

P9-2005-9

Е. М. Андреев, С. А. Густов, А. В. Демьянов,  
А. Е. Дребушко, Г. А. Кононенко, И. В. Мирохин,  
Н. А. Морозов, В. С. Роганов, О. В. Савченко,  
Н. Г. Шакун

МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕЗОННЫХ КАНАЛОВ  
ФАЗОТРОНА ЛЯП ОИЯИ

## Модернизация мезонных каналов фазотрона ЛЯП ОИЯИ

На фазотроне ЛЯП ОИЯИ осуществлена модернизация тракта Т и мезонных каналов № 1, 2 и 3, направленная на расширение возможностей проведения физических исследований на мезонных пучках фазотрона путем улучшения параметров существующих и формирования новых мезонных пучков. В результате проведенной модернизации за счет оптимизации углов отбора вторичных частиц из мишеней и установки дополнительных линз и магнитов интенсивность пучков положительных пионов на канале № 3 выросла в диапазоне энергий 100–400 МэВ в 3–40 раз и достигла  $3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$  на 1 мкА выведенного протонного пучка. Максимальная интенсивность пучка отрицательных пионов в этом диапазоне энергий приблизилась к значению  $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  на 1 мкА выведенного протонного пучка. На каналах № 1, 2 и 3 благодаря образованию стационарного вакуума от камеры фазотрона с разветвлением по всем трактам мезонных пучков до самого их конца и размещению в вакууме двух мишеней станций стало возможным получение мезонных пучков с импульсом  $< 50 \text{ МэВ}/c$ , в том числе пучков «поверхностных» мюонов с энергией около 4 МэВ. Появление условий для формирования узкого (сфокусированного на мезонной мишени в горизонтальной плоскости до 2–3 мм) выведенного протонного пучка позволило уменьшить примесь электронной или позитронной компоненты во всех мезонных пучках в 2–3 раза, а для пучков медленных пионов на канале № 3 (10–40 МэВ) примесь электронно-позитронной компоненты уменьшилась в 10–15 раз за счет увеличения угла отбора пионов до  $110^\circ$  на второй мишенной станции. Стало возможным применение небольших ( $\sim 80 \text{ мм}$ ) мишеней из тяжелых элементов, для которых выход пионов с импульсом около  $100 \text{ МэВ}/c$  увеличился в 2–4,5 раза по сравнению с мишенью из бериллия такого же размера.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005

## Перевод авторов

## Modernization of Meson Channels of the JINR LNP Phasotron

At the JINR LNP Phasotron, modernization of beamline T and meson beam channels 1, 2 and 3, for expansion of realization opportunities of physical researches on meson beams, was carried out. Parameters of existing beams were improved and new ones were generated. As a result of the modernization due to optimization of angles of secondary particle selection from targets and installation of additional lenses and magnets, the intensity of positive  $\pi$  meson beams on channel 3 has grown 3–40 times in the energy range 100–400 MeV and has run up to  $3 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$  per 1  $\mu\text{A}$  intensity of the extracted proton beam. The maximum intensity of the  $\pi^-$  meson beam in this range has reached  $5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$  per 1  $\mu\text{A}$  intensity of the extracted beam. On channels 1, 2 and 3 due to creation of stationary vacuum from the chamber of the phasotron with a branching on all beamlines of the mesons up to their end and accommodation in vacuum of two target stations, production of meson beams with momentum  $< 50 \text{ MeV}/c$ , including surface muons with energy near 4 MeV, was made possible. Occurrence of conditions for formation of a narrow (focused on the meson targets in a horizontal plane up to 2–3 mm) proton beam allowed one to reduce 2–3 times the impurity of electronic or positronic components in all meson beams, and for beams of slow  $\pi$  mesons on channel 3 (10–40 MeV) the admixture of electron–positron components reduced 10–15 times due to increase of the angle of selection of  $\pi$  mesons up to  $110^\circ$  on the second target station. It became possible to apply small ( $\sim 80 \text{ mm}$ ) target from heavy elements for which the  $\pi$ -meson yield with a moment of about  $100 \text{ MeV}/c$  increased 2–4.5 times in comparison with a beryllium target of the identical size.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005

## ВВЕДЕНИЕ

Расположение оборудования на тракте Т и начальных участках каналов № 1 и 3 до модернизации мезонных каналов (рис. 1) имело ряд особенностей и недостатков, которые ограничивали возможности проведения физических экспериментов на мезонных пучках фазотрона ЛЯП ОИЯИ. Так, отсутствие вакуума на тракте Т, в местах размещения мезонообразующих мишеней, в головных элементах каналов № 1 и 3 и анализирующих магнитах каналов № 1 и 2 не позволяло осуществлять проводку по этим каналам мезонных пучков с импульсом  $< 50 \text{ МэВ}/c$  и тем самым исключало получение на каналах № 1, 2 и 3 пучков «поверхностных» мюонов с энергией около 4 МэВ.

Угол отбора вторичных частиц от второй мишенной станции, равный  $50^\circ$ , не являлся оптимальным с учетом углового и энергетического сечения мезонообразования как для получения медленных пионов с энергией  $< 50 \text{ МэВ}$ , так и для получения высокоэнергетических пионов в диапазоне энергий 200–400 МэВ.

Близкое расположение мезонных мишеней от края линз МЛ-3 не позволяло сфокусировать и получить на мишени протонный пучок малых размеров и тем самым снизить примесь электронной или позитронной компоненты в мезонных пучках, а также использовать для увеличения интенсивности пучков пионов малых энергий мишени из тяжелых элементов из-за эффектов самопоглощения в мишени образующихся пионов.

Целью настоящей работы является описание результатов осуществленной модернизации тракта Т и каналов № 1, 2 и 3, которая позволила устранить указанные выше ограничения и недостатки и расширить возможности для проведения физических экспериментов на мезонных пучках фазотрона ЛЯП ОИЯИ.

### 1. ОПИСАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ ТРАКТА Т И МЕЗОННЫХ КАНАЛОВ № 1, 2 И 3

Первоначальные варианты модернизации мезонных каналов фазотрона были предложены еще в 1990 г. [1, 2]. Затем на протяжении 90-х гг. проект модернизации уточнялся и видоизменялся и в окончательном варианте был

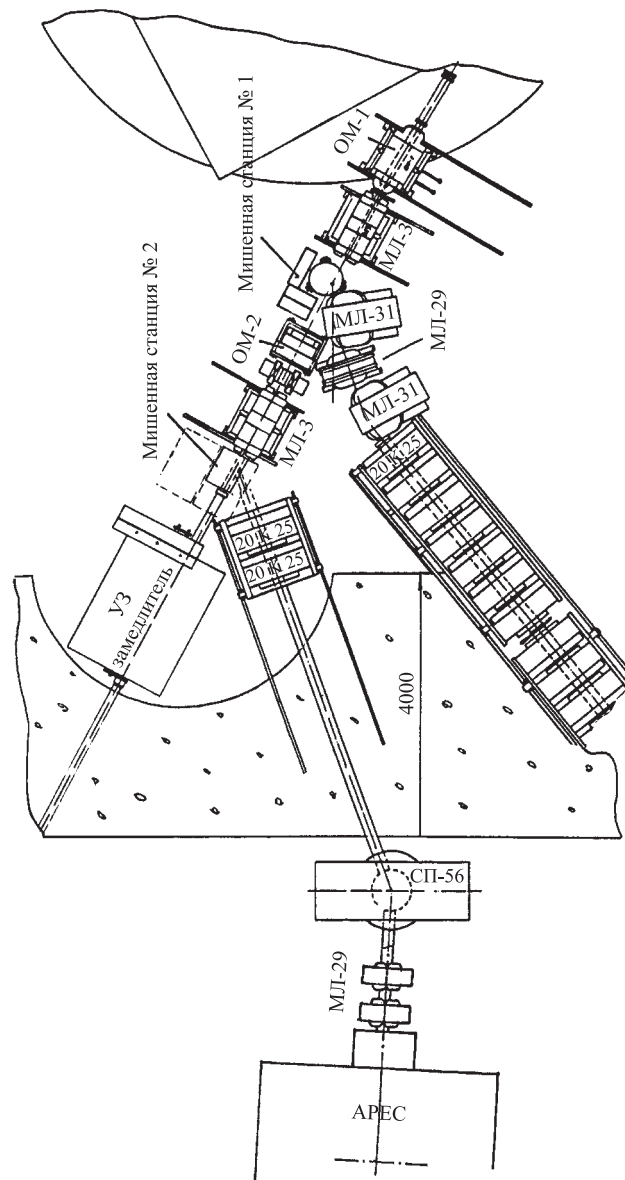


Рис. 1. Схема расположения оборудования на тракте Т и начальных участках каналов № 1 и 3 до модернизации мезонных каналов фазотрона ЛЯП ОИЯИ

