

УДК 621.384.634.5

ДУБНЕНСКИЙ СИНХРОФАЗОТРОН. ОТ ПРОТОНОВ К РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЯДРАМ И ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ДЕЙТРОНАМ

И. Н. Семенюшкин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрены основные этапы многолетнего развития ускорительного комплекса дубненского синхрофазотрона. Его итогом стало создание уникального набора пучков частиц в широком интервале энергий для исследований по релятивистской ядерной физике и другим научным направлениям.

A review is given of the main long-term stages of development of the Dubna Synchrophasotron facility, which has resulted in creation of an original set of particle and nuclei beams in a wide energy range for investigations in the field of relativistic nuclear physics and other fields.

*Памяти В. И. Векслера, А. М. Балдина, И. В. Чувило,
В. А. Петухова, Л. П. Зиновьева, А. Г. Зельдовича,
Н. И. Павлова, Л. Г. Макарова, К. В. Чехлова посвящаю*

Дубненский синхрофазотрон Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина должен отсчитывать свой день рождения с 1944 г. В этом году появились публикации В. И. Векслера: «Новый метод ускорения релятивистских частиц» [1] и «О новом методе ускорения релятивистских частиц» [2]. В. И. Векслер открыл замечательное свойство резонансных ускорителей заряженных частиц, названное им автофазировкой. Оказалось, что релятивистское возрастание массы частицы с ростом энергии, ранее определявшее предел достижимых энергий на циклотронах Лоуренса, может быть использовано для сохранения резонанса при изменении параметров ускорителя (частоты ускоряющего напряжения, величины магнитного поля). Применяя принцип автофазировки, В. И. Векслер предложил целый ряд новых типов ускорителей, включая синхрофазотрон. Это одно из крупнейших достижений XX в. открыло дорогу к созданию экспериментальной физики высоких энергий, главным инструментом которой стали построенные или строящиеся на принципе В. И. Векслера гигантские ускорители заряженных частиц. Исследования, выполненные на ускоренных пучках частиц, за эти годы в корне изменили наши представления о микромире.

Наверное, принцип автофазировки был открыт в нужное время и в нужном месте. Уже в феврале 1945 г. Отделение физико-математических наук АН СССР, заслушав доклад В. И. Векслера «Новый принцип ускорения релятивистских частиц» [3], сочло весьма важным как можно скорее приступить к осуществлению и проверке на опыте принципа автофазировки.

В августе 1946 г. Совет министров СССР принимает решение о строительстве мощного циклотрона (будущего синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ) и утверждает предложение комиссии Б.Л. Ванникова (в которую входили С.И. Вавилов, В.И. Векслер, А.Л. Минц и др.) о месте расположения ускорителя в районе Ивановской ГЭС [4]. Тем самым закладывается основа для будущего Дубны (тогда Ново-Иванькова) и создания ОИЯИ.

В СССР экспериментальное подтверждение принцип автофазировки получил в 1947 г., когда в Физическом институте АН СССР заработал первый ускоритель В. И. Векслера — электронный синхротрон на энергию 30 МэВ, а спустя два года — на 265 МэВ. В этом же году в Институте ядерных проблем АН СССР был запущен крупнейший в мире синхротрон на энергию 550 МэВ, впоследствии доведенную до 680 МэВ.

В 1949 г. по инициативе В. И. Векслера и директора ФИАН С. И. Вавилова начались работы по проектированию самого большого ускорителя протонов — будущего дубненского синхрофазотрона на энергию 10 ГэВ. Синхрофазотронный метод ускорения характеризуется использованием принципа автофазировки для частиц, движущихся в переменном магнитном поле по постоянной (или почти постоянной) равновесной орбите. При этом частота ускоряющего напряжения должна изменяться пропорционально скорости протонов. Для проектирования синхрофазотрона необходимо было разработать теорию. В течение двух лет работами М. С. Рабиновича, А. М. Балдина, А. А. Коломенского, В. В. Михайлова, В. А. Петухова, Л. Л. Собсовича теория в основном была создана [5–20]. 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 январе 1951 г. академик Д. В. Скобельцын утверждает технический проект на объект «КМ» (так тогда назывался дубненский синхрофазотрон) (рис. 1).

В тексте проекта перечислены

руководители работы:

член-корреспондент АН СССР	В. И. Векслер
действительный член АН УССР	А. П. Комар
доктор физико-математических наук	М. А. Марков
доктор физико-математических наук	В. А. Петухов
кандидат физико-математических наук	М. С. Рабинович
кандидат физико-математических наук	А. А. Коломенский
главный инженер лаборатории	К. И. Блинов

исполнители:

кандидат физико-математических наук	М. С. Рабинович
кандидат физико-математических наук	А. А. Коломенский
кандидат физико-математических наук	Л. Л. Собсович
научный сотрудник	А. М. Балдин
научный сотрудник	В. В. Михайлов

В короткие сроки в РТИ АН СССР, НИИЭФА, ГСПИ и других организациях был выполнен огромный объем проектных и конструкторских работ и отечественная промышленность приступила к изготовлению оборудования синхрофазотрона.

/ АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П.Н. ЛЕБЕДЕВА
ЭТАЛОННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор Физического
Института им. П.Н. Лебедева
Академии Наук СССР
академик

С.И. Вавилов / С.И. Вавилов /

" 5 " *август* 1950 г.

