

- Международной конф. по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 8–12 сент. 1970* (ОИЯИ, Издания Д-5805) Т. 2 (Дубна: ОИЯИ, 1971) Гл. 13, с. 615
8. Глаголев В В, Толстов К Д *ЭЧАЯ* 3 (1) 65 (1972)
 9. Пантуев В С, Хачатурян М Н, Чувило И В *ПТЭ* (1) 19 (1960); Азимов М А и др. *ЯФ* 3 515 (1967)
 10. Никитин В А и др. *ПТЭ* (6) 18 (1963)
 11. Золин Л С, Никитин В А, Пилипенко Ю К, Препринт Р-13-3425 (Дубна: ОИЯИ, 1967); Zolin L S, Nikitin V A, Pilipenko Y K *Cryogenics* 8 143 (1968); Ekström C *Nucl. Instrum. Meth. A* 362 1 (1995); Bartenev V et al. *Adv. Cryog. Eng.* 18 460 (1973)
 12. Векслер В И, в сб. *Материалы 9-й Международной конф. по физике высоких энергий, Киев, 15–25 июля 1959* (М.: Изд-во АН СССР, 1961)
 13. Гришин В Г *ЭЧАЯ* 7 595 (1976); 10 608 (1979)
 14. "Сотрудничество пропановой камеры ОИЯИ" *ЯФ* 22 5 (1975)
 15. Баюков Ю Д и др. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 30 521 (1966); Ставинский В С *ЭЧАЯ* 10 949 (1979)
 16. Ван Ган-чан и др. *ЖЭТФ* 38 1356 (1960)
 17. Бьеркен Дж Д, Дрелл С.Д. *Релятивистская квантовая теория* (М.: Наука, 1978)
 18. Балдин А М, Балдин А А *ЭЧАЯ* 29 576 (1998)
 19. Никитин В А и др. *ЯФ* 1 183 (1965); Nomofilov A A et al. *Phys. Lett.* 22 350 (1966)
 20. Бартнев В Д и др., в сб. *Труды Международной конф. по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 8–12 сент. 1970* (ОИЯИ, Издания, Д-5805) (Дубна: ОИЯИ, 1971) с. 16
 21. Никитин В А *ЭЧАЯ* 1 (1) 6 (1970); 10 581 (1979); Шафранова М Г *ЭЧАЯ* 5 645 (1974)
 22. Безногих Г Г и др. *ЯФ* 10 1212 (1969)
 23. Бартнев В Д и др. *ЯФ* 16 96 (1972)
 24. Далхажав Н и др. *ЯФ* 8 342 (1968)
 25. Бартнев В Д и др. *ЯФ* 15 1174 (1972)
 26. Akimov Y et al. *Phys. Rev. D* 12 3399 (1975)
 27. Vujak A et al. *Phys. Rev. D* 23 1895 (1981)
 28. Азимов Я И и др. *Письма в ЖЭТФ* 23 131 (1976)
 29. Dakhno L G, Nikolaev N N *Nucl. Phys. A* 436 653 (1985)
 30. Tsyganov E N, Fermilab TM-682, TM-684 (Batavia, 1976)
 31. Elishev A F et al. *Phys. Lett. B* 88 387 (1979)
 32. Moller S P, CERN-94-05 (1994) p. 1

PACS number: 29.20 Lq

От синхрофазотрона к Нуклотрону

А.Д. Коваленко

1. Введение.

Принцип автофазировки — "гордиев узел разрублен!"

