

90-289



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

9-90-289

**В.М.Абазов, Г.А.Андреев, А.Н.Брагин,
С.А.Густов, В.П.Зорин, И.И.Клочков,
О.Л.Климов, С.А.Кутузов, И.В.Мирохин,
Г.В.Мицын, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко,
Е.П.Череватенко, А.В.Филимонов**

**ПУЧКИ НУКЛОНОВ И МЕЗОНОВ
ФАЗОТРОНА ОИЯИ
ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ПРИКЛАДНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

1990

1. ВВЕДЕНИЕ

В конце 1985 г. в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ было завершено создание шестикабинного клиничко-физического комплекса, включающего в себя¹¹ /:

а) три протонных канала медицинского назначения для облучения глубоко залегающих опухолей широкими и узкими протонными пучками различной энергии;

б) π -мезонный канал медицинского назначения для получения и использования в лучевой терапии интенсивных пучков отрицательных π -мезонов;

в) канал сверхбыстрых нейтронов медицинского назначения для облучения больших резистентных опухолей;

г) терапевтическую гамма-установку, которая будет использоваться в качестве резервного источника излучения, а также для отработки сочетанных методов облучения.

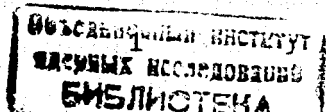
Схема первой очереди разводки медицинских пучков и расположения процедурных кабин клиничко-физического комплекса показана на рис. 1.

В течение последних трех лет выяснилось, что созданная для медико-биологических и клинических исследований разветвленная система каналов пучков и полученные характеристики этих пучков находят применение и в целом ряде физических задач (проекты ПИОН, ЯСНАПП, КОБРА и др.).

Целью настоящей работы являются детальное описание трактов пучков и обзор всех измеренных физико-дозиметрических характеристик нуклонных и мезонных пучков, имея в виду их возможное дальнейшее использование для новых физических и прикладных исследований.

2. ОПИСАНИЕ ТРАКТОВ ПУЧКОВ

Для получения широких (диаметром от 2 до 6 см) протонных пучков с энергиями 100, 130 и 200 МэВ¹²⁻⁴ /, а также узкого (диаметром около 3 мм) диагностического протонного пучка с энергией 660 МэВ¹⁵ / используется канал VIII. Выведенный из камеры ускорителя



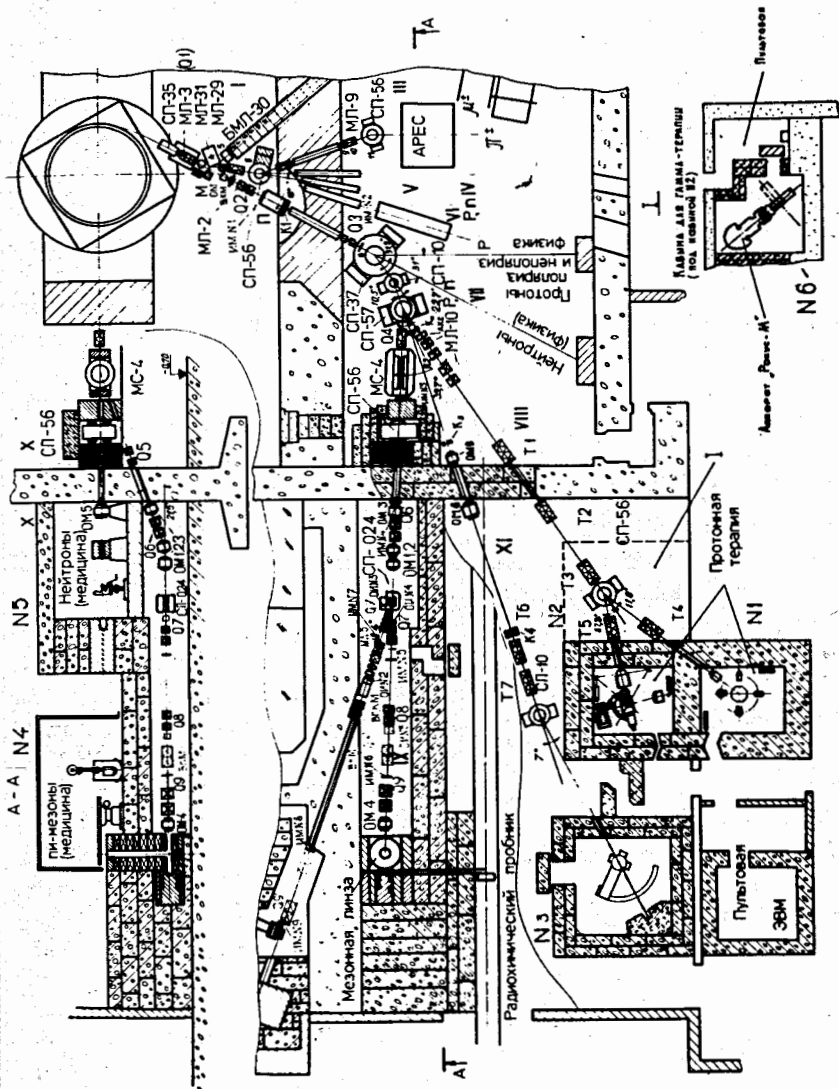


Рис. 1. Схема каналов медицинских пучков и расположение процедурных кабин на фазотроне ОИЯИ.