~~Секрет~~
~~Секрет~~

Экз. № 4
вх. № 745 от 24 v55

О Б Ъ Е К Т " К М "

Т Е Х Н И Ч Е С К И Й П Р О Е К Т

Т О М П

Ф И З И Ч Е С К О Е О Б О С Н О В А Н И Е

Ч А С Т Ъ В Т О Р А Я

Научный руководитель объекта
Член-корреспондент АН СССР

В.И. Векслер / В.И. Векслер /

Главный инженер Эталонной лаборатории
Физического Института АН СССР

К.И. Блинов / К.И. Блинов /

г о р . М О С К В А
1950 год

Рис. 1. Титульный лист технического проекта объекта «КМ». Объект «КМ» — так раньше назывался синхрофазотрон

В 1956 г. завершается сооружение синхрофазотрона и начинается наладка его систем. В апрельском номере журнала «Атомная энергия» публикуются основные параметры гигантского ускорителя протонов, построенного в Советском Союзе [21]. Его уникальное оборудование изготовлено на заводах Москвы, Ленинграда, Харькова. Поистине сотворено чудо: построен самый большой в мире ускоритель протонов в короткие сроки — и это всего спустя 10 лет после самой кровопролитной и самой опустошительной войны в истории России.

Основные системы синхрофазотрона:

- электромагнит с системой питания;
- вакуумная камера с системой откачки;
- система высокочастотного ускорения частиц;
- инжектор с системой ввода частиц в синхрофазотрон.

Электромагнит синхрофазотрона состоит из четырех квадрантов, разделенных четырьмя прямолинейными промежутками. Каждый квадрант состоит из 12 блоков. Вес каждого 750 т. Вес электромагнита с обмотками 36 кт. Наружный диаметр электромагнита 72 м. Электромагнит синхрофазотрона снабжен различными системами коррекции магнитного поля.

Для питания электромагнита была применена система с накоплением энергии во вращающихся маховых массах. Это позволило существенно снизить пиковые нагрузки и потреблять из электросети мощность, необходимую только для покрытия потерь в системе. Максимальная мощность системы электропитания 140000 кВт, максимальный ток 12,8 кА, максимальное напряжение 11 кВ, количество параллельно работающих синхронных машин — 4, количество игнитронов-вентилей — 96.

Вакуумная система синхрофазотрона имеет объем $\sim 160 \text{ м}^3$, вакуум 10^{-6} торр. Сконструирована двухкамерная система — внутренняя высоковакуумная — и наружная — форвакуумная. Давление в форвакуумной камере — 1 торр. Откачка производится с помощью 56 вакуумных агрегатов ВА-5 (впоследствии замененных на ВА-8) и форвакуумных насосов.

Создание ВЧ-системы ускорения протонов и системы управления процессами инжекции и ускорения частиц потребовало решения целого ряда новых проблем радиотехники и электроники. Так был разработан и создан задающий генератор, частота которого в цикле ускорения изменялась от 0,182 до 1,5 МГц и следовала за напряженностью магнитного поля в зазоре электромагнита с точностью, лучшей чем 10^{-3} . Была обеспечена требуемая точность включения системы инжекции и ускоряющего ВЧ-поля в синхрофазотроне ($\pm 4 \cdot 10^{-6}$ Тл) и др.

Инжектором синхрофазотрона служил линейный ускоритель протонов на энергию 9 МэВ. Ускоренные протоны с помощью системы транспортировки пучка и инфлекторных пластин вводились в вакуумную камеру синхрофазотрона. При этом необходимая угловая точность ввода пучка должна была составлять несколько минут.

Некоторые проектные параметры синхрофазотрона:

- ускоряемые частицы — протоны;
- энергия $E = 10 \text{ ГэВ}$;
- интенсивность $I = 10^9 \div 10^{10} \text{ п/имп.}$;
- время ускорения $\tau = 3,3 \text{ с}$;
- частота повторения циклов $\nu = 5 \text{ имп./мин}$;
- прирост энергии за оборот $\Delta E = 2,3 \text{ кэВ}$;

- диапазон изменения напряженности магнитного поля $0,015 \leq H \leq 1,3$ Тл;
- рабочий диапазон ускоряющего напряжения $3 \leq V \leq 8$ кВ.

Несколько месяцев потребовалось на комплексную наладку синхрофазотрона с пучком. День 17.04.1957 г. стал поистине историческим для ЛВЭ и для Объединенного института ядерных исследований — протоны были ускорены до проектной энергии 10 ГэВ. То напряжение и энтузиазм, которые царили в работе коллективов, участвовавших в запуске ускорителя, а это были в основном молодые специалисты, хорошо переданы в воспоминаниях директора лаборатории В. И. Векслера, начальника отдела синхрофазотрона Л. П. Зиновьева, сотрудников РТИ АН СССР А. Л. Минца и Ф. А. Водопьянова и др. [22].

Выдающееся достижение науки и техники СССР — сооружение и запуск синхрофазотрона — в 1959 г. был отмечен самой высокой наградой — Ленинской премией. Ее лауреатами стали и три сотрудника ЛВЭ: В. И. Векслер, Л. П. Зиновьев и В. А. Петухов.

Запуск синхрофазотрона не означал какой-либо передышки. Требовалось создавать рабочие режимы для проведения физических экспериментов и обеспечивать высокую эффективность работы всех систем ускорителя. Основная тяжесть работы легла на плечи сотрудников отделов: синхрофазотрона (руководитель Л. П. Зиновьев), радиотехнической аппаратуры (К. В. Чехлов), электротехнического (Л. Н. Беляев, А. А. Смирнов). Слабым местом был инжектор ЛУ-9, который давал до 25 % простоев ускорителя. Уже тогда, в первые месяцы работы ускорителя, стало ясно, что справиться с этими болезнями можно, если опираться прежде всего на собственные силы и постоянно заниматься совершенствованием и развитием систем синхрофазотрона.

