

ДУБНЕНСКИЙ СИНХРОФАЗОТРОН. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЛВЭ

И.Н.Семенюшкин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Развитие дубненского синхрофазотрона как источника релятивистских ядер и поляризованных дейтронов обеспечивалось непрерывным совершенствованием ускорительного комплекса. Дано краткое описание основных систем, режимов работы ускорителя и каналов пучков частиц ЛВЭ ОИЯИ. Рассмотрены новые возможности ускорительного комплекса лаборатории, связанные с запуском сверхпроводящего ускорителя — нуклотрона.

The development of the Dubna synchrophasotron as a source of relativistic nuclei and polarized deuterons was supported by a persistent improvement of the accelerator facility. A short description of the main systems, operation of the accelerator and beam channels at the LHE JINR is given. The new opportunity of the LHE accelerator facility connected with the superconductivity accelerator — Nuclotron — is discussed.

Одним из крупнейших достижений уходящего века стало открытие в 1944 г. В.И.Векслером [1—3] и несколько позже Э.М.Мак-Милланом [4] нового метода ускорения релятивистских частиц — принципа автофазировки. Это позволило сразу же после окончания Великой Отечественной войны приступить к проектированию и созданию в СССР ускорителей электронов и протонов на энергию в несколько сот МэВ. За два года М.С.Рабинович [5—9], С.М.Рытов [10], Э.Л.Бурштейн [11—12], А.А.Коломенский [13—14] разработали теорию круговых резонансных ускорителей, и уже в 1947 г. в Физическом институте АН СССР заработал первый ускоритель В.И.Векслера — электронный синхротрон на 30 МэВ, а спустя два года — на 265 МэВ. В этом же году в Институте ядерных проблем АН СССР (теперь Лаборатория ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований) был запущен крупнейший в мире фазотрон на энергию протонов 550 МэВ, впоследствии доведенную до 680 МэВ.

В 1948 году теоретики ФИАН начали разработку теории, необходимой для проектирования ускорителя протонов — будущего дубненского синхрофазотрона на 10 ГэВ. К 1951 г. в работах М.С.Рабиновича, А.М.Балдина, А.А.Коломенского, В.В.Михайлова, В.А.Петухова, Л.Л.Собсовича [15—30] теория была в основном создана. Исследования, выполненные на модели синхрофазотрона на энергию 180 МэВ В.А.Петуховым, Л.П.Зиновьевым, И.С.Данилкиным с сотрудниками, подтвердили правильность основных положений теории. В короткие сроки в РТИ АН СССР, НИИЭФА, ГСПИ и других организациях был выполнен огромный объем проектных и конструкторских работ, а отечественная промышленность изготовила все необходимое уникальное оборудование дубненского синхрофазотрона [31]. И вот 17 апреля 1957 г. могучий ускоритель ожил — на синхрофазотроне, строительство которого возглавляли выдающиеся советские ученые академики В.И.Векслер и А.Л.Миц, был получен ускоренный до энергии 9 ГэВ пучок протонов [32]. Ученые стран-участниц Объединенного института ядерных исследований получили первоклассную экспериментальную базу для проведения опытов по физике высоких энергий.

Непрерывное развитие ускорительного комплекса всегда было в центре внимания лаборатории. В течение 60-х годов была увеличена интенсивность ускоренного пучка протонов, созданы требуемые для экспериментаторов режимы работы ускорителя, каналы пучков π^\pm -мезонов, сепарированных K^\pm -мезонов и антипротонов. К сожалению, требуемая для получения проектных параметров сепарированных пучков интенсивность протонов в то время не была достигнута, что ограничило исследования на чистых пучках K -мезонов и антипротонов.

В 60-е годы в Советском Союзе, Западной Европе и США начали работать протонные синхротроны на большие энергии и интенсивности пучков. Дубненский синхрофазотрон перестал быть рекордным по энергии частиц. В возникшей ситуации необходимо было найти свое место для физических исследований, проводимых лабораторией на собственной ускорительной базе. Итогом тщательного и длительного изучения стало развитие комплекса в направлении получения ускоренных пучков более тяжелых, чем протоны, частиц, и, в первую очередь, для удовлетворения запросов нового научного направления релятивистской ядерной физики [33]. Важным стимулом для принятия решения, открывшего путь в неосвоенный энергетический диапазон ядер с энергией до 5 ГэВ/нуклон, явилось успешное осуществление на синхрофазотроне режима ускорения дейтронов [34,35].

Для выполнения намеченной программы физических исследований ускорительный комплекс синхрофазотрона должен был обеспечить:

- 1) широкий набор ускоренных ядер;

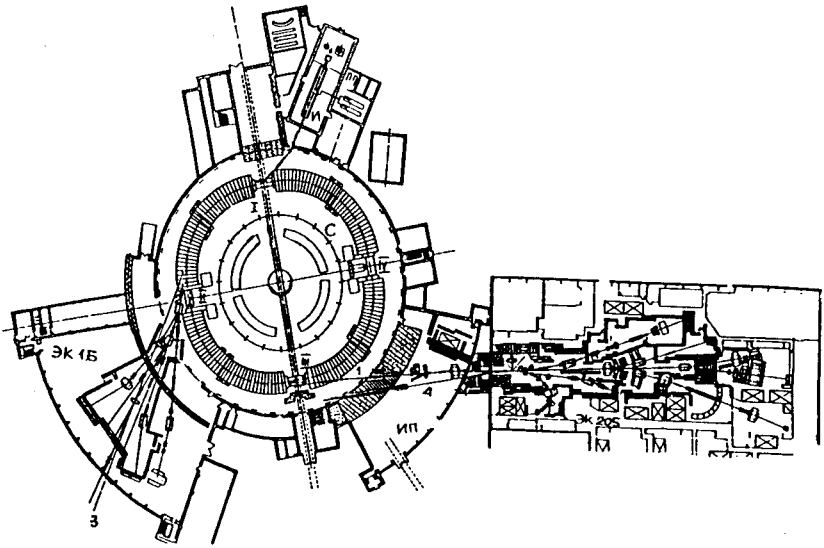


Рис.1. Ускорительный комплекс ЛВЭ ОИЯИ: С — синхрофазотрон; И — инжектор-линейный ускоритель; ЭК — экспериментальный корпус 1Б; ИП — измерительный павильон; ЭК-205 — экспериментальный корпус 205; I, II, III, IV — прямолинейные промежутки синхрофазотрона; 1 — пучок медленного вывода (МВ-1) из синхрофазотрона; 2 — пучок медленного вывода (МВ-2) из синхрофазотрона, а также быстрого вывода (БВ); 3 — нейтронный пучок из синхрофазотрона; 4 — пучок, выводимый из нуклотрона

2) эффективный вывод ускоренного пучка из ускорителя (длительный — сотни мс, быстрый — единицы мс и меньше);

3) разветвленную сеть каналов первичных и вторичных пучков;

4) высокий коэффициент одновременности работы физических установок, незначительный процент отказов оборудования ускорителя, радиационную безопасность.