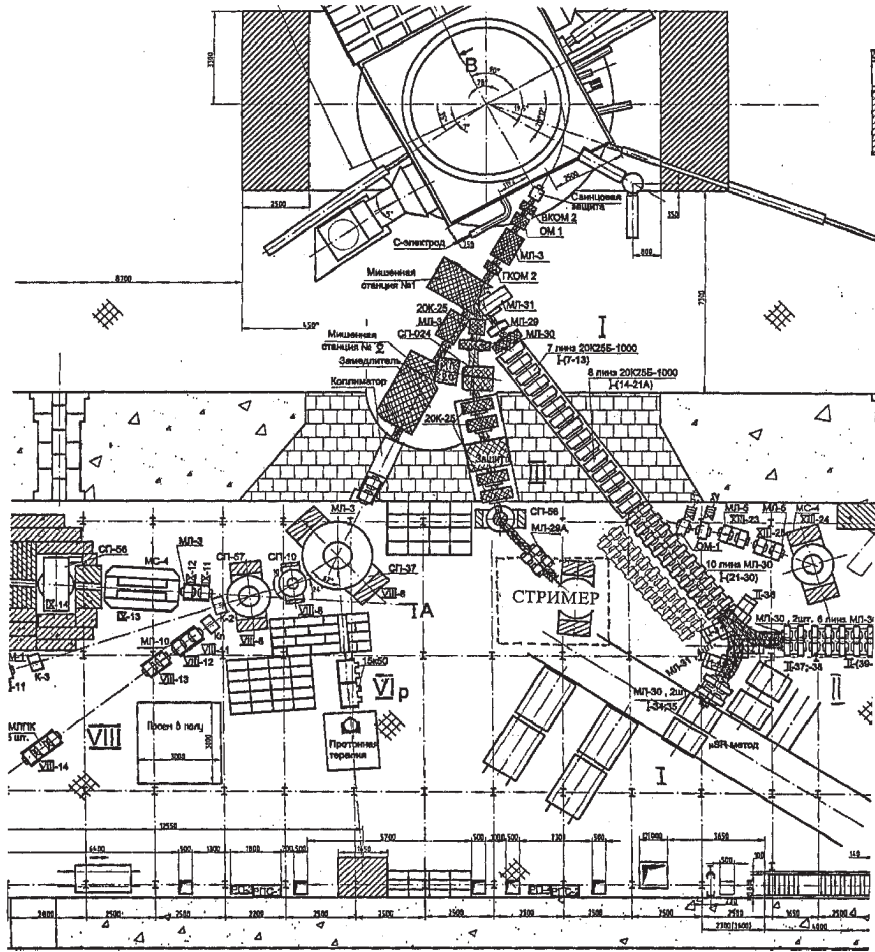


Рис. 2. Схема фазотрона ЛЯП ОИЯИ и трактов его пучков после завершения модернизации тракта Т и мезонных каналов № 1, 2 и 3. Модернизированные участки этих каналов показаны перекрестной штриховкой

реализован в начале 2002 г. Общая схема модернизированных участков тракта Т и мезонных каналов № 1, 2 и 3 показана на рис. 2.

В ходе модернизации на тракте Т осуществлена установка: нового отклоняющего магнита ОМ-1; вертикального и горизонтального корректоров на основе магнитов ОМ-2; мишенной станции № 1 с 8 сменными мишенями разной толщины по направлению протонного пучка (от 80 до 200 мм) из различ-

ных материалов от бериллия до вольфрама; компактной защиты мишенной станции из железных и свинцовых блоков. Выполнен монтаж головных элементов канала № 1, состоящих из линз типа МЛ-30, линзы МЛ-29 и магнита МЛ-31.

Завершена сборка и установка всех новых элементов канала № 3. Начиная от первой мишенной станции и до предполагаемого расположения установки СТРИМЕР смонтированы: линза 20К-25, линза МЛ-30, отклоняющий магнит СП-024, две пары линз 20К-25 с подвижной защитой между ними и две оконечные линзы МЛ-29.

Установлены вторая мишенная станция с набором из 10 сменных мишеней толщиной по пучку от 80 до 160 мм из различных материалов от бериллия до вольфрама, входящая в состав нового углеродного замедлителя, и линза МЛ-20, расположенная между второй мишенной станцией и магнитом СП-024.

Собран непрерывный вакуумопровод, охватывающий начальный участок тракта Т, начиная от камеры ускорителя, блоки сменных мишеней первой и второй мишенных станций, новый углеродный замедлитель, ответвления на каналы № 1 и 3 и проходящий через все магниты и линзы канала № 3, а также анализирующие магниты каналов № 1 и 2.

Следует отметить, что модернизация тракта Т и мезонных каналов № 1, 2 и 3 была осуществлена с использованием имевшихся в наличии магнитных квадрупольных линз, отклоняющих магнитов и основных деталей углеродного замедлителя и мишенной станции № 1, что существенно уменьшило финансовые затраты на проведение этой модернизации.

Осуществленная модернизация тракта Т и каналов № 1, 2 и 3 позволила выбрать на канале № 3 оптимальные углы отбора вторичных частиц из мезонообразующих мишеней ( $25^\circ$  для пионов в интервале энергий 200–400 МэВ и  $111^\circ$  для пионов с энергией  $< 50$  МэВ, для которых сечение образования пионов в 2–10 раз выше, чем при существовавшем угле отбора  $50^\circ$  [3–7]); обеспечить возможность значительного сокращения размеров выведенного протонного пучка в горизонтальной плоскости на мезонообразующих мишенях и максимального приближения такого пучка к той стороне мишени, которая обращена к головным элементам мезонных каналов для уменьшения эффекта самопоглощения пионов в мишени и вклада примеси электронной или позитронной компоненты в мезонных пучках; разместить мезонообразующие мишени в вакууме и применить мишени из тяжелых элементов, для которых можно ожидать увеличения выхода пионов с энергией  $< 50$  МэВ в 2–5 раз по сравнению с мишенью из бериллия такого же размера [8]; получить «поверхностные» мюоны с энергией около 4 МэВ. Увеличение угла отбора вторичных частиц с  $25^\circ$  до  $40^\circ$  на канале № 1 не может повлиять на изменение интенсивности мюонных пучков на выходе каналов № 1 и 2, так как сечение образования пионов с энер-

гией до 100 МэВ для этих углов не меняется сколь-нибудь заметным образом [6, 7].

## 2. НАСТРОЙКА МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ КАНАЛОВ

Режим электропитания линз и магнитов тракта Т (приведенный в табл. 1 и 2) для получения на мезонообразующих мишенях обычного и максимально узкого в горизонтальной плоскости выведенного протонного пучка подбирался путем предварительных расчетов на ЭВМ по программе TRANSPORT и последующей подстройки отдельных элементов этого тракта.

