

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

A 131

18-88-392

**В.М.Абазов, С.А.Густов, М.Зельчинский,
В.П.Зорин, С.А.Кутузов, И.В.Мирохин,
О.В.Савченко, А.Я.Серов*, Б.С.Сычев*,
С.В.Чернов*, Е.П.Череватенко**

**ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ПУЧКА
НЕЙТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
НА ФАЗОТРОНЕ ЛЯП ОИЯИ**

* Московский радиотехнический институт АН СССР

Пучки нейтронов характеризуются высокими значениями линейных потерь энергии в веществе, и с этим связываются большие надежды медиков на повышение эффективности лечения злокачественных опухолей с низкой радиочувствительностью. Известно, что гипоксические клетки и некоторые клетки, находящиеся в особых стадиях клеточного цикла, относительно резистентны к традиционному (электронно-фотонному) облучению и эту резистентность можно преодолеть или уменьшить, если применять частицы с высокой ЛПЭ, такие, как, например, нейтроны. Лечение нейтронами к настоящему времени получило вдвое большее количество пациентов, чем протонами (примерно 10000 — нейтронами и 5000 — протонами), и если протоны имеют четко выраженные преимущества геометрического распределения поглощенной дозы по сравнению с традиционным γ -облучением, то используемые в настоящее время в терапии нейтронные пучки такими преимуществами не обладают. Однако пучки нейтронов высоких энергий, как показали результаты измерений, выполненных в 1978 г., до реконструкции синхроциклотрона ЛЯП ОИЯИ^{1/1}, имеют практически такое же геометрическое распределение поглощенной дозы, как и широкий протонный пучок, применяемый для лечения больших опухолей, и вместе с тем сохраняют свойства, позволяющие преодолевать радиорезистентность опухолевых клеток.

В 1985 г. в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ были завершены работы по созданию на реконструированном фазотроне шестикабинного клинико-физического комплекса, включающего в себя три протонных канала для облучения глубоко залегающих опухолей широкими и узкими пучками различной энергии, π -мезонный канал для использования в лучевой терапии интенсивных отрицательных π -мезонов, канал нейтронов высоких энергий для облучения больших резистентных опухолей и терапевтическую γ -установку для использования ее при проведении сочетанных и самостоятельных облучений^{2/1}. В работе^{3/1} описано получение и исследование широких терапевтических протонных пучков данного комплекса; в настоящей работе приводятся первые результаты, касающиеся получения и формирования терапевтического пучка нейтронов высоких энергий и измерений его некоторых физико-дозиметрических характеристик.

Предпосылкой для создания терапевтического канала нейтронов высоких энергий послужили исследования дозовых распределений пучка нейтронов со средней энергией 350 МэВ, включающие его радиобиологическую оценку, проведенную в 1978 году, перед остановкой синхроциклотрона на реконструкцию. Предварительные результаты по-

казали наличие широкого максимума на глубине 10-20 см, довольно крутой спад дозы по краям пучка, слабую его расходимость с глубиной проникновения, а также пониженное значение коэффициента кислородного усиления (ККУ) по сравнению с рентгеновским, γ -излучением, электронами и протонами во всех точках глубинного дозового распределения в водном фантоме, что открывало некоторые новые возможности повышения эффективности лучевой терапии при лечении больных с большими гипоксическими опухолями [1, 4].

Для получения терапевтического пучка нейтронов высоких энергий на реконструированном фазотроне используется канал X4, схема которого представлена на рис. 1. Выведенный из камеры фазотрона пучок протонов с энергией 660 МэВ отклоняется магнитами СП-35 и ОМ-1 на угол 4° и $0,5^\circ$ соответственно в направлении центра магнита СП-37, расположенного в лаборатории №4 за четырехметровой стеной. С помощью трех дублетов квадрупольных линз МЛ-3 (Q1, Q2 и Q3) пучок протонов фокусируется таким образом, чтобы он прошел с минимальными потерями через коллиматоры в углеродном замедлителе П, коллими-

рующем систему К1, коллиматор в четырехметровой стене, а также через вакуумные камеры трех магнитов СП-37, СП-10 и СП-57, последовательно отклоняющих протонный пучок на углы 31° , $10,5^\circ$ и $22,7^\circ$ соответственно в направлении процедурной кабины №5. С помощью дублета квадрупольных линз Q4 протонный пучок фокусируется на одну из мишеней мишенной нейтронной станции.

Дистанционно управляемая нейтронная мишенная станция представляет собой вращающийся стальной барабан длиной около 1 м, окруженный защитой из железа и бетона суммарной толщиной 1 м, уменьшающей примерно на два порядка поток нейтронов, вылетающих из мишени перпендикулярно протонному пучку, и снижающей до допустимого уровня фон от наведенной радиоактивности. Барабан имеет 11 отверстий для установки на пути протонного пучка мишеней из различных материалов (Be, C, Al, Cu, Pb) с набором толщин до 70 г/см^2 для получения пучков нейтронов с различными спектральными распределениями.

Магнит СП-56, установленный сразу же после нейтронной мишенной станции, отклоняет прошедший через мишень протонный пучок и другие образовавшиеся в мишени заряженные частицы на угол свыше 18° , которые далее поглощаются в железной защите толщиной 1,5 м и бетонной защитной стене толщиной 2 м, а также в дополнительной медно-свинцовой защите магнита СП-56.

