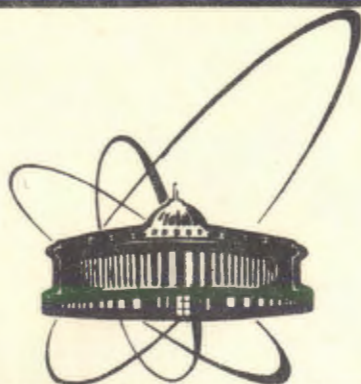


90-265

+



**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна**

16-90-265

М.Зельчинский ¹, Т.Плищинский ¹, А.Я.Серов ²,
Б.С.Сычев ², Е.П.Череватенко

**КОЭФФИЦИЕНТ КАЧЕСТВА НЕЙТРОННОГО
ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ПУЧКА
ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ОИЯИ**

¹Институт атомной энергии, Свек, Польша

²Московский радиотехнический институт АН СССР

1990

1. ВВЕДЕНИЕ

Коэффициент качества (К) является одним из параметров излучения, который используется главным образом в области радиационной безопасности для определения зависимости неблагоприятных биологических последствий облучения человека от линейной передачи энергии (ЛПЭ) излучения. Регламентированная Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) зависимость К от ЛПЭ представлена на рис.1 (кривая К)^{1/}, с помощью которой может определяться эквивалентная доза в поле смешанного излучения с различными значениями ЛПЭ. Эквивалентная доза Н тогда рассчитывается по формуле:

$$H = \int_0^{\infty} D(L_{\infty}) K(L_{\infty}) dL, \quad (1)$$

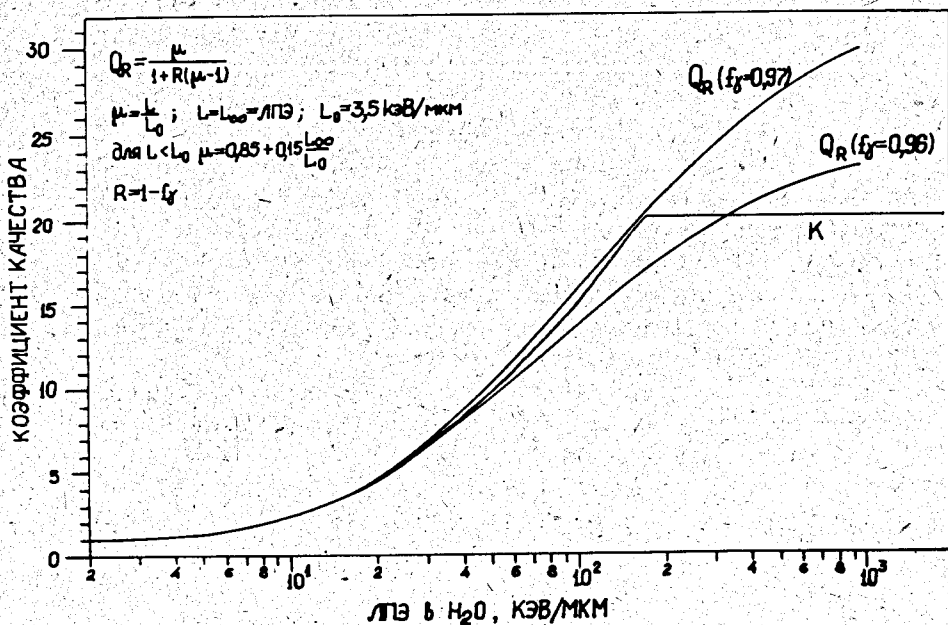


Рис.1. Зависимость коэффициента качества, рекомендованного МКРЗ (кривая К), и рекомбинационного параметра качества (Q_R) от линейной передачи энергии в воде.

где \bar{K} — средний коэффициент качества смешанного излучения; D — поглощенная доза, L_{∞} — ЛПЭ, включающая энергию всех δ -электронов; $D(L_{\infty})$ — распределение дозы по ЛПЭ; $K(L_{\infty})$ — зависимость K от ЛПЭ.