**Таблица 1. Режим работы тракта Т для получения на мишенях станциях протонного пучка примерно круглой формы**

Номер элемента	Тип элемента	Источник питания	Напряжение на шунте, мВ	Ток источника питания, А	Магнитное поле, Тл, или градиент, Тл/м	Фокусировка*
V <sub>кор</sub>	ОМ-2	КТЭ-8	+4,0	+53,2		
I-1	ОМ-1	МГ-19	+17,0	+170,0	1,12 Тл	
I-2	МЛ-3	АП-16	+17,0	+340,0	10,30 Тл/м	ГФ
I-3	МЛ-3	АП-05	-9,8	-196,0	7,05 Тл/м	ГД
VIII-4	МЛ-3	АП-08	-15,0	-300,0	9,60 Тл/м	ГФ
VIII-5	МЛ-3	АП-10	-15,0	-300,0	9,60 Тл/м	ГД

\*ГФ — горизонтальная фокусировка, ГД — горизонтальная дефокусировка.

**Таблица 2. Режим работы тракта Т для получения на мишенях узкого (в горизонтальной плоскости) протонного пучка**

Номер элемента	Тип элемента	Источник питания	Напряжение на шунте, мВ	Ток источника питания, А	Магнитное поле, Тл, или градиент, Тл/м	Фокусировка*
V <sub>кор</sub>	ОМ-2	КТЭ-8	+4,0	+53,2		
I-1	ОМ-1	МГ-19	+17,0	+170,0	1,12 Тл	
I-2	МЛ-3	АП-16	0,0	0,0		
I-3	МЛ-3	АП-05	+14,8	+290,0	9,50 Тл/м	ГФ
VIII-4	МЛ-3	АП-08	-15,0	-300,0	9,60 Тл/м	ГФ
VIII-5	МЛ-3	АП-10	-15,0	-300,0	9,60 Тл/м	ГД

\* ГФ — горизонтальная фокусировка, ГД — горизонтальная дефокусировка.

При настройке каналов № 1 и 2 для распадной части, анализирующих магнитов и оконечных частей этих каналов использовались ранее найденные

режимы электропитания [9, 10], а головные элементы оптимизировались на получение максимальной интенсивности мюонных пучков при минимальной примеси электронной или позитронной компоненты (см. табл. 3 и 4).

**Таблица 3. Режим работы канала № 1 для получения сепарированных положительных мюонов с импульсом 90 МэВ/с**

Номер элемента	Тип элемента	Источник питания	Напряжение на шунте, мВ	Ток источника питания, А	Градиент, Тл/м
I-4	МЛ-31	АП-12	+13,0	+260,0	
I-5	МЛ-29	АП-18	-13,25	-265,0	3,94
I-6	МЛ-30	АП-20	-12,5	-250,0	3,14
I-7	20К-25	АП-21	+14,0	+280,0	2,86
I-8, 9	20К-25	АП-19	+16,6	+332,0	3,40
I-10-19	20К-25	МГ-17	+23,8	+316,5	3,34
I-20, 20А	20К-25	АП-23	-15,5	-310,0	3,16
I-21-28	МЛ-30	МГ-16	+23,2	+308,6	3,90
I-29, 30	МЛ-30	АП-25	-15,1	-302,0	3,80
I-31	МЛ-31	АП-15	-6,1	-122,0	
I-32	МЛ-31	АП-22	-6,2	-124,0	
I-33	МЛ-31	АП-14	-9,0	-180,0	
I-34, 35	МЛ-30	АП-13	+12,0	+240,0	3,02

*Примечание.* Для других импульсов сепарированных мюонов токи в магнитах и линзах изменяются пропорционально импульсу.

Исходный режим электропитания для мезонного канала № 3 выбирался на основе аналитических оценок в приближении тонких линз и расчетов на ЭВМ по программам TRANSPORT-360, TURTLE и DYNAC, когда на выходе канала путем варьирования градиентов магнитного поля в линзах достигался максимальный коэффициент прохождения через канал пионного пучка, падающего на апертуру первой линзы с заданным однородным импульсным распределением в интервале  $\Delta p/p = \pm 0,2$ . Найденные в ходе оценок и расчетов исходные наборы градиентов в магнитных линзах канала № 3 приведены в пп. 1-4 табл. 8, а в качестве примера результаты расчета огибающих пионного пучка и значения коэффициента прохождения пучка через отдельные элементы канала № 3, полученные по программе DYNAC [11], показаны на рис. 3.

Полученные наборы опробовались экспериментально, из них выбирался наиболее предпочтительный по интенсивности на выходе канала, и в дальнейшем отдельные линзы канала настраивались на получение максимальной интенсивности методом последовательных приближений. Определенные таким образом режимы электропитания линз и магнитов канала № 3 для двух



**Таблица 4. Режим работы канала № 2 для получения сепарированных отрицательных мюонов с импульсом 90 МэВ/с**

Номер элемента	Тип элемента	Источник питания	Напряжение на шунте, мВ	Ток источника питания, А	Градиент, Тл/м
I-4	МЛ-31	АП-12	-14,0	-280,0	
I-5	МЛ-29	АП-18	+13,7	+274,0	4,05
I-6	МЛ-30	АП-20	+15,8	+316,0	3,98
I-7	20К-25	АП-21	-12,9	-258,0	2,64
I-8, 9	20К-25	АП-19	-17,1	-342,0	3,50
I-10-19	20К-25	АП-17	-26,6	-354,0	3,60
I-20, 20А	20К-25	АП-23	+17,0	+340,0	3,47
I-21-28	МЛ-30	МГ-18	-26,0	-346,0	4,43
I-29, 30	МЛ-30	АП-25	+15,7	+314,0	3,96
II-36	МЛ-31	АП-13	-7,0	-140,0	
I-32	МЛ-31	АП-22	-5,6	-112,0	
II-37, 38	МЛ-30	АП-14	+10,5	+210,0	2,64
II-39-44	МЛ-30	АП-26	+18,0	+180,0	2,26
II-45-52	МЛ-29	МГ-15	+12,0	+160,0	2,36
II-53-57	МЛ-29	МГ-22	-20,4	-204,0	3,02
II-58-60	МЛ-29	АП-06	-9,5	-190,0	2,82
II-61	МЛ-29	АП-07	+10,0	+200,0	2,96
II-62	МЛ-29	МГ-21	-20,0	-200,0	2,96

*Примечание.* Для других импульсов сепарированных мюонов токи в магнитах и линзах изменяются пропорционально импульсу.

мишенных станций приведены в табл. 5 и 6, а соответствующий набор градиентов — в п. 5 табл. 8.

Для измерения параметров пучков при настройке тракта Т и мезонных каналов № 1, 2 и 3 использовались как стандартная, ранее применявшаяся диагностическая аппаратура [9, 10], так и новые методические разработки [12]. Измерение профиля выведенного протонного пучка проводилось с помощью вакуумных профилометров, установленных перед 1-й и 2-й мишенными станциями. Пример поперечного распределения узкого протонного пучка на мезообразующей мишени показан на рис. 4. Интенсивности мезонных пучков измерялись телескопом из двух стинтилляционных счетчиков с различными размерами сцинтилляторов или одиночным сцинтилляционным счетчиком для мезонных пучков малых энергий. В случае регистрации положительных пионов перед первым сцинтилляционным счетчиком устанавливался фильтр из плексигласа или меди толщиной, достаточной для полного торможения протонов, всегда присутствующих в таком пучке. Состав мезонных пучков опре-