Нейтроны, образованные в мишени, с некоторой примесью γ -излучения проходят в направлении первичного протонного пучка через отверстие в стальном мишенном барабане, в котором происходит их первое формирование в пучок. Затем пучок нейтронов проходит между полюсами магнита СП-56 и далее через формирующий ступенчатый коллиматор в защитной стене выводится в процедурное помещение (кабина №5). В кабине нейтронного медицинского пучка, схематически показанной на рис. 1 (вверху), отклоняющий магнит ОМ-5 дополнительно очищает нейтронный пучок от примесей заряженных частиц, образованных в стенках коллиматора. Далее нейтронный пучок формируется в нужный профиль чистовым коллиматором (ЧК) из железа длиной 1 м, проходит напролет область расположения облучаемого объекта и гасится в ловушке из железа и тяжелого бетона суммарной толщиной 3,6 м, расположенной в задней стене кабины №5.

Процедурное помещение представляет собой закрытую кабину длиной 6,4 м, шириной 3,9 м и высотой 3 м, стены и перекрытия которой выполнены из обычного бетона толщиной до 1,8 м и 1 м соответственно. Кроме описанного выше оборудования для формирования нейтронного пучка кабина оснащена оборудованием для предлучевой подготовки пациента, облучения и контроля за облучением, включающим ротационный стенд с креслом для размещения и фиксации пациента в положении сидя, а также для его ротации вокруг вертикальной оси; рентгеновский центратор, служащий для окончательной юстировки на ось пучка и ось ротации глубоко расположенного объекта поражения

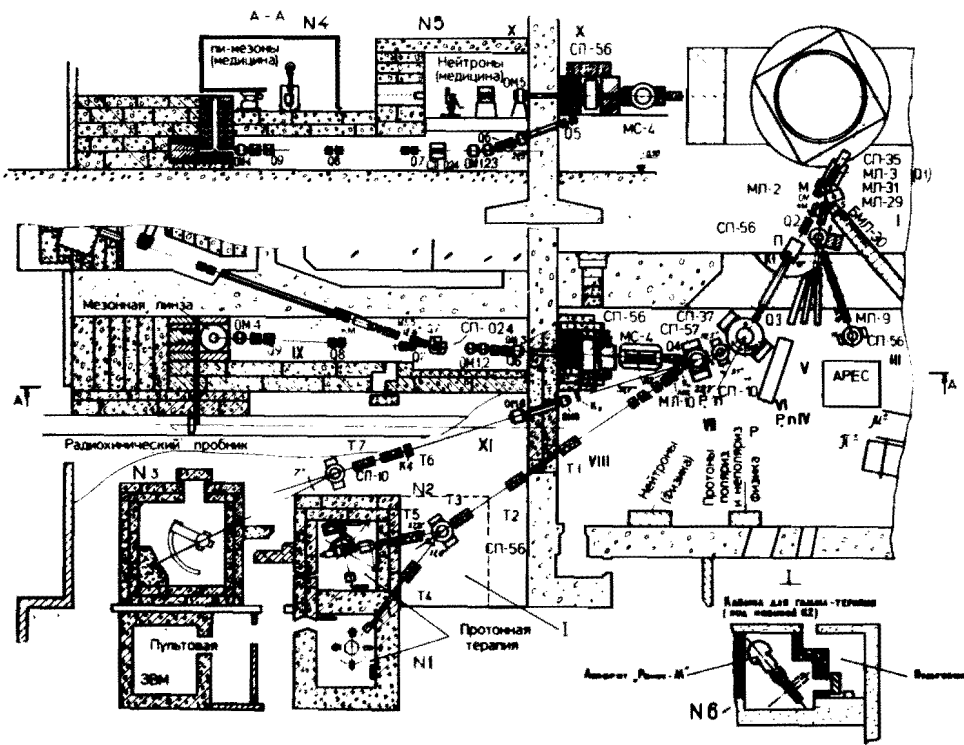


Рис. 1. План разводки пучков в процедурные помещения клиничко-физического комплекса ЛЯП ОИЯИ.

и контроля за его положением во время облучения; телекамеры и переговорные устройства для наблюдения за пациентом во время облучения; приборы для проверки рутинных дозиметрических измерений, а также оборудование и приборы для проведения физико-дозиметрических, микродозиметрических и радиобиологических исследований терапевтического нейтронного пучка. Оценки показывают¹², что для пучка протонов с энергией 660 МэВ при токе 7 мкА, падающего на бериллиевую мишень толщиной 36 см, ожидается мощность дозы в месте расположения облучаемого объекта около 20 сГр/мин, что достаточно для проведения клинических исследований. К настоящему времени интенсивность выведенного из ускорителя протонного пучка составляет 1-2 мкА, и настройка X-канала на оптимальную трассировку протонного пучка к нейтронной мишени, а также получение, формирование нейтронного пучка и измерение некоторых его дозиметрических характеристик проводились при этом токе.

Под оптимальной трассировкой протонного пучка подразумевалось получение минимального его изображения на нейтронной мишени при минимальных потерях пучка при его транспортировке к мишени. Оптимизация режимов работы всех ионно-оптических элементов X-канала осуществлялась с помощью программ TRANSPORT-360¹⁵ и DECAY TURTLE¹⁶ с учетом измерений фазовых и энергетических параметров выведенного протонного пучка фазотрона^{17,18}. Устанавливаемые в электромагнитных элементах канала расчетные токи окончательно корректировались по измерениям распределений интенсивности в поперечном сечении протонного пучка, которые выполнялись в различных местах канала с использованием специально созданного сканирующего диодного ряда, работающего на связи с ЭВМ¹⁹. При этом абсолютная точность определения огибающей протонного пучка с помощью

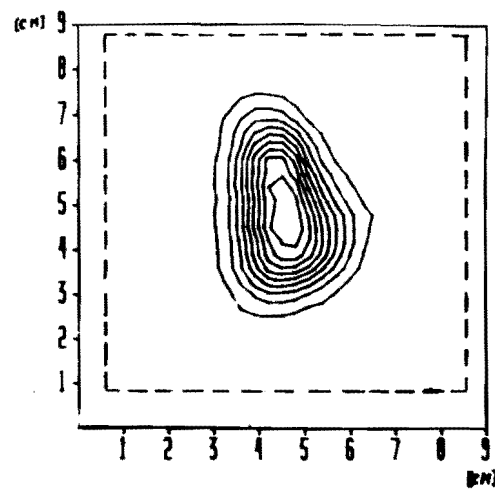


Рис. 2. Изодозное распределение протонного пучка, падающего на нейтронную мишень. - - - - - размеры бериллиевой мишени (8x8 см).