протонный пучок отклоняется на угол 6° магнитом ОМ-1, далее с помощью линзы МЛ-3 фокусируется на мезонной мишени (М) и затем горизонтальным и вертикальным корректирующими магнитами ОМ и ВКМ и далее линзой Q2 направляется и собирается на вход углеродного замедлителя (П), уменьшающего начальную энергию пучка до необходимой средней энергии 100, 130 или 200 МэВ. Дистанционно управляемый углеродный замедлитель (П) выполнен в виде трех независимо вращающихся барабанов, размещенных внутри защиты из тяжелого бетона, уменьшающей примерно на два порядка потока нейтронов, возникающих при торможении протонного пучка, и обеспечивающей на своей внешней поверхности после выключения ускорителя допустимый уровень фоновых излучений от наведенной пучком радиоактивности. Два первых (по направлению движения пучка) барабана имеют отверстия для установки на пути протонов углеродных блоков разной толщины, что обеспечивает выбор суммарной толщины замедлителя в интервале 0-130 см с шагом 1,2 см и получение заторможенного пучка протонов в широком диапазоне энергий от 100 до 660 МэВ. Третий вращающийся барабан, выполненный из стали толщиной 40 см, позволяет выводить на ось круглые или шелевые коллиматоры различных размеров, необходимые для формирования требуемого эмиттанса заторможенного пучка протонов, обеспечивающего его дальнейший анализ и транспортировку.

Магнитный анализ и получение необходимой дисперсии заторможенного пучка протонов осуществляется с помощью трех магнитов: СП-37, СП-10 и СП-57, последовательно отклоняющих пучок в горизонтальной плоскости на углы $31,3^\circ$; $10,5^\circ$ и $13,5^\circ$ соответственно.

Дублет квадрупольных линз Q3, расположенный на выходе коллиматора в защитной стене, позволяет получить пучок оптимальных размеров и осуществить пространственное разделение импульсных компонент заторможенного пучка протонов в месте расположения автоматической коллиматорной системы (АКС), формирующей импульсный спектр заторможенных протонов. Эта коллиматорная система представляет собой набор из 12 пар подвижных пластин шириной по 1,5 см, образующих регулируемый ступенчатый профиль, перекрывающий частично или полностью апертуру отдельных компонент импульсного распределения протонов, и трансформирующих, таким образом, имеющееся импульсное распределение в такое, которое позволяет получить в каждой из процедурных кабин распределение дозы с заданной конфигурацией кривой Брэгга. Импульсный разброс ($\Delta p/p$) заторможенного протонного пучка при таком способе формирования может изменяться от 0,4 до 7%.

Два квадрупольных дублета МЛ-10 и пять квадрупольных триплетов ($T_1 \div T_5$) служат для транспортировки пучка в процедурные помещения

№ 1 и 2 и компенсации линейной дисперсии в области расположения облучаемого объекта. Магнит СП-56 используется для попеременной разводки пучков в кабины № 1 и 2. Поперечное сечение протонных пучков в каждой из процедурных кабин формируется с помощью набора основных и чистовых коллиматоров, устанавливаемых непосредственно перед облучаемым объектом, и сформированный таким способом пучок направляется внутри облучаемого объекта. Стены процедурных кабин № 1 и 2 толщиной от 1,5 до 2,0 м тяжелого бетона вместе с защитной дверью, перекрывающей вход в любую из кабин, понижают величину фоновых излучений вне кабин до допустимого уровня.

В случае формирования узкого диагностического пучка для протоннографии (интенсивностью $\sim 10^6 \text{ с}^{-1}$) выведенный из ускорителя протонный пучок с полной энергией и интенсивностью проходит щелевой коллиматор K_1 ($3 \times 10 \text{ мм}$) в углеродном замедлителе (П) и затем с помощью линзы Q3 и магнитов СП-37, СП-10 и СП-57 фокусируется и отклоняется на вход коллиматора $K_{\text{п}}$, установленного перед АКС. Сформированный таким способом узкий протонный пучок транспортируется далее без потерь по каналу VIII в кабину № 1, где фокусируется на объекте, подлежащем диагностике, и затем поглощается в детектирующей установке.