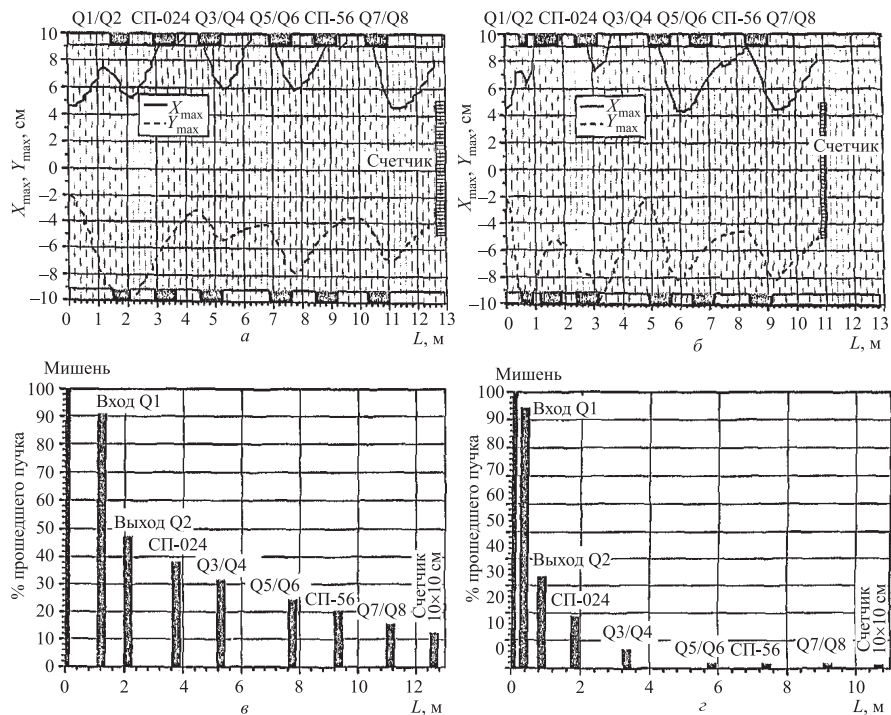


Рис. 3. Результаты расчета огибающих пионного пучка (а, б) и значений коэффициента прохождения пионного пучка через элементы канала № 3 (в, г), выполненного по программе DYNAC: а, в — для пионов с импульсом 200 МэВ/с от первой мишенной станции; б, г — для пионов с импульсом 100 МэВ/с от второй мишенной станции

делялся по времени пролета с помощью импульса совпадений от этого телескопа или одиночного счетчика и реперного импульса от высокочастотной системы ускорителя, соответствующего одному микробанчу протонного пучка в режиме медленного вывода (растяжки пучка). В качестве примера два таких временных спектра приведены на рис. 5. Для калибровки мезонных пучков по импульсу или энергии и определения импульсного разброса пучка использовалась методика измерения пробега по кривой остановок в телескопе из четырех сцинтилляционных счетчиков, последний из которых был включен на антисовпадения с первыми тремя, а перед третьим счетчиком располагался медный тормозитель переменной толщины. Результаты некоторых измерений кривых остановок, выполненные по такой методике, показаны на рис. 6.

Поперечные распределения пучков на выходе мезонных каналов измерялись с помощью разработанного в ИФВЭ сцинтилляционного годоскопа с пространственным разрешением около 5 мм [12]. Два профиля мезонных

**Таблица 5. Режим работы канала №3 для получения положительных пионов с импульсом 220 МэВ/с на первой мишенной станции**

Номер элемента	Тип элемента	Источник питания	Напряжение на шунте, мВ	Ток источника питания, А	Магнитное поле, Тл, или градиент, Тл/м	Фокусировка*
Ш-1	20К-25	АП-17	-17,3	-346,0	3,52 Тл/м	ГД
Ш-2	МЛ-30	АП-20	+15,0	+300,0	3,78 Тл/м	ГФ
Ш-3	СП-24	АП-27	-6,0	-60,0	0,220 Тл	
Ш-4	20К-25	АП-06	+9,35	+187,0	1,90 Тл/м	ГД
Ш-5	20К-25	АП-24	-12,0	-240,0	2,44 Тл/м	ГФ
Ш-6	20К-25	АП-07	-11,3	-226,0	2,30 Тл/м	ГД
Ш-7	20К-25	МГ-11	-16,0	-213,0	2,17 Тл/м	ГФ
Ш-8	СП-56	МГ-18	+11,2	+149,0	0,340 Тл	
Ш-9	МЛ-29	АП-11	+12,0	+240,0	3,54 Тл/м	ГД
Ш-10	МЛ-29	АП-25	+14,7	+294,0	4,35 Тл/м	ГФ

\* ГФ — горизонтальная фокусировка, ГД — горизонтальная дефокусировка.  
*Примечание.* Отрицательные пионы получаются заменой полярностей токов во всех линзах и магнитах на обратные. Для других импульсов пионов токи в магнитах и линзах изменяются пропорционально импульсу.

**Таблица 6. Режим работы канала №3 для получения положительных пионов с импульсом 100 МэВ/с на второй мишенной станции**

Номер элемента	Тип элемента	Источник питания	Напряжение на шунте, мВ	Ток источника питания, А	Магнитное поле, Тл, или градиент, Тл/м	Фокусировка*
Ш-П	МЛ-20	МГ-22	-60,0	-600,0	5,40 Тл/м	
Ш-3	СП-024	АП-27	-14,0	+140,0	0,450 Тл	
Ш-4	20К-25	АП-06	+7,5	+150,0	1,53 Тл/м	ГД
Ш-5	20К-25	АП-24	-6,5	-130,0	1,33 Тл/м	ГФ
Ш-6	20К-25	АП-07	-6,5	-130,0	1,33 Тл/м	ГД
Ш-7	20К-25	МГ-11	-8,0	-106,4	1,07 Тл/м	ГФ
Ш-8	СП-56	МГ-18	+5,6	+74,5	0,170 Тл	
Ш-9	МЛ-29	МГ-11	+6,5	+130,0	1,92 Тл/м	ГД
Ш-10	МЛ-29	АП-25	+7,5	+150,0	2,32 Тл/м	ГФ

\* ГФ — горизонтальная фокусировка, ГД — горизонтальная дефокусировка.  
*Примечание.* Отрицательные пионы получаются заменой полярностей токов во всех линзах и магнитах на обратные. Для других импульсов пионов токи в магнитах и линзах изменяются пропорционально импульсу, кроме линзы МЛ-20, для которой ток 600 А является предельным.

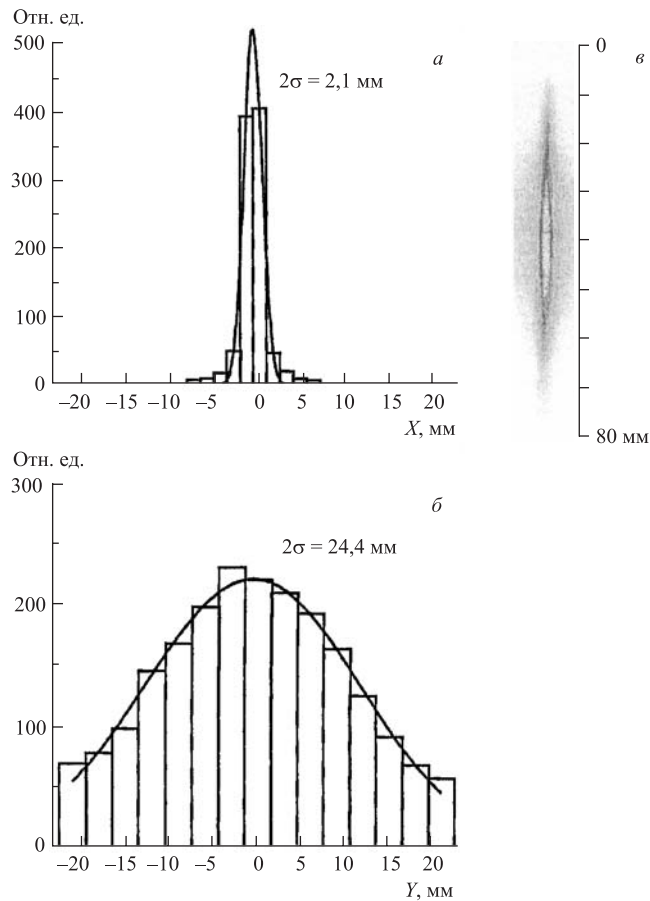


Рис. 4. Поперечное распределение узкого протонного пучка на мезонообразующей мишени: а) профиль пучка по горизонтали; б) профиль пучка по вертикали; в) автограф узкого протонного пучка

пучков, измеренных таким годоскопом на выходе канала № 3, приведены на рис. 7.

