

P9-2004-145

Д. Л. Новиков

К 50-ЛЕТИЮ НАУЧНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО  
ОТДЕЛА НОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЛЯП ОИЯИ

Новиков Д. Л. P9-2004-145  
К 50-летию научно-экспериментального отдела  
новых ускорителей ЛЯП ОИЯИ

Работа посвящена 50-летию образования отдела новых ускорителей в составе Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Приведено описание основных работ, выполненных сотрудниками отдела за прошедшие 50 лет.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Novikov D. L. P9-2004-145  
To the 50th Anniversary of the Scientific-Experimental Division  
of New Accelerators of the Dzhelepov Laboratory  
of Nuclear Problems, JINR

The paper is dedicated to the 50th anniversary of foundation of the scientific-experimental division of new accelerators of the Laboratory of Nuclear Problems. The description of the main works made by the research personnel of the division is presented.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

В августе 1946 г. правительством СССР было принято решение о сооружении в стране в сжатые сроки пятиметрового синхроциклотрона, который должен был обеспечить ускорение дейтронов до энергии 280 МэВ,  $\alpha$ -частиц до 560 МэВ и протонов до энергии 480 МэВ. Решение это было принято в рамках создания атомного щита, которое осуществлялось под руководством И. В. Курчатова.

Было определено место, где должен размещаться сооружаемый ускоритель — на правом берегу Волги, немного ниже по течению от Ивановской гидроэлектростанции. По сути, это было началом строительства ныне всемирно известного города Дубна, в котором находится Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ).

Запуск пятиметрового синхроциклотрона состоялся 14 декабря 1949 г. На синхроциклотроне были ускорены ядра атомов дейтерия и гелия до энергий 280 и 560 МэВ соответственно.

В 1953 г. Гидротехническая лаборатория (ГТЛ) приобрела статус самостоятельного института и получила наименование Институт ядерных проблем (ИЯП) АН СССР.

В 1953 г. после увеличения диаметра полюсов магнита синхроциклотрона до 6 м и существенной реконструкции его ВЧ-системы был введен в действие протонный вариант ускорителя на энергию протонов 680 МэВ с интенсивностью пучка протонов  $0,25 \div 0,3$  мкА; в то время дубненский синхроциклотрон был самым мощным ускорителем протонов в мире.

Одновременно с проведенной реконструкцией магнитной и ВЧ-систем В. П. Дмитриевским на синхроциклотроне был осуществлен новый, регенеративный метод вывода частиц из ускорителя, что позволило увеличить интенсивность выведенного пучка в десятки раз. В зале ускорителя был создан экспериментальный павильон, отделенный от ускорителя четырехметровой стеной из тяжелого бетона и закрытый толстым полутораметровым бетонно-потолочным перекрытием. В этот зал были выведены с помощью отклоняющего магнита и коллиматоров 14 пучков протонов, пионов и нейтронов различных энергий. Это предоставило большие возможности для исследований не только физикам Дубны, но и ученым из Москвы, Ленинграда, Харькова и других городов.

Годом раньше (1952 г.) появилась публикация М. Ливингстона с сотрудниками, в которой предлагалось использовать жесткую фокусировку в кольцевых протонных синхротронах с целью значительного снижения веса используемых в них магнитов [1]. Это предложение по жесткой фокусировке в ускорителях создавало предпосылки для использования специальных струк-

тур магнитного поля и в других классах ускорителей с целью увеличения достижимых в них энергий и интенсивностей ускоренных пучков.

К обсуждению возможностей и перспектив жесткой фокусировки для ускорителей со сплошным магнитом (циклотрон, синхроциклотрон) директор ИЯП М. Г. Мещеряков привлек академика И. В. Курчатова, который продолжал поддерживать работы, проводимые в ИЯП по всем направлениям. Специальные мини-семинары по проблемам жесткой фокусировки в ускорительной технике, проходившие с участием И. В. Курчатова, завершились поручением дирекции ИЯП создать *специализированное подразделение* с целью разработки и создания в нем циклотрона со спиральной структурой магнитного поля.

Структурная перестройка отдела, занимавшегося сооружением, эксплуатацией и совершенствованием синхроциклотрона, началась в 1954 г. и завершилась к 1956 г. одновременно с вхождением ИЯП в состав ОИЯИ. Из отдела эксплуатации синхроциклотрона была выделена группа инженеров и разработчиков по направлениям: формирование и расчеты магнитных полей сложных конфигураций, создание приборов для измерения в них полей с высокой степенью точности, расчеты и создание высокочастотных ускоряющих полей, систем радиоэлектроники и специализированных ионных источников для ускорителей различных конструкций. Возглавил этот коллектив с 1955 г. кандидат физ.-мат. наук В. П. Дмитриевский. Этот коллектив несколько позже стал называться отделом новых ускорителей.