В случае формирования узкого (диаметром от 5 до 20 мм) протонного пучка с энергией 660 МэВ для облучения внутричерепных мишеней методом напролет используется канал XI¹⁶. Выведенный из ускорителя протонный пучок с полной энергией и интенсивностью проходит линзу Q2, щелевой коллиматор K_1 ($5 \times 15 \text{ мм}$) в углеродном замедлителе (П) и затем с помощью линзы Q3 и магнитов СП-37, СП-10 и СП-57 фокусируется и отклоняется на вход коллиматора K_2 , установленного сразу после магнита СП-57. Далее пучок входит в XI канал, формируется коллиматорами K_3 и K_4 и с помощью линз T6, T7 и магнита СП-10 фокусируется и отклоняется в кабину №3, где после прохождения объекта облучения гасится в защите из железа (толщиной 1 м) и тяжелого бетона (1,5 м). Магниты ОМВ и ОМ-6 служат для стабилизации узкого протонного пучка в месте расположения объекта облучения.

Потери интенсивности пучка в этом режиме работы канала XI в основном определяются потерями в ускорительном зале и в лаборатории №4, а потери пучка в лаборатории №5 практически отсутствуют. Интенсивность узкого пучка в кабине №3 составляет $5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ и ловушка-гаситель уменьшает нейтронный фон в прилегающих к этой лаборатории помещениях до уровня предельно допустимой дозы.

Для получения медицинского пучка π^- -мезонов используется канал IX¹⁷⁻¹⁰. Выведенный из камеры ускорителя протонный пучок с полной энергией 660 МэВ и интенсивностью отклоняется магнитом

ОМ-1 на угол $\cong 6^\circ$, а затем корректирующими магнитами ОМ и ВКМ и линзами МЛ-3, Q2 и Q3 направляется на центр магнита СП-37, расположенного за четырехметровой защитной стеной. Магниты СП-37, СП-10 и СП-57 отклоняют пучок в горизонтальной плоскости на суммарный угол 65° , затем с помощью магнита МС-4 протонный пучок поворачивается в вертикальной плоскости вниз на угол $21,5^\circ$ и далее тремя магнитами ОМ-1,2,3, расположенными в туннеле на первом этаже здания ускорителя, снова переводится в горизонтальное положение. Магнит СП-024 отклоняет пучок на угол 3° в горизонтальной плоскости, чтобы попасть на центр π^- -мезонной линзы в конце IX канала или на $18,4^\circ$ в случае сброса пучка по каналу XII на мишень установки ЯСНАПП-2. Шесть линз (Q4 ÷ Q9) обеспечивают удержание протонного пучка и его транспортировку без потерь от магнита СП-57 до мишени π^- -мезонной линзы, предназначенной для получения интенсивного пучка π^- -мезонов. Вертикальный и горизонтальный корректирующие магниты ВКМ и ОМ-4 в конце тракта служат для наводки протонного пучка на мезонообразующую мишень (5 см W или 5 см Cu), расположенную в сильном магнитном поле π^- -мезонной линзы. После прохождения мишени протонный пучок гасится в защите из железа толщиной 2 м и тяжелого бетона толщиной 7 м. Весь путь протонного пучка проходит в вакууме, кроме воздушного промежутка между камерой ускорителя и началом вакуумопровода после углеродного замедлителя. Работа на каналах IX и XII возможна только в режиме, когда мезонная мишень (М) удаляется из пучка. В противном случае потери пучка в трактах при транспортировке через лаборатории №4 и 5 становятся недопустимо высокими.

При получении клинического пучка π^- -мезонов широкоугольная магнитная линза фокусирует мезоны вертикально вверх в кабину №4, расположенную на втором этаже четвертой пристройки. При интенсивности протонного пучка 2 мкА, падающего на мишень из вольфрама толщиной 5 см, получены пучки несепарированных π^- -мезонов с энергией до 80 МэВ и интенсивностью до $3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1/10}$.

Для проводки протонного пучка в здание ЯСНАПП используется канал XII¹¹. В этом режиме работы фазотрона выведенный протонный пучок транспортируется сначала по каналу IX до магнита СП-024, а затем отклоняется этим магнитом на угол $18,4^\circ$ в направлении мишени ЯСНАПП-2. Линзы Q7, МЛ-5 и Q8 канала XII обеспечивают удержание протонного пучка и его дальнейшую транспортировку до линзы Q9, которая во время работы ускорителя подкатывается к мишени ЯСНАПП-2 на расстояние до 80 см и формирует на этой мишени протонный пучок с поперечными размерами до 3-7 мм. Горизонтальный и вертикальный корректоры ВГКМ, установленные между линзами МЛ-5 и Q8, позволяют осуществлять точное наведение протонного пучка

малых размеров на мишень ЯСНАПП-2, после прохождения которой протонный пучок гасится в ловушке здания ЯСНАПП. Потери протонов в канале XII составляют 5-7% и максимально допустимая начальная интенсивность выведенного протонного пучка при полученном уровне потерь достигает 2 мкА.

Для получения терапевтического нейтронного пучка используется канал $X^{12, 19}$. Выведенный из камеры ускорителя протонный пучок с полной энергией 660 МэВ и интенсивностью отклоняется магнитом ОМ-1 на угол $\cong 6^\circ$, а затем корректирующими магнитами ОМ и ВМК и линзами МЛ-3, Q2 и Q3 направляется на центр магнита СП-37, расположенного за четырехметровой защитной стеной. Магниты СП-37, СП-10 и СП-57 отклоняют пучок в горизонтальной плоскости на суммарный угол 64° , а затем с помощью линзы Q4 пучок фокусируется на одну из мишеней нейтронной мишенной станции.