### 3. ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕЗОННЫХ ПУЧКОВ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во время проведения измерений параметров мезонных пучков регистрирующая аппаратура устанавливалась соответственно после линзы № 35 на канале № 1 и после линзы № 52 в разрезе канала № 2. Низкоэнергетические

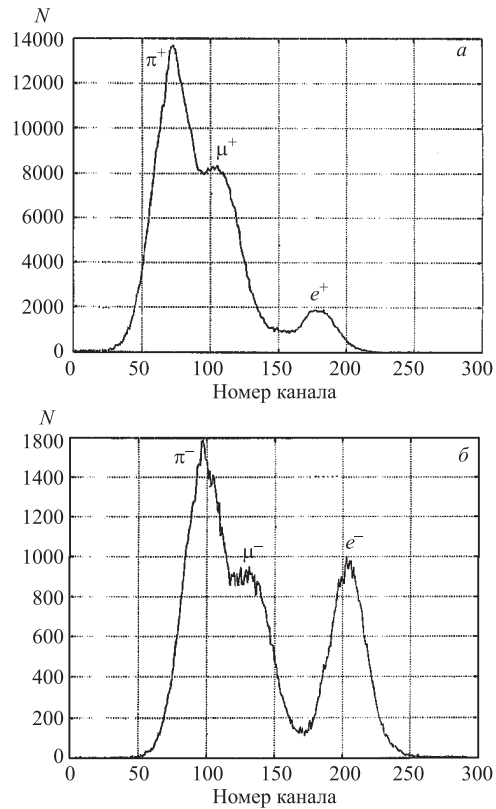


Рис. 5. Спектры по времени пролета для пучков положительно (а) и отрицательно (б) заряженных частиц с импульсом 110 МэВ/с, полученных на второй мишенной станции канала № 3 от бериллиевой мишени толщиной по протонному пучку 160 мм. По горизонтальной оси — номер канала времяамплитудного конвертора, пропорциональный времени пролета регистрируемой частицы. По вертикальной оси — относительный счет в каждом канале

мюоны с импульсом  $< 80$  МэВ/с регистрировались одиночным сцинтилляционным счетчиком со сцинтиллятором размером  $150 \times 150 \times 10$  мм, просматриваемым двумя фотоумножителями, сигналы с которых включались на совпадения. При регистрации «поверхностных» мюонов с импульсом около 30 МэВ/с в условиях существенно большей примеси позитронной компоненты пучка (отношение  $N_e/N_\mu \approx 25$ ) использовались дополнительно факторы отбора по пробегу (путем включения счетчика антисовпадений и размещения перед первым счетчиком пластины из плексигласа толщиной 2 мм, поглощавшей

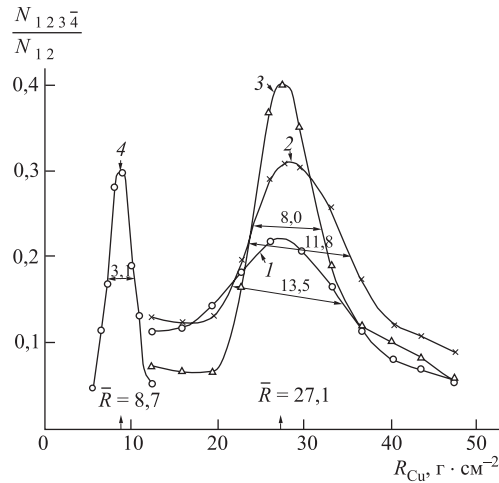


Рис. 6. Кривые остановок для различных условий получения и регистрации пучков положительных пионов на канале № 3. Кривая 1 соответствует мезонной мишенной станции № 1, бериллиевой мишенной толщину  $t = 20$  см, регистрирующему счетчику размером  $100 \times 100$  мм, среднему импульсу  $p = 166,5$  МэВ/с, импульсному разбросу  $\Delta p/p = \pm 9,9$  % (ПШПВ). Кривая 2 соответствует мишенной станции № 1, бериллиевой мишенной с  $t = 20$  см, счетчику  $25 \times 25$  мм,  $p = 166,5$  МэВ/с,  $\Delta p/p = \pm 8,6$  % (ПШПВ). Кривая 3 соответствует мишенной станции № 1, бериллиевой мишенной с  $t = 8$  см, счетчику  $25 \times 25$  мм,  $p = 166,5$  МэВ/с,  $\Delta p/p = \pm 5,64$  % (ПШПВ). Кривая 4 соответствует мишенной станции № 2, бериллиевой мишенной с  $t = 16$  см, счетчику  $100 \times 100$  мм,  $p = 110$  МэВ/с,  $\Delta p/p = \pm 5,85$  % (ПШПВ)

все «поверхностные» мюоны) и характерной зависимости по импульсу (изменение импульса регистрируемых мюонов с 27 до 30 МэВ/с приводило к уменьшению счета мюонов более чем на порядок). Результаты измерения интенсивности пучков положительных и отрицательных мюонов на каналах № 1 и 2 вместе с данными, полученными до модернизации этих каналов, приведены на рис. 8. Такие параметры пучков мюонов, как импульсный разброс и размеры пучка на выходе канала, остались после модернизации каналов без изменений.

Получение пучков мюонов в области импульсов  $< 50$  МэВ/с стало возможным после модернизации мезонных каналов за счет образования стационарного вакуума от мезонной мишенной и до конца каналов № 1 и 2. Интенсивность мюонных пучков при изменении их импульса от 125 до 30 МэВ/с уменьшается примерно на три порядка, и такая зависимость хорошо описывается расчетной кривой, учитывающей экспериментальные данные по образованию пионов [3–7], распад пионов в канале и динамику захвата в канале образующихся мюонов для низкоэнергетической ветви распада с нормиров-

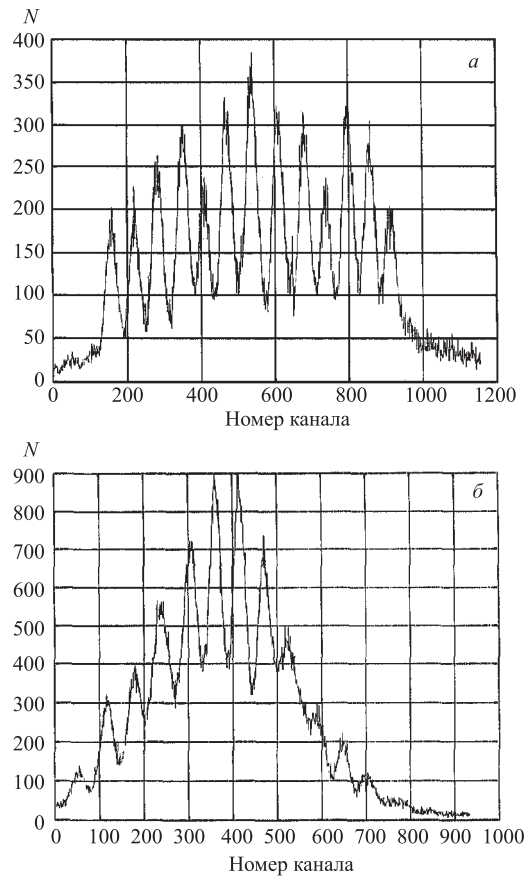


Рис. 7. Горизонтальное (*а*) и вертикальное (*б*) поперечные распределения пучка отрицательных пионов с импульсом 333 МэВ/с, полученные с помощью годоскопического фотоумножителя [12] на первой мишенной станции от бериллиевой мишени толщиной по протонному пучку 200 мм. По горизонтальной оси — номер канала времяамплитудного конвертора, пропорциональный горизонтальной или вертикальной координате регистрируемой частицы пучка. По вертикальной оси — число зарегистрированных частиц в одном канале. Расстояние между соседними пиками полученных распределений, соответствующих отдельным сцинтилляторам годоскопического фотоумножителя, составляет 5 мм

