



циклотрон должен быть компактен, иметь внешнюю инжекцию с источником ионов типа ECR, обеспечивать интенсивность пучка ионов $84 \text{ Kг}^{+17} \cdot 10^{11}$ ч/с. Основные узлы этого циклотрона изготавливались в цехах опытного производства в Дубне. Сдача в эксплуатацию циклотрона ЦИТРЕК осуществлена летом 2002 года.

3. Пучки синхроциклотрона и фазотрона ЛЯП ОИЯИ

В 1949–1974 годах наряду с постепенным развитием и совершенствованием синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем происходило количественное увеличение и качественное улучшение первичных и вторичных пучков, получаемых на внутренних и внешних мишенях этого ускорителя. Повышение интенсивности внутреннего протонного пучка до 2,3 мкА и увеличение коэффициента его вывода, осуществление медленного вывода протонов и появление ряда новых пучков существенно расширили возможности постановки принципиально новых экспериментов и значительно улучшили условия проведения на синхроциклотроне физических и прикладных исследований.

Схема образования и разводки пучков синхроциклотрона ЛЯП к началу его реконструкции в фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля показана на рис. 1.

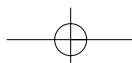
Пионные пучки с энергией от 140 до 370 МэВ с мезонного пробника № 4 попадают в мезонную лабораторию через коллиматоры 1, 2, 3 в ярме магнита. Поляризованные протоны с нейтронного пробника № 2 выводятся через коллиматор № 4 с энергией 635 МэВ в поляризационную лабораторию. Поляризованные протоны получают с внешней мишени, расположенной на выведенном протонном пучке, и через коллиматоры № 5–№ 9 попадают в зал экспериментальных установок. Мезонные пучки с импульсом около 180 МэВ/с, образованные на мезонном пробнике № 1 внутри ускорителя, выводятся в этот же зал через коллиматоры от № 6 до № 10 с помощью отклоняющего магнита СП37.

Используя внешнюю мишень, расположенную на выведенном протонном пучке, через СП37 и коллиматор № 6 в зал экспериментальных установок выводятся пучки положительных мезонов с энергией 30–70 МэВ и 170–350 МэВ. Через этот же коллиматор получают пучки очень медленных мюонов (~ 5 МэВ) при торможении мезонного пучка с импульсом около 180 МэВ/с.

Через коллиматоры № 6, № 7, № 8 в зал экспериментальных установок выводятся протоны с энергией 667 МэВ с помощью магнитного канала, расположенного внутри ускорителя.

В зале экспериментальных установок нейтронные пучки получают через коллиматоры № 11, № 12, № 13 с нейтронного пробника № 2. Этот пробник используется также для получения пучков γ -квантов и электронов через те же коллиматоры.

С мезонного пробника № 1 образуются мезонные пучки с энергией 300 и 160 МэВ через коллиматоры № 14 и № 17. Для другого азимутального расположения мезонной мишени через коллиматор № 14 получают пучки γ -квантов и электронов. С этого же пробника через мезонный канал № 15 образуются чистые мюонные пучки с энергией от 30 до 250 МэВ и пионные пучки с энергией от 80 до 300 МэВ, которые выво-