Дистанционно управляемая нейтронная мишенная станция представляет собой вращающийся барабан, окруженный защитой из железа и бетона суммарной толщиной около 1 м, уменьшающей более чем на два порядка потока нейтронов, вылетающих из мишени перпендикулярно протонному пучку, и снижающей до допустимого уровня фон от наведенной пучком радиоактивности. Барабан имеет 11 отверстий для установки на пути протонов мишеней из различных материалов (Be, C, Al, Cu, Pb) с набором толщин до 70 г/см^2 для получения пучка нейтронов со средней энергией около 350 МэВ. Магнит СП-56, установленный сразу после нейтронной мишенной станции, отклоняет прошедшие через мишень протоны и образовавшиеся в мишени заряженные частицы на угол свыше 18° в горизонтальной плоскости для последующего их поглощения в железной защите толщиной 1,3 м и бетонной защите толщиной 2 м. Нейтроны, образованные в мишени под углом 0° , проходят между полюсами магнита СП-56, первый формирующий коллиматор в железной защите и двухметровой бетонной стене и направляются в процедурное помещение (кабина №5), расположенное в зале лаборатории №5. В кабине установлен магнит ОМ-5, который дополнительно очищает нейтронный пучок от примесей заряженных частиц, образовавшихся на стенках коллиматора. Далее нейтронный пучок формируется чистовым коллиматором из железа длиной $\sim 1 \text{ м}$, проходит область расположения облучаемого объекта и гасится в ловушке из железа и тяжелого бетона суммарной толщиной около 3,5 м, расположенной в тыльной стене кабины №5. Для пучка протонов интенсивностью 2 мкА, падающего на бериллиевую мишень толщиной 36 см, максимальный поток нейтронов для коллиматора диаметром 120 мм будет составлять около 10^9 с^{-1} , что соответствует мощности дозы в месте расположения облучаемого объекта $\sim 5 \text{ рад/мин}$.

3. АППАРАТУРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ И НАСТРОЙКИ КАНАЛОВ

Для диагностики пучков была разработана, изготовлена, смонтирована и отлажена детектирующая аппаратура, в большей части работающая в автоматическом режиме на связи с ЭВМ и включающая в себя:

1. Ионизационные камеры для мониторинга первичных и вторичных пучков¹³.
2. Калориметры для абсолютной калибровки первичного протонного пучка^{14, 18}.
3. Установку для оперативного измерения энергии и дисперсии протонного пучка (на связи с ЭВМ).
4. Ионизационные камеры для измерения профиля протонного пучка (на связи с ЭВМ).
5. Неподвижные и подвижные линейки из полупроводниковых элементов для детальных измерений поперечного распределения пучков заряженных частиц (на связи с ЭВМ)¹⁵.
6. Изодозограф для определения пространственного распределения пучков заряженных частиц в воздухе и водной среде (на связи с ЭВМ)¹⁶.
7. Магнитные индукционные датчики для мониторинга протонного пучка в вакууме (на связи с ЭВМ)¹⁷.
8. Оптические индикаторы для наблюдения за формой и положением пучка в вакууме.
9. Вакуумный профилометр протонного пучка (на связи с ЭВМ).
10. Сцинтилляционные и полупроводниковые счетчики для измерения состава пучков (на связи с ЭВМ).
11. Корректирующие магниты с источниками питания для настройки каналов пучков.
12. Систему для оперативного отображения токов линз и магнитов на экран дисплея ЭВМ.

4. ФИЗИКО-ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НУКЛОННЫХ И МЕЗОННЫХ ПУЧКОВ

С помощью аппаратуры, перечисленной в п.3, были выполнены измерения параметров выведенного протонного пучка фазотрона ОИЯИ^{18, 19, 20}, а также получены все необходимые физико-дозиметрические характеристики вторичных пучков. Результаты проведенных измерений показаны на рис. 2-7 и суммированы в таблицах 1-8.

Следует отметить, что при существующей интенсивности выведенного протонного пучка фазотрона ОИЯИ 2,0-2,5 мкА с помощью широ-

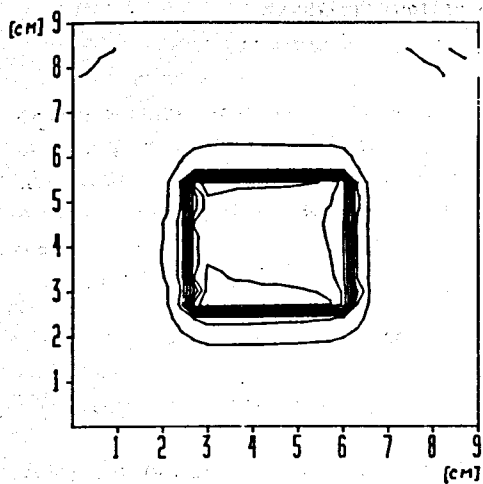


Рис. 2. Изоуровни поперечного сечения протонного пучка, прошедшего прямоугольный коллиматор, получены с помощью сканирующего диодного ряда ¹¹⁵I.