В 1959 г. отделы синхрофазотрона и радиотехнический помимо обеспечения эксплуатации ускорителя взялись за создание более совершенного инжектора. Такой ускоритель был построен и введен в эксплуатацию в 1961 г. Наряду с работами по коррекции магнитного поля ускорителя, улучшению вакуума это позволило довести интенсивность ускоренного пучка до $5 \cdot 10^{10}$ р/имп. Большой цикл работ был выполнен в электротехническом отделе по улучшению режимов работы, надежной защите устройств, особенно по игнитронным преобразователям (руководитель А. А. Смирнов). Так создание системы импульсно-фазового управления игнитронного преобразователя для генерации сложной формы импульса магнитного поля синхрофазотрона с плоскими вершинами позволило в одном цикле ускорителя проводить несколько физических экспериментов и значительно увеличить длительность взаимодействия моноэнергетического пучка с мишенью. Новые режимы работы для физиков создавались в радиотехническом отделе.

Все это можно было выполнить лишь при поддержке других отделов лаборатории: КБ, производственных мастерских, отдела главного энергетика. И мы должны быть благодарны и помнить людей, которых уже, к великому сожалению, нет с нами: В. П. Саранцева, Л. Н. Беляева, Г. С. Казанского, С. С. Нагдасева, М. И. Жучкова, А. А. Капралова, Н. И. Малашкевича, А. И. Михайлова, Д. В. Уральского, А. В. Сабаева, Н. К. Соболева и многих, многих других.

Непрерывное развитие ускорительного комплекса всегда было в центре внимания лаборатории. В течение 60-х гг. 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, требуемой для получения проектных параметров сепарированных пучков интенсивности протонов в то время не достигли, что ограничило исследования на чистых пучках K^\pm -мезонов и антипротонов.

В 1960 г. дубненский синхрофазотрон перестал быть рекордным в мире по энергии частиц. В Западной Европе (ЦЕРН) и в США (BNL) заработали протонные ускорители на большие энергии и интенсивности. С учетом предстоящего запуска серпуховского ускорителя на 70 ГэВ была разработана программа модернизации ускорительного комплекса лаборатории. Она предусматривала:

- 1) значительное повышение интенсивности ускоренного пучка протонов (до 10^{12} *p*/имп.);
- 2) эффективный вывод ускоренного пучка из синхрофазотрона;
- 3) глобальную бетонную защиту (саркофаг) синхрофазотрона;
- 4) новый экспериментальный корпус для проведения исследований на выведенном пучке.

И хотя ряд обстоятельств задерживал ход реализации программы (уход из ЛВЭ ряда ведущих специалистов в ИФВЭ, недостаточные капиталовложения на изготовление нового оборудования) и, конечно, болезнь В. И. Векслера (1965) и его смерть (1966), тем не менее специалисты ЛВЭ разработали проект нового инжектора ЛУ-20 — линейного ускорителя протонов на 20 МэВ, велись расчеты, моделирование по выводу пучка, изготавливалось необходимое оборудование.

В эти трудные для лаборатории годы директором был И. В. Чувило. Иван Васильевич был первым заместителем директора лаборатории с 1955 г. и очень много сделал при подготовке программы научных исследований и ее реализации на синхрофазотроне. В 1968 г. он получил новое назначение — стал директором ИТЭФ. А в ЛВЭ пришел новый директор — А. М. Балдин.

Существенно важным шагом в развитии ЛВЭ стало ускорение в 1970 г. на синхрофазотроне дейтронов до энергии 11 ГэВ [23, 24]. Тем самым было также показано, что возможно получить ускоренные пучки и других легких ядер, для которых выполняется условие $Z|A = 1/2$. Было установлено, что при энергии ядер 3,5–4 ГэВ/*A* начинают проявляться кварковые особенности нуклонов в ядрах [25]. Это придавало синхрофазотрону уникальные качества — рекордного по энергии ускорителя ядер в мире. Необходимо было уточнить стратегию развития ускорительного комплекса на ближайшие годы.

Она определялась выработанной программой физических исследований. Предстояло обеспечить:

- 1) широкий набор ускоренных ядер;
- 2) эффективный вывод ускоренного пучка синхрофазотрона (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.

И, наконец, поскольку уже начались работы по разработке систем сверхпроводящего ускорителя, будущего нуклотрона, который должен был заменить синхрофазотрон, в первую очередь требовалось обеспечивать модернизацию тех систем ускорительного комплекса, которые могли стать составной частью будущего ускорителя (источники частиц, инжектор, каналы пучков, системы диагностики, контроля радиационной безопасности и др.).

Реализация намеченного плана развития ускорительного комплекса синхрофазотрона позволила бы ЛВЭ сохранить тогда свое значение основной базы исследований по физике

высоких энергий в странах-участницах ОИЯИ. Для этого ЛВЭ должна была предоставить физикам пучки частиц, обладающие параметрами лучших или близкими к лучшим в мире, создать крупные установки, позволяющие проводить уникальные физические эксперименты и осуществлять «физику на расстоянии», обеспечить участников экспериментов как в Дубне, так и за ее пределами информацией, полученной в фотоэмульсиях, на пленках с пузырьковых и других типов камер, на магнитных лентах — с электронных установок.