Мне выпала честь представлять ученых-ускорительщиков, инженерно-технический состав и всех сотрудников Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, созданной выдающимся ученым, внесшим огромный вклад в мировую науку, в международное сотрудничество ученых, В.И. Векслером, на торжественной сессии, посвященной 100-летию со дня его рождения. Для людей моего поколения, т.е. родившихся на полвека позже Владимира Иосифовича и вовлеченных судьбой в процесс создания ускорителей, получения и использования пучков заряженных частиц высоких энергий, его имя, конечно, в первую очередь ассоциируется с открытием принципа автофазировки. Мне кажется, что наиболее точно атмосфера, предшествовавшая этому, отражена в воспоминаниях

Е.Л. Фейнберга в статье "Вавилов и вавиловский ФИАН", выдержку из которой не могу не процитировать:

"...В конце 30-х годов не меньше, чем теперь, было ясно, что ядерная физика нуждается в ускорителях частиц на большие энергии. ...Сергей Иванович (Вавилов — Авт.) понимал, что серьезная ядерная физика невозможна без крупного ускорителя. И вот в 1940 г. принимается смелое решение: создается "циклотронная бригада" с заданием изучить вопрос о сооружении циклотрона с диаметром полюсов в несколько метров и приступить к его проектированию. ... В циклотронную бригаду вошла все та же "зеленая" молодежь — Векслер, Вернов, Грошев, Черенков и я (т.е. Е.Л.Фейнберг — Авт.). Изучение вопроса шло интенсивно, споры по поводу возможных вариантов были горячими, но все лишь для того, чтобы снова и снова убеждаться в невероятной трудности задачи. Однако все было круто изменено, когда в феврале 1944 г. В.И. Векслер, все годы, чем бы он одновременно ни занимался, неустанно размышлявший над проблемой ускорения, буквально разрубил гордиев узел: он обнаружил, что можно переключиться через релятивистский барьер. Открытая им возможность создания ускорителей совершенно нового класса повернула всю мировую технику ускорителей на другой путь"¹.

В анналах же мировой истории науки открытие возможности преодоления релятивистского барьера при резонансном ускорении заряженных частиц, т.е. открытие принципа автофазировки вошло как: "The discovery of phase stability principle" by V.I. Veksler and E.McMillan.

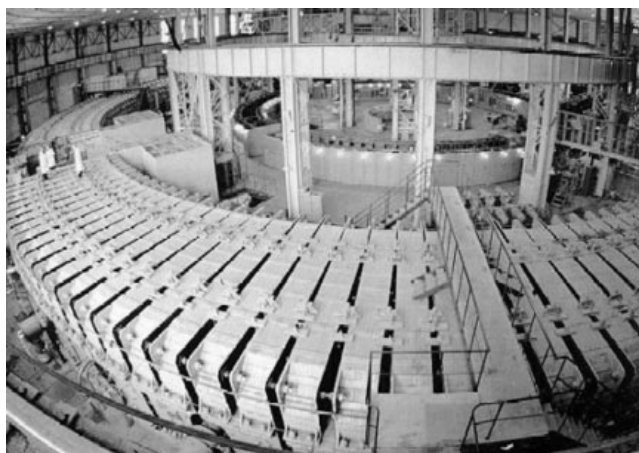
Открытие принципа автофазировки сняло принципиальное ограничение на получение в лабораторных условиях пучков заряженных частиц *сколь угодно высоких энергий*. Действительно, сравнивая энергию протонов (≈ 100 МэВ), достигнутую на циклотронах — циклических резонансных ускорителях "довекслеровского периода", с ожидаемой в ЦЕРНе после запуска Большого Адронного Коллайдера ЛНС (7 000 000 МэВ), можно сказать, что с позиций ускорительщиков того времени это были уже практически "*недостижимо высокие энергии*", а если учесть, что в коллайдерном режиме энергия сталкивающихся протонов в системе их центра масс достигнет $E_{ц.м} = 14$ ТэВ, т.е. эквивалентная энергия налетающего на неподвижную мишень протона соответствует примерно 5×10^7 МэВ, — то тем более. В последние годы неоднократно высказывается мнение, что ЛНС — это последний адронный коллайдер, построенный на Земле. Я не думаю, что это так. Наиболее широко и интенсивно обсуждаемый сейчас проект следующего за ЛНС ускорительного комплекса — это международный электрон-позитронный коллайдер ILC (International Linear Collider) на энергию 2×500 ГэВ, создание которого поддерживается мировым сообществом, работающим в области физики частиц. Активную позицию занимают в этом вопросе ученые России и ОИЯИ, предложившие использовать район Дубны для размещения такого комплекса. Но вполне уместно в связи с юбилеем Векслера поставить вопрос: "А есть ли разумный, реализуемый в принципе, верхний предел энергии "рукотворного" ускорителя протонов?" Фантазия автора