Рис. 3. Примеры изодозных распределений протонных пучков с энергиями 200, 100 и 130 МэВ (а, б, в) и поперечных изоуровней узких протонных пучков (г, д), полученных с помощью изодозографа с миниатюрным кремниевым детектором ¹¹⁶I.

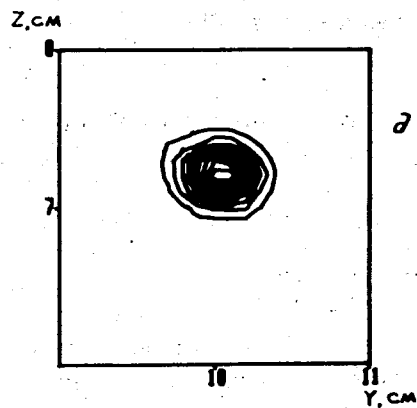
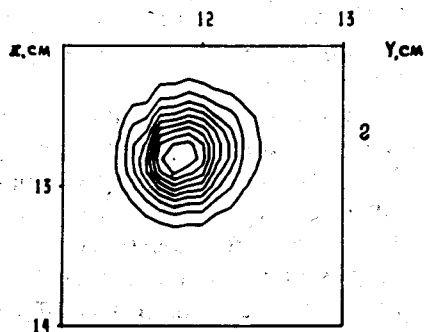
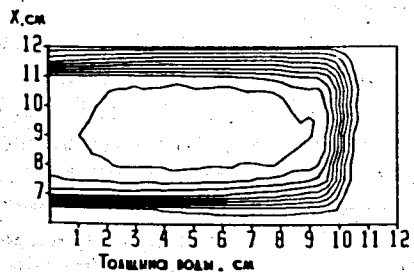
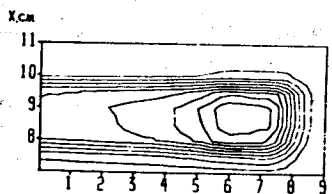
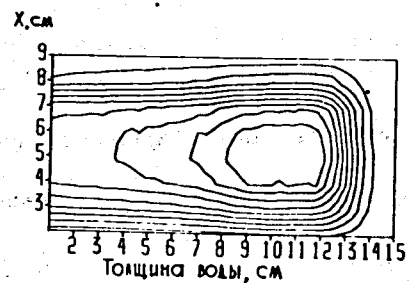
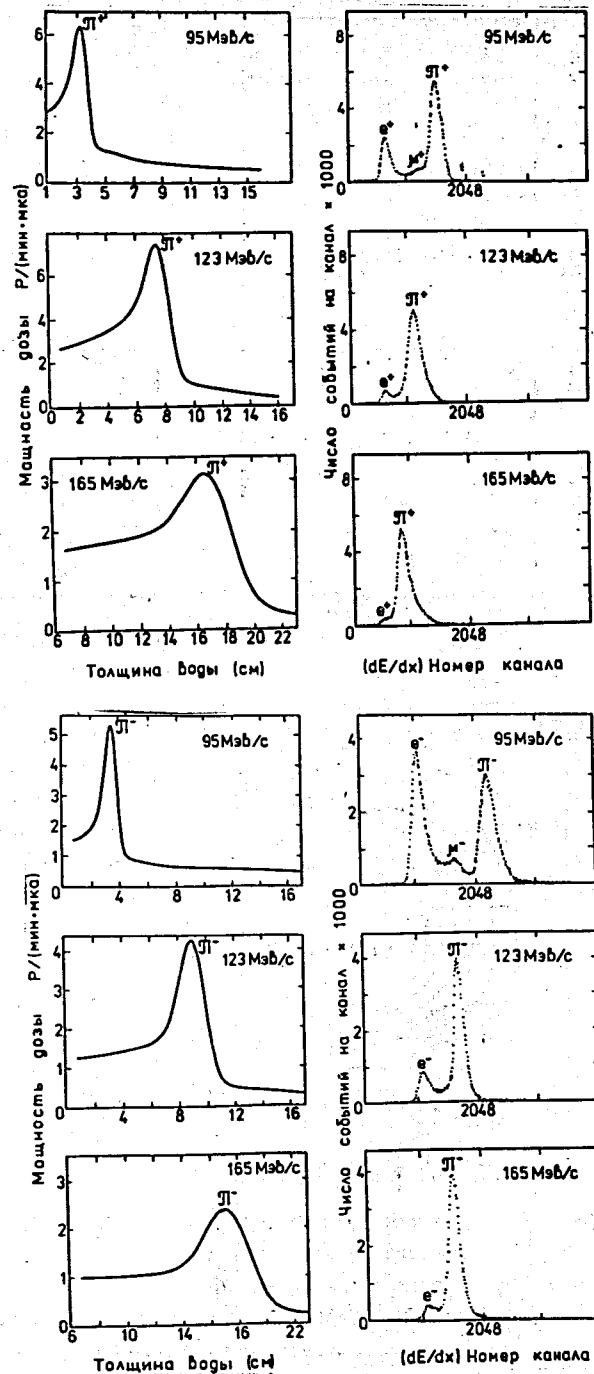


Рис. 4. Примеры глубинных дозных распределений мезонных пучков и dE/dx-спектров, полученных с помощью изодозографа и сцинтилляционных счетчиков.