В 1955 г. вышла в свет работа Д. Керста и К. Саймона [2], в которой предложена пространственная вариация магнитного поля с целью повышения энергии в циклотронах, т. е. такое магнитное поле циклотрона, которое изменяется как по азимуту, так и по радиусу. В том же 1955 г. выходит отчет ИЯП АН СССР № 167 В. П. Дмитриевского: «О предельной энергии частиц в ускорителях типа циклотрон с пространственной вариацией магнитного поля» [3].

В 1955–1958 гг. в отделе новых ускорителей ведутся интенсивные исследования по теории движения частиц в магнитных полях сложных конфигураций, а также стендовые испытания структур со спиральной вариацией магнитного поля, создаются модели этих полей, приборы, способные измерять величины магнитного поля с высокой точностью, и т. д. Одновременно на магните классического циклотрона У-120 создается модель циклотрона со спиральной структурой магнитного поля. Итогом этих работ был успешный запуск [4] в 1958 г. первого в мире изохронного циклотрона со спиральной структурой магнитного поля, на котором были ускорены дейтроны до энергии 12 МэВ при наборе энергии за оборот 5 кэВ. Это означало, что спиральная структура магнитного поля способна обеспечить устойчивое ускорение частиц в циклотронном режиме на протяжении нескольких тысяч оборотов, по сравнению со 100 оборотами классического циклотрона или несколькими сотнями оборотов для структуры магнитного поля типа Томаса.

Достижения теории фазового движения и пространственной устойчивости в магнитных полях со спиральной структурой, развитой в Дубне, Харуэлле (Англия) и Ок-Ридже (США), а также экспериментальное подтверждение возможности изохронного ускорения практически до 1 ГэВ вдохновили мировую научную общественность на создание новых приборов для научных исследований, так называемых мезонных фабрик, т. е. мощных ускорителей на энергию до 1 ГэВ с токами ускоренных в них частиц, превышающими на три порядка токи, которые были получены на синхроциклотронах.

В начале шестидесятых годов разрабатывается сразу четыре проекта мезонных фабрик: в Ок-Ридже под руководством Р. С. Ливингстона ( $Mc^2$ ), в Дубне под руководством В. П. Дмитриевского (РЦ), в Лос-Анжелесе ( $H^-$ ) под руководством Р. Ричардсона, в Цюрихе под руководством Г. Виллакса (SIN).

В дальнейшем решениями правительств различных стран к реализации были приняты только два из вышеперечисленных проектов:  $H^-$ , строительство которого было перенесено в Канаду (ныне известен как проект TRIUMF), и шедевр мезонной фабрики SIN (ныне PSI), который плавно прошел все стадии от проектирования до строительства, имея лучшие параметры как по интенсивности ускоренного пучка, коэффициенту вывода пучка, близкому к единице, так и по потерям пучка в процессе ускорения.

В 1958–1963 гг. под руководством Б. И. Замолодчикова на синхроциклотроне ЛЯП были проведены работы, в результате которых произошло восьмикратное повышение интенсивности ускоренного внутреннего пучка протонов синхроциклотрона. Работы проводились в три этапа. На первом этапе ток пучка был увеличен с 0,25 до 0,8 мкА за счет изменения формы кривой «частота–время» на захвате. На втором этапе была изменена форма статорных пакетов вариатора частоты, тем самым удалось устранить фазовые потери тока пучка на средних радиусах (40–80 см), что привело к его повышению на конечном радиусе ускорителя до значения 1,2 мкА. Третий этап заключался в установке в центральной области синхроциклотрона специальных электростатических электродов, которые увеличили фокусировку по вертикали. При значении фокусирующего напряжения на электроде  $U_{\phi} = -13$  кВ ток пучка на конечном радиусе был увеличен примерно в два раза и составил 2,3–2,4 мкА [5].

Возможности для проведения различных физических экспериментов на синхроциклотроне были существенно расширены благодаря созданию новых пучков поляризованных протонов,  $\pi^{\pm}$ -мезонов, нейтронов и в особенности пучков мюонов, полученных от распада  $\pi$ -мезонов в 15-метровом жесткофокусирующем канале из магнитных линз (руководители Б. И. Замолодчиков и А. А. Кропин). В результате перечисленных выше работ синхроциклотрон ЛЯП начал работать на физический эксперимент по 6–6,5 тыс. часов в год и по общему признанию стал лучшим синхроциклотроном в мире.