кой на импульс 125 МэВ/с. Примесь электронной компоненты в полученных пучках отрицательных мюонов увеличивается в этом диапазоне импульсов от величины  $6 \cdot 10^{-2}$  для импульса 125 МэВ/с до значения  $N_e/N_\mu \approx 4$  для импульса 50 МэВ/с. Применение узкого протонного пучка уменьшает эту

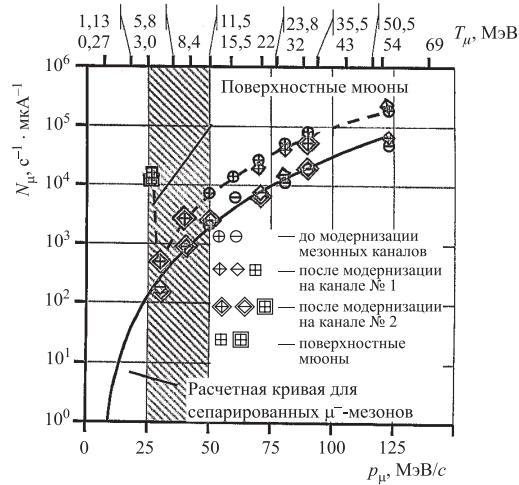


Рис. 8. Интенсивности пучков положительных (+) и отрицательных (-) мюонов на каналах №1 и 2, приведенные на 1 мкА выведенного протонного пучка. Получение пучков мюонов в заштрихованной области  $< 50$  МэВ/с стало возможным после модернизации мезонных каналов и образования вакуума от мезонной мишени до конца каналов №1 и 2

примесь в 2–3 раза (табл. 7) и делает возможным проведение экспериментов на тонких мишенях при импульсе мюонов  $< 80$  МэВ/с.

Таблица 7. Примесь электронной компоненты в пучках сепарированных отрицательных мюонов на канале №2

$P_{\mu}, \text{МэВ}/c$	125	90	70	50	40	30
$T_{\mu-}, \text{МэВ}$	58	33	21	11,5	7,5	4,2
$N_{e-}/N_{\mu-}$ до модернизации	0,06	0,08	1,05	4,0		
$N_{e-}/N_{\mu-}$ после модернизации для узкого пучка протонов	0,02	0,04	0,35	1,2	4	32

На рис. 9 представлены результаты измерений интенсивности пучков положительных и отрицательных пионов в диапазоне энергий 20–400 МэВ, полученные на канале №3 и мишени станции №1 для бериллиевой мишени толщиной по пучку 200 мм. Сплошные кривые на графиках проведены от руки по экспериментальным точкам. На этом же рисунке для сравнения



приведена кривая выхода положительных пионов до модернизации канала №3, полученная для угла отбора вторичных частиц  $50^\circ$  на основе экспериментальных данных работ [3–5] и нормированная на интенсивность пучков положительных пионов для импульсов 125 и 170 МэВ.

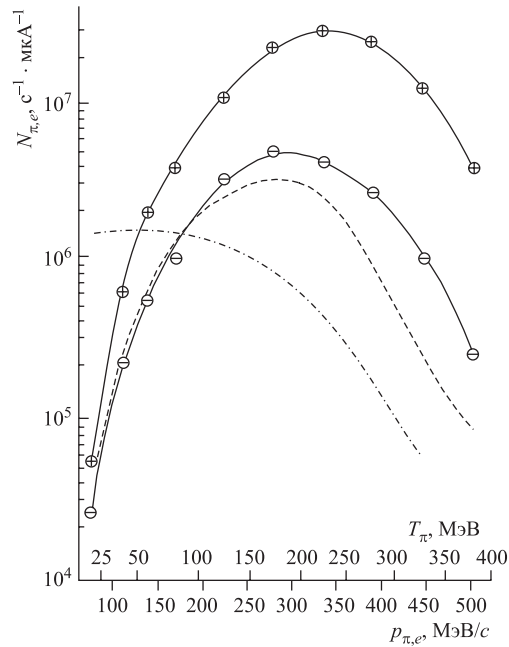


Рис. 9. Интенсивности пучков положительных (+) и отрицательных (-) пионов, полученных на канале №3 (мишенная станция №1) после завершения его модернизации. Штрихпунктирная кривая — интенсивность электронной или позитронной компоненты для этих пучков. Пунктирная кривая — интенсивность пучков положительных пионов до модернизации канала №3. Интенсивность пучка положительных пионов после модернизации канала №3 возросла в 3–40 раз в диапазоне энергий пионов от 100 до 400 МэВ

Интенсивность пучка положительных пионов после модернизации канала №3 достигла максимального значения —  $3 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$  на 1 мкА выведенного протонного пучка при энергии 200–250 МэВ, а интенсивность в диапазоне энергий 100–400 МэВ увеличилась в 3–40 раз за счет установки в канале №3 четырех дополнительных магнитных квадрупольных линз и перехода на угол отбора вторичных частиц, равный  $25^\circ$ , при котором сечение образования пионов в высокоэнергетической области значительно (до 10 раз) больше, чем для угла  $50^\circ$  [3–5], выбранного в канале №3 до его модернизации.

Максимальное значение интенсивности пучков отрицательных пионов приближается к величине  $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  на 1 мкА выведенного протонного пучка, а отношение интенсивностей положительных и отрицательных пионов увеличивается в 2–13 раз в диапазоне энергий от 20 до 400 МэВ в согласии с имеющимися данными экспериментальных работ по образованию пионов [3–5].

На рис. 9 приведена также зависимость интенсивности позитронной или электронной компоненты в пионных пучках, которая уменьшается при использовании узкого протонного пучка в 2–3 раза. Представленные на рис. 9 значения интенсивности пионных пучков имеют точность  $\pm 15\%$ , которая определяется в основном погрешностью в абсолютной калибровке выведенного протонного пучка, а для позитронной или электронной компоненты ошибка измеренной интенсивности составляет 10–30% в зависимости от точности разделения частиц на спектрах по времени пролета.

Экспериментальное значение коэффициента прохождения пучка положительных пионов с импульсом 200 МэВ/с составляет  $k = N_{\pi^+}/N_0 \approx 0,16$ , где  $N_{\pi^+} = 7,5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} \cdot \text{мкА}^{-1}$  — число пионов, зарегистрированных на выходе канала, а  $N_0 = 4,65 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$  — расчетное число пионов, попадающих в апертуру первой квадрупольной линзы в однородном импульсном интервале  $\Delta p/p=0,4$ . Значение  $k \approx 16\%$  превосходит на фактор 1,3–2 исходные расчетные значения коэффициента прохождения, приведенные в пп. 1–4 табл. 8, но несколько уступает  $k = 19,7\%$  в оптимизированном варианте расчета по программе DYNAC (п. 6 табл. 8) с набором градиентов, наиболее близким к экспериментальному набору градиентов, приведенному в п. 5 табл. 8. С одной стороны, все это говорит о приблизительном характере расчетов, обусловленном чисто интуитивным подбором градиентов в квадрупольных линзах, заметно отличающихся в разных вариантах расчета от экспериментально найденных значений, но, с другой стороны, полученное совпадение результатов тщательно проведенных оптимизированных расчетов (п. 6 табл. 8) с экспериментальными значениями (п. 5 табл. 8) в пределах погрешностей, связанных с определением абсолютной интенсивности протонного пучка ( $\pm 15\%$ ) и величиной дифференциального сечения образования пионов ( $\pm 10\%$ ), свидетельствует о достаточной оптимальности выбранного режима электропитания магнитных элементов канала при его экспериментальной настройке.