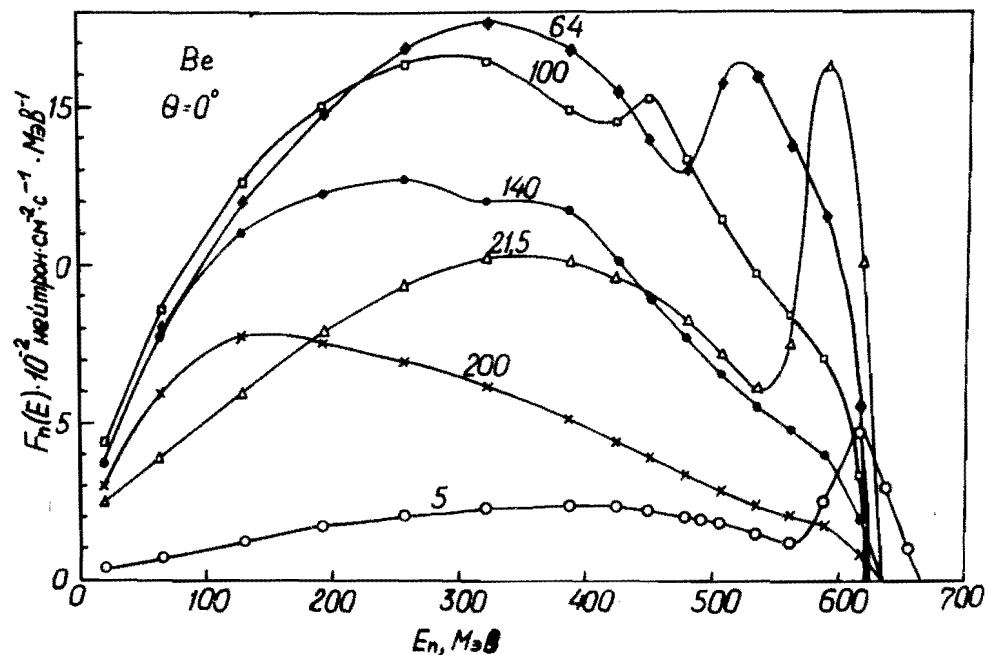


Рис. 3. Энергетические спектры плотности потока нейтронов, испускаемых из бериллиевой мишени различной толщины под углом 0° . Цифры над каждой кривой обозначают толщину мишени в г/см².

измерений его профилей в различных местах X-канала, выполненных данным прибором, была не хуже 1 мм. На рис. 2 показано распределение протонного пучка с энергией 660 МэВ, проведенного практически без потерь на бериллиевую мишень, которое измерено данным профилометром и представлено в виде изодозного распределения. Ширина пучка на полувысоте составляет 1,7 см в горизонтальном сечении через максимум распределения и 3,2 см — в вертикальном сечении. Измерения абсолютного значения интенсивности протонного пучка осуществлялись калориметрическим методом. В используемых калориметрах в качестве рабочего тела была выбрана медная пластина размером 5x20 см и толщиной 1,5 см, что позволяет измерять абсолютную интенсивность протонного пучка в интервале от 0,03 до 10 мкА с точностью около 10%.

Под действием протонов с энергией 660 МэВ в мишени генерируются нейтроны в широком энергетическом и угловом диапазоне. На рис. 3 представлены энергетические спектры плотности потока нейтронов, испускаемых из бериллиевой мишени различной толщины под углом 0° , которые рассчитаны с помощью программы CASC-2¹¹, моделирующей межъядерный каскад в материале мишени в рамках метода последовательных столкновений. Площадь под спектральным распределением, характеризующая выход нейтронов всех энергий из мишени, имеет максимум при определенной ее толщине, соответствующей максимальному выходу нейтронов. Эта толщина является оптимальной с точки зрения получения максимальной дозы от нейтронного пучка.