Для практического определения рекомендованных средних значений коэффициента качества при оценке радиационной опасности в конкретных полях смешанного излучения применяется рекомбинационный метод, использующий явление рекомбинации положительных и отрицательных ионов в треках, образованных ионизирующими частицами. При этом доля ионов, избежавших рекомбинации и достигших электродов ионизационной камеры (т.е. эффективность собирания ионов), тем меньше, чем выше ЛПЭ ионизирующих частиц. Эффективность собирания ионов функционально связана с рекомбинационным параметром качества — РПК (см. ниже п.2.1), зависимость которого от ЛПЭ очень близка к зависимости $K(L_{\infty})$, что делает возможным измерение данного параметра в смешанных полях излучений (рис.1, кривая Q_R).

Использование концепции коэффициента качества излучения можно расширить за рамки ее использования в области радиационной безопасности и применить в других областях, где коэффициент качества может использоваться как измеряемый параметр смешанного излучения, функционально связанный с ЛПЭ. В частности, в радиотерапии от локальной плотности энергии, выделяемой в треках частиц (а следовательно, от связанной с ней величины K) зависит биологическая эффективность воздействия излучения на опухолевые и здоровые клетки; в радиобиологии с помощью параметра, характеризующего качество излучения, можно оценить коэффициент кислородного усиления (ККУ) и относительную биологическую эффективность (ОБЭ) в полях излучения с малой дозой, недостаточной для их определения радиобиологическими методами; в дозиметрии параметр, характеризующий качество излучения, может быть использован для определения эффективного значения энергии ионизации и отношения эффективных тормозных способностей в исследуемом пучке излучения^{/2/}.

Целью настоящей работы является определение коэффициента качества в поле излучения, создаваемом в водном фантоме терапевтическим пучком нейтронов высоких энергий, предназначенным для радиотерапии глубокорасположенных больших радиорезистентных злокачественных опухолей^{/3/}. Результаты измерений сравниваются с расчетами.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Рекомбинационный параметр качества

Экспериментально определяемый рекомбинационный параметр качества (РПК) — величина, которая обычно отождествляется с рекомен-

дованным коэффициентом качества (K) ввиду их практически аналогичной зависимости от ЛПЭ (рис.1). По определению^{/4/} РПК является отношением доли ионов, рекомбинирующих в определенных условиях полости тканезквивалентной ионизационной камеры высокого давления (рекомбинационной камеры), находящейся в исследуемом поле излучения, к доле ионов, рекомбинирующих в тех же условиях в поле стандартного гамма-излучения:

$$Q_R = \frac{1 - f_n}{1 - f_\gamma}, \quad (2)$$

где Q_R — рекомбинационный параметр качества; f_n и f_γ — эффективность собирания ионов соответственно в исследуемом и стандартном поле излучения.

Выразив эффективность собирания ионов через отношение тока i_R , измеряемого в режиме рекомбинации, к току насыщения i_S , выражение (2) можно записать в рабочем виде:

$$Q_R = \frac{1}{R} \left[1 - \frac{i_n(U_R)}{i_n(U_S)} \right], \quad (3)$$

где U_R — напряжение, обеспечивающее соответствующий режим рекомбинации; U_S — напряжение, обеспечивающее режим, близкий к насыщению; $R = 1 - i_\gamma(U_R) / i_\gamma(U_S)$ — знаменатель выражения (2), выступающий в выражении (3) как калибровочный множитель.

Согласно теории локальной рекомбинации ионов зависимость рекомбинационного параметра качества от ЛПЭ может быть представлена функцией

$$Q_R = \frac{\mu}{1 + R(\mu - 1)}, \quad (4)$$

где μ — отношение ЛПЭ рассматриваемого излучения и стандартного γ -излучения (см. рис.1). Приемлемая для измерения коэффициента качества зависимость Q_R от ЛПЭ обеспечивается приложением к электродам камеры такого напряжения, при котором $f_\gamma = 0,96$. Объемная рекомбинация ионов при этом должна быть пренебрежимо малой.

Нельзя, однако, полностью отождествлять рекомбинационный параметр качества и рекомендованный коэффициент качества. Отметим основные различия.

1. Локальная рекомбинация ионов (также и РПК) определяется эффективным расстоянием между ионами противоположных знаков в объеме порядка доли микрометра, что не вполне соответствует неограниченной ЛПЭ, определяющей $K(L_{\infty})$, особенно в области низких ЛПЭ.

2. Зависимости РПК и К от ЛПЭ не тождественны, особенно в области больших ЛПЭ.