На рис.1 представлена схема ускорительного комплекса ЛВЭ. Синхрофазотрон и его инжектор размещаются в корпусе №1 и здании ЛУ-20 соответственно. В здании 1Б, измерительный павильон и корпус 205 выводятся пучки из синхрофазотрона и размещаются физические установки. Перечисленные корпуса и здания — это небольшая часть из более 80 сооружений лаборатории, необходимых для ее полноценного функционирования.

Кольцевой магнит синхрофазотрона состоит из четырех квадрантов, каждый длиной 44 м, разделенных четырьмя 8-метровыми прямолинейными промежутками. Прямолинейный промежуток I используется для ввода пучка из инжектора в синхрофазотрон. В нем также размещено оборудование системы вывода пучка. Промежутки II, III используются под оборудование медленного вывода и последний промежуток — для размещения ускоряющей ВЧ-системы синхрофазотрона.

Магнитное поле при инжекции составляет 0,023 Тл, его максимальное значение — 1,26 Тл. Скорость нарастания магнитного поля 0,4 Тл/с.

Ускоряющая ВЧ-система синхрофазотрона обеспечивает ускорение частиц на второй гармонике. Начальная частота 0,3 МГц, конечная — 2,88 МГц.

Вакуумная камера имеет объем $\sim 200 \text{ м}^3$. Ее поперечные размеры $2000 \times 400 \text{ мм}$. Средний вакуум при использовании масляных вакуумных насосов $2 \cdot 10^{-6}$ Торр.

ИНЖЕКТОР. ИСТОЧНИКИ ИОНОВ

Предварительное ускорение частиц перед вводом их в синхрофазотрон осуществляется инжекционным комплексом. Он включает различного рода источники (протонов, высокозарядных ионов (ядер), поляризованных дейтронов), форинжектор — импульсный трансформатор с ускоряющей трубкой и линейный ускоритель протонов на энергию 20 МэВ — ЛУ-20 [36].

В принципе линейный ускоритель может быть использован и для ускорения высокозарядных ионов (ядер). Этого можно достигнуть регулированием уровня вводимого в ЛУ ВЧ-ускоряющего поля, обеспечивая прохождение ускоряющих промежутков частицами в соответствующей фазе электрического поля. При переходе к ускорению от протонов к легким ядрам отношение заряда q к массе m уменьшается в два раза, и для соблюдения синхронности движения частиц в этом случае напряженность электрического поля в резонаторе ЛУ-20 должна быть увеличена в $\sqrt{2}$, а вводимая мощность в два раза. Технически выполнить это невозможно, и поэтому остается другой вариант ускорения, связанный с уменьшением энергии при скорости частиц в два раза меньшей, чем у протонов, — ускорение на второй кратности. В режиме ускорения на второй кратности можно ускорять и высокозарядные ионы с $q/m < 1/2$. Практически это удастся сделать до $q/m \geq 0,33$. При этом приходится, соответственно, оптимизировать и работу форинжектора.

В случае ускорения ядер значительный выигрыш в интенсивности ускоренных частиц получается при работе форинжектора в номинальном

Таблица 1. Основные параметры линейного ускорителя ЛУ-20

1. Энергия пучка протонов на входе ЛУ-20	$W_{п1} = 0,6 \text{ МэВ}$
2. Энергия пучка протонов на выходе ЛУ-20	$W_{п2} = 20 \text{ МэВ}$
3. Энергия пучка ядер на входе ЛУ-20	$W_{я1} = 0,315 \text{ МэВ/нукл}$
4. Энергия пучка ядер на выходе ЛУ-20	$W_{я1} = 5 \text{ МэВ/нукл}$
5. Частота ускоряющего поля	$\frac{\omega}{2\pi} = 144,5 \text{ МГц}$
6. Синхронная фаза при ускорении протонов	$\Phi_s = 31,5^\circ$
7. Добротность резонатора	$Q = 40000$
8. ВЧ-мощность, вводимая при ускорении протонов ($I = 50 \text{ мА}$)	$P = 4,5 \text{ МВт}$
9. Амплитуда среднего поля на оси резонатора	$E_0 = 18,5 \text{ кВ/см}$
10. Длительность импульса тока ускоренного пучка	$\tau = 600 \text{ мкс}$
11. Длина резонатора	$L = 14,5 \text{ м}$
12. Диаметр резонатора	$D = 1,4 \text{ м}$
13. Апертура канала	$2a = 17\text{-}22 \text{ мм}$
14. Количество трубок дрейфа	$n = 1/2 + 58 + 1/2$
15. Диаметр трубок дрейфа	$d = 13 + 9 \text{ см}$
16. Система фокусировки	FODO
17. Градиент фокусирующих линз	$G = 5500\text{-}800 \text{ Э/см}$
18. Коэффициент зазора	$\alpha = 0,25$
19. Пропускная способность канала	$A = 0,25 \text{ см·град}$
20. Мгновенный энергетический спектр ускоренного пучка на выходе группирователя	$\frac{\Delta W}{W_s} = 0,2\%$
21. Диапазон модуляции средней энергии пучка на выходе разгруппирователя	$\frac{\Delta W}{W_s} = 2,5\%$

режиме (≈ 600 кВ). Для согласования форинжектора и линейного ускорителя по энергии частиц начальная часть ЛУ-20 используется только для транспортировки пучка (эта часть резонатора торцевой стенкой отделяется от остальной и в ней отсутствует ВЧ электрическое поле). Ускорение начинается во второй части резонатора с энергии ~ 300 кэВ/нуклон и доводится до 5 МэВ/нуклон.

В табл.1 приведены основные параметры инжектора синхрофазотрона.

Таким образом, возможности получения широкого набора релятивистских пучков ядер фактически предопределяются параметрами протонного линейного ускорителя ЛУ-20. Нужны источники ионов, дающие пучки с требуемой интенсивностью, геометрическими характеристиками и достаточно высокой зарядностью ($q/m \geq 0,33$). И с другой стороны, из-за уменьшения скорости ионов на выходе ЛУ-20 по сравнению с протонами требуется осуществлять в синхрофазотроне режим кратного ускорения (на частоте в n раз большей частоты обращения ускоряемых частиц), а при желании иметь тяжелые ионы необходимо значительно улучшить вакуум в камере ускорителя.