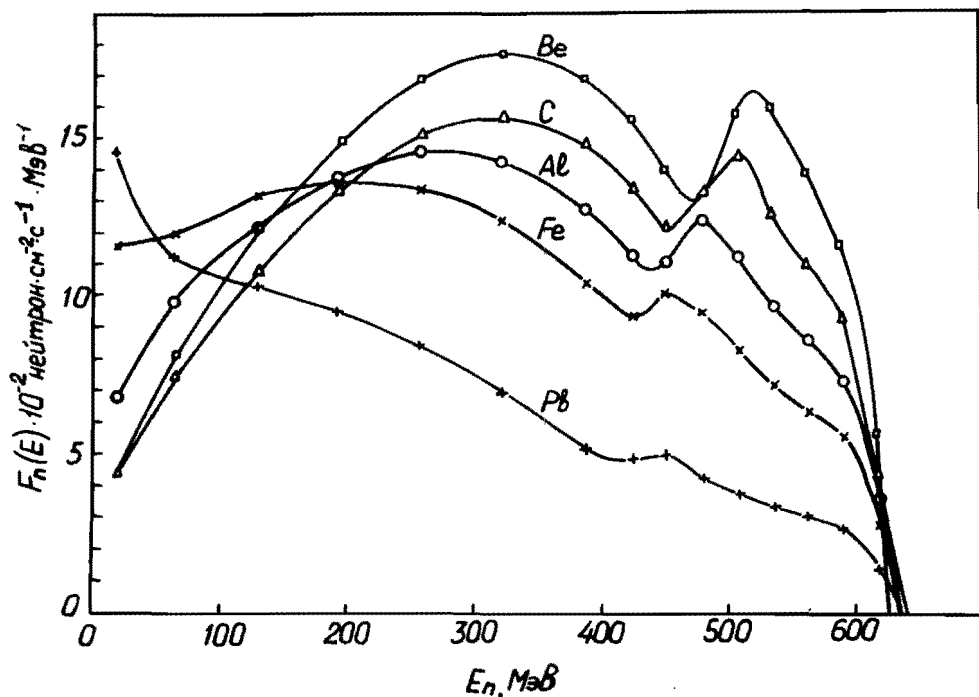


Рис. 4. Энергетические спектры плотности потока нейтронов, выходящих под углом 0° из различных мишеней оптимальной толщины.

На рис. 4 представлены результаты расчета энергетических спектров плотности потока нейтронов, выходящих из различных наиболее простых в конструктивном исполнении мишеней под углом 0° ¹³. Значения оптимальных толщин мишеней, используемых в нейтронной мишенной станции, приведены в нижеследующей таблице.

Таблица

Материал мишени	Be-9	C-12	Al-27	Fe-50	Cu-64	Pb-207
Оптимальная толщина, г/см ² :						
Расчет	64	62	75	92	98	113
Эксперимент	64±11	61±11	80±14	88±23	98±19	109±37

Экспериментальные данные, приведенные в последней строке таблицы, получены при измерении глубинных дозовых полей в водном фантоме для различных толщин исследуемых мишеней.

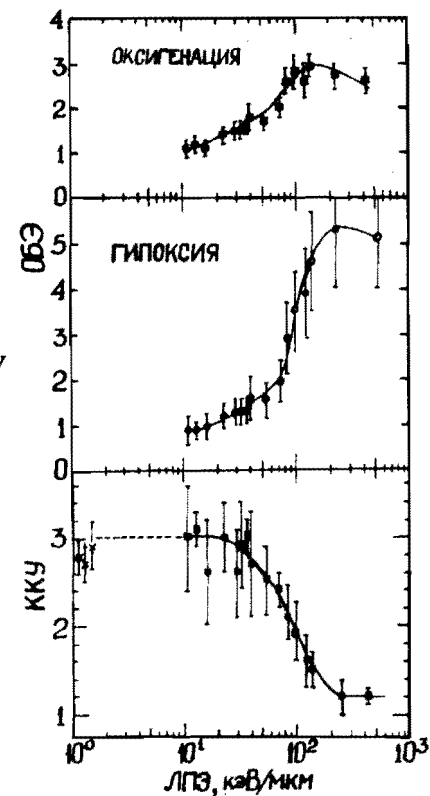
Рис. 4 показывает, что из всех рассмотренных мишеней оптимальной толщины наибольший выход нейтронов обеспечивает бериллиевая мишень толщиной 64 г/см². На основе данных об энергетическом спектре нейтронов, испускаемых из бериллиевой мишени оптимальной толщины, были рассчитаны пространственные распределения полной поглощенной дозы и составляющих ее компонент в водном фантоме¹². В частности, показано, что на глубине водного фантома 9,5 см в зоне пучка примерно 44% от полной поглощенной дозы составляет вклад от высокоэнергетических протонов, 27% — от тяжелых заряженных частиц и ядер отдачи, 16% — от низкоэнергетических вторичных нуклонов, 10% — от γ -квантов и 3% — от π -мезонов.

Спектр нейтронов меняется в зависимости от материала и толщины мишени. Оптимальный спектральный состав нейтронного терапевтического пучка определяется многими параметрами, которые связаны, в частности, с формированием наиболее благоприятного дозового поля в облучаемом объекте, величиной дозы нейтронного пучка, а также с относительной биологической эффективностью (ОБЭ) и коэффициентом кислородного усиления (ККУ), влияющими, в конечном счете, на терапевтические свойства данного пучка.

Приведенные на рис. 5 зависимости ОБЭ и ККУ от линейной передачи энергии (ЛПЭ)¹³ показывают, что наиболее терапевтически выигрышным является такое спектральное распределение нейтронного пучка, которое создает в облучаемом объекте наибольшую долю сильноионизирующих частиц, имеющих ЛПЭ в районе 200 кэВ/мкм. При этом значении ЛПЭ ОБЭ гипоксических клеток имеет максимальное значение $\sim 5,2$, а ККУ выходит на минимум, составляя примерно 1,2. (Для слабоионизирующих частиц эти значения составляют примерно 1 и 3 соответственно).

На рис. 6 приведены дозовые спектры ЛПЭ на глубине 12 см водного фантома, облучаемого моноэнергетическими нейтронами с энергией 100, 350 и 600 МэВ, рассчитанные с

Рис. 5. Зависимость ОБЭ и ККУ от средней ЛПЭ для почечных клеток человека T-1, облучаемых ионами углерода (\blacksquare , \bullet) и неона (\square , \circ).