В 1974 г. завершился важный этап модернизации ускорительного комплекса лаборатории. С окончанием комплексной наладки нового инжектора — линейного ускорителя протонов на 20 МэВ (ЛУ-20) — и ряда радиотехнических систем, улучшающих качество вводимого в синхрофазотрон пучка, интенсивность ускоренного пучка протонов была доведена до $4 \cdot 10^{12}$ *p*/имп. [26]. Новый инжектор был спроектирован в ЛВЭ, основное оборудование тоже было изготовлено в лаборатории, вакуумный кожух — в ОП ОИЯИ, ВЧ-генератор «Родонит» — на одном из ленинградских предприятий. В его создании участвовало много коллективов лаборатории, но основная тяжесть легла на сектор инъекции отдела синхрофазотрона (Ю. Д. Безногих, В. А. Попов, В. Л. Степанюк, А. И. Говоров).

Новый тип высокозарядного источника ионов, использующего для их получения лазерное излучение из неодимового стекла, был опробован на ЛУ-20. Этот источник разработан группой профессора Ю. А. Быковского из МИФИ [27], в 1976 г. он был использован для ускорения ядер углерода в синхрофазотроне [28]. Однако малая частота работы источника — 1 имп./мин — существенно ограничивала возможности его использования для проведения физических исследований.

В 1977 г. на синхрофазотроне началась эксплуатация источника высокозарядных ионов «Крион». Принцип его работы был предложен Е. Д. Донцом и основывался на последовательной ионизации нейтрального газа с помощью хорошо сфокусированного электронного пучка [29]. Этот источник позволил ускорить в синхрофазотроне ядра углерода, азота, кислорода, неона и начать исследования на пучках этих частиц [30]. Несколько позже был введен в действие источник такого же типа «Крион-С», который обеспечил ускорение ядер серы [31].

Создание такого высокозарядного источника ионов — это большое достижение профессора Е. Д. Донца и его ближайших сотрудников: А. И. Пикина, В. П. Овсянникова. Впоследствии этот тип источника высокозарядных ионов получил широкое распространение во многих лабораториях мира.

В 1984 г. начата эксплуатация созданного в секторе инъекции отдела синхрофазотрона источника высокозарядных ионов на основе CO₂-лазера [33, 34]. Этот источник работал с требуемой частотой повторения и позволил расширить набор ускоряемых легких ядер на синхрофазотроне до магния включительно. Рабочее вещество источника — кристалл, из которого под действием лазерного излучения вылетает горячая плазма, содержащая высокозарядные ионы. Ионы требуемой зарядности ускоряются в форинжекторе и инжекторе и далее в синхрофазотроне до требуемой энергии. Большим достоинством источника является возможность быстрого (минуты) осуществления перехода от ускорения одного сорта ядер к другому и устойчивая высокоэффективная работа в течение многих лет. В создание этого источника много ума и труда вложено В. А. Мончинским, Ю. Д. Безногих и их коллегами.

Пучок поляризованных дейтронов был получен на синхрофазотроне в 1981 г. с помощью источника «Полярис» [35–37]. Источник построен на основе метода атомного

пучка, и в нем впервые широко используется криогенная техника как для различных элементов магнитной оптики, так и для обеспечения высокого вакуума. В течение более 20 лет этот источник, разработанный Ю. К. Пилипенко с сотрудниками, широко использовался на синхрофазотроне, а теперь применяется и на нуклотроне для проведения исследований по спиновой физике. Этот источник обеспечил ускорительному комплексу лаборатории уникальное качество — рекордные по энергии пучки векторно- и тензорно-поляризованных дейтронов.

Широкий набор источников заряженных частиц: дуоплазмотрон (протоны, дейтроны, ядра гелия), «Крион» и лазерный (высокозарядные ионы легких атомов), «Полярис» (поляризованные дейтроны) — предоставлял физикам и ученым других специальностей для своих исследований чрезвычайно богатый набор пучков, по своему разнообразию, пожалуй, единственный в мире.

Исключительно важным направлением в модернизации синхрофазотрона, которая проводилась в то же время, что и развитие инжекционного комплекса, было получение выведенных из ускорителя пучков. При этом особое внимание обращалось как на обеспечение высокой эффективности вывода, так и на получение требуемой для физических экспериментов временной структуры выводимого пучка. Высокая эффективность вывода открывала возможность использовать достигнутую интенсивность пучка частиц, когда это требовалось, без создания дорогостоящей глобальной бетонной защиты синхрофазотрона (с остановкой его на 2 года на время сооружения этой защиты).

Вывод ускоренных частиц при требуемых значениях магнитного поля был осуществлен за счет создания резонанса $Q_r = 2/3$ радиальных бетатронных колебаний и использования для этого необходимых элементов магнитной оптики [38–41]. В 1972 г. осуществлен медленный вывод (МВ-1) в сторону измерительного павильона и корп. 205. Длительность вывода составила 500 мс, а эффективность вывода — 96%! Системы подавления пульсаций магнитного поля и другие системы позволили получить практически бесструктурный выводимый пучок. Этот успех, «виновниками» которого были И. Б. Иссинский, А. А. Смирнов, В. Б. Василишин, Е. М. Кулакова, С. А. Новиков, В. Г. Глущенко, Б. Д. Омельченко, А. И. Михайлов, А. П. Царенков и многие другие сотрудники, открывал новые перспективы исследований на синхрофазотроне.

В 1975 г. вступил в строй быстрый вывод (БВ) пучка (~ 1 мс), используемый для облучения двухметровой пропановой и однометровой жидководородной пузырьковых камер. С 1976 г. МВ-1 и БВ могут работать в одном цикле ускорителя. В 1978 г. создан второй медленный вывод (МВ-2) в экспериментальном павильоне 1Б [42, 43].