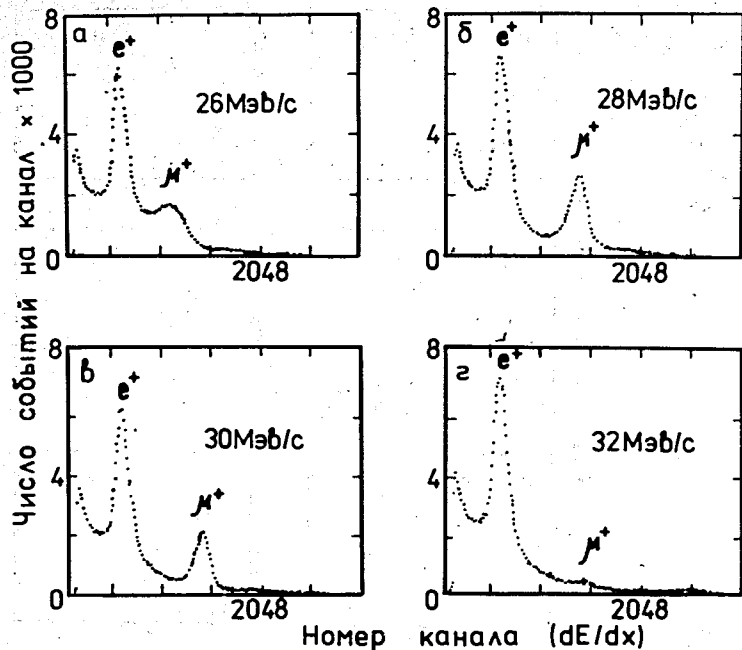


Рис. 5. dE/dx -спектры "поверхностных" μ^+ -мезонов при разных импульсах заряженных частиц.

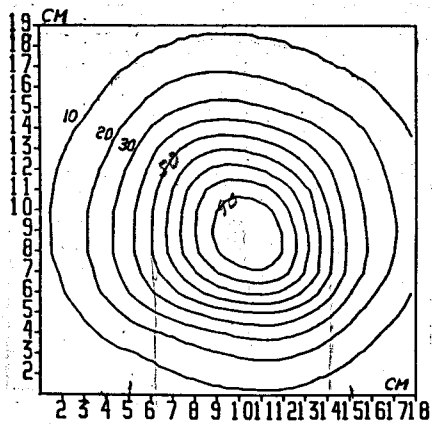


Рис. 7. Глубинное дозное распределение нейтронного пучка, возникающего при соударении протонов с энергией 660 МэВ с бериллиевой мишенью толщиной 36 см^{12/} (сплошная кривая, точки разного вида соответствуют показаниям различных детекторов). Пунктирные кривые — данные других работ для существенно меньших энергий нейтронов.

Рис. 6. Изоуровни поперечного сечения мезонного пучка в фокусе широкоугольной магнитной линзы, полученные с помощью изодозографа с кремниевым детектором^{11/}.

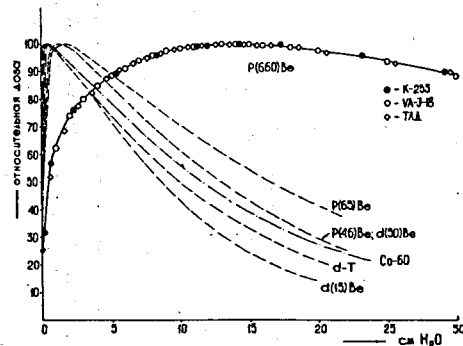


Таблица 1. Характеристики реализованных режимов работы протонных каналов фазотрона ОИЯИ для проведения физических экспериментов

Номер канала	VIII	IX	XI	XII
Назначение	Установка ПИОН	Установка КОБРА	Установка Зрелова	Установка ЯСНАПТ-2
Энергия, МэВ	100-660	660	660	660
Разброс по импульсу, %	$\Delta p/p \geq 0,5$			
Площадь изображения на мишени, см ² (уровень 2σ)	7	5	$\geq 0,25$	0,5-1
Коэффициент проводки, %		92		87
Максимально допустимая интенсивность по радиационной защите	10^9	2 мкА	10^8	2 мкА
Эмиттанс пучка на выходе канала, см · мрад :				
а) горизонтальный		16,0		19,0
б) вертикальный		8,5		8,5

Параметры выведенного протонного пучка:

1. Средняя энергия $T_p = (659 \pm 6)$ МэВ.
2. Энергетическая дисперсия $\sigma_E = (3,1 \pm 0,8)$ МэВ.
3. Эмиттанс на границе рассеяния магнитного поля фазотрона: горизонтальный $\epsilon_x = (5,1 \pm 2,3)$ см · мрад; вертикальный $\epsilon_y = (3,4 \pm 1,4)$ см · мрад.