В 1960–1962 гг. в отделе новых ускорителей проведены разработки элементов и систем кольцевого фазотрона со спиральной структурой магнитного поля. По этой программе разрабатывались элементы ведущего магнитного поля фазотрона со спиральной структурой, модели отдельных секторов с таким полем, специализированная высокочастотная система, инжектор в виде одиночного резонатора с энергией протонов 1 МэВ, источник ионов с холодным полым катодом и током протонов в импульсе длиной 20 мкс до 40 мА [6].

Особое внимание в этот период времени в отделе новых ускорителей уделялось обоснованию и разработке технического проекта совместно с НИИЭФА, МРТИ, ГСПИ и другими ведущими организациями по переоборудованию действующего синхроциклотрона ЛЯП в релятивистский протонный циклотрон (РЦ) [7] на энергию 700 МэВ с током до 1 мА в рамках создания в ОИЯИ мезонной фабрики. Однако по ряду причин этот проект не был реализован.

В 1962 г. появляется первое предложение по реализации циклотрона с жесткой фокусировкой [8]. Впервые делается попытка объединить в кольцевом циклотроне два таких важных свойства, как изохронность замкнутых орбит и жесткая фокусировка, т. е. такая фокусировка, которая обеспечивает частоту радиальных (поперечных) и вертикальных колебаний больше единицы за один полный оборот в ведущем магнитном поле циклотрона.

Проверку динамики пучка ускоряемых частиц в условиях предельных значений пространственного заряда решено было экспериментально осуществить на электронной модели кольцевого циклотрона (ЭМКЦ) с соответствующими параметрами подобия к протонному варианту кольцевого циклотрона.

С начала 1963 г. в отделе новых ускорителей начались работы по моделированию магнитного поля ЭМКЦ и созданию электронной пушки и трактов инжекции электронного пучка на первую орбиту циклотрона. Первое сообщение о разработке ЭМКЦ было сделано на 4-й Международной конференции по циклотронам в Гатлинбурге [9], а также были представлены фотографии основных элементов в процессе сборки.

Физический запуск ЭМКЦ состоялся в январе 1967 г. [10] В течение нескольких лет на ЭМКЦ проводились интенсивные исследовательские работы по изучению динамики пучка при больших значениях собственного пространственного заряда. В результате этих работ получены предельные значения достижимого тока пучка, проверена теория смещения рабочей точки некогерентных колебаний к ближайшему целочисленному значению параметрического резонанса, отработана система стабилизации и подавления фазового смещения центра тяжести пучка в процессе ускорения, по-новому была решена задача абсолютной привязки фазы пучка. С помощью цифрового частотомера, разработанного П. Т. Шишлянниковым, в режиме циркуляции пучка в ЭМКЦ измерены частоты обращения ступка частиц по радиусу ускорения с точностью  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ , что использовалось позже для автоматической

(с привлечением ЭВМ) коррекции среднего магнитного поля ускорителя по пучку.

В 1967–1969 гг. в связи с успехами в физических исследованиях, проведенных на тандемных электростатических ускорителях, появился заметный интерес к моноэнергетическому пучку ускоренных ионов с разбросом энергии  $\Delta W/W \sim 10^{-4}$ . В этот период в НЭОНУ было сделано предложение, а затем и отдельные наработки по созданию циклотрона с регулируемой энергией и моноэнергетическим пучком. В апреле 1969 г. в Дубне состоялось рабочее совещание по созданию моноэнергетического циклотрона [11]. Однако и эти работы не получили дальнейшего развития из-за отсутствия достаточного для них финансирования.

В 1970 г. было сформулировано окончательное предложение НЭОНУ по модернизации циклотрона У-120, работающего в Ржеже (ЧССР), в современный изохронный циклотрон с регулируемой энергией, который был назван У-120М. В 1970 г. в Дубне состоялось первое рабочее совещание по У-120М с привлечением большого числа специалистов-ускорительщиков из стран-участниц ОИЯИ [12]. В октябре 1971 г. в Дубне прошло второе рабочее совещание по У-120М, а в 1973 г. в Ческе-Будейовице (ЧССР) прошло завершающее третье рабочее совещание по У-120М.

Весной 1976 г. в Дубне был осуществлен физический пуск циклотрона У-120М, и после транспортировки с помощью 11 большегрузных трейлеров всех элементов ускорителя в Ржеж (ЧССР) в октябре 1977 г. успешно прошел основной запуск на его рабочем месте в Институте ядерных исследований АН ЧССР, где он проработал многие годы, выполняя большую программу физических исследований и осуществляя наработку медицинских фармпрепаратов.