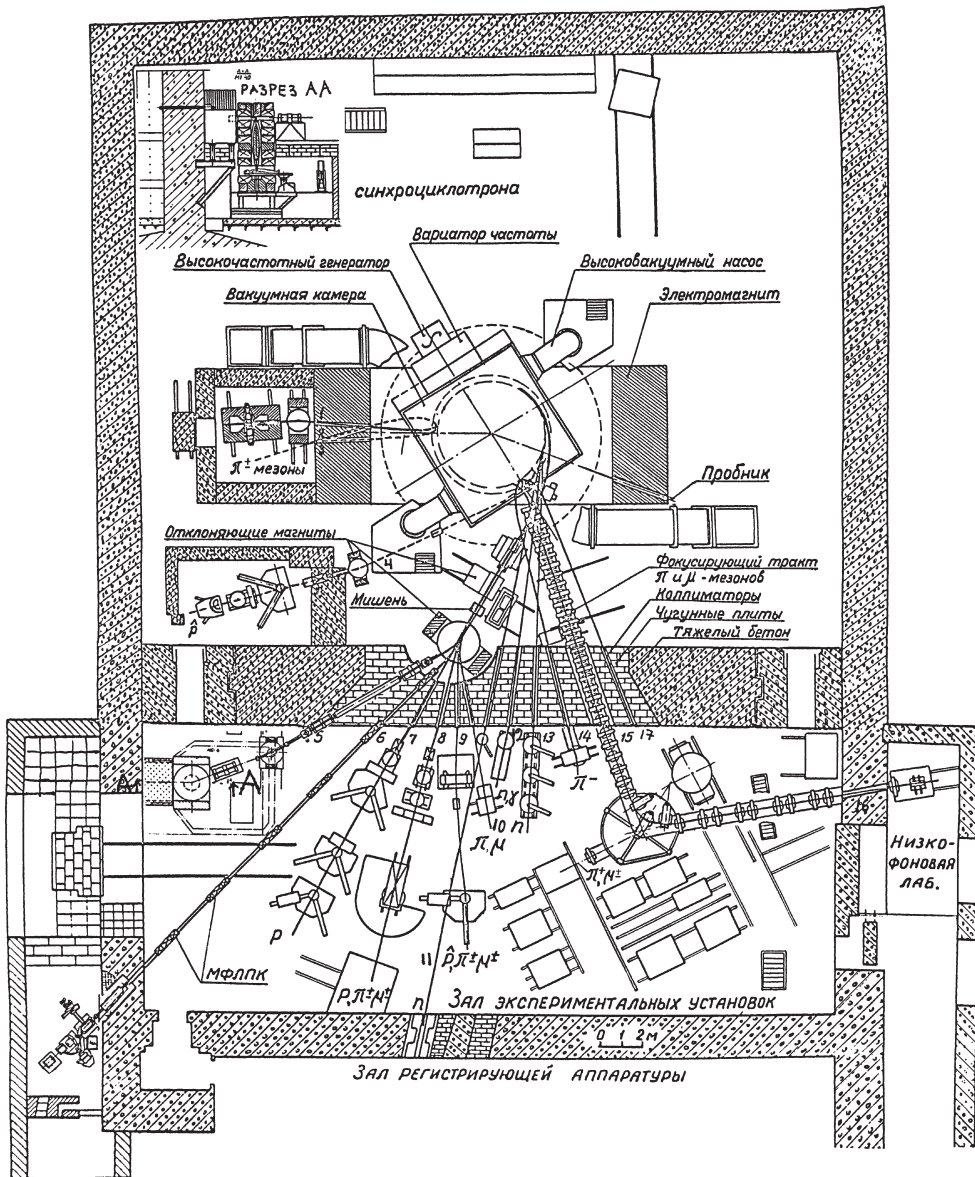


Рис. 1. Схема разводки пучков синхроциклотрона ЛЯП ОИЯИ (1974 г.)

дятся в зал экспериментальных установок, а также через дискретный фокусирующий канал и коллиматор № 16 в низкофоновую лабораторию.

Использование внутреннего пучка, помимо образования вторичных пучков, осуществляется также с помощью радиохимического пробника № 3, на котором производится облучение различных материалов.

Через коллиматоры № 5, № 6 и № 7 выводятся пучки для прикладных исследований. На продолжении коллиматора № 6 создан фокусирующий протонный канал, который транспортирует протоны с энергией от 90 до 200 МэВ, образованные путем торможения выведенного протонного пучка, в процедурную кабину для проведения медико-биологических и клинических исследований по лечению онкологических больных.