Таблица 2. Параметры пучка отрицательных мезонов для $\Delta p/p = (5,8 \pm 0,3)$ %

Импульс P, МэВ/с	Энергия π -мезонов, МэВ	Пробег π -мезонов R, г/см ² · Н ₂ О	Полуширина разброса пробегов ΔR , г/см ² · Н ₂ О	Мощность дозы в пи-Д _{макс.} в Брэгга, сГр/мин · мкА	$\frac{D_{\text{макс.}}}{D_{\text{выхода}}}$
76	20	$1,8 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	4,6	2,8
95	30	$3,7 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$	5,1	3,6
112	40	$6,1 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	5,0	3,9
123	52	$8,0 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,1$	4,7	3,7
149	65	$13,7 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,1$	3,4	3,1
165	77	$17,9 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$	2,3	2,6

Таблица 3. Процентный состав мезонных пучков в зависимости от импульса и типа мишени для положительно заряженных частиц

Импульс частиц, МэВ/с	Мишень Cu			Мишень W		
	e^+ (%)	μ^+ (%)	π^+ (%)	e^+ (%)	μ^+ (%)	π^+ (%)
76	50±2	8±1	42±2	67±2	6±1	27±1,5
85	26±1,5	8±1	68±2	41±2	6±1	53±2
112	15±1	6±1	79±2,5	24±1,5	6±1	70±2
123	9±1	5±1	86±2,5	13±1	5±1	82±2,5
149	6±1	3±1	91±2,5	9±1	3±1	88±2,5
165	5±1	2±1	93±2,5	7±1	2±1	91±2,5

Таблица 4. Процентный состав мезонных пучков в зависимости от импульса и типа мишени для отрицательно заряженных частиц

Импульс частиц, МэВ/с	Мишень Cu			Мишень W		
	e^- (%)	μ^- (%)	π^- (%)	e^- (%)	μ^- (%)	π^- (%)
95	50±2	6±1	44±2	61±2	5±1	34±1,5
112	32±1,5	5±1	63±2	41±2	4±1	55±2
123	24±1,5	3,5±1	73±2,5	32±2	3,5±1	65±2
149	15±1	≤3	82±2,5	22±1,5	≤3	75±2,5
165	13±1	≤3	84±2,5	19±1	≤3	78±2,5

Таблица 5. Плотность потока, интенсивность и плотность остановок положительно заряженных частиц мезонного пучка, рассчитанных на 1 мкА протонного пучка. Мишень W

Импульс частиц, МэВ/с	Плотность потока, 10^4 1/см ² ·с			Интенсивность на площадь 80 см ² , 10^6 1/с			Плотность остановок 10^4 1/г·Н ₂ О
	e^+	μ^+	π^+	e^+	μ^+	π^+	
76	40±8	3,3±0,7	16±3	32±6	2,6±0,6	13±3	40±8
95	30±6	4,5±0,9	38±8	24±5	3,6±0,8	30±6	54±11
112	20±4	4,8±1,1	58±12	16±3	3,8±0,8	46±9	45±9
123	10±2	3,6±1,0	62±12	8,0±1,6	2,9±0,8	50±10	33±7
149	5,4±1,2	1,5±0,5	52±10	4,3±0,9	1,2±0,4	42±3	17±3
165	3,5±1,0	0,8±0,4	44±9	2,8±0,6	0,6±0,3	35±7	13±2

Таблица 6. Плотность потока, интенсивность и плотность остановок компонент отрицательно заряженных частиц мезонного пучка, рассчитанных на 1 мкА протонного пучка. Мишень W

Импульс частиц, МэВ/с	Плотность потока, 10^4 1/см ² ·с			Интенсивность на площадь 80 см ² , 10^6 1/с			Плотность остановок, 10^4 1/г·Н ₂ О
	e^-	μ^-	π^-	e^-	μ^-	π^-	
95	23±5	1,8±0,5	12±2,5	18±4	1,4±0,4	10±2	16±3
112	14±3	1,5±0,5	19±4	11±2	1,2±0,4	15±3	15±3
123	10±2	1,1±0,4	21±4	8,0±1,6	0,9±0,9	17±3,4	13±2,6
149	6,3±1,3	≤0,9	22±4,5	5,0±1,0	≤0,7	18±3,6	8,0±1,6
165	4,8±1,0	≤0,8	20±4	3,8±0,8	≤0,6	17±3,4	6,0±1,2

Таблица 7. Плотность потока, интенсивность и плотность остановок поверхностных μ^+ -мезонов, рассчитанных на 1 мкА протонного пучка. Мишень Cu

