

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

621.384.611 (09)

**ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЦИКЛОТРОНА ЗА 50 ЛЕТ
(1930—1980)****Л. М. Неменов**

Вернемся на полвека назад и рассмотрим эволюцию, которую претерпел магнитный резонансный ускоритель, получивший название «циклотрон».

В предлагаемом обзоре рассмотрены, на наш взгляд, наиболее существенные моменты, способствовавшие превращению лабораторного прибора, сделанного руками экспериментатора, в сложнейшее инженерное сооружение, эксплуатируемое на всех континентах земного шара. Следует заметить, что рамки обзора, естественно, не позволяют охватить все аспекты, связанные с развитием циклотронной техники.

Первое сообщение о принципе циклического резонансного ускорителя без использования сверхвысокого напряжения было сделано в 1930 г. Лоуренсом и Эдлефсеном¹.

В 1931 г. Лоуренс и М. Ливингстон на циклотроне с диаметром полюсов 100 мм ускорили ионы молекулярного водорода до энергии 80 кэВ. Этот, сделанный в лабораторных условиях, прибор, вызывающий сейчас улыбку, стал прообразом современных циклических ускорителей.

В том же году Лоуренс и М. Ливингстон на более совершенной установке ускорили протоны до энергии 1,22 МэВ. При этом было показано, что изменение магнитного поля на десятые доли процента приводит к нарушению условия резонанса. Авторы в основных чертах изложили метод коррекции неоднородностей магнитного поля с помощью железных элементов, вкладываемых между полюсами электромагнита и крышками ускорительной камеры. Для отклонения пучка заряженных частиц использовалось электрическое поле конденсатора. Ток в пучке на конечном радиусе составлял всего 10^{-9} А, но авторы уже обсуждали возможность получения тока порядка 10^{-7} А.

В 1932 г. те же ученые на более совершенной установке ускорили дейтроны до энергии 3,6 МэВ. В той же камере в 1933 г. ионы молекулярного водорода были ускорены до энергии 4,8 МэВ. При этом дуанты — электроды, создававшие высокочастотное ускоряющее электрическое поле, — являлись элементами колебательного контура.

Первая попытка построения циклотрона в Советском Союзе относится к 1932 г. В Ленинградском физико-техническом институте в лаборатории И. В. Курчатова М. А. Еремеевым был построен циклотрон с диаметром полюсов 300 мм. Магнит, изготовленный из сердечника трансформатора, не мог создать достаточную однородность магнитного поля. Ток пучка ускоренных до энергии 900 кэВ протонов имел порядок 10^{-10} А.

В 1934 г. Лоуренс и М. Ливингстон в камере с диаметром крышек 690 мм ускорили ионы молекулярного водорода до 5 МэВ и в 1935 г. получили в отклоненном пучке ток, равный 10^{-5} А.

✱ 1936 г. принес крупный успех. Лоуренс и Кукси², построив новую камеру с диаметром крышек 700 мм, ускорили дейтроны до энергии 5 МэВ и впервые, используя электростатическую отклоняющую систему, выпустили из камеры через тонкое платиновое окошко пучок заряженных частиц с силой тока 5 мкА. Высокочастотный генератор, собранный по двухтактной схеме с самовозбуждением, отдавал колебательную мощность порядка 25 кВт. Разность потенциалов между дуантами составляла

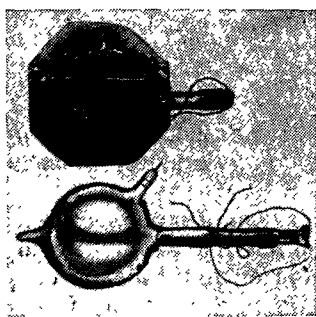


Рис. 1. Ускорительные камеры первого циклотрона Лоуренса.

Ионы молекулярного водорода ускорены до 80 кэВ (1930 г.).

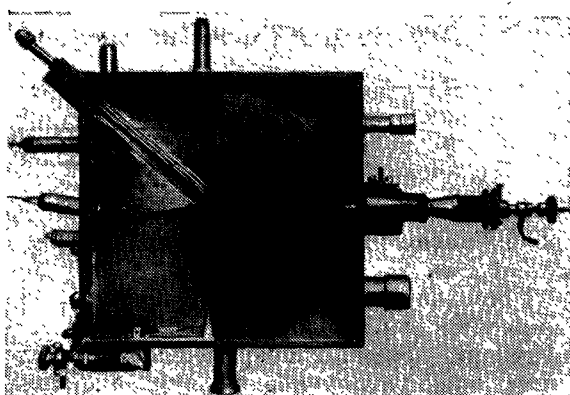


Рис. 2. Ускорительная камера циклотрона Лоуренса.

Протоны ускорены до энергии 1,22 МэВ (1931 г.).

50—100 кВ. Коррекция магнитного поля осуществлялась введением железных дисков между полюсами электромагнита и крышками ускорительной камеры.