В настоящее время на инжекторе используются четыре типа ионных источников. Для получения пучков протонов, дейтронов, ядер гелия — дуоплазмотрон; ядер, включая серу, — электронно-лучевой и лазерный; поляризованных дейтронов — «Полярис». Источник первого типа — дуоплазмотрон, используемый в ЛВЭ, по своим характеристикам практически не отличается от аналогичных источников на многих ускорителях мира. Оригинальными являются три типа источников, рассмотренные ниже.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ

Электронно-лучевой метод получения высокозарядных ионов и ядер, реализованный в источнике Донца [37], имеет рекордный фактор ионизации $n\tau$ (n — плотность электронов [см^3] и τ — длительность ионизации [с]). На этом источнике удалось достигнуть $n\tau = 8 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}$ при энергии электронов 20 кэВ, что позволило получить Xe^{54+} [38,39].

Принцип работы источника состоит в следующем. В хорошо сфокусированный электронный пучок вводится ионизируемое вещество. На время ионизации обеспечивается удержание в электронном пучке образующихся ионов. После достижения требуемой зарядности ионный пучок выводится из источника. Схема источника приведена на рис.2.

Для фокусировки интенсивного пучка электронов из электронной пушки используется продольное магнитное поле, создаваемое с помощью сверхпроводящего магнитного соленоида с напряженностью поля несколько

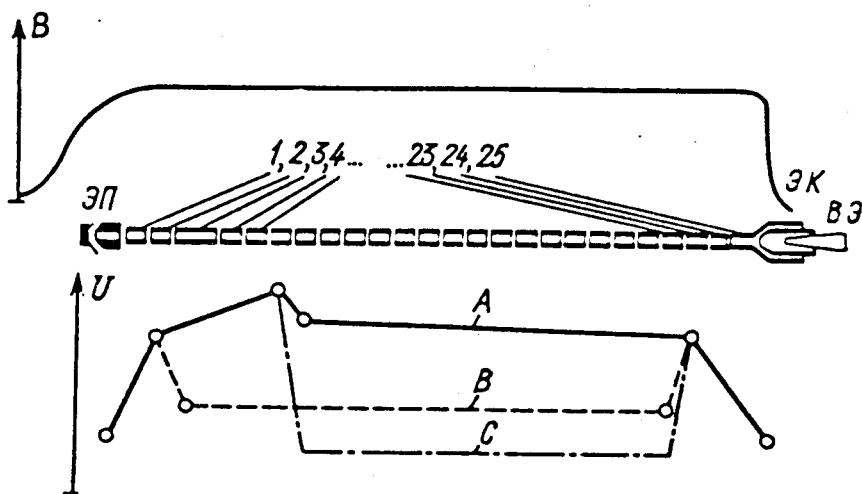


Рис.2. Схема криогенного источника ионов КРИОН: ЭП — электронная пушка, 1, 2, ... 25 — дрейфовые трубки, ЭК — электронный коллектор, ВЭ — вытягивающий электрод, В — распределение индукции магнитного поля вдоль оси ионизатора. Распределение электрических потенциалов вдоль дрейфовой структуры ионизатора: А — вывод ионов из источника и подготовка к ионизации, В — инжекция рабочего газа, С — ионизация рабочего газа

тесла. Радиальное удержание ионов обеспечивается за счет пространственного заряда электронного пучка. Предельное число положительных элементарных зарядов, которое может быть удержано электронным пучком, равно $\sim 10^{11} - 10^{12}$.

Для формирования пучка ионов при инжекции рабочего вещества в источник используется соответствующее аксиальное распределение потенциала во времени. При этом участок, куда вводится рабочее вещество, лишь на определенный промежуток времени «подключается» к объему электростатической ловушки. После завершения процесса ионизации осуществляется вывод ионов в аксиальном направлении за счет создания соответствующего распределения потенциала вдоль пучка. Требуемый для получения высокозарядных ионов и ядер вакуум меньше 10^{-10} Торр достигается за счет того, что рабочий объем источника находится внутри азотного экрана и большая часть трубок дрейфа имеет температуру 4,2 К.

Уникальным достоинством ионизатора является управляемый во времени и достаточно узкий зарядовый спектр получаемых ионов.

С 1977 г. источник КРИОН-1 используется на инжекторе синхрофазотрона для получения релятивистских пучков ядер. Источник проработал в общей сложности более 3500 часов, показав высокие эксплуатационные характеристики. Типичная интенсивность на выходе ионизатора $\sim 10^{10}/Z$ для легких элементов. Электронный ток в ионизаторе ~ 100 мА и его плотность несколько сот А/см². Длительность импульса тока ионов — до 40 мкс.

ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ

Впервые лазерный источник [41] был использован на синхрофазотроне в 1976 г. для ускорения углерода [42]. Однако твердотельный лазер на неодимовом стекле не обеспечивал требуемой надежности работы источника и мог действовать с частотой посылок только в 5 раз меньшей, чем это требуется для ускорителя.

В лаборатории создан надежно работающий ионный источник [43,44] на основе CO₂-лазера. Переход на более длинноволновое излучение CO₂-лазера позволил при значительном снижении плотности излучения обеспечить высокую зарядность образующихся ионов и во много раз увеличить частоту циклов работы источника.

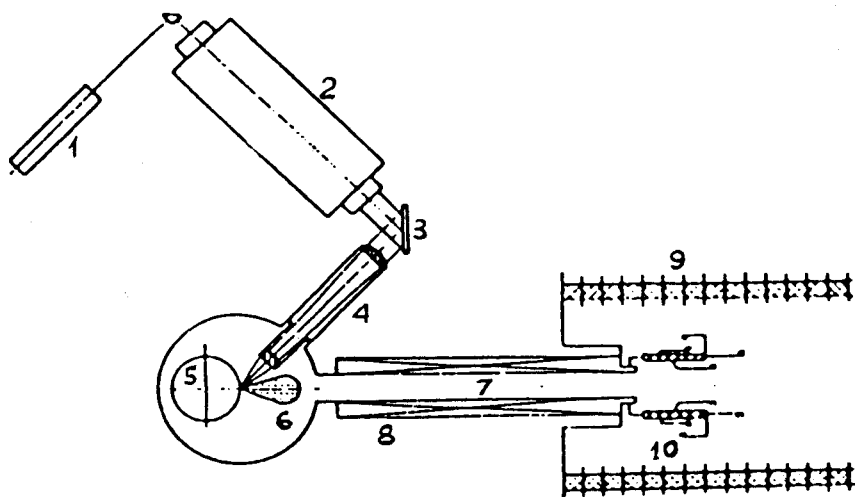


Рис.3. Схема лазерного источника ионов: 1 — настроечный He—Ne-лазер, 2 — CO₂-лазер, 3 — зеркало, 4 — оптика, 5 — мишень, 6 — плазма, 7 — пространство дрейфа, 8 — магнитная катушка, 9 — предускоритель, 10 — ионная оптика

Схема устройства источника показана на рис.3. Лазерное излучение из резонатора фокусируется на мишень, находящуюся в вакуумной камере. Образующиеся ионы системой формирования извлекаются из лазерной плазмы, ускоряются в форинжекторе и направляются в линейный ускоритель. Предельная плотность излучения на мишени составляет $\sim 10^{10}$ Вт/см². На выходе линейного ускорителя имеется обдирочное устройство (мишень из углерода с плотностью ~ 60 мкг/см²). Последующий магнитный анализ позволяет получить чистый пучок ядер.