3. РПК определяется локальной плотностью ионизации в тканезквивалентном газе, а не в воде.

Приведенные различия, однако, не влекут существенных расхождений между численными значениями Q_R и К в случае широкого спектра заряженных частиц, но должны приниматься во внимание при сопоставлении данных. С целью приближения условий расчета и эксперимента наряду с расчетами, использующими зависимость рекомендованного коэффициента качества от ЛПЭ для каждого типа частиц, образуемых в фантоме нейтронами высоких энергий, были также приведены расчеты согласно зависимости Q_R от ЛПЭ.

2.2. Эксперимент

Схема формирования нейтронного терапевтического пучка на фазотроне ЛЯП ОИЯИ описана в работе ^{3/}. Блок-схема экспериментальной установки показана на рис.2. Фантом (Ф), представляющий собой ванну размером 70 см вдоль направления движения нейтронного пучка и поперечными размерами 60x50 см, со стенками из плексигласа толщиной 1 см (входное окно толщиной 5 мм), наполненный водой, помещался в процедурной кабине нейтронного терапевтического пучка в месте, предназначенном для пациента, на расстоянии 0,8 м от чистового коллиматора (К) с диаметром отверстия 10 см и на расстоянии 9 м от мишени, бомбардируемой протонами с энергией 660 МэВ. Энергетические спектры нейтронов для мишеней из бериллия, меди и свинца ^{5/}, использовавшихся

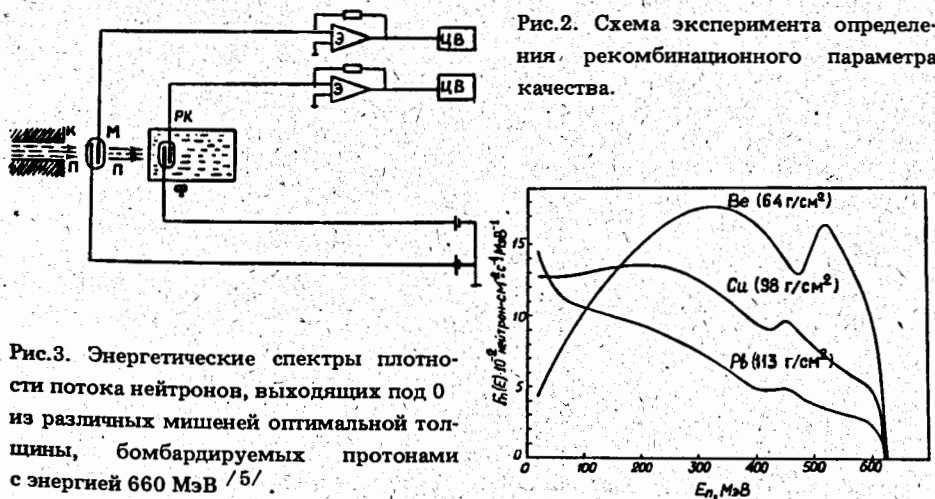


Рис.2. Схема эксперимента определения рекомбинационного параметра качества.

Рис.3. Энергетические спектры плотности потока нейтронов, выходящих под 0 из различных мишеней оптимальной толщины, бомбардируемых протонами с энергией 660 МэВ ^{5/}.

в экспериментах, приведены на рис.3. Профиль пучка высокоэнергетических нейтронов на входе в фантом и глубинное распределение поглощенной дозы, измеренные с помощью ионизационной камеры диаметром 16 мм ^{3/}, показаны на рис.4 и 5.

Плоская рекомбинационная камера (РК на рис.2) с диаметром электродов 36 мм и полной толщиной 10 мм (подобная по конструкции камере типа KR-13^{6,7/}), наполненная пропаном под давлением 400 кПа, помещалась в фантоме (Ф) перпендикулярно направлению пучка (П). Передвижение камеры осуществлялось с помощью двухкоординатной системы перемещения. Роль мониторингового детектора (М) выполняла тонкостенная трансмиссионная ионизационная камера с межэлектродным расстоянием 5 мм, заполненная атмосферным воздухом.