На направлении коллиматора № 5 с помощью широкоугольной соленоидальной линзы с неоднородным аксиально-симметричным магнитным полем получен π -мезонный пучок высокой интенсивности для медико-биологических и физических исследований. Через коллиматор № 7 выводится нейтронный пучок, образованный под углом 0° на внешней бериллиевой мишени толщиной 36 см. Пучок предназначен для проведения дозиметрических и радиобиологических измерений.

Параметры пучков синхроциклотрона по состоянию на июнь 1971 года приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры пучков синхроциклотрона при токе внутреннего пучка 2,3 мкА (июнь 1971 г.)

Частицы	Энергия (МэВ)	Коллиматор	Интенсивность (c^{-1}) на всю площадь детектора	Площадь детектора (cm^2)
Протоны (выведенный пучок)	667 ± 3	6,7,8	$1 \cdot 10^{12}$	12
Поперечно поляризованные протоны	635 ± 9	4	$4,5 \cdot 10^7$	10
	612 ± 9	5,9*	$6 \cdot 10^7$	10
Продольно поляризованные протоны	612 ± 9	5,9*	$6 \cdot 10^7$	10
Протоны (медицинский канал)	90 ± 16	6*	$4 \cdot 10^8$	20
Протоны (медицинский канал)	185 ± 11	6*	$1,2 \cdot 10^9$	20
Нейтроны (по всей площади спектра)	500÷650	11,12,13	$3 \cdot 10^6$	18
Нейтроны от толстой внешней мишени	350 (средняя энергия)	7	10^8	75
Гамма-кванты	10÷600	11	$2,4 \cdot 10^5$	20
π^+ -мезоны	60 ± 2	6*	$4 \cdot 10^4$	75
	70 ± 3	8,9	$8 \cdot 10^4$	75
	307 ± 6	9,6*	$4 \cdot 10^5$	75
	346 ± 9	9*	$4 \cdot 10^4$	75
π^- -мезоны	70 ± 3	8,9,10	$8 \cdot 10^4$	75
	155 ± 5	17	$4 \cdot 10^4$	60
	250 ± 9	1	$3 \cdot 10^4$	16
	300 ± 8	14	$4 \cdot 10^4$	75
	370 ± 8	1	$5 \cdot 10^3$	16

Таблица 1 (окончание)

Частицы	Энергия (МэВ)	Коллиматор	Интенсивность (с ⁻¹) на всю площадь детектора	Площадь детектора (см ²)
μ^+ -мезоны	95±7	8,9,10	1·10 ⁴	60
μ^- -мезоны	95±7	8,9,10	6·10 ⁴	75
π^+ -мезоны (соленоидальная линза)	30±4		4·10 ⁷	80
π^- -мезоны (соленоидальная линза)	30±4		1·10 ⁷	80
<i>Пучки мезонного канала</i>				
μ^- -мезоны (примесь пионов 7%)	30±3 76±6**		3,5·10 ⁴ 1,5·10 ⁵	75 75
μ^- -мезоны (низкофоновая лаборатория)	73±6		3,0·10 ⁴	75
μ^- -мезоны (примесь пионов ~5%)	167±13		1,4·10 ⁵	75
μ^- -мезоны	275±22		5·10 ⁵	75
μ^+ -мезоны	115±11		6·10 ⁴	75
π^+ -мезоны	89±4		2,0·10 ⁵	75
π^- -мезоны	89±4** 160±9		5,9·10 ⁵ 1,0·10 ⁶	75 75
π^- -мезоны (низкофоновая лаборатория)	150±10		2,5·10 ⁵	75
π^- -мезоны	294±15		1,2·10 ⁶	75

Интенсивности мезонных пучков даны для растянутого пучка.

* Внешняя мишень.

** Число мюонных и пионных остановок в максимуме кривой пробега для мишени из углерода площадью 80 см и толщиной 1 г/см составляет 1,6·10⁴ с⁻¹ и 4,8·10⁴ с⁻¹ соответственно.