С помощью лазерного источника на синхрофазотроне были получены пучки лития, углерода, кислорода, фтора, магния, кремния.

ИСТОЧНИК ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ДЕЙТРОНОВ

Все возрастающее значение в программе исследований, выполняемых на синхрофазотроне, приобретают эксперименты на поляризованных пучках дейтронов. Впервые пучок поляризованных дейтронов был получен на ускорителе ЛВЭ в 1981 году с помощью источника «Полярис» [45—47]. Основной особенностью, отличающей этот источник, основанный на методе атомного пучка, от аналогичных, является широкое применение криогенной техники. Она используется для получения вакуума (крионасосы-панели, охлаждаемые жидким гелием); сверхпроводящие секступольные линзы — для анализа атомарного пучка дейтронов по спине; сверхпроводящие соле-

Таблица 2. Поляризация дейтронов на выходе ЛУ-20

Переход	Поляризация	Коэффициент поляризации
3—6	P_z	$0,47 \pm 0,04$
	P_{zz}	—
1—4	P_z	$-0,37 \pm 0,04$
	P_{zz}	—
3—5	P_z	$-0,60 \pm 0,08$
	P_{zz}	—
2—6	P_z	—
	P_{zz}	$0,54 \pm 0,08$

Таблица 3. Основные характеристики пучков частиц инжекционного комплекса синхрофазотрона

Ускоренные частицы	Интенсивность, имп.	Длительность импульса, мкс	Используемый источник	Примечание
P	$1,5 \cdot 10^{14}$	500	дуоплазмотрон	энергия протонов 20 МэВ
d	$1 \cdot 10^{14}$	500	— " —	энергия ядер 5 МэВ·А
$d \uparrow$	$2,5 \cdot 10^{10}$	100	«Полярис»	
${}^4_2\text{He}$	10^{13}	500	дуоплазмотрон	
${}^3_2\text{He}$	$3,5 \cdot 10^{11}$	500	— " —	
${}^7_3\text{Li}$	$5 \cdot 10^{10}$	15	лазерный	
${}^6_3\text{Li}$	$3 \cdot 10^9$	15	— " —	
${}^{10}_6\text{C}$	$6,5 \cdot 10^{10}$	25	— " —	
${}^{16}_8\text{O}$	$6 \cdot 10^9$	10	— " —	
${}^{19}_9\text{F}$	$2,5 \cdot 10^9$	6	— " —	
${}^{22}_{10}\text{Ne}$	$2 \cdot 10^7$	40	КРИОН	
${}^{24}\text{Mg}$	$2 \cdot 10^8$	25	лазерный	
${}^{28}_{14}\text{Si}$	$1 \cdot 10^8$	25	— " —	
${}^{32}_{16}\text{S}$	$4 \cdot 10^6$	—	КРИОН-С [40]	

ноиды — для ионизатора Пеннинга и др. Источник позволяет получить в зависимости от используемого радиочастотного перехода векторно(P_z)- и тензорно(P_{zz})-поляризованные пучки дейтронов.

Данные по поляризации пучков дейтронов на выходе ЛУ-20 приведены в табл.2.

В табл.3 приведены основные характеристики пучков частиц инжекционного комплекса синхрофазотрона.

ВЫВОД ПУЧКА ИЗ СИНХРОФАЗОТРОНА

Развитие синхрофазотрона как ускорителя релятивистских ядер фактически не имело бы перспективы, если бы отсутствовал эффективный вывод ускоренных частиц. Нужно также заметить, что без вывода пучка невозможно было увеличивать интенсивность уже имеющихся вторичных пучков или создавать пучки более редких частиц при работе от мишеней, расположенных внутри камеры синхрофазотрона, поскольку по нормам радиационной безопасности интенсивность протонов не должна была превышать $\sim 10^{10}$ частиц в цикле. Успешное решение этой сложной задачи устранило эти препятствия. В настоящее время на синхрофазотроне эксплуатируются два медленных (до 1 с) вывода ускоренного пучка и один быстрый (до 1 мс). Вывод ускоренных частиц [48—51] при требуемом значении магнитного поля осуществляется за счет создания резонанса $Q_r = 2/3$ радиальных бетатронных колебаний. Для этого с помощью специальных обмоток на полюсах магнита синхрофазотрона создается как требуемое радиальное искажение орбиты движения частиц, так и достигается резонансное значение величины n — показателя спада магнитного поля. Частицы, вошедшие в резонанс, забрасываются в случае вывода частиц в корпус 205 в септум-магнит, расположенный во II прямолинейном промежутке (рис. 1), отклоняются в радиальном направлении, попадают во второй септум-магнит (III прямолинейный промежуток) и выводятся из ускорителя. Между первым и вторым септум-магнитами имеется линза, фокусирующая пучок в горизонтальной плоскости на вход второго магнита. Вывод частиц происходит при постоянном магнитном поле и выключенном ВЧ ускоряющем напряжении. Это обеспечивает постоянство энергии вводимых частиц и отсутствие временной ВЧ-структуры пучка. Принятые меры — подавление низкочастотных пульсаций магнитного поля и др. — позволили практически устранить такие пульсации в интенсивности выводимого пучка.

Второй медленный вывод [52,53], в отличие от первого, — одноступенчатый. Отклонение пучка и вывод его из камеры синхрофазотрона осуществляется с помощью одного септум-магнита, расположенного в I прямолинейном промежутке. Этот же промежуток используется и для ввода пучка в синхрофазотрон. Пучок выходит наружу перед II прямолинейным промежутком. Для устранения дефокусирующего влияния рассеянного магнитного поля на полюсах магнита синхрофазотрона на участке вывода установлены специальные шиммы. Они обеспечивают фокусировку по горизонтали, хотя и не удастся получить такие же геометрические характеристики пучка, как на первом медленном выводе.

Два медленных вывода независимо один от другого в одном цикле ускорения позволяют выводить в любом соотношении по интенсивности и тре-

Таблица 4. Основные характеристики медленных выводов МВ-1 и МВ-2

Характеристика	МВ-1	МВ-2
Направление вывода	измерительный павильон, корпус 205	корпус 1Б
Энергия частиц:		
протоны, ГэВ	0,8 ÷ 8,2	1,4 ÷ 6,3
ядра, ГэВ/нуклон	0,25 ÷ 3,6	0,45 ÷ 2,8
Длительность вывода, мс	1 ÷ 500	1 ÷ 700
Эффективность вывода (коэффициент вывода при максимальной энергии), %	90	30
Эмиттанс пучка, π мм-мрад		
горизонтальный	25	60
вертикальный	37	70
Размер пучка (полный $\pm 2\sigma$), мм ²	от 10×10	от 10×10
на внешней мишени	до 160×160	до 160×160

буемой энергии пучок из ускорителя в корп.205 и экспериментальный павильон 1Б. В этот же павильон в одном цикле можно осуществлять быстрый вывод пучка вместе с медленным выводом в корп.205. Интенсивность выводимого пучка и его энергия по каждому направлению также регулируются независимо.