После того как на электронной модели кольцевого циклотрона были исследованы основные процессы поведения пучка при предельных значениях пространственного заряда, на повестку дня был поставлен вопрос об эффективном, близком к 100 %, выводе пучка из циклотрона (рис. 1, 2).

В отделе продолжались работы с применением численного моделирования на ЭВМ, а также эксперименты на ЭМКЦ с использованием прецессии орбиты на конечном радиусе ускорения. В 1972 г. была опубликована работа В. П. Дмитриевского, В. В. Кольги и Н. И. Полумордвиновой [13], в которой предложен метод вывода пучка из циклотрона с эффективностью, близкой к 100 %, названный затем «эффект расширения замкнутых орбит».

В 1972–1973 гг. после модернизации систем, обеспечивающих требуемый закон изменения магнитного поля на конечных радиусах ЭМКЦ, на электронной модели были проведены первые эксперименты по выявлению эффекта расширения замкнутых орбит, которые подтвердили, что энергетический шаг орбиты в зоне вывода может быть увеличен в 10–15 раз [14]. Дальнейшие расчеты и моделирование процесса ускорения на ЭВМ пока-



Рис. 1. Обсуждение очередного этапа исследования эффекта разделения орбит



Рис. 2. Подготовка к измерениям коррекции фазы по пучку на ЭМКЦ

зали, что для улучшения условий вывода при помощи эффекта расширения требуется существенно улучшить качество ускоряемого пучка в циклотроне. Из этих расчетов следовало, что в зоне вывода колебания частиц пучка при их ускорении не должны превышать 4–5 мм, а амплитуды низших гармоник аксиальной составляющей магнитного поля должны быть существенно ниже тысячных долей от основного поля. Для ЭМКЦ это составляет значение 0,05 Гс, т.е. в десять раз ниже магнитного поля Земли. На первом этапе работ с целью уменьшения амплитуды колебаний частиц пучка, связанных



с асимметрией энергии набора энергии за оборот, один  $90^\circ$ -й дуант был заменен двумя  $45^\circ$ -ми дуантами, расположенными симметрично напротив друг друга и возбужденными в противофазе. С этой же целью была смонтирована система корректирующих обмоток, позволяющих изменять величину и фазу низших гармоник магнитного поля во всей области ускорения от инжекции до вывода. Всего было установлено четыре группы по одиннадцать пар корректирующих обмоток. После проведенных модернизаций в экспериментах на ЭМКЦ с пучком было показано, что поставленные требования по качеству пучка выполнены: амплитуды колебаний частиц в пучке были доведены до 4–5 мм по всей зоне ускорения. Далее надо было выполнить еще одно требование по улучшению качества пучка — уменьшить энергетический разброс в пучке. Поставленную задачу можно было решить двумя способами. В первом способе необходимо было создать такую систему инжекции, которая обеспечила бы очень короткие по времени сгустки пучка частиц. Если в стандартном циклотроне азимутальная протяженность ускоряемого пучка составляет примерно  $30\text{--}40^\circ$ , то требование к моноэнергетичности пучка в ЭМКЦ приводило к значению не более  $5^\circ$  и то только в том случае, когда фаза центра сгустка при ускорении в зависимости от радиуса ускорения остается неизменной. В реальном же магнитном поле циклотрона фаза центра сгустка в процессе ускорения изменяется в пределах  $\pm 15^\circ$ ; только при применении специальной системы коррекции эти изменения могут быть уменьшены до значения  $\pm 5^\circ$ . Поставленная задача инжекции короткого сгустка частиц была решена при помощи специального высокочастотного инжектора.

Следующим шагом в обеспечении условий, улучшающих моноэнергетичность частиц в пучке, стали создание и реализация новой ускоряющей системы с применением сложения гармонических колебаний первой и последующих кратностей, так называемый режим с плоской вершиной. В таком режиме ускорения пучок частиц значительной протяженности может двигаться по плоской вершине синусоиды и набирать в процессе ускорения практически одну и ту же энергию для всех частиц, находящихся в пучке. При реализации режима ускорения с плоской вершиной на ЭМКЦ были разработаны дополнительный третий гармонический дуант со сложным профилем по радиусу, изготовлен комплекс радиочастотной аппаратуры, включающий в себя восемь самостоятельных блоков [15]. Следует отметить, что для того, чтобы указанный режим работы ВЧ-системы оказался эффективным, необходимо было создать условия для поддержания синхронной работы двух основных и третьего гармонического дуантов с точностью по времени  $3 \cdot 10^{-12}$  с. Описанное выше сложное оборудование было изготовлено, запущено в действие и показало полную свою работоспособность. Эксперименты, проведенные на ЭМКЦ, показали, что разработанный комплекс обеспечивал лучший режим токопрохождения с разделением орбит практически до конечного радиуса

и эффективное разделение орбит на радиусе вывода. Коэффициент вывода пучка с эффектом разделения составил  $\eta = 99,5\%$ .