Два медленных вывода независимо один от другого позволяют выводить в любом соотношении по интенсивности и требуемой энергии пучок из ускорителя в корп. 205 и экспериментальный павильон 1Б. В павильон 1Б 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.

1979 г. Завершается строительство большого экспериментального корп. 205 (гектар под крышей). Он обеспечен всем необходимым для проведения исследований на крупных физических установках (большим количеством разных элементов магнитной оптики с набором необходимого числа источников электропитания, радиационной защитой, информацией о работе систем синхрофазотрона и многим другим).

Первый эксперимент был выполнен под руководством Э. Н. Цыганова учеными ПНР, СССР и США по изучению каналирования протонов с энергией 8,4 ГэВ. Было открыто

новое физическое явление — отклонение пучка протонов изогнутым кристаллом.

При создании на основе МВ-1 (системы медленного вывода) сети каналов частиц в этом корпусе наряду с обеспечением требуемых параметров пучка для физических установок, как правило, предусматривалась совместная работа данной установки с другими в одном цикле ускорения. Схема каналов представляет собой «елочку» [44]. Для этого по трассе выведенного пучка организовано необходимое число мишенных станций, которые могут являться источниками вторичных частиц для физических установок. Кроме того, в измерительном павильоне (перед корп. 205) также имеется мишенная станция, используемая для получения частиц, которые трудно или невозможно получить путем ускорения в синхрофазотроне (пучки трития, ядер гелия-3, других изотопов). Такая схема каналов допускает одновременную работу физических установок при интенсивностях частиц, различающихся на 4–5 порядков. Отщепление небольшой доли протонного пучка или пучка ядер [45] с поворотом его в нужную сторону проводилось с помощью изогнутых кристаллов. При этом практически отсутствовал радиационный фон. Не взаимодействовавший первичный пучок гасился в конце корп. 205 в ловушке. Следует также отметить, что на синхрофазотроне был создан и эффективно использовался моноэнергетический пучок нейтронов с энергией до 4,25 ГэВ [46, 47]. Схема ускорительного комплекса ЛВЭ представлена на рис. 2.

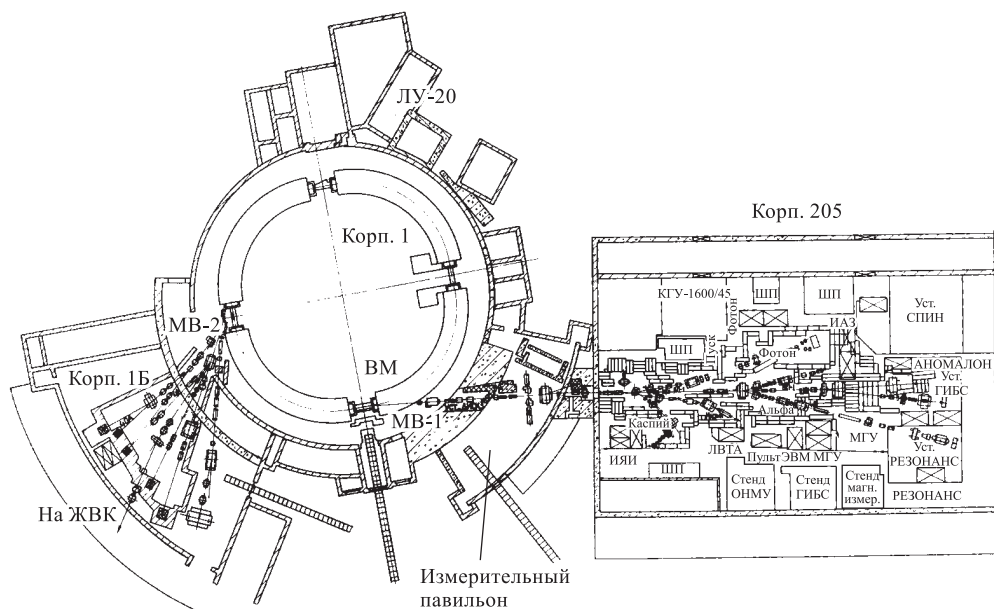


Рис. 2. Схема ускорительного комплекса синхрофазотрона

Создание и непрерывное развитие ЛУ-20 и других устройств инжекционного комплекса, уникальных источников высокозарядных ионов и поляризованных дейтронов, ввод в эксплуатацию на синхрофазотроне ВЧ-системы ускорения на второй кратности

Таблица 1. Основные характеристики работы синхрофазотрона за период 1976–1986 гг.