Основные характеристики медленных выводов МВ-1 и МВ-2 приведены в табл.4.

ПУЧКИ ЧАСТИЦ

На рис.4 и 5 представлены схемы каналов пучков частиц в измерительном павильоне, корп.205 на основе медленного вывода МВ-1 и в корп.1Б на основе медленного вывода МВ-2 (рис.6). При создании сети каналов частиц наряду с обеспечением требуемых параметров пучка для физической установки, как правило, предусматривалась совместная работа данной установки с другими в одном цикле ускорения. Независимость работы установок достигалась выбором подходящей схемы фокусировки и транспортировки пучка, рациональным использованием источников

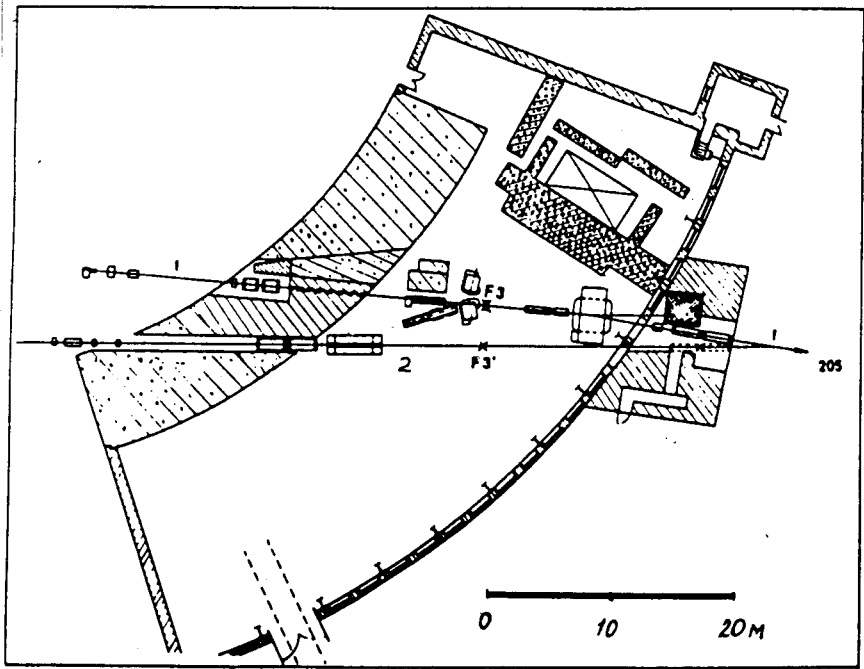


Рис.4. Схема пучков частиц в измерительном павильоне ЛВЭ ОИЯИ: 1 — выведенный пучок из синхрофазотрона (МВ-1), направляемый в корп.205, 2 — выведенный пучок из нуклотрона, направляемый в корп.205 (проект). F3, F3' — промежуточные фокусы пучка

электропитания для элементов магнитной оптики, организацией радиационной защиты, особенно вокруг мишенных станций и ловушек пучка.

Так, для сети каналов на основе МВ-1 выбрана схема в виде «елочки». Для этого по трассе выведенного пучка — канал ВП-1 — организованы четыре мишенные станции (точки F3 — F6). В этих местах формируются промежуточные изображения пучка и могут устанавливаться мишени, которые являются источниками вторичных частиц для каналов 24 и 1В+7В. Мишень в F3 используется для получения в любом из каналов корп.205 частиц, которые трудно или невозможно получить путем ускорения в синхрофазотроне (пучки трития, гелия-3 и других изотопов). Выбранная схема обеспечивает высокую эффективность использования первичного пучка, особенно когда «ветви елочки» — боковые каналы — настроены на использование π -мезонов или других вторичных частиц. Магниты, имеющиеся в каждом канале, позволяют независимо выделять импульс нужных частиц, а размер мишени — варьировать их интенсивность.

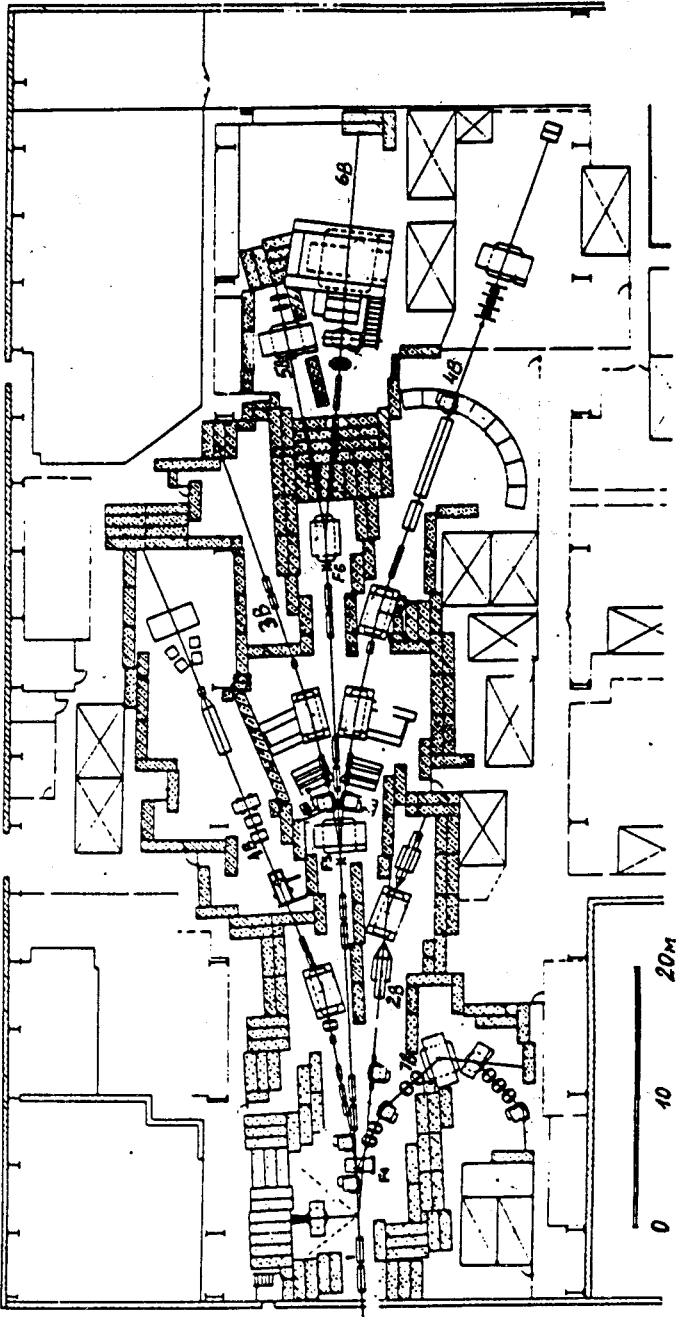


Рис. 5. Схема пучков частиц в экспериментальном корп.205 ЛВЭ ОИЯИ: 1В-7В — каналы частиц, F4-F6 — промежуточные фокусы пучка