Достигнутые интенсивности нуклонных и мезонных пучков позволили выполнить на синхротронном комплексе исследований по физике элементарных частиц и атомного ядра и получить много новых научных результатов. Среди них тринадцать новых явлений, зарегистрированных в СССР как открытия.

В 1979–1984 годах синхротрон Лаборатории ядерных проблем был реконструирован в фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля. Повышение интенсивности внутреннего пучка, наряду с ростом в несколько раз коэффициента вывода протонного пучка, позволило увеличить интенсивность выведенного пучка протонов в 20–25 раз и отказаться от использования внутренних мишеней для генерации вторичных пучков, за исключением облучения материалов для некоторых радиохимических экспериментов.

На реконструированном фазотроне создана и действует разветвленная система из 10 каналов пучков, которые используются для физических и прикладных экспериментов с пи-мезонами, нейтронами и протонами.

Схема расположения реконструированного фазотрона и трактов его пучков изображена на рис. 2.

Мезонные каналы I и II предназначены для получения сепарированных и несепарированных мюонных, пионных и электронных пучков с энергией 30–300 МэВ. Основное назначение канала II – формирование сепарированных мюонных пучков в низкофоновой лаборатории. После модернизации этих каналов, проведенной в 2000–2003 годах, на них стало возможным и получение низкоэнергетических мюонных пучков, включая «поверхностные» мюоны с энергией около 4 МэВ.

Канал III предназначен для получения пионных пучков с энергией 50–250 МэВ. Проведенная в 2000–2003 годах модернизация этого канала расширила диапазон энергий получаемых пионных пучков до 15 МэВ в низкоэнергетичной области и до 400 МэВ в сторону высоких энергий.

Для получения протонных пучков с энергией 70–660 МэВ используется канал VI.

На канале VIII формируются широкие и узкие заторможенные протонные пучки в диапазоне энергий от 100 до 660 МэВ с возможностью уменьшения разброса по импульсу до 0,5%.

Интенсивные мезонные пучки получают на канале IX с помощью широкоугольной соленоидальной магнитной линзы. В 1992–1993 годах этот канал был дополнен магнитным спектрометром, позволившим получать интенсивные пучки сепарированных «поверхностных» мюонов и сепарированные пионные пучки с энергией до 20 МэВ.

Канал X предназначен для формирования нейтронного пучка со средней энергией около 350 МэВ. Узкие протонные пучки (диаметром от 5 до 20 мм) формируются на канале XI.

Для транспортировки протонного пучка в здание ЯСНАПП используется канал XII.

Канал XIII формирует пионные пучки на установку СТРИМЕР.

Облучение мишеней для радиохимических исследований производится на внутреннем пучке фазотрона в диапазоне энергий от 70 до 660 МэВ при интенсивности пучка протонов до 6 мкА.

Основные характеристики нуклонных, мезонных и электронных пучков фазотрона приведены в таблицах 2 и 3. Физико-дозиметрические характеристики медицинских пучков реконструированного фазотрона приведены в таблице 4. Интенсивности вторичных пучков в таблицах приведены в расчете на 1 мкА выведенного протонного пучка.

В результате реконструкции синхроциклотрона в фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля интенсивности пучков положительных пионов увеличились на один-два порядка, а интенсивность пучка сепарированных положительных мюонов возросла примерно в десять раз. Стало возможным получение интенсивных пучков медленных пионов и мюонов, в том числе сепарированного пучка «поверхностных» мюонов.