Годы	Отработано, ч		Отказы оборудования, %	Ускоряемые частицы и длительность работы на них, ч	Интенсивность, частиц/цикл		Коэффициент одновременного использования СФ на физ. эксперименте при работе на p и d	Отработано на сэкономленной электро-энергии, ч
	Всего	Из них на протон и дейтрон, %			Макс.	Средн.		
1976–1980	21160	60	6,0	$p = 8600$ $d = 4400$ ${}^4\text{He} = 4810$ $\text{C} = 2935$ $\text{O} = 148$ $\text{Ne} = 12$	До $3 \cdot 10^{12}$ До $1 \cdot 10^{12}$ $4,7 \cdot 10^{10}$ $4 \cdot 10^6$? ?	$1,3 \cdot 10^9$	1,65	970
1981–1985	19809	55	5,0	$p = 6416$ $d = 4484$ $d \uparrow = 1156$ ${}^3\text{He} = 615$ ${}^4\text{He} = 2403$ $\text{Li} = 60$ $\text{C} = 2575$ $\text{O} = 843$ $\text{F} = 522$ $\text{Ne} = 386$ $\text{Mg} = 282$ $\text{Si} = 63$	$6 \cdot 10^8$ $4 \cdot 10^9$ $5 \cdot 10^{10}$ $1 \cdot 10^9$ $4 \cdot 10^8$ $1,5 \cdot 10^7$ $6 \cdot 10^6$ $6 \cdot 10^3$ $1 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^8$ $8 \cdot 10^8$ $1,5 \cdot 10^{10}$ $3 \cdot 10^8$ $2,2 \cdot 10^8$ $5 \cdot 10^6$ $2 \cdot 10^6$ $1,5 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^4$ $1,5 \cdot 10^4$	2,3	1233
1986	4089	51	3,7	$p = 1715$ $d = 372$ $d \uparrow = 813$ $\text{Li} = 113$ $\text{C} = 634$ $\text{O} = 96$ $\text{F} = 168$ $\text{Mg} = 178$	$2 \cdot 10^8$ $4 \cdot 10^9$ $2 \cdot 10^9$ $2,5 \cdot 10^7$ $2 \cdot 10^6$ $8 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^8$ $1 \cdot 10^9$ $9 \cdot 10^8$ $1,5 \cdot 10^7$ $1 \cdot 10^6$ $4 \cdot 10^4$	4,3	269

[48, 49], создание эффективных систем вывода ускоренных пучков, криооткачка вакуумной камеры ускорителя [50], каналы пучков в корп. 205 и в других экспериментальных залах, компьютерный контроль за радиационной безопасностью [51] при работе ускорительного комплекса — далеко не полный перечень усовершенствований, обеспечивших систематический рост интенсивности ускоренных пучков и расширение их набора за прошедшие годы [52].

Всего экспериментаторы могли использовать для своих исследований пучки около двух десятков частиц в широком интервале энергий. И это заслуга большого коллектива талантливых людей, и прежде всего В. И. Волкова, С. А. Аверичева, Е. А. Матюшевского, В. С. Григорашенко, М. Д. Шафранова, В. П. Заболотина, Б. К. Курятникова, Ю. И. Тягущкина, А. Д. Кириллова, П. А. Рукояткина, Б. Д. Омельченко и многих других.

Как работал синхрофазотрон в 1976–1986 гг., видно из табл. 1. Эффективность работы составляла 94–95 % (отказы оборудования — 5–6 % от планируемого времени работы ускорителя). Ежегодно в среднем синхрофазотрон работал 4000 ч. А всего отработал за свою жизнь более 100 тыс. ч. И во многом такая работа определялась высокой квалификацией начальников смен синхрофазотрона: С. В. Федукова, А. С. Исаева, В. Н. Перфеева, Д. И. Шерстянова, Е. В. Руднева.

Пройденный синхрофазотроном за 45 лет (1957–2002 гг.) путь представлен в табл. 2.

Таблица 2. Основные результаты развития ускорительного комплекса синхрофазотрона с 1957 по 2002 г.

Основные характеристики	1957 г.	2002 г.
Энергия ускоренных протонов	10 ГэВ	10 ГэВ
Энергия ускоренных ядер	—	$A \cdot 5$ ГэВ
Ускоряемые частицы	p	p $d, \text{He}, \text{Li}, \dots, S$ $d \uparrow$
Интенсивность за цикл	10^9	$2 \cdot 10^{12}$ $10^{12} - 10^6$ $5 \cdot 10^9$
Пучки частиц для экспериментаторов	Вторичные от внутренних мишеней (широкий импульсный спектр)	Ускоренные (монохроматические) и выведенные с помощью двух медленных и одного быстрого выводов
Число одновременно используемых пучков (в одном цикле ускорителя)	1	До 5

Естественно, что пучки синхрофазотрона привлекали внимание не только физиков. В использовании ряда пучков были заинтересованы медики и биологи. Еще в 1978 г. на методическом канале [53] выведенных из синхрофазотрона ядер гелия с энергией 200 МэВ/А был успешно опробован макет диагностической аппаратуры для ионной радиографии, созданной под руководством профессора Ю. В. Заневского в сотрудничестве