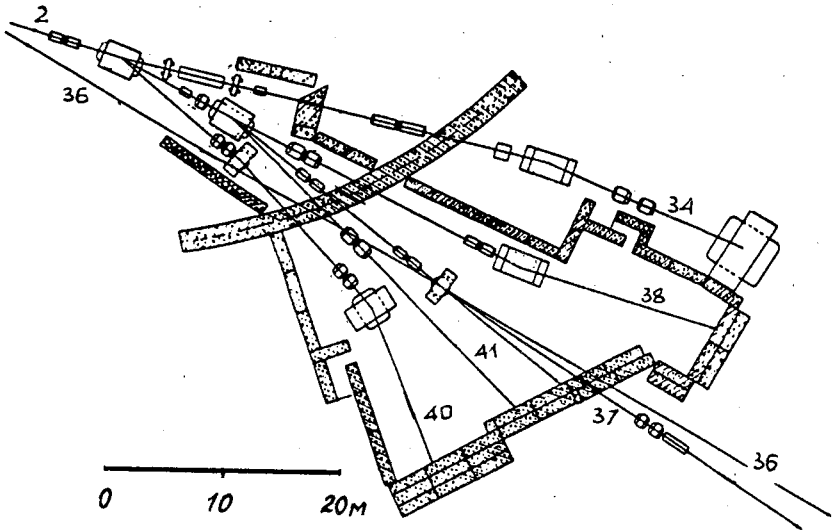


Рис.6. Схема пучков частиц в измерительном павильоне 1Б ЛВЭ ОИЯИ: 2 — выведенный пучок из синхрофазотрона (МВ-2 и БВ), 34, 37, 38, 40, 41 — каналы частиц, 36 — нейтронный пучок

Схема каналов в корп.205 допускает одновременную работу физических установок на интенсивностях частиц, различающихся на 4—5 порядков. Выделение такой относительно малой интенсивности пучка с помощью коллиматора практически невозможно и к тому же будет связано с возникновением сильного радиационного фона. В лаборатории для таких экспериментов используются изогнутые кристаллы, которые обеспечивают поворот в нужном направлении и отщепление небольшой доли не только протонного пучка, но и ядер [54] с практическим отсутствием радиационного фона.

В табл.5 приведены основные характеристики пучков для установок [55] в корп.205.

Всего в каналах частиц на МВ-1 используется 72 магнита и линзы. Практически все каналы могут одновременно работать на вторичных частицах и на первичных частицах — любые 3 канала.

В табл.6 приведены основные характеристики пучков для установок [55] в корп.1Б.

Кроме того, для экспериментов на однометровой жидководородной пузырьковой камере может быть использован моноэнергетический пучок нейтронов [56,57]. В этом случае внутри вакуумной камеры синхрофазотрона устанавливается мишень, на которой происходит стриппинг ускоренных

Таблица 5. Основные характеристики пучков частиц в корп.205

Номер канала	Максимальная энергия протонов и ядер	$\frac{\Delta E}{E}$	Расходимость, $\Delta X \times \Delta Y$	Интенсивность (максим.)	Установка
	ГэВ; ГэВ/нукл.	%	мрад ²	нукл/цикл	
ВП-1	8,2; 3,6	0,2	до 5×2 или 2×5	5·10 ¹¹ *	АЛЬФА-ПОЛИС
1В	8,2; 3,6	0,2	“—”	10 ⁷ *	
2В	8,2; 3,6	0,2	“—”	10 ¹⁰	МАСПИК
3В	8,2; 3,6	0,2	“—”	10 ⁹	КОНУС-М
4В	8,2; 3,6	0,2	“—”	10 ⁶	СФЕРА СМС-МГУ
5В	8,2; 3,6	0,2	до 4×8 или 8×4	10 ⁶	АНОМАЛОН
6В	8,2; 3,6	0,2	“—”	10 ⁵	ГИБС
7В**	$P \dots 0,6$ $K^{\pm} \dots 0,8$ $\pi^{\pm} \dots 1,1$	3,0	35×15	P до 5·10 ⁶ π^{\pm} до 3·10 ⁶ K^+ до 10 ⁵ K^- до 10 ⁴	КАСПИЙ

*Интенсивность ограничена ловушкой пучка.

**Только вторичные частицы. Интенсивность на 10¹² падающих протонов для максимальной энергии частиц.

дейтронов. Образующиеся нейтроны очищаются от заряженных частиц магнитным полем ускорителя и магнитами канала, а геометрические размеры пучка формируются коллиматором. Энергия нейтронов может изменяться от 0,6 до 4,25 ГэВ с энергетическим разбросом $\pm 3\%$.

Новые источники ионов, развитие устройств ЛУ-20, ввод в эксплуатацию системы ВЧ-ускорения на второй кратности [58,59] синхрофазотрона, криооткачка вакуумной камеры кольцевого ускорителя [60], автоматизация и контроль на основе ЭВМ за системами и режимами [61] ускорительного комплекса — это далеко не полный перечень усовершенствований, обеспечивших систематический рост интенсивности ускоренных пучков

Таблица 6. Основные характеристики пучков частиц в корп.1Б

Номер канала	Максимальная энергия протонов и ядер	$\frac{\Delta E}{E}$	Расходимость, $\Delta X' \times \Delta Y'$	Интенсивность (максим.)	Установка
	ГэВ; ГэВ/нукл.	%	(мрад) ²	нукл./цикл	
34	6,3; 2,8	0,2	до 5×10 или 10×5	10 ⁴	СЛОН 2-м пропановая пузырьковая камера
37	6,3; 2,8	0,2	до 5×10 или 10×5	10 ⁶	1-м жидководор. пузырьковая камера
38	6,3; 2,8	0,2	до 5×10 или 10×5	10 ¹⁰	методический пучок
40	2,2; 0,8	0,2	до 5×10 или 10×5	10 ¹⁰	методический пучок
41	6,3; 2,8	0,2	до 5×10 или 10×5	10 ⁶	ПАМИР

частиц и расширение их набора. Сегодня для исследований экспериментаторы могут использовать пучки около двух десятков частиц в широком интервале энергий.