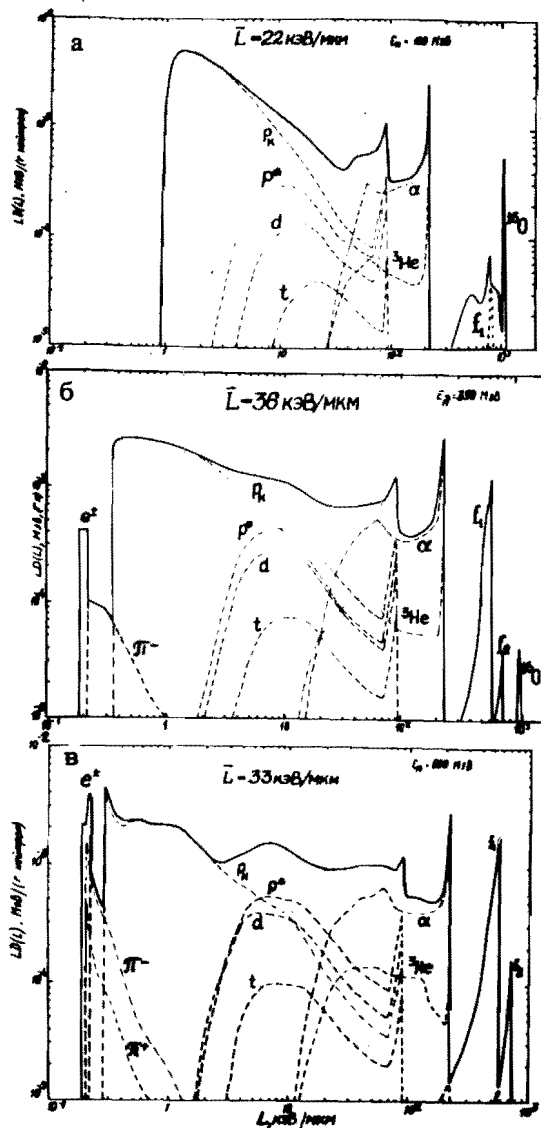


Рис. 6. Дифференциальные парциальные (-----) и суммарные (—) спектры ЛПЭ на глубине 12 см водного поглотителя, облучаемого нейтронами с энергией 100, 350 и 660 МэВ.

помощью модернизированной программы MEDICA, вычисляющей в произвольной точке поглотителя пространственно-энергетическое распределение флюенса первичных и вторичных частиц, образующихся в результате развития межъядерного каскада в веществе поглотителя, инициированного высокоэнергетическими нуклонами^{14/}. В качестве исходной информации по интегральным и дифференциальным сечениям неупругих и упругих взаимодействий использовались результаты работ^{15-18/}. Рис. 6 показывает, что на данной глубине спектр ЛПЭ и относительный вклад в дозу различных частиц меняется в зависимости от энергии нейтронов, падающих на фантом. Так, до значения ЛПЭ примерно 2 кэВ/мкм спектры определяются электронами и позитронами, которые образуются в результате развития электронно-фотонного ливня, инициированного γ -квантами от распада π^0 -мезонов, образующихся при энергиях нейтронов и вторичных нуклонов выше 300 МэВ (на рисунке обозначены e^{+-}). Кроме e^{+-} в данную часть спектра ЛПЭ дают вклад заряженные π -мезоны (ионизационное торможение), образующиеся при энергиях нейтронов и вторичных нуклонов выше 300 МэВ (обозначенные π^+, π^-), а также высокоэнергетические каскадные протоны, образующиеся в столкновениях нейтронов с ядрами (P_k).

цированного γ -квантами от распада π^0 -мезонов, образующихся при энергиях нейтронов и вторичных нуклонов выше 300 МэВ (на рисунке обозначены e^{+-}). Кроме e^{+-} в данную часть спектра ЛПЭ дают вклад заряженные π -мезоны (ионизационное торможение), образующиеся при энергиях нейтронов и вторичных нуклонов выше 300 МэВ (обозначенные π^+, π^-), а также высокоэнергетические каскадные протоны, образующиеся в столкновениях нейтронов с ядрами (P_k).

В диапазоне ЛПЭ примерно от 2 до 95 кэВ/мкм спектр обусловлен каскадными протонами более низких энергий (P_k), а также дейтронами (d) и α -частицами и в меньшей степени тритонами (t) и ядрами ^3He , образующимися в неупругих взаимодействиях первичных нейтронов и вторичных адронов (n, p, π^{+-}) с ядрами кислорода.

В области ЛПЭ от 95 до 220 кэВ/мкм определяющий вклад дают α -частицы, образующиеся главным образом в неупругих взаимодействиях первичных нейтронов с ядрами кислорода.

Для ЛПЭ более 220 кэВ/мкм спектры определяются остаточными ядрами отдачи, образующимися в неупругих взаимодействиях первичных нейтронов и вторичных адронов с ядрами кислорода, а также ядрами отдачи кислорода в упругом нуклон-ядерном взаимодействии.

С увеличением энергии нейтронов уменьшается вклад ядер отдачи кислорода (^{16}O) и увеличивается вклад остаточных ядер отдачи (f_1 и f_2), кроме того, происходит расширение спектров ЛПЭ как в сторону высоких, так и в сторону низких значений ЛПЭ. При этом усредненная по спектру величина ЛПЭ имеет наибольшее значение для монолинии 350 МэВ (36 кэВ/мкм). Вопросы оптимизации спектрального состава терапевтического нейтронного пучка будут рассмотрены в отдельной работе. Здесь предварительно можно отметить, что оптимальная средняя энергия, по-видимому, лежит в районе порога мезообразования, поскольку, с одной стороны, сводится к минимуму вклад от слабоионизирующей компоненты (e^{+-}, π^{+-}), а с другой — сохраняется вклад от сильноионизирующей компоненты, обусловленной короткопробежными ядерными фрагментами (α, f_1 и f_2), чей вклад может непропорционально сильно снижать коэффициент кислородного усиления^{19/}.

Представленные на рис. 7 и 8а дозовые распределения нейтронного пучка со средней энергией 350 МэВ, получаемого из бериллиевой мишени толщиной 36 см ($66,2 \text{ г/см}^2$), бомбардируемой протонами с энергией 660 МэВ, характеризуются рядом благоприятных для терапии факторов:

- наличием широкого максимума на глубине 10-18 см, поглощенная доза в котором втрое выше входной, что означает существенное снижение нагрузки на поверхностные ткани;
- слабой расходимостью пучка с глубиной проникновения;
- достаточно равномерным распределением дозы по сечению пучка и крутым спадом ее по краям.