Следует отметить, что найденный режим электропитания, а следовательно, и градиентов магнитных квадрупольных линз на канале №3, приведенный в табл. 5, не является единственным, так как канал №3 близок к периодической системе из квадрупольных линз и его аксептанс слабо меняется при заметных изменениях градиентов в этих линзах.

Таблица 8. Сравнение расчетных и экспериментально найденных наборов градиентов (режимов электропитания) в квадрупольных линзах канала №3 для пюнов с импульсом 200 МэВ/с и первой мишенной станции

№ п/п	Вариант режима электропитания	Градиент магнитного поля в квадрупольных линзах, Тл/м								Коэф. прохождения $K$ , %	Импульсный разброс (ПШПВ) $\Delta p/p$ , %
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8		
1	Вариант расчета №1 по программе TURTLE	2,6	-2,8	3,1	-4,5	3,7	-3,1	2,9	-2,7	7,5	$\pm 9$
2	Вариант расчета №2 по программе TURTLE	3,4	-3,0	3,85	-3,7	3,1	-4,4	-3,0	2,5	7,5	$\pm 6,5$
3	Расчет в приближении тонких линз	-3,1	2,2	1,7	-2,1	-3,1	3,7	-2,7	2,6	10,5	$\pm 4,7$
4	Расчет по программе DYNAC	2,8	-2,8	2,4	-2,4	2,5	-2,5	2,6	-2,6	12,4	$\pm 7$
5	Экспериментально найденный режим	-3,2	3,4	-1,7	2,2	-2,1	2,0	-3,2	3,9	16,0	$\pm 9,9$
6	Расчет по программе DYNAC (оптимизированный)	-3,4	3,2	-1,9	2,4	-2,4	2,3	-3,2	3,5	19,7	$\pm 6$

Размеры пионного пучка от первой мишенной станции на выходе канала № 3 (рис. 7), измеренные годоскопом, составляют  $\pm 20$  мм (ПШПВ — полуширина на полувысоте распределения) по горизонтали и  $\pm 15$  мм (ПШПВ) по вертикали и полностью укладываются в размеры сцинтиллятора  $100 \times 100$  мм у регистрирующих счетчиков.

Импульсный разброс пучка для бериллиевой мишени толщиной по пучку 200 мм и регистрирующего счетчика размером  $100 \times 100$  мм составляет (см. рис. 6)  $\Delta p/p = \pm 9,9\%$  (ПШПВ) и уменьшается до  $\Delta p/p = \pm 5,4\%$  для бериллиевой мишени толщиной по пучку 80 мм и регистрирующего счетчика размером  $25 \times 25$  мм. При этом интенсивность пучка положительных пионов с импульсом 166 МэВ/с снижается с  $4 \cdot 10^6$  до  $2,2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  на 1 мкА, а угловая расходимость пучка составляет  $\pm 1,9^\circ$  (ПШПВ) по горизонтали и  $\pm 0,8^\circ$  (ПШПВ) по вертикали. В таком режиме работы канала № 3 полученные параметры пионных пучков достаточно полно удовлетворяют заявленным специфическим требованиям на пионные пучки для установки СТРИМЕР (размер пучка  $20 \times 40$  мм; угловая расходимость  $\pm 2,5^\circ$ ; импульсный разброс  $\Delta p/p = \pm 6\%$  ПШПВ) и примерно в 30 раз превосходят по интенсивности существующие пучки пионов на канале № 13. Была проверена также перспективность использования небольших мишеней из тяжелых элементов для увеличения интенсивности пионных пучков малых энергий ( $< 50$  МэВ).

Так, при переходе с бериллиевой мишени толщиной по пучку 80 мм на медную мишень таких же размеров интенсивность положительных пионов с импульсами 110 и 138 МэВ/с возросла соответственно в 3,7 и 2,3 раза при увеличении примеси позитронной компоненты на один пион соответственно в 2,2 и 3 раза. Для отрицательных пионов с импульсом 110 МэВ/с интенсивность при переходе с бериллиевой мишени на медную увеличилась в  $\sim 4,7$  раза при возрастании примеси электронной компоненты в 3 раза.

На рис. 10 представлены результаты измерений интенсивности пучков положительных и отрицательных пионов, полученные на второй мишенной станции канала № 3 от бериллиевой мишени толщиной по пучку 160 мм, а также сопутствующей примеси электронно-позитронной компоненты в этих пучках. По сравнению с первой мишенной станцией примесь электронной или позитронной компоненты в расчете на один пион уменьшается для положительных пионов с импульсом 110 МэВ/с в 17 раз, а для отрицательных пионов с тем же самым импульсом — в 12 раз. По сравнению с каналом № 3 до модернизации эта примесь уменьшилась более чем на порядок.

Такое благоприятное изменение состава пионных пучков находится в согласии с ожидаемым уменьшением примеси электронно-позитронной компоненты при переходе на угол отбора вторичных частиц  $110^\circ$ , для которого сечение образования пионов в 2–3 раза выше, чем для угла отбора  $25^\circ$  [6, 7], а угловое распределение  $\gamma$ -квантов, приводящих к появлению электронно-позитронной компоненты и возникающих при распаде образую-

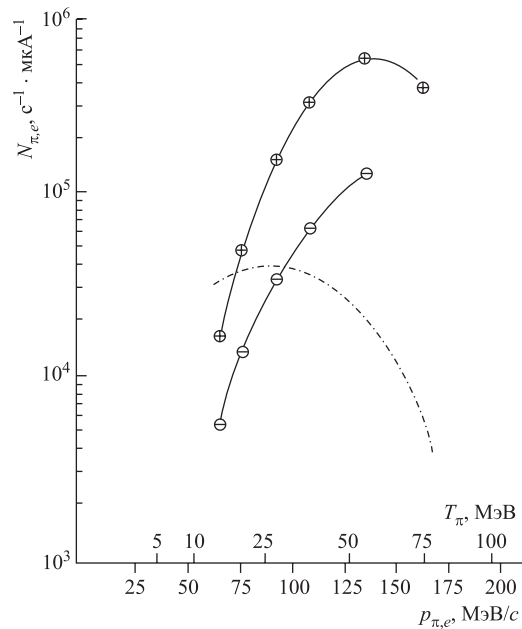


Рис. 10. Интенсивности пучков положительных (+) и отрицательных (-) пионов, полученные на канале № 3 (мишенная станция № 2) после завершения его модернизации. Штрихпунктирная кривая — интенсивность электронной или позитронной компоненты для этих пучков. По сравнению с первой мишенной станцией и каналом № 3 до модернизации примесь электронно-позитронной компоненты в расчете на один пион уменьшилась в 10–15 раз

щихся в мишени  $\pi^0$ -мезонов, имеет выраженную направленность в переднюю полусферу [13].

Столь значительное уменьшение примеси электронно-позитронной компоненты существенно улучшает условия для проведения физических экспериментов на пучках пионов малых энергий (меньших чем 40 МэВ).