¹ Фейнберг Е.Л. *Эпоха и личность. Физики. Очерки и воспоминания*. 2-е изд. (М.: Физматлит, 2003) с. 233.

этих строк ограничилась в свое время предложением и концептуальным рассмотрением Пэватрона² — протонного синхротрона/коллайдера на энергию 1 ПэВ, т.е. 10^{15} эВ, основанного на экономичной сверхпроводящей магнитной системе нового типа. В коллайдерном режиме Пэватрон обеспечил бы эквивалентную энергию взаимодействия $\sim 2 \times 10^{21}$ эВ в системе с неподвижной мишенью, что превышает максимальную энергию частиц $\sim 3,0 \times 10^{20}$ эВ), зарегистрированную в приходящих к нашей планете космических лучах, с исследованиями которых было связано начало деятельности Владимира Иосифовича в области физики высоких энергий.

2. Объект КМ — Синхрофазотрон и его модернизация

Создание синхрофазотрона — установки под кодовым названием КМ, т.е. кольцевой магнит, и успешный его запуск в Дубне в апреле 1957 г. явились событием мирового значения. Наличие ускорителя на энергию протонов 10 ГэВ фактически дало старт ускорительной физике высоких энергий, обеспечив на определенном отрезке истории лидирующую роль ОИЯИ в этих исследованиях. Об этом рассказал В.А. Никитин в предыдущем докладе. Наиболее впечатляющим элементом крупнейшего в мире ускорителя, конечно же, был кольцевой электромагнит весом 36 тыс. т и периметром 208 м с системой импульсного электропитания. Внушительный вид этого магнита производит сильное впечатление на входящих в корпус № 1 Лаборатории и по сей день. Многие другие системы синхрофазотрона, в частности, ВЧ, вакуумная камера и ее откачка, были также разработаны на уровне самых современных технологий своего времени. Будучи "прочно сработанным" синхрофазотрон оставался "в строю" с 1957 г. до 2003 г. В результате последовательной модернизации, проведенной в 1970-х годах по инициативе А.М. Балдина, ставшего директором ЛВЭ в 1968 году, этот протонный ускоритель в 1970-е годы прошлого столетия был преобразован в



Кольцевой магнит синхрофазотрона на энергию протонов 10 ГэВ.

первый ускоритель релятивистских ядер. В Лаборатории были предложены и реализованы новые методы получения высокозарядных ионов в источниках частиц, создан новый инжектор — линейный ускоритель ЛУ-20, созданы системы вывода ускоренных пучков протонов и ядер из Синхрофазотрона в двух направлениях, включая новый экспериментальный корпус (здание 205), введены многие другие усовершенствования. На Синхрофазотроне были получены уникальные пучки поляризованных дейтронов с импульсом до 4,5 А ГэВ, сформированы вторичные пучки поляризованных нейтронов. В период 1970–1990 гг. средний годовой уровень работы ускорительного комплекса ЛВЭ превышал 4000 ч³.