В измерениях дозовых распределений нейтронного пучка в фантоме, представленных на рис. 7 и 8, использовался клинический дозиметр типа VA-J-18 (производство ГДР) с шаровой камерой типа K-253 диаметром 16 мм, наполненной воздухом и имеющей воздухозввива- лентные стенки толщиной 1 мм, а также термолюминесцентные дозиметры, представляющие собой поликристаллы LiF диаметром 3 мм и высотой 2 мм. Проведенные ранее исследования показали полную пригодность этих дозиметров для относительных измерений пространственного распределения поглощенной дозы в пучках нейтронов высо-

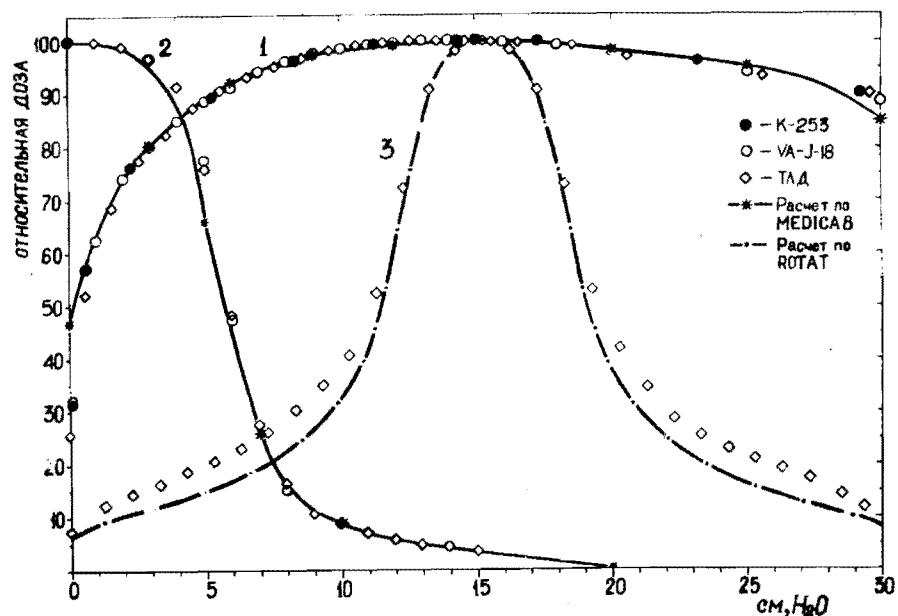


Рис. 7. Распределения поглощенной дозы в воде для нейтронного пучка со средней энергией 350 МэВ. 1 – глубинное распределение по оси пучка диаметром 10 см; 2 – радиальное распределение на глубине 12 см фантома; 3 – полная ротация для пучка диаметром 5 см.

кой энергии¹²⁰. На рис. 7 видно довольно хорошее согласие в результатах измерений для относительных глубинных (кривая 1) и радиальных (кривая 2) распределений, нормированных на максимум распределения в фантоме, полученных данными дозиметрами. Перемещение шаровой ионизационной камеры в водном фантоме осуществлялось с использованием трехкоординатного сканирующего изодозографа, управляемого ЭВМ, с помощью которой обрабатывалась информация с дозиметра VA-J-18 и по завершении измерений результаты представлялись в виде изодозных картин на плоттере или дисплее. Термолюминесцентные дозиметры размещались в фантоме в горизонтальной плоскости на тонкой (1 мм) плексигласовой подложке; доза, накопленная за время их облучения, определялась по амплитуде пика высвечивания. Градуировка детекторов проводилась в поле γ -излучения ^{60}Co .

Определение абсолютного значения поглощенной дозы проводилось путем измерения абсолютного значения заряда, собранного на электродах ионизационной камеры с известным объемом. Соотношение между зарядом и дозой, поглощенной в материале фантома, принималось согласно теории полости¹²¹, модифицированной нами путем

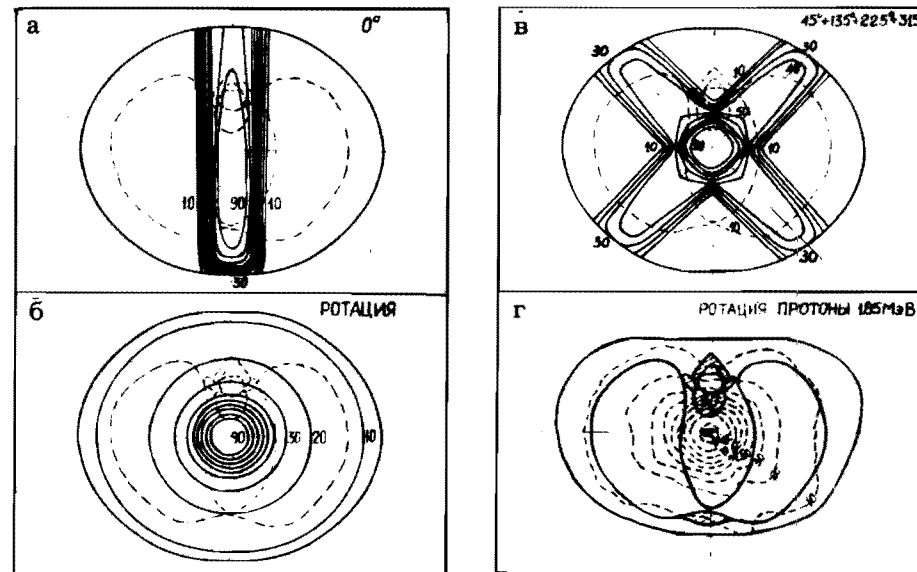


Рис. 8. Изодозные распределения нейтронного пучка со средней энергией 350 МэВ в водном фантоме для : а) однополюсного облучения (0°); б) ротационного облучения; в) многополюсного облучения ($45^\circ+135^\circ+225^\circ+315^\circ$); г) ротационное облучение протонным пучком с энергией 185 МэВ.