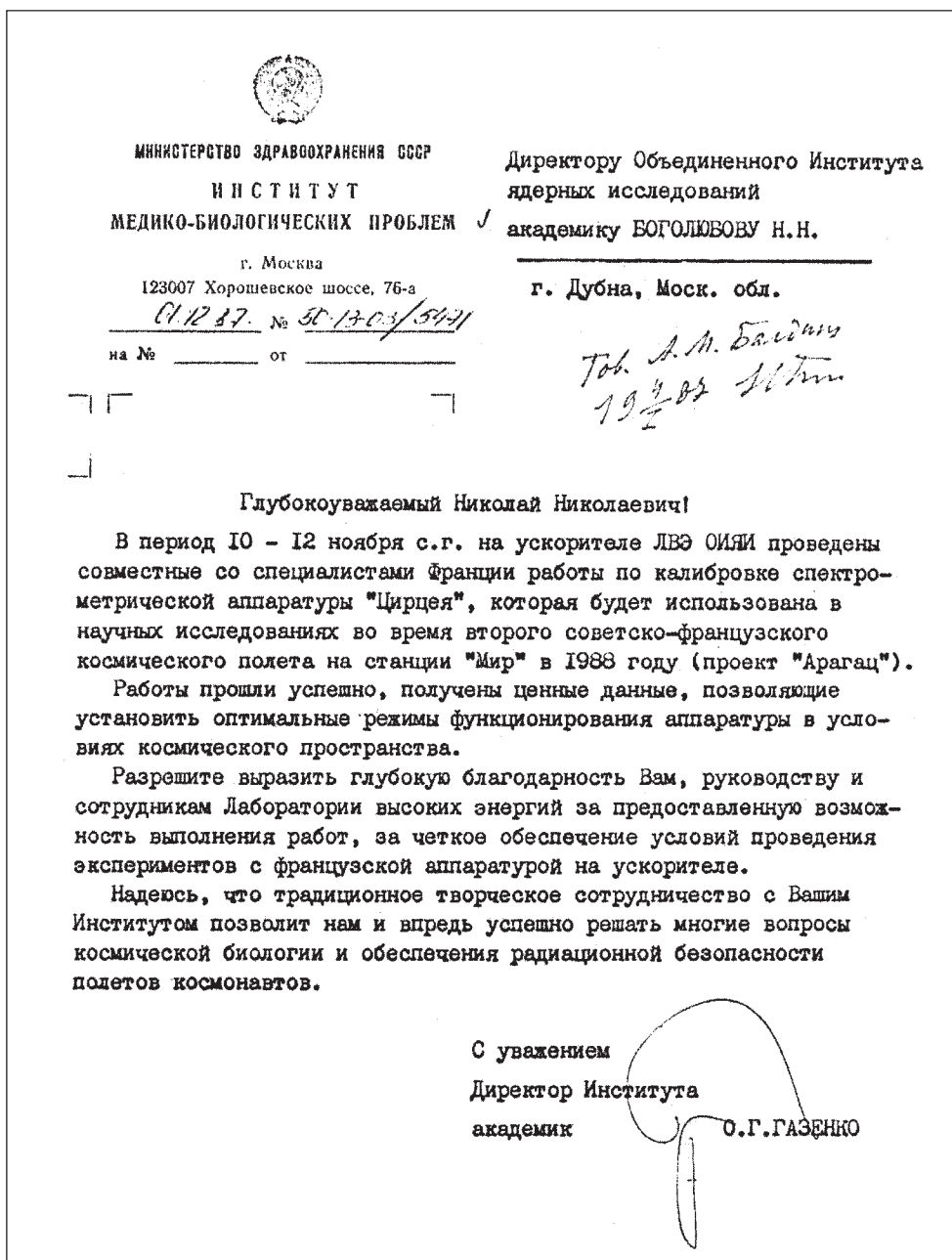


Рис. 3. Одно из многих писем о сотрудничестве ЛВЭ ОИЯИ с другими научными центрами

с коллективом программистов ЛВТА ОИЯИ (профессор И. М. Иванченко). При поглощенной дозе 10^{-3} рад можно было локализовать участки размером несколько мм, отличающиеся по плотности окружающего вещества на единицы процентов [54]. Ядерные пучки, достижимые по энергии на синхрофазотроне, соответствуют по энергии ядрам космического излучения, представляющим потенциальную опасность для космонавтов и аппаратуры при длительных полетах [55]. Начиная с 1976 г. ученые Института медико-биологических проблем выполнили на ускорителе ЛВЭ большой комплекс исследований по космической биологии и обеспечению радиационной безопасности полетов космонавтов (рис. 3).

К сожалению, в ЛВЭ не проводились исследования по экономической отдаче синхрофазотрона и выполненных на нем исследований: получение новых знаний, стимулирование новых разработок и др., что могло быть использовано при производстве новых приборов, материалов и т. д. Можно лишь сослаться на опыт ЦЕРН. Исследования, выполненные в 80-е гг. в этой организации, на основе анализа деятельности около 200 фирм, сотрудничавших в эти годы с ЦЕРН, явно указали на экономическую выгоду, которую получили эти фирмы в своей последующей деятельности [56]. Это лишний раз подтверждает, что богатство России в XXI в. должно прирастать, прежде всего, наукой!

И последнее слово о дубненском синхрофазотроне, его дальнейшей судьбе. Синхрофазотрон достойно отработал почти 50 лет. Мне представляется, что он должен быть сохранен как памятник и человеку, открывшему человечеству путь к космическим энергиям, и многим, многим людям, отдавшим свои знания, силы и умение служению науке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Векслер В. И. // Докл. АН СССР. 1944. Т. 43. С. 346.
2. Векслер В. И. // Там же. Т. 44. С. 393.
3. Атомный проект СССР: Документы и материалы. Т. I: 1938–1945. Ч. 2. М., 2002. С. 220–222.
4. Атомный проект СССР: Документы и материалы. Т. II: Атомная бомба. 1945–1954. Кн. 2. М., 2001. С. 298–301.
5. Рабинович М. С. Теория синхрофазотрона. М.: ФИАН, 1947.
6. Рабинович М. С., Балдин А. М., Михайлов В. В. Исследование движения частиц в синхрофазотроне с прямолинейными промежутками. М.: ФИАН, 1949.
7. Рабинович М. С., Балдин А. М., Михайлов В. В. К теории свободных колебаний в ускорителе с прямолинейными промежутками. М.: ФИАН, 1950.
8. Рабинович М. С. Общая теория движения частиц в синхрофазотроне с разрезами. М.: ФИАН, 1950.
9. Рабинович М. С. Резонансы между медленными колебаниями. М.: ФИАН, 1950.
10. Рабинович М. С. Эффективность инъекции. М.: ФИАН, 1950.
11. Рабинович М. С. // Тр. ФИАН. 1958. Т. X. С. 23.