Как уже отмечалось выше, по финансовым соображениям не был принят к реализации проект релятивистского циклотрона РЦ, который должен был заменить успешно работающий синхроциклотрон. Но общеизвестно, что любой ускоритель, достигший даже рекордных параметров по интенсивности и качеству пучков, примерно через 15–20 лет теряет эти преимущества, уже не может обеспечить условия для получения новых высокозначимых физических результатов; поэтому в 1967 г., как альтернатива проекту РЦ, в отделе новых ускорителей был предложен к реализации проект фазотрона со спиральной структурой магнитного поля на энергию протонов 680 МэВ [16], названный проектом «Ф».

Руководство по реализации проекта «Ф» осуществлялось В. П. Желеповым, В. П. Дмитриевским и на завершающей стадии — Л. М. Онищенко. При реконструкции машины были заменены практически все основные элементы и системы синхроциклотрона. Из старого оборудования ускорителя были использованы только ярмо основного магнита и высоковакуумные агрегаты. Необходимо отметить, что при громадных размерах основных деталей (полус магнита составлял 6 м) необходимо было изготавливать сложные по форме многотонные детали с ювелирной точностью (доли мм), для чего требовалось использовать уникальные механические станки, имеющиеся в наличии только в единичном исполнении на специализированных предприятиях страны. Из-



Рис. 3. Вариатор в процессе монтажа: слева — роторы вариатора в корпусе, справа — статорные (дуантные) пакеты

готовление двух вариаторов частоты, представляющих собой практически высокооборотные турбины, требовало также решения целого ряда как механических, так и технологических проблем. На сооружение всего комплекса уникального оборудования установки «Ф» потребовалось в общей сложности более 12 лет (рис. 3–6).

Физический пуск фазотрона был осуществлен летом 1984 г. [17].

После доводки некоторых систем ускорителя и усиления фокусировки в его центральной области фазотрон ОИЯИ с 1985 г. начал работать на физический эксперимент по полной программе.

Величина тока внутреннего пучка фазотрона была доведена до 10 мкА, а коэффициент вывода с новым железно-токовым каналом составил  $\sim 50\%$ . Это означало, что интенсивность частиц в каналах пучков была увеличена в 25–40 раз.

Одновременно с сооружением фазотрона был построен ряд новых павильо-



Рис. 4. Спиральные шиммы на полюсах магнита фазотрона

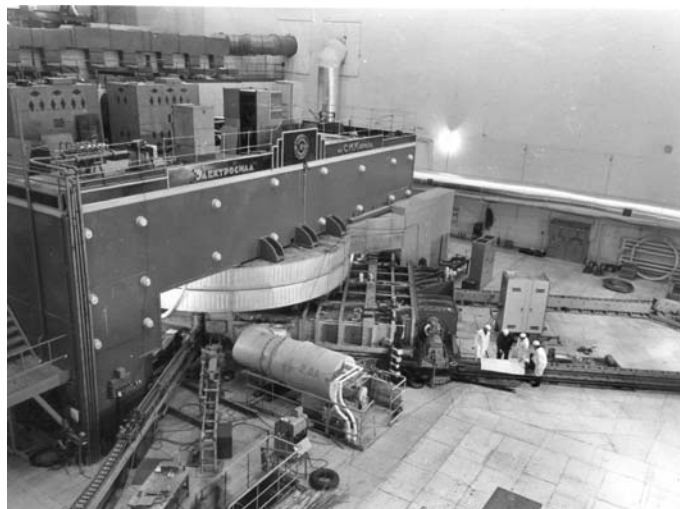


Рис. 5. Общий вид фазотрона

нов и зданий: павильон для размещения физической аппаратуры и измерительного центра, специальный зал для комплекса ЯСНАПП-2 с сепаратором