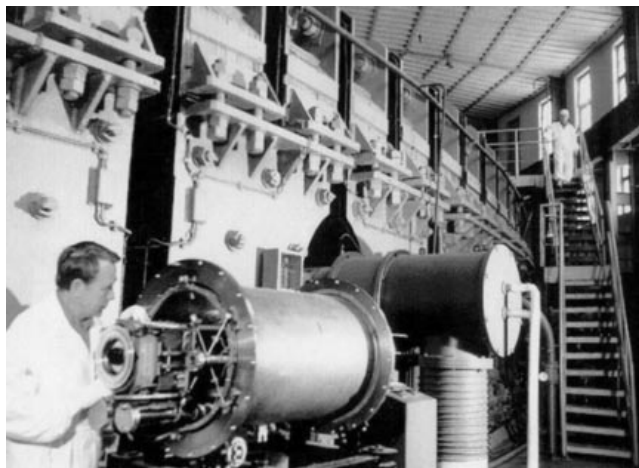
Модернизация синхрофазотрона в значительной степени решила на многие годы проблему наличия в России базы для постановки и проведения физических экспериментов в области релятивистской ядерной физики с использованием пучков легких (вплоть до серы, $A = 32$) ядер. Один из важнейших результатов этих исследований — установление границы области предельной фрагментации ($\sim 3,5$ А ГэВ), определяющей начало асимптотического режима в релятивистских ядерных столкновениях. Однако перспективное развитие этого нового научного направления требовало расширения диапазона масс ускоряемых частиц, вплоть до урана, повышения максимальной энергии пучков, улучшения ряда других параметров ускорителя, что было реально недостижимо на синхрофазотроне, и ясное осознание этого уже в начале 70-х годов привело к идее создания специализированного ускорителя релятивистских ядер, получившего название Нуклотрон.

3. Нуклотрон — новая технология сверхпроводящих синхротронов

С начала 1970-х годов в передовых исследовательских центрах мира приступили к практическому освоению технологии и техники сверхпроводимости и ее внедрению в базовые приборы — ускорители заряженных частиц. В ЛВЭ ОИЯИ также начинается разработка проблемы создания сверхпроводящего жесткофокусирующего ускорителя релятивистских ядер — Нуклотрона. В период 1973–1983 гг. велись поиски реализуемой концепции Нуклотрона и освоение технологии производства сверхпроводящих магнитов в лабораторных условиях. В результате возникло оригинальное направление создания достаточно простых и надежных сверхпроводящих магнитных систем для синхротронов с уровнями полей 1,8–2 Тл, способных работать с частотой повторения циклов до 1 Гц, что и по сей день не достигнуто в других лабораториях. Магниты имеют ферромагнитное ярмо с полюсами, формирующими необходимую конфигурацию поля, и обмотку возбуждения из трубчатого сверхпроводящего композитного кабеля, охлаждаемого циркулирующим потоком двухфазного гелия при температуре 4,5 К. Достигнутый прогресс в технологии создания магнитных систем ускорителей высоких энергий наглядно иллюстрирует фотография. Две реализованные идеи, а именно: прин-

² Kovalenko A D "VLHC based on cooled iron intermediate field superconducting magnets", in *Intern. Conf. on High Energy Accelerators, HEACC'03, Tsukuba, Japan, March 2003*.

³ Более детально о развитии синхрофазотрона сообщалось в ряде обзорных статей, например: Семенов И Н "Дубненский синхрофазотрон. От протонов к релятивистским ядрам и поляризованным дейтронам" *Письма в ЭЧАЯ* 1 (6(123)) 80 (2004).



Сверхпроводящий дипольный магнит Нуклотрона в зале синхрофазотрона.

цип жесткой фокусировки и применение сверхпроводимости в магнитах с целью получения высокой плотности тока в их обмотках возбуждения, позволили кардинальным образом миниатюризировать габариты магнитов, уменьшить погонный вес кольца ускорителя более чем в 500 раз! Наиболее оригинальным элементом в конструкции Нуклотрона является трубчатый сверхпроводящий кабель с малыми динамическими тепловыделениями и минимальной деградацией критического тока в быстропеременном магнитном поле. При этом использовались стандартные, выпускаемые уже в то время советской промышленностью компоненты, в частности ниобий-титановый композитный провод с диаметром сверхпроводящей нити 10 мкм. В начале 80-х годов было завершено создание рабочих прототипов магнитов нового ускорителя, после чего стало возможно реально проектировать все его системы.