Импульс, МэВ/с	$\frac{N_{\mu^+}}{N_{e^+}}$ (%)	Плотность потока, 10^3 1/см ² ·с·мкА	Интенсивность на площадь 80 см ² , 10^5 1/с·мкА	Плотность остановок, 10^5 1/г·Н ₂ О·мкА
28	3,3±0,2	6,6±1,3	5,3±1,1	2,8±0,6
30	2,7±0,2	5,4±1,1	4,3±0,9	1,8±0,4
32	0,2	0,4	—	—

коугольной магнитной линзы достигнуты интенсивности мезонных пучков $\cong 10^8$ с⁻¹ для π^+ -мезонов и $\cong 3 \cdot 10^7$ с⁻¹ для π^- -мезонов, что соответствует проектным параметрам мезонных пучков установки "Ф" для планировавшейся интенсивности выведенного протонного пучка 25 мкА. Кроме того, получен пучок так называемых "поверхностных" μ -мезонов (энергия ~4 МэВ) с интенсивностью $\cong 10^6$ с⁻¹.

Таблица 8. Характеристики каналов медицинских пучков реконструированного фазотрона, рассчитанных на интенсивность введенных протонов 1 мкА

№ п/п	Энергия протонов, МэВ	Номер каналов	Вид частиц	Интенсивность в кабине	Диаметр пучка в кабине	Мощность дозы в месте расположения облучаемого объекта, сГр/мин	Примечание
1	VIII 200	1	протоны 200 МэВ	$5 \cdot 10^8$	2-6	10-150	200 МэВ протоны получают торможением в углеродном замедлителе (II)
2	VIII 100	1	протоны 100 МэВ	10^8	2-6	30-120	—
3	VIII 660	1	протоны 660 МэВ	10^6	0,3	6,0	для диагностических целей
4	VIII 130	2	протоны 130 МэВ	$2 \cdot 10^8$	3-5	25-100	130 МэВ протоны получают торможением в углеродном замедлителе, (II)
5	XI 660	3	протоны 660 МэВ	$5 \cdot 10^7$	0,5-2	$6 \cdot 10^2$	
6	IX 660	4	π^- -мезоны 30-80 МэВ	$(1 \div 2) \cdot 10^7$	2-10	4±6	π^- -мезоны получают на мишени из вольфрама толщиной 5 см
7	X 660	5	нейтроны со средней энергией 350 МэВ	$(3 \div 5) \cdot 10^8$	5-15	2,4±9,0	нейтроны получают на бериллиевой мишени толщиной 36 см

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достигнутые значения интенсивностей мезонных пучков повышают возможности фазотрона ОИЯИ до уровня малых мезонных фабрик с эквивалентным током выведенного протонного пучка 20-25 мкА и в достаточной мере обеспечивают перспективу развития на ближайшие годы как для исследований в области мезонной физики, так и для выполнения ряда прикладных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джелепов В.П. и др. — Мед. радиология, 1987, №8, с.81.
2. Абазов В.М. и др. — Сообщение ОИЯИ 9-87-281, Дубна, 1987.
3. Абазов В.М. и др. — Сообщение ОИЯИ 9-87-280, Дубна, 1987.
4. Абазов В.М. и др. — Препринт ОИЯИ Р9-86-648, Дубна, 1986; Мед. радиология, 1988, №1, с.67.
5. Абазов В.М. и др. — Сообщение ОИЯИ 18-88-207, Дубна, 1988.
6. Зорин В.П. и др. — Сообщение ОИЯИ 9-87-840, Дубна, 1987.
7. Абазов В.М. и др. — Сообщение ОИЯИ 9-90-64, Дубна, 1990.
8. Абазов В.М. и др. — Сообщение ОИЯИ 9-90-68, Дубна, 1990.
9. Абазов В.М. и др. — Сообщение ОИЯИ 9-90-69, Дубна, 1990.
10. Абазов В.М. и др. — В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ №2(41)-90, Дубна, 1990, с.22.
11. Абазов В.М. и др. — Сообщение ОИЯИ 9-89-176, Дубна, 1989.
12. Абазов В.М. и др. — Сообщение ОИЯИ 18-88-392, Дубна, 1988.
13. Зельчинский М., Шнишкин А.Л. — Сообщение ОИЯИ Р13-88-142, Дубна, 1988.
14. Джелепов В.П. и др. — Препринт ОИЯИ 16-3491, Дубна, 1967.
15. Густов С.А. — Сообщение ОИЯИ 9-87-668, Дубна, 1987.
16. Кутузов С.А. — Сообщение ОИЯИ Р10-89-194, Дубна, 1989.
17. Мицун Г.В. — Сообщение ОИЯИ 13-89-170, Дубна, 1989.
18. Абазов В.М. и др. — Сообщение ОИЯИ 9-87-322, Дубна, 1987.
19. Абазов В.М. и др. — Сообщение ОИЯИ 9-88-214, Дубна, 1988.
20. Мирохин И.В. — Сообщение ОИЯИ 9-87-321, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 апреля 1990 года.