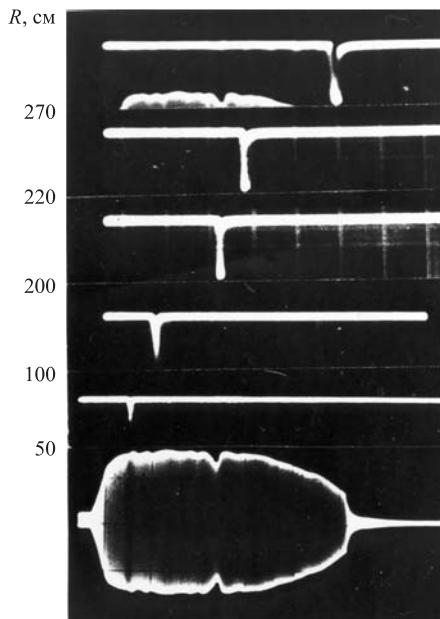


Рис. 6. Осциллограммы сигнала гамма-излучения (регистрируемого фотоумножителем), возникающего при взаимодействии ускоренного в фазотроне пучка с мишенью на разных радиусах; нижняя осциллограмма — огибающая ускоряющего напряжения. Развертка 0,5 мс/дел.

возможности создания так называемого «усилителя мощности», вышедшей в 1993 г. [19].

В ряду большого числа работ В. П. Дмитриевского по созданию сильноточных ускорителей, предназначенных, в частности, и для электроядерного способа получения энергии, следует отметить следующие:

- 1) совместно с В. П. Желеповым и В. В. Кольгой: «Суперциклотрон — перспектива дальнейшего развития сильноточных ускорителей» (ОИЯИ Р9-9066. Дубна, 1975);
- 2) «Нейтронные генераторы» — доклад на международной конференции в Кракове в 1978 г.;

ионов, лаборатория для экспериментов, требующих низкого фона излучения, павильон с шестикабинным комплексом медицинских пучков для лечения онкологических больных.

Естественно, что перечисленные выше работы выполнялись общими усилиями всего коллектива сотрудников Лаборатории ядерных проблем и имели четкую координацию.

Красной нитью в работах В. П. Дмитриевского и под его руководством в работах сотрудников НЭОНУ проходят исследования по электроядерному способу получения энергии и конкретно по изучению, исследованию и созданию ускорителей заряженных частиц, которые могут быть использованы в этой проблеме.

Более 20 лет отделяет первую фундаментальную работу В. П. Дмитриевского, написанную совместно с В. И. Гольданским и др. [18], «Электроядерный метод генерации нейтронов» (АЭ. 1970. Т. 29, вып. 3. С. 151–158) от широко известной статьи К. Руббиа с сотр. по поводу

3) совместно с сотрудниками НЭОНУ: «Дейтронный циклотронный комплекс на базе сверхпроводящих секторных магнитов» (ОИЯИ Р9-81-734. Дубна, 1981);

4) «Нейтронные и мезонные генераторы на базе циклотронных установок» — доклад на Межд. совещ. по циклотронам и их применению (Бехин, ЧССР, июнь 1985. Труды совещания, ОИЯИ Р9-85-707. Дубна, 1985).

В этом же направлении выполнены работы по проекту циклотрона с жесткой фокусировкой, по исследованию динамики ускоряемого пучка частиц при больших плотностях пространственного заряда на ЭМКЦ, по исследованию эффекта расширения замкнутых орбит [20].

Предложение (1981 г.) по созданию циклотронного комплекса на базе каскада из трех секторных циклотронов потребовало проведения объемного цикла исследовательских работ, включающих как многочисленные расчеты на ЭВМ с привлечением самого современного программного обеспечения, так и моделирование отдельных элементов циклотронного комплекса, а также экспериментальных исследований на созданных моделях и макетах. Перечисленные работы заняли около 15 лет и продолжались с должной интенсивностью до середины 90-х гг.

К этому циклу работ необходимо отнести исследование возможности создания специализированного секторного циклотрона-инжектора с теплым магнитом СИЦ-1, предназначенного для инъекции в дейтронный циклотрон, второй ступени комплекса ДЦ-1 вместо линейного ускорителя QRF.

Наиболее тщательно были исследованы элементы второй ступени комплекса ДЦ-1, в котором предполагалось ускорять частицы от энергии 7,5 до 45 МэВ/н. Для экспериментальных исследований были изготовлены полномасштабные прототипы сверхпроводящего секторного магнита (один элемент из четырех) и полномасштабный прототип ускоряющего  $\Delta$ -резонатора (один из двух) [21].

Для обеспечения требуемых температур хладагента сверхпроводящего магнита практически была создана целая криогенная лаборатория на основе криогенной гелиевой установки КГУ-150/4,5. Собственными силами изготовлена сверхпроводящая обмотка секторного магнита. Изготовлены и смонтированы железное ярмо магнита и вакуумная камера криостата. Проведены многочисленные расчеты и эксперименты по работоспособности и надежности при эксплуатации выбранной конструкции, расчеты механических напряжений и возможных деформаций элементов криосистемы, создана система криообеспечения магнита и система защиты в аварийных ситуациях и т. д.