В табл.7 приведены интенсивности основных пучков частиц, ускоряемых в синхрофазотроне.

Суммарное время работы синхрофазотрона уже превысило 100 тыс. часов. На протяжении многих лет ускоритель стабильно работает 4000 часов в год, и его пучки используются не только для проведения экспериментов по проблематике лаборатории, но и для выполнения других исследований, в том числе и медико-биологических. Примерно 30% времени ускоряются протоны и в остальное время — более тяжелые частицы. Число одновременно проводимых экспериментов доходит до 5—6. Несмотря на солидный возраст ускорительного комплекса отказы оборудования [62] за последние годы не превышали 5—6% от планируемого времени работы.

Таблица 7. Интенсивности пучков частиц, ускоряемых в синхрофазотроне

Частицы	Интенсивность за цикл	Поляризованные частицы	Тип поляризации и переход	Коэффициент поляризации	Интенсивность за цикл
p	$4 \cdot 10^{12}$	d	P_z (3—6)	$0,52 \pm 0,05$	$1,2 \cdot 10^9$
d	10^{12}				
${}^3_2\text{He}$	$2 \cdot 10^{10}$		P_z (1—4)	$-0,37 \pm 0,04$	$1,2 \cdot 10^9$
${}^4_2\text{He}$	$5 \cdot 10^8$				
${}^6_3\text{Li}$	$5 \cdot 10^8$		P_{zz} (2—6)	$-0,53 \pm 0,05$	$1,2 \cdot 10^9$
${}^7_3\text{Li}$	$4 \cdot 10^9$				
${}^{12}_6\text{C}$	$2 \cdot 10^9$		P_{zz} (2—6)	$0,22 \pm 0,05$	$1,2 \cdot 10^9$
${}^{16}_8\text{O}$	$2 \cdot 10^7$				
${}^{19}_9\text{F}$	$2 \cdot 10^6$		P_{zz} (3—5)	$-0,60 \pm 0,08$	$1,2 \cdot 10^9$
${}^{22}_{10}\text{Ne}$	10^4				
${}^{24}_{12}\text{Mg}$	$3 \cdot 10^7^*$		P_z (3—5)	$0,19 \pm 0,04$	$1,2 \cdot 10^9$
${}^{28}_{14}\text{Si}$	$5 \cdot 10^4^*$				
${}^{32}_{16}\text{S}$	$3,5 \cdot 10^3^*$				

*Работает криооткачка вакуумной камеры синхрофазотрона.

НУКЛОТРОН

В 1993 г. начал работать жесткофокусирующий сверхпроводящий ускоритель ЛВЭ ОИЯИ — нуклотрон [63,64,55]. Успешно завершено создание, в основном силами лаборатории, экономичного по капитальным затратам и эксплуатационным расходам современного ускорителя заряженных частиц, и, что крайне важно, сохранена возможность использования синхрофазотрона для проведения исследований. Этого удалось достигнуть как за счет рационального размещения ускорителя, так и за счет эффективной перестройки имеющихся помещений и использования оборудования ускорительного комплекса. Нуклотрон смонтирован в кольцевом тоннеле в

здании синхрофазотрона. В качестве инжектора используется линейный ускоритель на 20 МэВ (ЛУ-20) с системой транспортировки пучка в нуклотрон. При необходимости это позволит осуществлять переход при проведении экспериментов с синхрофазотрона на нуклотрон и наоборот в течение немногих часов, переключая лишь системы транспортировки пучка после ЛУ-20. Для размещения оборудования, необходимого для получения жидкого гелия, приспособлены существующие помещения ЛВЭ и относительно небольшие здания, построенные для компрессоров. Вывод пучка из нуклотрона должен быть, в первую очередь, осуществлен в сторону корп.205 (рис.1), что позволит использовать уже имеющуюся сеть каналов заряженных частиц с физическими установками. Нуклотрон рассчитан на ускорение протонов до энергии 12 ГэВ и ядер до максимальной энергии 6 ГэВ/нуклон.

Основные отличительные особенности нуклотрона по сравнению с синхрофазотроном:

- 1) возможность ускорения ионов всех атомов, включая уран (вакуум в камере ускорителя 10^{10} Торр);
- 2) возможность осуществления в десятки раз более длительного медленного вывода ускоренного пучка;
- 3) существенно лучшие (более чем в 10 раз) геометрические характеристики пучка;
- 4) возможность проведения экспериментов на внутренних тонких (струйных и др.) мишенях из различных веществ, в том числе поляризованных протонов и дейтронов в широком интервале энергий.

Реализация этих возможностей, создание бустера нуклотрона [65], непрерывное развитие источников частиц, совершенствование каналов транспортировки пучков и др., несомненно, на многие годы обеспечит хорошие перспективы для проведения исследований в ЛВЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа физических экспериментов [66] на ближайшие несколько лет на ускорительном комплексе синхрофазотрон — нуклотрон нацелена на изучение переходного режима от протон-нейтронной к кварк-глюонной материи. Особое место в ней занимают исследования спиновых явлений. До создания бустера нуклотрона эти эксперименты могут проводиться только на синхрофазотроне, где имеются интенсивные пучки поляризованных дейтронов и нейтронов с энергией от 0,2 до 3,6 ГэВ/нуклон. Ввод в действие в 1995 г. поляризованной протонной мишени [67] существенно расширил возможности исследования спиновых эффектов. Первым экспериментом,