Для проведения широкого круга медико-биологических и клинических исследований сформированы широкие и узкие пучки протонов с энергией от 70 до 660 МэВ,

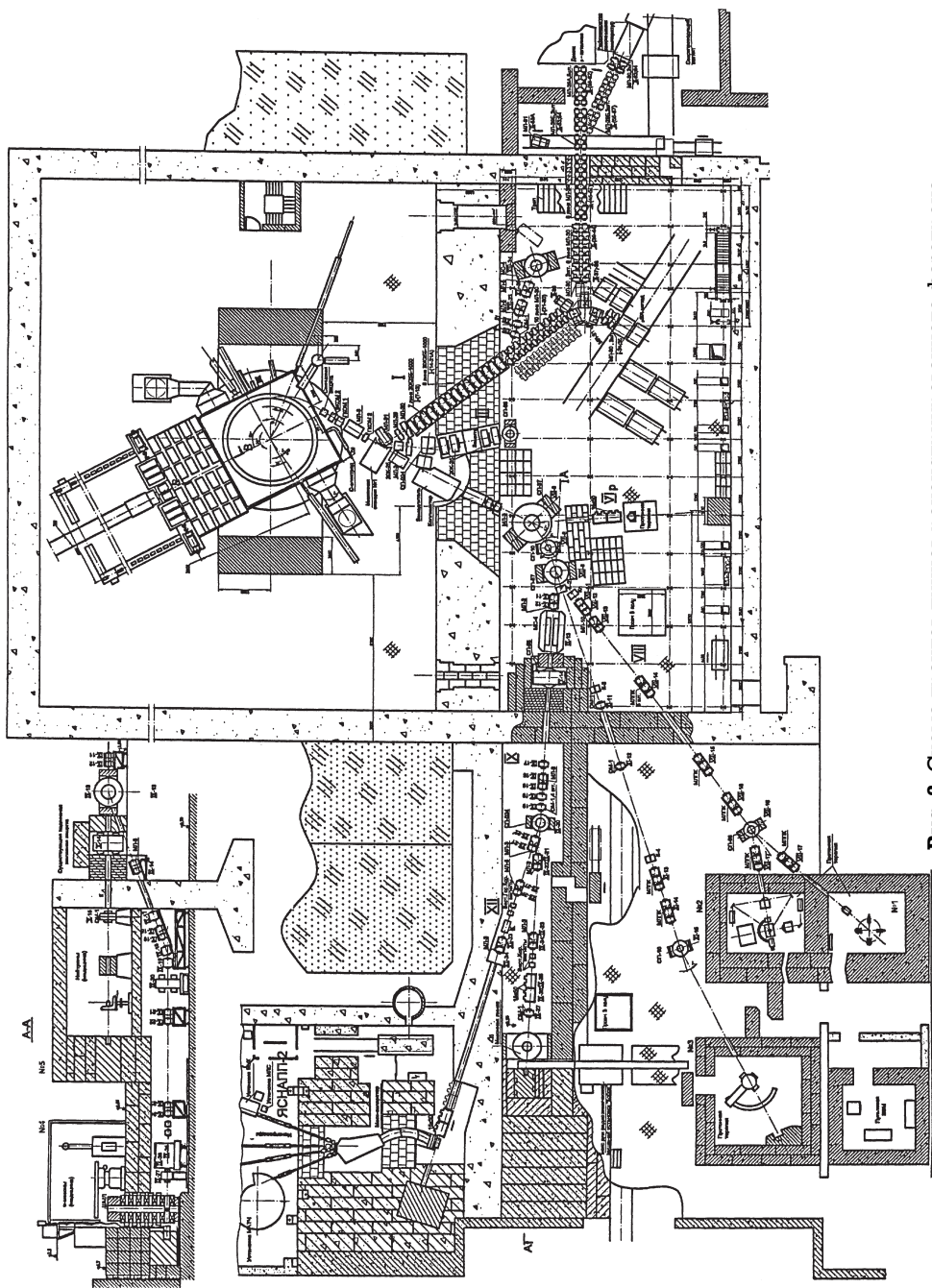


Рис. 2. Схема трактов пучков реконструированного фазотрона

Таблица 2. Параметры нуклонных пучков фазотрона

Номер канала	Вид частиц	Энергия (МэВ)	Интенсивность	Диаметр пучка (см)	Примечание
VI	<i>P</i>	70–660	10^{8*}		Получаются торможением в углеродном замедлителе
VIII	<i>P</i>	200	$5 \cdot 10^8$	2–6	
VIII	<i>P</i>	100	10^8	2–6	
VIII	<i>P</i>	660	10^6	0,3	
VIII	<i>P</i>	130	$5 \cdot 10^6$	3–5	
IX	<i>P</i>	660	$1,2 \cdot 10^{13*}$		
X	<i>N</i>	350	$(3-5) \cdot 10^8$	5–15	Нейтроны получают на бериллиевой мишени толщиной 36 см
XI	<i>P</i>	660	$5 \cdot 10^7$	0,5–2	
XII	<i>P</i>	660	$1,2 \cdot 10^{13*}$	0,5–1,0	

* Максимальная интенсивность протонного пучка, допускаемая ограничениями системы дозиметрического контроля фазотрона.

интенсивный пучок отрицательных π -мезонов с энергией от 30 до 80 МэВ, пучок сверхбыстрых нейтронов со средней энергией 350 МэВ.

Фазотрон является сейчас наиболее интенсивным источником мезонных пучков в странах-участницах ОИЯИ. Два мезонных канала I и II обеспечивают получение сепарированных пучков с интенсивностью $6 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ для положительных мюонов и $2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ для отрицательных мюонов с наилучшей эффективностью на 1 мкА протонного пучка для жесткофокусирующих каналов такого типа. С помощью