введения поправочного коэффициента детектора, учитывающего влияние отличия атомного состава материала камеры от атомного состава материала фантома. Этот коэффициент определялся экспериментально в исследуемом пучке нейтронов с помощью плоской ионизационной тонкостенной камеры, перед которой помещались радиаторы из различных материалов, в частности, из материала, из которого изготовлена стенка рабочей камеры, используемой для определения дозы, а также из некоторых других конструктивных материалов, воды и ткани. Введение и экспериментальное определение коэффициента детектора позволило избежать использования других, менее точно определяемых факторов, таких как керма и коэффициенты вклада¹²⁰, учитывающих влияние ядерных реакций в материалах камеры на ее чувствительность. Показано, что значения поправочного коэффициента детектора отличаются от единицы не более, чем на 1% в области максимума дозового поля в воде исследуемого нейтронного пучка и не более чем на 2% на глубинах, превышающих 1 г/см^2 для многих органических материалов, в частности для плексигласа, тканезквивалентной и воздухэквивалентной пластмассы толщиной до 10 мм^{122} . Было также показано практическое отсутствие влияния состава и давления газа в камере на определяемое значение поглощенной дозы в фантоме, облучаемом данным

нейтронным пучком, при учете плотности газа и отношения тормозных способностей ионизирующих частиц в материале фантома и в газе. Это обстоятельство позволило использовать для измерения поглощенной дозы в пучке нейтронов высоких энергий стандартную воздухоэквивалентную ионизационную камеру К-253 (производство ГДР), заполненную атмосферным воздухом. Абсолютное значение рабочего объема этой камеры было определено в поле γ -излучения изотопа ^{60}Co путем сравнения со специально сконструированной в Институте атомной энергии в Сверке (ПНР) эталонной камерой 123 , объем которой установлен в результате геометрических измерений с точностью 0,3%. Отношение эффективных тормозных способностей материала фантома (вода) и воздуха принималось по табличным данным для средней энергии вторичных протонов. Полученное значение может быть уточнено путем учета спектра заряженных частиц на разных глубинах фантома. Энергия ионообразования определялась с использованием функциональной связи этой величины с эффективной ЛПЭ излучения 124 , значение которой определялось экспериментально по колонной рекомбинации ионов в плоскопараллельной тканеэквивалентной ионизационной камере, наполненной пропаном под давлением 400 кПа 125 . В связи с лишь незначительным изменением значения энергии ионообразования с глубиной принималось постоянное значение энергии ионообразования, равное 34,6 эВ. Поправочный коэффициент детектора и отношение тормозных способностей для камеры К-253 в первом приближении также принимались независимыми от глубины. Такое упрощение позволяет трактовать глубинное распределение заряда, собранного камерой, как распределение поглощенной дозы. Ошибка за счет такой трактовки не превышает 2% на глубинах, больших 1 см воды. При определении абсолютного заряда, собранного камерой, использовались высокостабильные высокоомные сопротивления, абсолютные значения которых определялись путем измерения времени заряда эталонной емкости. Учитывались поправочные коэффициенты, касающиеся насыщения, полярности напряжения, температуры, давления и влажности воздуха. Получены абсолютные значения дозы в максимуме дозного распределения, составляющие от 1,6 до 2,6 сГр/мин в зависимости от условий коллимации нейтронного пучка, рассчитанные на 1 мкА тока протонов, падающих на бериллиевую мишень толщиной 36 см. На рис. 7 приведены некоторые точки, полученные путем измерения абсолютного заряда, собранного на электродах камеры К-253, нормированного на максимальное значение в глубинно-дозовом распределении в водном фантоме. Хорошее согласие с данными относительного распределения, полученными дозиметром VA-J-18 и ТЛД, свидетельствует еще раз о пригодности этих дозиметров для относительных измерений на нейтронном пучке, а с другой стороны — о возможности абсолютной калибровки этих дозиметров для получения пространственного распределения поглощенной дозы в абсолютных единицах, знание которого необходимо при планировании и проведении фракционированного многопольного или

ротационного облучения больших гипоксических опухолей на пучке нейтронов высоких энергий.

Как видно из рис. 7, в то время как значение поглощенной дозы в максимуме глубинного распределения втрое выше входного, выходная доза составляет примерно 90% от максимальной, и одним из способов ее снижения может служить применение ротационного или многопольного облучения глубокорасположенного объекта поражения, при котором существенно снижается лучевая нагрузка на поверхность тела и критические органы, к которым, в частности, относится спинной мозг. Это иллюстрирует экспериментальная кривая 3 на рис. 7, представляющая относительное распределение поглощенной дозы при ротации эллиптического фантома (с осями 31 и 26 см), измеренное ТЛД вдоль большой оси этого фантома, а штрихпунктирная линия — распределение, рассчитанное по программе ROTAT $^{126, 127}$, берущей за исходное поле изодозное распределение, измеренное дозиметром VA-J-18 для нейтронного пучка диаметром 5 см и представленное на рис. 8а. Расчет проводился методом суммирования дозовых полей со всех направлений облучения. Как видно, при применении ротации (рис. 8б) лучевая нагрузка на поверхность тела снижается примерно до 7% и примерно в 2,5 раза она снижается в районе расположения спинного мозга, являющегося критическим органом. При применении многопольного облучения (рис. 8в) можно добиться, чтобы нагрузка в области спинного мозга определялась изоуровнями от 35 до 0%, то есть почти так же, как и для широкого протонного пучка (рис. 8г), применявшегося в течение ряда лет для лечения рака пищевода, когда через спинной мозг проходили изоуровни от 35 до 15% 128 .