Ток (либо заряд) мониторинговой и рекомбинационной камер измерялся с помощью двухканального электрометра (Э) и считывался с цифровых вольтметров (ЦВ). При измерении заряда производилось одновременное накопление его, а также одновременное отключение обеих камер. Режим накопления заряда применялся лишь при работе с понижен-

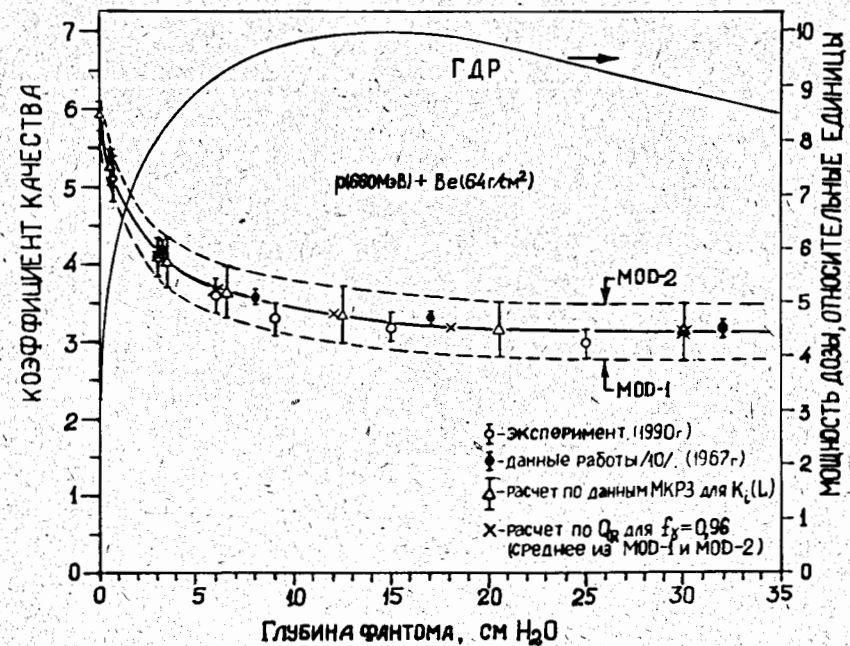


Рис.4. Глубинное дозное распределение (ГДР) и распределение коэффициента качества нейтронного терапевтического пучка.

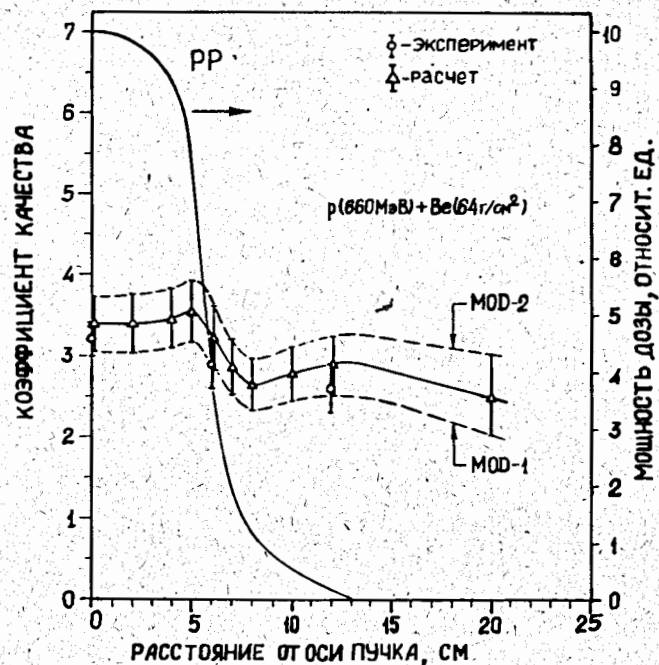


Рис.5. Радиальное распределение (PP) нейтронного терапевтического пучка на входе в фантом ($Z = 0$ см) и коэффициента качества на глубине $Z = 15$ см воды.

ной интенсивностью, а также при нестабильной работе фазотрона. В основном использовался режим измерения токов, при этом обеспечивалась приблизительно одинаковая постоянная времени в обоих каналах электрометра. В каждом режиме производилась регистрация достаточно большого числа показаний цифрового вольтметра с целью снижения статистической ошибки.

