, со средней ЛПЭ (25–50 кэВ/мкм) — 23 % и с высокой ЛПЭ (50–100 кэВ/мкм) — 10 % в пике Брэгга.

Если принять эффективное значение ЛПЭ для диапазонов средних и высоких ЛПЭ как геометрическое среднее минимального и максимального ЛПЭ в диапазоне, то $Q = 4,53 \text{ Зв/Гр}$, что на 12 % выше, чем полученное с помощью ЭРМ. Такое различие находится в пределах точности рекомбинационных методов, если учитывать стандартные отклонения при измерении токов РК на пучке протонов.

6. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рекомбинационная камера для измерений в расширенном пике Брэгга протонов с энергией 170 МэВ была применена впервые. Однако имеются данные по измерениям на входе и на плато пучков протонов с похожей энергией. Рекомбинационный параметр качества излучения на глубине 5 см в фантоме, облучаемом пучком протонов с энергией 209 МэВ в ЛЯП ОИЯИ, в 1971 г. оказался равным 1,4 [15], что на 9% ниже значения Q_R , полученного в настоящей работе на входе пучка в фантоме. Расхождения находятся в пределах погрешности измерений. Также расхождение может быть объяснено различием первичной энергии протонов и различием положения РК в фантоме.

Анализ характеристики РК, помещенной перед фантомом, облучаемым пучком протонов с энергией 200 МэВ, был проведен в 1995 г. [11] с помощью РММ. Были получены вклады (в поглощенную дозу) частиц с низкой ЛПЭ — 97%, с ЛПЭ 100–200 кэВ/мкм — 2% и с ЛПЭ > 200 кэВ/мкм — 1%. Такое распределение соответствует $Q_R = 1,43$ и $Q = 1,64$ Зв/Гр, что не противоречит данным, полученным в настоящей работе.

ВЫВОДЫ

1) С помощью рекомбинационной камеры определен вклад частиц с высокой ЛПЭ в поглощенную дозу в пучке протонов в условиях, применяемых при облучении пациентов в ОИЯИ. Этот вклад составляет $d_2 = (30,8 \pm 3) \%$ в расширенном пике Брэгга.

2) Коэффициент качества излучения в расширенном пике Брэгга составляет $Q = (4 \pm 0,4)$ и $(1,6 \pm 0,2)$ Зв/Гр на входе пучка. Значения коэффициента качества, полученного разными рекомбинационными методами, практически совпадают.

3) Результаты настоящей работы находятся в согласии с результатами, полученными ранее с помощью рекомбинационных методов в похожих пучках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельчинский М. Методика определения дозы в медицинских пучках частиц высоких энергий. ОИЯИ, Р16-88-531. Дубна, 1988.
2. Зельчинский М. и др. Исследование детекторов для определения дозиметрических параметров медицинских пучков пи-мезонов и нейтронов высоких энергий. ОИЯИ, 16-80-563. Дубна, 1980.
3. Zielczynski M., Golnik N. Energy Expended to Create an Ion Pair as a Factor Dependent on Radiation Quality // Measurement Assurance in Dosimetry. IAEA, Vienna, 1994.

4. Zielczynski M., Golnik N. Recombination Index of Quality — Measuring and Applications // Rad. Prot. Dosim. 1994. V. 52. P. 419–422.
5. ICRU: Microdosimetry. Report V. 36. Bethesda, 1983.
6. Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water. IAEA TRS-398, Vienna, 2001.
7. Golnik N. Recombination Method in the Dosimetry of Mixed Radiation. IAE Report 20/A. Swierk, 1996.
8. ICRP Publication 26. N. Y., 1977.
9. ICRP Publication 103. N. Y., 2007.
10. Golnik N., Zielczynski M. The Concept of RIQ and Its Adaptation to Recent Recommendation of ICRP for External Neutron Field // Nukleonika. 1996. V. 41, No. 2. P. 119–126.
11. Golnik N. Microdosimetry Using a Recombination Chamber: Method and Application // Rad. Prot. Dosim. 1995. V. 61. P. 125–128.
12. Zielczynski M. A New Approach to the Dosimetry of Mixed Radiation Using a Recombination Chamber // Rad. Prot. Dosim. 2004. V. 110. P. 267–271.
13. Boag J. W. Ionisation Chamber // Radiation Dosimetry / Eds.: F. H. Attix et. al. N. Y., 1968. V. 2. P. 1.
14. Zielczynski M., Golnik N., Gryzinski M. A. Determination of Initial Recombination of Ions Created in Quasi-Pulsed Radiation Field // Nukleonika. 2008. V. 53 (Suppl. 2).
15. Зельчинский М., Пиона С., Комочков М. М., Сычев Б. С., Череватенко А. П. Дозиметрические характеристики протонов с энергией 200 МэВ // Атомная энергия. 1971. Т. 31. С. 473–476.

Получено 29 марта 2010 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 24.05.2010.

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

Усл. печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 1,24. Тираж 230 экз. Заказ № 56997.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/