широкоугольной магнитной линзы на канале IX при интенсивности выведенного протонного пучка 2 мкА достигнуты интенсивности мезонных пучков $\sim 3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ для положительных и отрицательных пи-мезонов. Кроме того, на канале IX получен пучок так называемых «поверхностных» мюонов (энергия 4 МэВ) с интенсивностью $\sim 5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, что сопоставимо с интенсивностями таких пучков на мезонных фабриках.

Для сепарированного пучка поверхностных мюонов на канале IX достигнута интенсивность $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ при соотношении $N_{e^+}/N_{\mu^+} \approx 2$.

На канале III в диапазоне энергий 200–300 МэВ получены интенсивности $2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ для положительных пи-мезонов и $4 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ для отрицательных пи-мезонов.

Конкурентоспособность фазотрона в современных условиях обеспечивается полученными интенсивностями первичных и вторичных пучков, достаточными для проведения широкого круга электронных экспериментов, где регистрируется каждая входящая в установку частица, наличием интенсивного пучка сепарированных «поверхностных» мюонов, наличием низкофоновой лаборатории, где уровень нейтронного фона позволяет проводить эксперименты, трудновыполнимые на других ускорителях.

В настоящее время научные исследования на пучках реконструированного фазотрона ведутся на следующих основных направлениях: исследования мю-катализа,