12. Балдин А. М., Михайлов В. В., Рабинович М. С. // ЖЭТФ. 1956. Т. 31. С. 993.
13. Балдин А. М., Михайлов В. В. Влияние на движение частиц отклонения магнитного поля от расчетного и допуска в синхрофазотроне АН СССР. М.: ФИАН, 1950.
14. Балдин А. М. Синхрофазотрон с кратным резонансом и прямолинейными промежутками. М.: ФИАН, 1949.
15. Коломенский А. А., Петухов В. А., Рабинович М. С. Кольцевой фазотрон. М.: ФИАН, 1953.
16. Коломенский А. А., Сабсович Л. Л. // ЖТФ. 1956. Т. 26. С. 576.
17. Коломенский А. А. Совместное рассмотрение фазовых и свободных колебаний в синхрофазотроне с разрезным магнитом. М.: ФИАН, 1950.
18. Сабсович Л. Л. Разработка и исследование высоковольтных инжектирующих устройств. М.: ФИАН, 1950.
19. Сабсович Л. Л. Вывод частиц из синхрофазотрона АН СССР. М.: ФИАН, 1950.
20. Сабсович Л. Л. Влияние рассеянного поля магнитного шунта на эффективность вывода из синхрофазотрона. М.: ФИАН, 1951.
21. Векслер В. И. и др. // АЭ. 1956. Т. 4. С. 22.
22. Владимир Иосифович Векслер. Дубна, 2003. С. 135–158.
23. Балдин А. М. и др. ОИЯИ, Р9-5442. Дубна, 1970.
24. Безногих Ю. Д. и др. // ПТЭ. 1969. № 4. С. 202.
25. Балдин А. М. // Очерки по истории развития физики в СССР: Сб. Киев, 1982. С. 152.
26. Безногих Ю. Д. и др. ОИЯИ, Р9-12723. Дубна, 1979.
27. Быковский Ю. А. и др. Авт. свид. СССР № 324938 от 08.06.68; ОИПОТЗ. 1974. № 7. С. 227.
28. Ананьин О. Б. и др. // Квантовая электроника. 1977. Т. 7. С. 1547.
29. Донец Е. Д. Авт. свид. СССР № 248860 от 16.03.67; ОИПОТЗ. 1969. № 23. С. 65.
30. Донец Е. Д. // ЭЧАЯ. 1982. Т. 13. С. 945.
31. Donets E. D. // Proc. of the Intern. Conf. on Ion Sources, Berkeley, USA, July 10–14, 1989; Rev. Sci. Instr. 1990. V. 61. P. 225.
32. Коваленко А. Д. и др. // Краткие сообщ. ОИЯИ. 1993. № 2[59]. С. 23.
33. Безногих Ю. Д. и др. ОИЯИ, Р9-84-246. Дубна, 1984.
34. Безногих Ю. Д. и др. // Тр. IX Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1985. Т. 2. С. 39.
35. Belushkina A. A. et al. // Proc. of the Intern. Conf. on High Energy Physics with Polarized Beams and Polarized Targets. Basel, 1981. P. 429.

36. *Anishchenko N. G. et al.* // Proc. of the 6th Intern. Symp. on High Energy Physics, Marseille, 1984; J. de Phys. Colloque. C. 2, Suppl. 2. 1985. V. 46. P. 2–703.
37. *Belyshkina A. A. et al.* // Proc. of the VII Intern. Symp. on High Energy Spin Physics. Protvino, 1987. V. II. P. 215.
38. *Василишин Б. В. и др.* ОИЯИ, Р9-6973. Дубна, 1973.
39. *Issinsky I. B. et al.* // Part. Accel. 1973. V. 5. P. 215.
40. *Gvozdev V. et al.* // Ibid. V. 6. P. 53.
41. *Волков В. И. и др.* ОИЯИ, 9-90-512. Дубна, 1990.
42. *Булдаковский В. Н. и др.* ОИЯИ, 9-86-174. Дубна, 1986.
43. *Баландиков А. Н. и др.* ОИЯИ, 9-90-152. Дубна, 1990.
44. *Семенюшкин И. Н.* // ЭЧАЯ. 1996. Т. 27. С. 583–587.
45. *Бельзер Л. И. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. P. 303.
46. *Гаспарян А. П. и др.* ОИЯИ, 1-9111. Дубна, 1975.
47. *Abdivaliev et al.* // Nucl. Phys. B. 1975. V. 99. P. 445.
48. *Бровко О. И. и др.* ОИЯИ, 9-83-340. Дубна, 1983.
49. *Бровко О. И. и др.* // ПТЭ. 1984. Т. 4. С. 32.
50. *Василишин Б. В. и др.* // Тр. X Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987. Т. 2. С. 33.
51. *Баландиков А. Н. и др.* // Тр. XI Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1989. Т. 1. С. 92.
52. *Баландиков А. Н. и др.* ОИЯИ, 9-87-364. Дубна, 1987.
53. *Булдаковский В. Н. и др.* // Тр. VI Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1979. Т. 2. С. 140.
54. *Анисимов Ю. С. и др.* // Тр. III Совещ. по использованию ядерно-физ. методов для решения научно-техн. и народно-хоз. задач. Дубна, 1979. С. 327.
55. *Зиновьев Л. П. и др.* ОИЯИ, 18-82-65. Дубна, 1982.
56. *Schmied H.* // Proc. of the Intern. Symp. «The 50th Anniversary of the Discovery of Phase Stability Principle». Dubna; Moscow, July 12–15, 1994. Dubna, 1996. P. 110.