На рекомбинационную камеру подавалось поочередно напряжение U_S , обеспечивающее режим, близкий к насыщению, и напряжение U_R , обеспечивающее соответствующий режим рекомбинации. Подбор напряжения U_R осуществлялся до включения нейтронного пучка в поле γ -излучения источника Cs-137, устанавливаемого перед фантомом. Контрольное измерение в поле γ -излучения проводилось также после нейтронного облучения.

Основные измерения проводились при мощности дозы порядка 1 сГр/мин. Дополнительные измерения были проведены также при семикратно пониженной интенсивности пучка с целью учета объемной реком-

бинации ионов. С этой же целью часть измерений была выполнена в двух временных режимах вывода протонов из фазотрона, различающихся величиной длительности импульсов пучка, следующих в обоих случаях с одинаковой частотой (250 Гц). В одном режиме длительность импульса составляла около 70 мкс, в другом — 3500 мкс, т.е. заполняла почти весь промежуток времени между импульсами (4 мс), обеспечивая режим практически непрерывного излучения.

С целью введения поправочного коэффициента, учитывающего возможное влияние мертвых объемов в камере, в разъемах и кабелях, а также влияние внутренних потенциалов рекомбинационной камеры, некоторые измерения проводились как при положительных, так и при отрицательных напряжениях U_S и U_R . С целью учета возможной ошибки, обусловленной неполным насыщением, была снята полная вольт-амперная характеристика. Для учета возможного влияния межэлектродного напряжения на величину чувствительного объема камеры вольт-амперные характеристики в поле γ -излучения были сняты при нескольких значениях давления газа в камере. Для учета изменения чувствительности мониторинной камеры с плотностью воздуха регистрировались температура и атмосферное давление во время измерений. Были измерены темновые токи обеих камер до и после нейтронного облучения. В связи с замеченным дрейфом отношения тока рекомбинационной камеры к току монитора (около 0,3% в час) периодически повторялись измерения РПК в контрольной точке фантома.

2.3. Обработка результатов измерений

Значение рекомбинационного параметра качества Q_R определялось отношением токов (или зарядов) согласно выражению (3), в котором значение i вычислялось как отношение показания тока (или заряда), собираемого на электродах рекомбинационной камеры при заданном напряжении, к соответствующему показанию монитора. Напряжение, подаваемое на рекомбинационную камеру, составляло $U_R = 205$ В. При этом численное значение калибровочного множителя R в выражении (3) равно: $R = 0,039$.

Для получения окончательного значения Q_R на определенной глубине Z и определенном расстоянии от оси пучка r в фантоме вводились соответствующие поправочные члены и множители. Численные значения наиболее существенных поправок, учитывающих возможные ошибки, упомянутые ранее, составляли: объемная рекомбинация — от 0,2 до 4,0%; темновой ток и ток наведенной активации монитора — 1÷3%, полярность напряжения — 0,6%. Статистическая погрешность измерения токов при одной установке рекомбинационной камеры в фанто-

ме не превышала 0,5%, что соответствовало 4% погрешности определения РПК. Погрешность абсолютного значения может достигать в некоторых точках 12%. Основными источниками такой неопределенности являются неполностью выясненные явления дрейфа чувствительности алюминиевой мониторной камеры, изменения эффективности собирания ионов в рекомбинационной камере в процессе облучения дозами порядка нескольких грей; влияния напряжения, прикладываемого между электродами, на чувствительный объем используемой рекомбинационной камеры.

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Расчет пространственного распределения коэффициента качества в смешанном поле излучения, образуемом в водном фантоме нейтронным пучком с граничной энергией спектра 660 МэВ (рис.3), проводился на базе расчетов пространственных распределений поглощенной и эквивалентной дозы согласно выражению

$$K(r, z) = \frac{H(r, z)}{D(r, z)}. \quad (5)$$

Алгоритм расчета пространственного распределения поглощенной дозы $D(r, z)$ в водном фантоме, облучаемом узким пучком моноэнергетических нейтронов, подробно изложен в работах ^{8,9/}. Там же проведены расчеты коэффициента качества для узкого моноэнергетического пучка нейтронов с энергией 525 МэВ. В данной работе вычисления коэффициента качества проведены с учетом спектрального состава и профиля конкретного нейтронного терапевтического пучка, падающего на фантом. В расчетах пространственного распределения поглощенной дозы учитывался вклад в полную поглощенную дозу вторичных протонов, заряженных π -мезонов, электронов, тяжелых заряженных частиц (d , T , ^3He , ^4He), а также остаточных ядер и ядер отдачи кислорода, которые образуются в результате неупругих и упругих взаимодействий адронов с ядрами кислорода воды.