Проект "Реконструкция магнитной системы синхрофазотрона на сверхпроводящую — Нуклотрон" был утвержден в декабре 1986 года. В период с 1987 г. по 1992 г. были запущены в серию, изготовлены и прошли комплексные испытания 100 дипольных и 66 квадрупольных криогенно-магнитных модулей его магнитной системы. Монтаж Нуклотрона был завершён в январе 1993 г. и в марте этого же года проведен первый наладочный сеанс. В эти юбилейные дни идет 36-й по счету сеанс его работы. Магнитно-криостатная система нового ускорителя периметром 251,5 м расположена в



Нуклотрон: фрагмент кольца ускорителя в районе инжекции пучка.

тоннеле, окружающем фундамент синхрофазотрона. Для охлаждения магнитов до рабочей температуры (4,5 К) в ЛВЭ создана адекватная инфраструктура, включающая необходимые технические и технологические средства для хранения газообразного гелия, его охлаждения, ожигения и транспортировки. Нуклотрон — 6 А ГэВ синхротрон основан на уникальной и по сей день, высочайшего уровня технологии⁴.

Время ввода Нуклотрона в действие совпало с началом перехода России к рыночной экономике — достаточно сложному периоду в жизни ОИЯИ и науки в России вообще. Время работы ускорительного комплекса ЛВЭ сократилось почти в 4 раза (с 4000 до 1000 ч в год) из-за ограниченности бюджетного финансирования, кроме того, отсутствие вывода пучка из нового ускорителя ограничивало возможности использования Нуклотрона физиками и приводило к необходимости одновременной эксплуатации и синхрофазотрона и Нуклотрона, что, в свою очередь, не позволяло сконцентрировать имеющиеся и без того недостаточные финансовые ресурсы только на завершении необходимых работ по Нуклотрону. Это продолжалось достаточно долго: с 1993 по 2003 гг., но и в этот период, благодаря, без преувеличения можно сказать, самоотверженному труду специалистов ускорительных отделов и всего коллектива Лаборатории, удалось реализовать ряд научно-технических достижений, превышающих мировой уровень. Так, открытие группой Е.Д. Донца явления "электронной струны" и осуществление на этой основе нового режима работы электронно-лучевого источника высокозарядных ионов КРИОН привело к практическому получению пучков ионов Ag^{16+} и Fe^{24+} .

Был проведен комплекс работ по завершению создания системы медленного резонансного вывода пучка из Нуклотрона, в результате чего впервые в мировой практике осуществлен вывод пучка из сверхпроводящего синхротрона. При этом получен ряд рекордных параметров, в частности, достигнута длительность растяжки до 10 с, в то время как на синхрофазотроне этот параметр ограничен величиной 0,5 с. Успешные результаты по ускорению и выводу пучков релятивистских ионов аргона и, особенно, железа убедительно продемонстрировали преимущества сверхпроводящего синхротрона перед традиционным. На рисунке 1 показаны (а) — один из моментов монтажа элементов системы вывода пучка в тоннель Нуклотрона, (б) — временная структура (растяжка) выведенного пучка и (в) — фотография через объектив микроскопа события взаимодействия ядра железа с энергией 1 ГэВ на нуклон с ядром фотоэмульсии, полученная сотрудничеством по проекту "Беккерель", включающим в себя группы физиков из ОИЯИ, ФИ РАН и других организаций, на Нуклотроне.

Широкий ассортимент ускоренных пучков и возможность оперативной перестройки режимов, в частности энергии и интенсивности выведенных пучков в ходе сеансов, определили высокий рейтинг "пучкового" времени Нуклотрона. В 2002–2006 гг. годовая эксплуатация Нуклотрона достигла уровня 2000 ч, что при реальном финансировании затрат, определяемых бюджетом

⁴ Более детально сверхпроводящая система Нуклотрона описана в работе: Смирнов А.А., Коваленко А.Д. "Нуклотрон — сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ (создание, работа, развитие)" *Письма в ЭЧАЯ* 1 (6(123)) 11 (2004).