Таблица 3. Параметры мезонных и электронных пучков фазотрона

Номер канала	Вид частиц	Энергия (МэВ)	Импульс (МэВ/с)	Поток частиц (c^{-1}) через площадь 100 см^2	Разброс $\Delta p/p$	Поляризация	Примесь
I	μ^-	40	100	$4,5 \cdot 10^4$	10%	80%	8% e^-
I	μ^-	58	125	10^5	10%	80%	8% e^- ; 2,4% π^-
I	μ^+	58	125	$3 \cdot 10^5$	10%	80%	3% e^+
I	π^-	100	220	10^6	10%		
I	π^+	100	220	$2,5 \cdot 10^6$	10%		
II	μ^-	34	90	$1,5 \cdot 10^4$	10%	75%	7% e^-
II	μ^-	58	125	$6 \cdot 10^4$	10%	75%	9% e^- ; 0,4% π^-
II	μ^+	58	125	$2 \cdot 10^5$	10%	75%	3% e^+ ; 0,45% π^+
II	e^-	30	30	$1,4 \cdot 10^5$			$\leq 0,2\% \mu^-$; $\leq 0,2\% \pi^-$
II	e^-	60	60	$2 \cdot 10^5$			1,2% μ^- ; $\leq 0,2\% \pi^-$
II	e^-	125	125	$6 \cdot 10^5$			17% μ^- ; $\leq 4\% \pi^-$
II	e^+	125	125	$6 \cdot 10^5$			64% μ^+ ; $\leq 12\% \pi^+$
III	π^+	15–400	65–525	$1,3 \cdot 10^7$	16%		
III	π^-	15–400	65–525	$2 \cdot 10^6$ при 300 МэВ/с (190 МэВ)	16%		
IX	π^+	20–77	76–165	$6,6 \cdot 10^7$ при 112 МэВ/с (40 МэВ)	6%		24% e^+ ; 6% μ^+ при 112 МэВ/с
IX	π^-	30–77	95–165	$2,6 \cdot 10^7$ при 123 МэВ/с (47 МэВ)	6%		32% e^- ; 35% μ^- при 123 МэВ/с
IX	μ^+	~ 4	26–30	$5,3 \cdot 10^5$ при 28 МэВ/с	6%	>90%	$N_{\mu^+}/N_{e^+} = 0,033$ при 28 МэВ/с
IX	μ^+	~ 3	21	$2,5 \cdot 10^5$	9,5%	>90%	$N_{\mu^+}/N_{e^+} = 0,43$
IX	π^+ (сепарир.)	20	76	$6,8 \cdot 10^5$	9,5%		$N_{\pi^+}/N_{e^+} = 3,0$

Таблица 4. Физико-дозиметрические характеристики медицинских пучков реконструированного фазотрона

Номер канала	Энергия транспортируемых протонов (МэВ)	Номер кабины	Вид частиц в кабине и их энергия (МэВ)	Интенсивность частиц в кабине (c^{-1})	Диаметр пучков в кабине (см)	Мощность дозы в месте нахождения облучаемого объекта (рад/мин)
VIII	200	1	протоны 200	$5 \cdot 10^8$	2–6	10–200
VIII	100	1	протоны 100	10^8	2–6	30–120
VIII	660	1	протоны 660	10^6	0,3	6,0
VIII	130	2	протоны 130	$2 \cdot 10^8$	3–6	25–100
XI	660	3	протоны 660	$5 \cdot 10^7$	0,5–2	600
IX	660	4	π^- -мезоны 30–80	$2 \cdot 10^7$	2–10	4–6
X	660	5	Нейтроны, средняя энергия 350	$5 \cdot 10^8$	5–15	2,5–9
X	250	5	протоны 250	$5 \cdot 10^9$	До 21	До 2000
VI	70–100	7	протоны 70–100	$3 \cdot 10^8$	0,5–2	До 3000

изучение редких и экзотических распадов пионов и мюонов и процессов взаимодействия пионов с легкими ядрами, исследование конденсированных сред μSR -методом, ядерная спектроскопия на комплексе ЯСНАПП-2, исследования электроядерного способа получения энергии и трансмутации радиоактивных отходов, медико-биологические и клинические исследования по адронной терапии онкологических больных.

В планах дальнейшего развития трактов пучков фазотрона намечены разработка и создание канала транспортировки выведенного протонного пучка с вертикальным направлением подвода пучка снизу-вверх к мишени подкритической сборки установки SAD.

4. Заключение

Сфера научной деятельности сотрудников Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова уникальна для Объединенного института ядерных исследований. Она охватывает эксперименты в области физики элементарных частиц (при высоких, промежуточных и низких энергиях); исследования по физике ядра (в том числе релятивистскую ядерную физику и ядерную спектроскопию); исследования слабых взаимодействий и физики нейтрино; экспериментальное изучение конденсированных сред; теоретическую поддержку экспериментальных исследований; изучение