При расчете полной поглощенной дозы учитывался вклад частиц нулевого, первого и второго поколений ^{15/}. Следует заметить, что вклад частиц второго поколения учитывался приближенно двумя способами. В первом варианте (MOD-1) учитывалось поглощение всей энергии частиц второго поколения, во втором варианте (MOD-2) учитывалось поглощение только части энергии этих частиц, которая идет на ионизацию среды. Расчеты коэффициента качества с использованием вариантов MOD-1 и MOD-2 дают, соответственно, нижнюю и верхнюю границу его значений (см. рис.4-6).

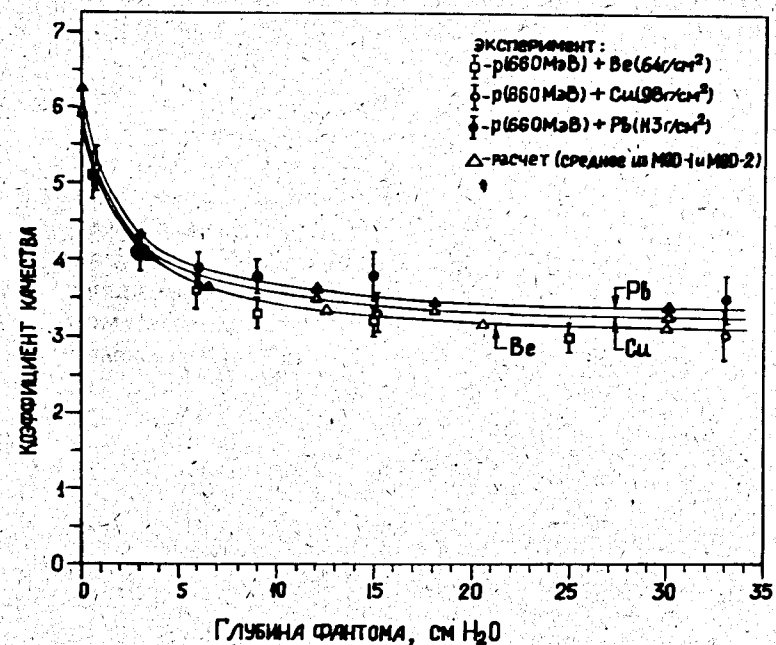


Рис.6. Глубинное распределение коэффициента качества нейтронных пучков, получаемых из различных мишеней.

Расчет эквивалентной дозы $H(r, z)$ проводился согласно выражению (1) с использованием для каждого вышеназванного вида излучения своих коэффициентов качества, определенных согласно рекомендациям МКРЗ. При этом для заряженных частиц с линейной передачей энергии более 3,5 кэВ/мкм использовалось значение K в зависимости от значения ЛПЭ в воде. Коэффициент качества для остаточных ядер и ядер отдачи кислорода принимался равным 20.

Кроме того, как уже упоминалось, для приближения условий расчета к условиям эксперимента были выполнены также расчеты с использованием зависимости Q_R от ЛПЭ.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Результаты измерений и расчетов коэффициентов качества нейтронного терапевтического пучка сведены в таблицу и представлены на рис.4-6.

Распределение коэффициента качества по глубине фантома для бериллиевой мишени толщиной 64 г/см², бомбардируемой протонами

Таблица

Точки детектирования в фантоме		Материал и толщина нейтронообразующей мишени		
z, см	r, см	Бериллий 64 г/см ²	Медь 98 г/см ²	Свинец 113 г/см ²
0,6	0	5,1±0,3	5,2±0,3	5,1±0,3
3	0	4,1±0,25	4,1±0,25	4,1±0,25
6	0	3,6±0,25	-	3,9±0,2
9	0	3,3±0,2	-	3,8±0,2
15	0	3,2±0,2	3,3±0,25	3,8±0,3
15	6	2,9±0,25	3,0±0,25	3,3±0,25
15	12	2,6±0,25	-	-
25	0	3,0±0,2	-	-
33	0	-	3,0±0,3	3,5±0,3
70	0	2,8±0,3	-	-