выполненным совместно учеными ОИЯИ и Франции с помощью этой мишени, стало продолжение исследований, начатых в Сакле и теперь проведенных при больших энергиях в Дубне, — измерение разности полных сечений нейтронов с продольной и поперечной поляризацией на протонах. Последний пример лишний раз подчеркивает, насколько важно было при создании нуклотрона обеспечить плавный переход от синхрофазотрона на новый ускоритель, сохранить для экспериментаторов, ориентирующихся на ускорительный комплекс ЛВЭ, уникальные пучки частиц. То, что это стало возможным, в первую очередь, заслуга высококвалифицированного коллектива ускорительщиков ЛВЭ, начало которому положил В.И.Векслер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Векслер В.И. — ДАН, 1944, т.43, с.346.
2. Векслер В.И. — ДАН, 1944, т.44, с.393.
3. Veksler V.I. — Journ. of Phys. USSR, 1945, vol.9, p.153.
4. McMillan E.M. — Phys.Rev.Lett., 1945, vol.68, p.1434.
5. Рабинович М.С. — Journ. of Phys. USSR, 1946, vol.10, p.523.
6. Рабинович М.С. — Journ. of Phys. USSR, 1946, vol.10, p.530.
7. Рабинович М.С. — Теория синхротрона. ФИАН, 1946.
8. Рабинович М.С. — Интенсивность пучка в фазотроне. ФИАН, 1947.
9. Рабинович М.С. — Теория современных резонансных ускорителей. ФИАН, 1948.
10. Рыгов С.М. — К теории синхротрона. ФИАН, 1947.
11. Бурштейн Э.Л., Коломенский А.А. — Движение заряженных частиц в быстропеременных магнитных полях. ФИАН, 1947.
12. Бурштейн Э.Л. — К расчету интенсивности в бетатроне. ФИАН, 1948.
13. Коломенский А.А. — Теория кратного резонансного ускорителя (микротрона). ФИАН, 1950.
14. Коломенский А.А. — Движение электронов в аксиально-симметричном магнитном поле (внешняя молекула). ФИАН, 1949.
15. Рабинович М.С. — Теория синхрофазотрона. ФИАН, 1947.
16. Рабинович М.С., Балдин А.М., Михайлов В.В. — Исследование движения частиц в синхрофазотроне с прямолинейными промежутками. ФИАН, 1949.
17. Рабинович М.С., Балдин А.М., Михайлов В.В. — К теории свободных колебаний в ускорителе с прямолинейными промежутками. ФИАН, 1950.
18. Рабинович М.С. — Общая теория движения частиц в синхрофазотроне с разрезами. ФИАН, 1950.
19. Рабинович М.С. — Резонансы между медленными колебаниями. ФИАН, 1950.
20. Рабинович М.С. — Эффективность инжекции. ФИАН, 1950.
21. Рабинович М.С. — Труды ФИАН, 1958, т.Х, с.23.
22. Балдин А.М., Михайлов В.В., Рабинович М.С. — ЖЭТФ, 1956, т.31, с.993.

23. Балдин А.М., Михайлов В.В. — Влияние на движение частиц отклонения магнитного поля от расчетного и допуска в синхрофазотроне АН СССР. ФИАН, 1950.
24. Балдин А.М. — Синхрофазотрон с кратным резонансом и прямолинейными промежулками. ФИАН, 1949.
25. Коломенский А.А., Петухов В.А., Рабинович М.С. — Кольцевой фазотрон. ФИАН, 1953.
26. Коломенский А.А., Сабсович Л.Л. — ЖТФ, 1956, т.26, с.576.
27. Коломенский А.А. — Совместное рассмотрение фазовых и свободных колебаний в синхрофазотроне с разрезным магнитом. ФИАН, 1950.
28. Сабсович Л.Л. — Разработка и исследование высоковольтных инжектирующих устройств. ФИАН, 1950.
29. Сабсович Л.Л. — Вывод частиц из синхрофазотрона АН СССР. ФИАН, 1950.
30. Сабсович Л.Л. — Влияние рассеянного поля магнитного шунта на эффективность вывода из синхрофазотрона. ФИАН, 1951.
31. Векслер В.И. и др. — АЭ, 1956, т.4, с.22.
32. Veksler V.I. — In: Proc.Intern.Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958, 2, vol.30, p.3.
33. Балдин А.М. — В кн.: Очерки по истории развития физики в СССР. Киев: Наукова думка, 1982, с.152.
34. Балдин А.М. и др. — ОИЯИ, P9-5442, Дубна, 1970.
35. Безногих Ю.Д. и др. — ПТЭ, 1969, № 4, с.202.
36. Безногих Ю.Д. и др. — ОИЯИ, 9-12723, Дубна, 1979.
37. Донец Е.Д. — Авт.свид. СССР №248860 от 16.03.67 г. ОИПОТЗ, 1969, №23, с.65.
38. Донец Е.Д. — ЭЧАЯ, 1982, т.13, с.945.
39. Donets E.D. — In: Proc.Intern.Conf. on Ion Sources. Berkeley. Calif. 10—14.07.1989; Rev.Sci.Instrum., 1990, vol.61, p.225.
40. Коваленко А.Д. и др. — Краткие сообщения ОИЯИ, 1993, №2[59]-93, с.23.
41. Быковский Ю.А. и др. — Авт.свид. СССР №324938 от 08.06.68 г. ОИПОТЗ, 1974, №7, с.227.
42. Ананьин О.Б. и др. — Квантовая электроника, 1977, т.7, с.1547.
43. Безногих Ю.Д. и др. — ОИЯИ, P9-84-246, Дубна, 1984.
44. Безногих Ю.Д. и др. — В сб.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1985, т.2, с.39.
45. Belushkina A.A. et al. — In: High Energy Physics with Polarized Beams and Polarized Targets. Basel, 1981, p.429.
46. Anishchenko N.G. et al. — In: Proc. of 6-th Int.Symp. on High Energy Spin Physics, Marseille, 1984 (Journ. De Phys. Colloque, c2, Supplement an 2) т.46, 1985, p.c2-703.
47. Belushkina A.A. et al. — In: Proc. of VII Int.Symp. on High Energy Spin Physics, Protvino, 1987, vol.II, p.215.
48. Василишин Б.В. и др. — ОИЯИ, P9-6973, Дубна, 1973.
49. Issinsky I.V. et al. — Part.Accel., 1973, vol.5, p.215.
50. Gvozdev V. et al. — Part.Accel., 1973, vol.6, p.53.
51. Волков В.И. и др. — ОИЯИ, 9-90-512, Дубна, 1990.

52. Булдаковский В.Н. и др. — ОИЯИ, 9-86-174, Дубна, 1986.
53. Баландиков А.Н. и др. — ОИЯИ, 9-90-152, Дубна, 1990.
54. Бельзер Л.И. и др. — Письма в ЖЭТФ, 1987, т.46, с.303.
55. JINR LHE USERS HANDBOOK, JINR, Dubna, 1993.
56. Гаспарян А.П. и др. — ОИЯИ, 1-9111, Дубна, 1975.
57. Abdivaliev A. et al. — Nucl.Phys., 1975, vol.V99, p.445.
58. Бровко О.И. и др. — ОИЯИ, 9-83-340, Дубна, 1983.
59. Бровко О.И. и др. — ПТЭ, 1984, т.4, с.32.
60. Василишин Б.В. и др. — В сб.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1987, т.2, с.33.
61. Баландиков А.Н. и др. — В сб.: Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1989, т.1, с.92.
62. Баландиков А.Н. и др. — ОИЯИ, 9-87-364, Дубна, 1987.
63. Baldin A.M. et al. — JINR, E8-95-65, Dubna, 1995.
64. Kovalenko A.D. — Status of the Nuclotron. In: Proc. 4 European Particle Accelerator Conf., Singapore World Scientific, 1995, vol.1.
65. Иссинский И.Б., Михайлов В.А. — ОИЯИ, P1-91-2, Дубна, 1991.
66. Зарубин П.И. — ЭЧАЯ, 1995, т.26, вып.3, с.523.
67. Ball J. et al. — Preprint CEN-Saclay DPhPE 84-15, 1984.