В циклотронах, имеющих секторную структуру магнита, могут быть использованы объемные резонаторы, обладающие большой запасенной энергией ВЧ-поля и способные обеспечить ускоряющее напряжение до 500–600 кВ. Для исследования подобного резонатора была изготовлена полномасштабная модель такого резонатора, на который были проведены детальные радиотех-

нические исследования, оптимизирующие набор энергии ускоряемыми частицами как на стадии инжекции, так и в зоне вывода пучка частиц на конечных радиусах ускорения.

В 1987 г. выходит работа В. П. Дмитриевского с сотрудниками НЭОНУ, в которой дано обоснование возможности одновременного ускорения в циклотроне протонов и отрицательных ионов водорода [22]. Цель этого предложения состоит в увеличении интенсивности при использовании одновременно положительной и отрицательной полуволн ускоряющего электрического поля. При этом накладываются специальные требования на сдвиг фазы ускоренных одновременно положительных и отрицательных ионов из-за разницы их массы покоя. В 1988 г. это предложение было экспериментально реализовано на циклотроне У-120М Института ядерной физики ЧСАН в Ржеже, ЧССР [23].

В 1989–1993 гг. по заказу Кубинской Республики как страны-участницы ОИЯИ в НЭОНУ разрабатывался проект целевого циклотрона У-120К, проект был тщательно разработан, доведен до технического выполнения и согласован с кубинской стороной — заказчиком проекта.

В марте 1991 г. был подписан контракт ОИЯИ с Институтом ядерной физики УзССР о создании специализированного циклотрона У-115Т на энергию протонов 20 МэВ для производства в промышленном масштабе коммерческих изотопов. С конца апреля 1992 г. на территории ЛЯП началась сборка основных узлов У-115Т, изготовленных в механических мастерских ЛЯП ОИЯИ [24]. Летом этого же года сформировано магнитное поле циклотрона, создан рабочий вакуум в камере ускорителя, получено рабочее напряжение на дуанте циклотрона 50–60 кВ. В октябре 1992 г. основные элементы циклотрона У-115Т были доставлены в Институт ядерной физики Узбекистана в г. Улугбек под Ташкентом.

В ноябре 1999 г. коллектив сотрудников НЭОНУ приступил к выполнению проектных работ по созданию циклотрона ЦИТРЕК для производства трековых мембран по заказу холдинговой компании «ТРЕКПОР ТЕХНОЛОДЖИ». По проекту циклотрон ЦИТРЕК должен быть компактным, иметь внешнюю инжекцию с источником ионов типа ECR, обеспечивать интенсивность пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+17}$  порядка  $10^{11} \text{ с}^{-1}$ . Основные узлы этого циклотрона изготавливались в цехах Опытного производства ОИЯИ. Сдача в эксплуатацию циклотрона ЦИТРЕК осуществлена летом 2002 г. [25].

Приведенный выше перечень работ, выполненных сотрудниками отдела новых ускорителей, составляет только часть основных работ, которыми может гордиться каждый участник сплоченного коллектива. На протяжении нескольких десятков лет под руководством В. П. Дмитриевского была создана школа квалифицированных специалистов-ускорительщиков, способная решать самые сложные задачи на современном высоком уровне. За годы существования отдела его сотрудниками были успешно защищены 11 докторских и

25 кандидатских диссертаций. Докторские диссертации защитили: В. П. Дмитриевский, В. И. Данилов, В. В. Кольга, Б. И. Замолотчиков, Ю. Н. Денисов, А. А. Глазов, Н. Л. Заплатин, Л. М. Онищенко, В. В. Калинин, Л. А. Саркисян, С. Б. Ворожцов. Кандидатские диссертации защитили: А. А. Кропин, Д. Л. Новиков, В. С. Рыбалко, П. Т. Шишлянников, А. Г. Василенко, С. А. Ивашкевич, В. Н. Аносов, В. П. Саванеев, Е. В. Самсонов, Н. А. Морозов, Е. Н. Заплатин, Ю. Г. Аленицкий, А. Ф. Чеснов, Г. А. Карамышева, М. Б. Юлдашева, И. В. Титкова, прикомандированные из стран-участниц ОИЯИ: Лю Нэчуань (КНР), Е. Швабе (ПНР), М. Кузьмяк, М. Чигака, З. Трейбал (ЧССР), И. Енчевич (НРБ), Юн Хо Дзин, Ли Гын Чел (КНДР), Ле Киен Тхань (СРВ).