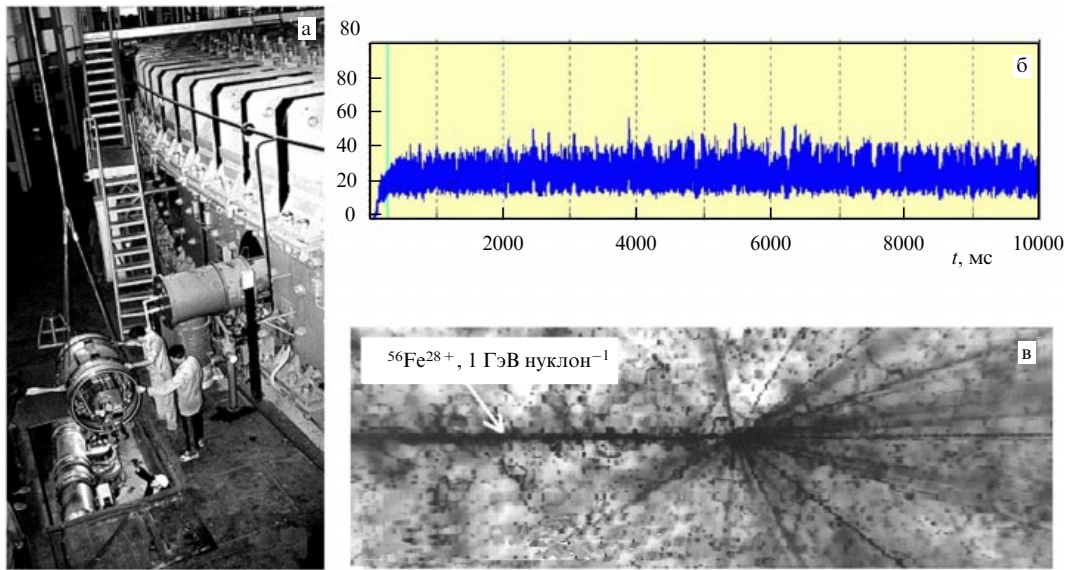


Рис. 1. Нуклотрон: (а) процесс монтажа элементов системы вывода пучка, (б) сигнал тока выводимого пучка на мониторе, (в) взаимодействие релятивистского ядра железа с ядром фотоэмульсии.

ОИЯИ для ускорительного комплекса ЛВЭ и растущими ценами на основные энергоресурсы, практически было пределом. Запросы же физиков более чем в 2 раза превышали плановое время сеансов. Несмотря на весьма тщательный отбор наиболее приоритетных и важных из заявляемых работ, число экспериментов, включаемых в расписание, достигало двух десятков.

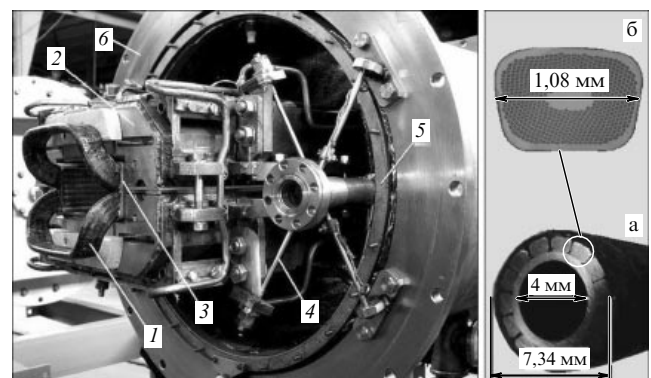
Хочу также отметить и существенный прогресс в направлении дальнейшего развития в ЛВЭ технологии быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов для новых протонных и ионных синхротронов высоких энергий, достигнутый уже после запуска Нуклотрона. Одним из важных результатов в этом направлении является уменьшение более чем в 2 раза динамических тепловыделений в дипольном и квадрупольном магнитах нуклотронного типа. Этот цикл работ выполняется в сотрудничестве с Научным центром по исследованию тяжелых ионов ГСИ в Дармштадте (Германия) и имеет финансовую поддержку Евросоюза в рамках программы FP6. Конечной целью проводимых в ЛВЭ исследований является создание базовых элементов сверхпроводящей магнитной системы (дипольных и квадрупольных магнитов) нового синхротрона СИС100 — одного из принципиальных составляющих проектируемого в Дармштадте ускорительного комплекса для исследований с антипротонами и тяжелыми ионами высоких энергий. В создании этого комплекса, получившего название FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), участвуют многие страны, включая Россию.