Таким образом, в то время, как используемые в настоящее время в терапии нейтронные пучки не имеют преимуществ в дозном распределении по сравнению с традиционным γ -излучением, пучок нейтронов высоких энергий имеет практически такое же геометрическое распределение поглощенной дозы, как и широкий протонный пучок, и вместе с тем обещает дать в ряде случаев терапевтический выигрыш за счет преодоления радиорезистентности гипоксических опухолевых клеток, встречающихся, в частности, при раке пищевода, лечение которого проводилось относительно успешно на протонном пучке ЛЯП ОИЯИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джелетов В.П. и др. — В кн.: III Совещание по использованию ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. ОИЯИ, Р18-12147, Дубна, 1979, с.271.
2. Джелетов В.П. и др. — В кн.: Труды десятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т. II, с.155.
3. Абазов В.М. и др. ОИЯИ, Р9-86-648, Дубна, 1986.
4. Джелетов В.П. и др. — Мед. радиология, 1980, №3, с.56.

5. Brown K.L. et al. CERN, 80-04, 1980.
6. Brown K.L., Iselin C. CERN, 74-2, 1974.
7. Абазов В.М. и др. ОИЯИ, 9-88-214, Дубна, 1988.
8. Абазов В.М. и др. ОИЯИ, 9-87-322, Дубна, 1987.
9. Густов С.А. ОИЯИ, 9-87-668, Дубна, 1987.
10. Желепов В.П., Комаров В.И., Савченко О.В. ОИЯИ, 16-3491, Дубна, 1967.
11. Серов А.Я., Сычев Б.С., Череватенко Е.П. ОИЯИ, 18-80-540, Дубна, 1980.
12. Серов А.Я. и др. ОИЯИ, 18-83-53, Дубна, 1983.
13. Blakely E.A. et al. — *Radiation Research*, 1979, 80, p.122.
14. Серов А.Я., Сычев Б.С., Череватенко Е.П. ОИЯИ, 18-87-670, Дубна, 1987.
15. Серов А.Я., Сычев Б.С. Труды РТИ АН СССР, М., 1973, №14, с.183.
16. Сычев Б.С. и др. Препринт РТИ АН СССР, М., 1983, №18.
17. Сычев Б.С. — Известия АН БССР, серия физ.-энерг. наук, 1986, №4, с.13.
18. Сычев Б.С. и др. Препринт РТИ АН СССР, М., 1979, №799.
19. Raju M.R., Jett J.H. — *Radiation Research*, 1974, v.60, p.473.
20. Зельчинский М. и др. ОИЯИ, 16-80-563, Дубна, 1980.
21. Kase K.R., Bjorngard B.E., Attix F.H. *The Dosimetry of Ionizing Radiation, V.I., Academic Press*, 1985.
22. Zielczynski M., Cherevatenko E.P. — In: *Sixth Symposium on Neutron Dosimetry. Neuherberg/Munich, Oct. 12-16, 1987, Book of Abstracts, ISSN 0721-1694, p.170.*
23. Зельчинский М. ОИЯИ, 16-88-71, Дубна, 1988.
24. Zielczynski M. — In: *Sixth Symposium on Neutron Dosimetry. Neuherberg/Munich, Oct. 12-16, 1987, Book of Abstracts, ISSN 0721-1694, p.141.*
25. Zielczynski M. et al. — In: *International Symposium on Dosimetry in Radiotherapy, IAEA, Viena, 31 Aug.-4 Sept. 1987, Extended Synopses, p.191.*
26. Абазов В.М. ОИЯИ, Б2, 16-9130, Дубна, 1972.
27. Абазов В.М., Зорин В.П. ОИЯИ, 16-11153, Дубна, 1978.
28. Астрахан Б.В. — В кн.: *Труды Первого международного семинара по использованию протонных пучков в лучевой терапии. М.: Атомиздат, 1979, т.3, с.140.*

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д12-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д12-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды II Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987.	4 р. 20 к.
Д17-88-95	Труды IV Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1987.	5 р. 20 к.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 июня 1988 года.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Абазов В.М. и др.

18-88-392

Получение и исследование терапевтического пучка нейтронов высоких энергий на фазотроне ЛЯП ОИЯИ

Представлены первые результаты по формированию терапевтического пучка нейтронов со средней энергией несколько сотен МэВ, получаемого на реконструированном фазотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с помощью толстых мишеней, бомбардируемых протонами с энергией 660 МэВ. Выбрана оптимальная мишень. Рассмотрены вопросы измерения абсолютного значения поглощенной дозы и относительных пространственных ее распределений в водном фантоме. Показано, что пучок нейтронов высоких энергий обладает практически таким же геометрическим распределением поглощенной дозы, как и широкий протонный пучок, и вместе с тем, обещает дать в ряде случаев терапевтический выигрыш за счет преодоления радиорезистентности гипоксических опухолевых клеток.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Abasov V.M. et al.

18-88-392

Forming and Study of a High Energy Neutron Beam from JINR Phasotron

First results are presented on forming the therapy beam of neutron with mean energy of a few hundred MeV. The beam is obtained from thick target bombarded by 660 MeV protons extracted from the converted phasotron at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR. The optimum target is selected. Determination of absolute value of absorbed dose and spatial dose distribution in a water phantom are considered. It is shown that the geometrical distribution of dose absorbed in phantom for the high energy neutron beam is practically the same as for a broad therapeutic beam of protons, but using of the neutron beam promises in some cases a therapy gain due to overcoming of radioresistency of hypoxic cancer cells.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988