В юбилейном для НЭОНУ году его сотрудники продолжают вести традиционные для них исследования по сильноточным ускорителям циклотронного типа для электрояда, совершенствуют и уточняют параметры отдельных узлов и элементов медицинского циклотрона, а также занимаются разработкой проекта специализированного циклотронного комплекса для таможи с целью обнаружения при его помощи взрывчатых веществ среди грузов, проходящих через терминалы.

Прошедшее в Дубне рабочее совещание по обсуждению эскизного проекта циклотрона для таможи, которое состоялось 7–9 июня 2004 г., подводя итоги, приняло итоговое решение, в котором со стороны заказчика был отмечен высокий уровень исследований, заложенных в обсуждаемый проект. В настоящее время ведется рабочее проектирование отдельных элементов этого циклотрона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Courant E. D., Livingston M. S., Snyder H. S. // Phys. Rev. 1952. V. 88. P. 1190.
2. Kerst D. W., Terwilliger K. M., Symon K. R., Jones L. W. // Bull. Amer. Phys. Soc. 1955. V. 30. P. 14.
3. Дмитриевский В. П. Отчет ИЯП АН СССР, № 167. М., 1955.
4. Danilov V. I., Denisov Yu. N., Dmitrievskij V. P. et al. // Proc. of Intern. Conf. on High-Energy Acceler. and Instrumentation. CERN, Geneva, 1959. P. 211; Василевская Д. П. и др. ОИЯИ Р9-336. Дубна, 1959; АЭ. 1959. Т. 6, вып. 6. С. 657.
5. Данилов В. И., Замолотчиков Б. И. и др. // Труды межд. конф. по ускорителям. М.: Атомиздат, 1964. С. 591.
6. Василевская Д. П. и др. ОИЯИ-930, Дубна, 1962; Nucl. Instr. 1963. V. 21, No. 1. P. 85.
7. Глазов А. А., Денисов Ю. Н., Джелепов В. П., Дмитриевский В. П. и др. // Труды межд. конф. по ускорителям. Дубна, 1963. М.: Атомиздат, 1964. С. 547.

8. Глазов А. А., Денисов Ю. Н., Желепов В. П., Дмитриевский В. П. и др. Отчет ОИЯИ Б-1242. Дубна, 1964.
9. Glazov A. A. et al. IEEE Trans. NS-13. 1966, No. 4. P. 215.
10. Аносов В. Н. и др. // АЭ. 1968. Т. 25, № 6. С. 539.
11. Труды рабочего совещ. по созданию моноэнергетического циклотрона. ОИЯИ, 13-4496. Дубна, 1969.
12. Труды рабочего совещ. по У-120М. ОИЯИ, Р9-5498. Дубна, 1971.
13. Дмитриевский В. П., Кольга В. В., Полумордвинова Н. И. ОИЯИ, Р9-7633. Дубна, 1972.
14. Василенко А. Т. и др. // Труды 4-го всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1975. С. 205.
15. Глазов А. А. и др. ОИЯИ, Р9-97-187. Дубна, 1997.
16. Глазов А. А. и др. ОИЯИ, 9-3211. Дубна, 1967;  
Glazov A. A. et al. // Proc. 6th Int. Conf. on High Energy Accel., Cambridge, 1967.
17. Аленицкий Ю. Г. и др. // Труды 9-го всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Р9-84-641. Дубна, 1984.
18. Васильков Р. Г., Гольданский В. И., Желепов В. П., Дмитриевский В. П. // АЭ. 1970. Т. 29, вып. 3. С. 151.
19. Rubbia C. et al. CERN/ISC 93-31, 18.10.1993.
20. Дмитриевский В. П. и др. ОИЯИ, Р9-81-734. Дубна, 1981.
21. Труды межд. совещ. по циклотронам и их применению. ОИЯИ, Д9-89-708. Дубна, 1989.
22. Дмитриевский В. П. и др. ОИЯИ, Р9-87-703. Дубна, 1987; EPAC, Rome, 1989. V. 1. P. 616.
23. Бейшовец В., Дмитриевский В. П. и др. ОИЯИ, Р9-88-249. Дубна, 1988.
24. Аленицкий Ю. Г. и др. // Труды 13-го Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-92-455. Т. 2. С. 319. Дубна, 1992.
25. Аленицкий Ю. Г. и др. ОИЯИ, Р9-2004-5. Дубна, 2004.

Получено 17 сентября 2004 г.



Редактор *Е. К. Аксенова*

Подписано в печать 25.01.2005.

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

Усл. печ. л. 0,88. Уч.-изд. л. 1,03. Тираж 300 экз. Заказ № 54755.

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

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

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