Ряд других новых разработок сверхпроводящих кабелей и вариантов магнитов с параметрами, превосходящими магниты Нуклотрона как по частоте повторения циклов, так и по максимальному полю и другим важным параметрам, был выполнен в контексте дальнейшего развития комплекса Нуклотрон в ОИЯИ. В частности, предложен, изготовлен и испытан дипольный магнит с однослойной обмоткой, выполненной из трубчатого сверхпроводящего кабеля с критическим током, в 2 раза превышающим критический ток оригинального нуклотронного СП-кабеля при тех же размерах поперечного

сечения. При этом впервые использован сверхпроводящий композитный провод трапециевидного поперечного сечения, специально изготовленный во ВНИИИМ им. А.А. Бочвара по нашей спецификации. Кроме того, конструктивно обмотка магнита, находящаяся при температуре 4,5 К, имеет точечный тепловой контакт с ярмом магнита, температура которого может достигать 50–80 К. Параметры такого магнита уникальны, например может быть реализован режим работы с частотой циклов до 10 Гц, при этом тепловыделения на уровне 4,5 К минимальны.

4. НИКА — флагманский проект ОИЯИ на базе Нуклотрона

В современных условиях сильной конкуренции всех мировых научных центров за предоставление уникаль-



Прототип сверхпроводящего дипольного магнита для работы с частотой повторения циклов до 10 Гц: 1 — однослойная СП-обмотка из уникального сильноточного трубчатого кабеля (поперечное сечение кабеля и композитного провода показаны на фото справа (а) и (б) соответственно), 2 — ярмо магнита, 3 — зазор между обмоткой, охлаждаемой до 4,5 К, и ярмом магнита, имеющим температуру 80 К, 4 — подвеска магнита в криостате, 5 — промежуточный тепловой экран, 6 — внешний вакуумный сосуд криостата.

ных возможностей международным коллаборациям физиков, перспективы дальнейшего развития ЛВЭ и ускорительного комплекса напрямую связаны с наличием достаточно амбициозной физической проблемы, обладающей высокой конкурентоспособностью на мировом уровне, исследование и решение которой может быть осуществлено на Нуклотроне с учетом реализуемой технической модернизации существующего ускорительного комплекса и, естественно, с учетом представления о реальных финансовых возможностях. В 2006 г. в ОИЯИ предложен новый проект, названный НИКА, главная цель которого — поиск смешанной фазы и критической точки сильновзаимодействующей материи. Это имеет важное значение для понимания физики взаимодействия адронов и тяжелых ионов, процессов развития Вселенной после Большого взрыва, образования нейтронных звезд. Новая базовая установка, которая позволяет в принципе оптимальным образом проводить такие исследования — это коллайдер релятивистских тяжелых ионов с энергией в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} \sim 7-9$ ГэВ и достаточной светимостью. Данный энергетический диапазон полностью перекрывается потенциальными возможностями ускорительного комплекса ЛВЭ с учетом развития. Основными задачами проекта НИКА являются: 1) развитие существующего нуклотрона как базовой установки для генерации интенсивных пучков ионов в диапазоне масс от p до U и легких поляризованных ядер; 2) разработка и создание коллай-