Следует отметить, что сепарированные мюонные пучки на каналах № 1 и 2 получаются с достаточно малой примесью электронно-позитронной компоненты (<10%), как это видно из табл. 7, только для импульсов, больших чем 90 МэВ/с. Применение узкого протонного пучка уменьшает эту примесь в 2–3 раза. Дальнейшего уменьшения примеси для пучков мюонов с импульсом <90 МэВ/с можно достичь либо с помощью электромагнитных сепараторов со скрещенными электрическими и магнитными полями, либо подтормаживанием пучка частиц на выходе канала с последующим магнитным анализом. Последний вариант был заложен в проекте модернизации мезонных каналов

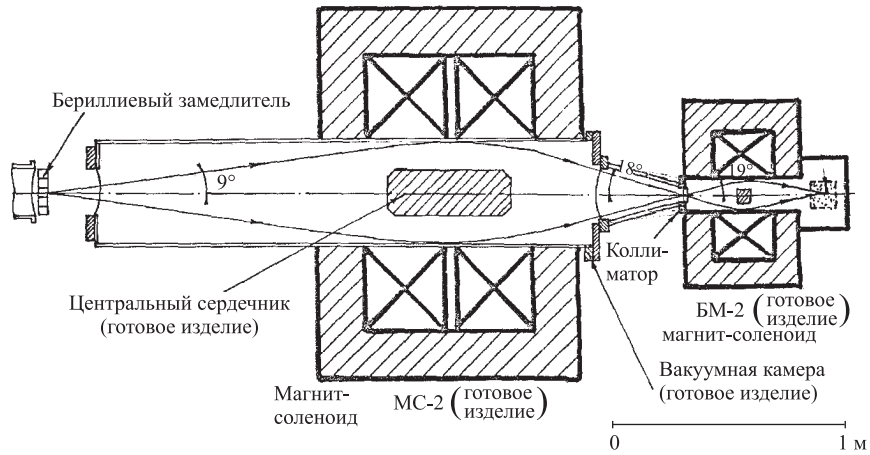


Рис. 11. Схема формирования мезонных пучков малых энергий ( $< 15$  МэВ) на выходе канала № 2 (направление II), предложенная для повышения степени сепарации мезонных пучков путем подтормаживания и повторного магнитного анализа заряженных частиц пучка с разными массами [14]

[14], и его схема, показанная на рис. 11, содержит два последовательно соединенных соленоидальных спектрометра, установленных в конце канала № 2 (направление II) и позволяющих осуществить следующие улучшения параметров мезонных пучков:

- 1) уменьшение размеров (до 3 раз) для мюонных пучков с импульсом  $< 50$  МэВ/с без заметной потери интенсивности;
- 2) снижение (до одного порядка) примеси электронно-позитронной компоненты в мюонных пучках с импульсом  $< 50$  МэВ/с, включая «поверхностные» мюоны при допустимой потере интенсивности в несколько раз [15, 16];
- 3) получение сепарированных пучков медленных пионов с энергией  $< 10$  МэВ путем торможения пионов с энергией 150–250 МэВ в конце канала № 2 и последующего магнитного анализа пионов из образовавшегося непрерывного спектра пионов в диапазоне энергий от 0 до 20 МэВ [17].

Реализация этой части проекта была прервана из-за прекращения финансирования, но при необходимости может быть быстро осуществлена при выделении на эти цели сравнительно небольших финансовых ресурсов и при наличии готовых магнитов-соленоидов и деталей большой вакуумной камеры.

Важным дополнительным результатом осуществленной модернизации тракта Т и мезонных каналов № 1, 2 и 3 является улучшение радиационной обстановки в зале фазотрона за счет создания вакуума в тракте Т от камеры фазотрона до защитной стены и исключения тем самым той части радиоактивных изотопов (порядка 0,1 Ки), которые образовывались ранее при

прохождении выведенного протонного пучка в слое воздуха толщиной около 10 м, а также уменьшение рассеянного радиационного фона на каналах № 9 и 12 за счет увеличения коэффициента проводки протонного пучка по этим каналам из-за отсутствия многократного кулоновского рассеяния протонного пучка в 10-метровом слое воздуха на тракте Т.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На фазотроне ЛЯП ОИЯИ осуществлена модернизация тракта Т и мезонных каналов № 1, 2 и 3, направленная на расширение возможностей проведения физических исследований на мезонных пучках фазотрона путем улучшения параметров существующих и формирования новых мезонных пучков. В результате проведенной модернизации за счет оптимизации углов отбора вторичных частиц из мишеней и установки дополнительных линз и магнитов интенсивность пучков положительных пионов на канале № 3 выросла в диапазоне энергий 100–400 МэВ в 3–40 раз и достигла  $3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$  на 1 мкА выведенного протонного пучка. Максимальная интенсивность пучка отрицательных пионов в этом диапазоне энергий приблизилась к значению  $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  на 1 мкА выведенного протонного пучка. На каналах № 1, 2 и 3 благодаря образованию стационарного вакуума от камеры фазотрона с разветвлением по всем трактам мезонных пучков до самого их конца и размещению в вакууме двух мишенных станций стало возможным получение мезонных пучков с импульсом  $< 50 \text{ МэВ/с}$ , в том числе пучков «поверхностных» мюонов с энергией около 4 МэВ. Появление условий для формирования узкого (сфокусированного на мезонной мишени в горизонтальной плоскости до 2–3 мм) выведенного протонного пучка позволило уменьшить примесь электронной или позитронной компоненты во всех мезонных пучках в 2–3 раза, а для пучков медленных пионов на канале № 3 (10–40 МэВ) примесь электронно-позитронной компоненты уменьшилась в 10–15 раз за счет увеличения угла отбора пионов до  $110^\circ$  на второй мишенной станции. Стало возможным применение небольших ( $\sim 80 \text{ мм}$ ) мишеней из тяжелых элементов, для которых выход пионов с импульсом около  $100 \text{ МэВ/с}$  увеличился в 2–4,5 раза по сравнению с мишенью из бериллия такого же размера.

Важным дополнительным результатом проведенной модернизации является улучшение радиационной обстановки в зале фазотрона и на каналах № 9 и 12 за счет создания стационарного вакуума на тракте Т.

Имеется возможность дальнейшего уменьшения примеси электронно-позитронной компоненты в мезонных пучках с импульсом  $< 50 \text{ МэВ/с}$  на канале № 2.

В заключение авторы выражают благодарность В. Б. Бруданину, Л. М. Онищенко, Н. А. Русаковичу и Е. М. Сыресину за всестороннее со-

действие и постоянную помощь при проведении всех работ по модернизации мезонных каналов фазотрона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Савченко О. В.* // Сборник совещания по программе экспериментов на фазотроне ОИЯИ. ОИЯИ, Д1-90-480. Дубна, 1990. С. 21.
2. *Савченко О. В.* Депонированная публикация. ОИЯИ, Б1-9-89-177. Дубна, 1989.
3. *Мещеряков М. Г. и др.* // ЖЭТФ. 1956. Т. 31. С. 45.
4. *Мещеряков М. Г. и др.* // Там же. С. 55.
5. *Ажгирей Л. С. и др.* // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 1357.
6. *Cochran D. R. F. et al.* // Phys. Rev. D. 1972. V. 6. P. 3085.
7. *Crawford J. F. et al.* // Phys. Rev. C. 1980. V. 22. P. 1184.
8. *Волченков В. А. и др.* Препринт ЛИЯФ № 612. Гатчина, 1980.
9. *Баландин М. П. и др.* Сообщение ОИЯИ 9-90-435. Дубна, 1990.
10. *Андреев Е. М. и др.* Сообщение ОИЯИ 9-92-225. Дубна, 1992.
11. *Lapostoll P. et al.* Program DYNAC, Version 5,5. R4. CERN, 2003.
12. *Васильченко В. Г. и др.* // ПТЭ. 1978. № 4. С. 183.
13. *Баюков Ю. Д. и др.* // ЖЭТФ. 1957. Т. 32. С. 667.
14. *Савченко О. В.* Предложения по формированию мюонных пучков в низкофоновой лаборатории // Внутренний отчет ЛЯП 1994 г.
15. *Абазов В. М. и др.* Сообщение ОИЯИ 9-90-69. Дубна, 1990.
16. *Абазов В. М. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-93-81. Дубна, 1993.
17. *Комаров В. И. и др.* Сообщение ОИЯИ 2747. Дубна, 1966; Nucl. Instr. and Meth. 1967. V. 50. P. 105.

Получено 9 февраля 2005 г.



Редактор *А. Н. Шабашова*

Подписано в печать 07.04.2005.

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

Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,94. Тираж 280 экз. Заказ № 54858.

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

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)