с энергией 660 МэВ, представлено на рис.4. Полученные данные хорошо согласуются в пределах экспериментальных ошибок со значениями, полученными ранее для бериллиевой мишени толщиной 4,6 г/см², дающей, однако, более жесткий спектр нейтронов ^{10/}, чем для нейтронов терапевтического пучка (рис.3). Измеренные значения коэффициента качества также хорошо согласуются с расчетными значениями в пределах нижней и верхней границ, даваемых вариантами расчета MOD-1 и MOD-2. Причем значения коэффициента качества, рассчитанные с использованием зависимости K(L), рекомендованных МКРЗ, практически не отличаются от значений, рассчитанных с использованием зависимости Q_R(L), которую имеет рекомбинационная камера, используемая в измерениях при f_γ = 0,96. Это позволяет измеряемую величину рекомбинационного параметра качества отождествлять в данном случае с коэффициентом качества нейтронного терапевтического пучка.

Радиальное распределение коэффициента качества нейтронного пучка, измеренное на глубине 15 см, соответствующей району максимума распределения поглощенной дозы, показывает монотонный спад его значений с удалением от оси пучка (рис.5). Расчеты, однако, показывают более детальное распределение данного параметра по радиусу фантома: некоторое увеличение (около 6%) на расстоянии, соответствующем радиусу пучка (5 см), а также на расстоянии, соответствующем границе зоны пучка, составляющем 13 см в радиальном распределении пучка, падающего на фантом.

Слабая зависимость коэффициента качества от спектрального состава нейтронного пучка, отмеченная для бериллиевой мишени, наблюдается также и при более существенном изменении спектра нейтронов, особенно на нескольких первых сантиметрах глубины фантома. Так, приведенные на рис.6 кривые распределения коэффициента качества по глубине фантома для бериллиевой и медной мишеней отличаются не более чем на 5% друг от друга; для свинцовой мишени заметные отличия от бериллиевой мишени, около 15%, наблюдаются за областью максимума дозного распределения, в то время как спектры нейтронов из этих мишеней (рис.3) различаются довольно существенно. Некоторое возрастание коэффициента качества с переходом от легких мишеней к более тяжелым связано, на наш взгляд, с уменьшением средней энергии нейтронов, падающих на фантом, вследствие чего происходит, с одной стороны, уменьшение средней энергии вторичных тяжелых заряженных частиц и, следовательно, увеличение их средних ЛПЭ в воде, а с другой стороны, приводит к уменьшению доли частиц с низкими ЛПЭ, образуемых нейтронами, — заряженных пионов, а также электронов и позитронов, инициируемых γ-квантами от распада π⁰-мезонов ^{13/}.

Для радиотерапии предпочтительным является применение пучка, создающего более высокое значение средней ЛПЭ (т.е. и коэффициента качества), что позволяет более эффективно преодолевать радиорезистентность злокачественных клеток. Поэтому большой интерес представляют дальнейшие исследования условий создания нейтронного пучка, дающего максимальный коэффициент качества. При этом определение коэффициента качества может довольно просто осуществляться с помощью описанного в данной работе метода измерения рекомбинационного параметра качества, использующего ионизационную камеру с повышенным давлением газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Recommendations ICRP. Publication 21. Oxford, Pergamon Press, 1971.
2. Зельчинский М. — ОИЯИ, Р16-88-531, Дубна, 1988.
3. Абазов В.М. и др. — ОИЯИ, 18-88-392, Дубна, 1988.
4. Zielczynski M. et al. — In: Seventh Symposium on Microdosimetry. Harwood Academic Publishers, 1980, v.2, p.853.
5. Серов А.Я. и др. — ОИЯИ, 18-80-540, Дубна, 1980.
6. Зельчинский М. и др. — ОИЯИ, 16-80-563, Дубна, 1980.
7. Макаревич М. и др. — ОИЯИ, Р16-81-492, Дубна, 1981.
8. Серов А.Я. и др. — ОИЯИ, 18-83-53, Дубна, 1983.
9. Серов А.Я. и др. — Атомная энергия, 1984, т.56, вып.1, с.36.
10. Зельчинский М. и др. — ОИЯИ, Р16-3587, Дубна, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 апреля 1990 года.