дера тяжелых ионов с максимальной энергией $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ и средней светимостью $10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и 3) подготовка эксперимента по поиску смешанной фазы и создание многоцелевой установки для регистрации процессов столкновения ионов. Концептуальная схема нового комплекса показана на рис. 2. В рабочую группу проекта НИКА, возглавляемую А.Н. Сисакяном, входят С.В. Афанасьев, В.Д. Кекелидзе, А.Д. Коваленко, А.И. Малахов, И.Н. Мешков, В.А. Никитин, А.С. Сорин, В.Д. Тонеев. Реализацию проекта предполагается осуществить поэтапно. Первый этап (2007–2009 гг.) включает развитие Нуклотрона, подготовку технических проектов элементов комплекса НИКА, начало испытаний прототипов элементов ускорителя и многоцелевого детектора взаимодействий, названного МПД. На втором этапе (2008–2012 гг.) будет разработан и построен бустер Нуклотрона и завершены основные работы по созданию коллайдера НИКА и установки МПД. Параллельно в период 2010–2013 гг. будут осуществляться монтажные работы по коллайдеру и физической установке. Пуск планируется на 2013 год. Создание коллайдера НИКА на базе Нуклотрона будет уже третьим рождением ускорительного комплекса, построенного изначально в Дубне под руководством В.И. Векслера. Но, как и в те времена, это будет принципиальным шагом в обеспечении уникальных условий для изучения еще далеко нерешенных проблем физики высоких энергий.

5. Заключение

Лучшая оценка человека — это добрая память людей о нем, о его деятельности, его наследии. И это имеет место в данном случае. Имя В.И. Векслера вошло в историю мировой науки, в историю страны, в историю Дубны. О нем часто вспоминают те, кому пришлось работать вместе с ним (хотя таких остается все меньше и меньше). Продолжает жить созданный под его руководством ускорительный комплекс. Этот комплекс развивается и несмотря на все трудности развивается и сейчас благодаря усилиям его последователей.

Мне не довелось видеть Владимира Иосифовича, но вся моя работа и жизнь в Дубне, начиная с приезда на дипломную практику в феврале 1967 года, оказалась связанной с его наследием: до 1974 года — с реализацией коллективного метода ускорения, а затем с Синхрофазотроном и Нуклотроном. Но еще гораздо раньше, за 10 лет до приезда в Дубну, на меня произвело, по-видимому, неизгладимое впечатление сообщение о запуске Синхрофазотрона и это во многом определило все дальнейшее в моей работе и жизни.

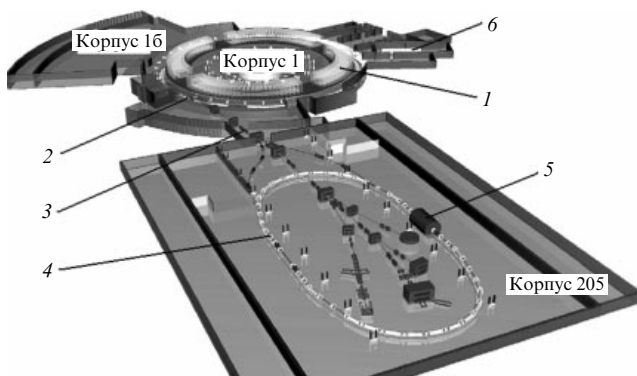


Рис. 2. Концептуальная схема коллайдера тяжелых ионов на базе Нуклотрона (проект НИКА): 1 — синхрофазотрон, 2 — Нуклотрон, 3 — существующий канал вывода пучков из Нуклотрона в главный экспериментальный зал, 4 — накопительные кольца коллайдера, 5 — детектор МПД для регистрации встречных взаимодействий, 6 — помещения для источников частиц и предускорительной части комплекса.