Впервые было обращено внимание на то обстоятельство, что геометрический центр ускорительной камеры не совпадает с центром орбит ускоряемых частиц, и было показано, что это явление может быть устранено дополнительной коррекцией магнитного поля. В камере за отклоняющей системой был расположен электрод, измерявший ток в пучке. Там же могла быть установлена мишень для облучения, охлаждаемая проточной водой.

На этом циклотроне впервые были проведены опыты с быстрыми нейтронами, полученными при бомбардировке бериллия дейтронами. Авторами было высказано прогрессивное предположение о целесообразности вывода пучка в вакуумированной трубе через защитную стену на значительное расстояние от циклотрона для уменьшения фонового излучения самой установки.

В 1937 г. Лоуренс и Кукси³ создали весьма совершенную ускорительную установку. Дуантный контур имел мощное водяное охлаждение. Камера была снабжена надежными вакуумными клапанами. Имелось устройство для измерения потенциала дуантов. В отклоняющей системе впервые применялся тонкий наконечник из тугоплавкого металла для уменьшения потерь входящего в конденсатор пучка заряженных частиц.

Впервые был применен разработанный Р. Вильсоном зонд со скользящим уплотнением для измерения по нагреву тока ускоренных частиц на любом радиусе. На этом же зонде могла укрепляться мишень для об-

лучения. Шлюз, расположенный за отклоняющей системой, позволял производить установку и снятие облучаемых мишеней без нарушения вакуума в ускорительной камере. Выпуск пучка ускоренных частиц наружу осуществлялся через тонкую металлическую фольгу, укрепленную на охлаждаемой пластинке с многочисленными отверстиями. Авторы получили дейтроны с энергией 8 МэВ. Ток на конечном радиусе достигал 100 мкА.

Сооружение этого циклотрона являлось большим достижением, так как, по существу, это была первая установка в мировой практике, сделанная на высоком инженерно-техническом уровне.

В том же году в Ленинграде в Радиовом институте АН СССР была построена первая в СССР и Европе циклотронная установка с диаметром полюсов 1000 мм⁴. Через год она была введена в эксплуатацию И. В. Курчатовым, В. Н. Рукавишниковым, Д. Г. Алхазовым и М. Г. Мещеряковым. Дейтроны на этом циклотроне были ускорены до 6 МэВ при токе внутри ускорительной камеры порядка 40 мкА.

В 1937 г. А. И. Алихановым, И. В. Курчатовым, Л. М. Неменовым и Я. Л. Хургиным был спроектирован самый большой в Европе циклотрон с диаметром полюсов 1200 мм. Циклотрон должен был быть введен в эксплуатацию в январе 1942 г., но этому помешала вторая мировая война. Циклотрон был введен в эксплуатацию в конце 1946 г.⁵

В 1937 г. Альварес и др. сделали первую попытку удалить облучаемую мишень от циклотрона; Бекер и М. Ливингстон на основе работ Тьюва и Ламара сконструировали и опробовали первый капиллярный источник ионов для циклотрона. Бете опубликовал первую статью по теории циклотрона.

Особенно плодотворным для развития ускорительной техники был 1938 г. Данинг и Андерсон⁶, используя идею Слоана, на циклотроне Колумбийского университета впервые применили четвертьволновую коаксиальную вакуумную резонансную линию для подачи высокочастотного напряжения на дуанты. Это усовершенствование позволило отказаться от применения стеклянных изоляторов, ограничивавших величину напряжения, подаваемого на дуанты. Альварес получил прерывистый пучок тепловых нейтронов, осуществив модуляцию пучка дейтронов, падавших на бериллиевую мишень. Вильсон и Камен поставили впервые убедительные опыты для проверки теории циклотрона.

Этот год был чрезвычайно богат теоретическими работами. Сюда следует отнести фундаментальные исследования Роуза по теории циклотрона⁷, работу Хургина о предельной энергии частиц, ускоряемых в циклотроне⁸, работу Вильсона об электростатической и магнитной фокусировке пучка⁹.

Но самым замечательным событием этого года следует считать появление работы Томаса¹⁰, показавшего, что в циклотроне заряженные частицы можно ускорить до значительно больших энергий, если создать магнитное поле с азимутальной вариацией достаточной глубины и растущее с увеличением радиуса орбит ускоряемых ионов.

В классическом циклотроне возрастающее магнитное поле привело бы к дефокусировке и, в результате, к полной потере всех ускоряемых ионов. Томас теоретически показал, что в рассмотренном им случае движение частиц будет устойчивым и обеспечит резонансные условия на протяжении всего ускорительного процесса. Идеи Томаса тогда не получили развития, так как создание магнитного поля требуемой формы представлялось чрезвычайно сложной задачей. В то время даже коррекция магнитного поля в классическом циклотроне вызывала довольно большие трудности.

Проектирование и постройка гигантского циклотрона с диаметром полюсов 4,7 м для ускорения дейтронов до 100 МэВ, предпринятая Лоуренсом еще в довоенное время, отвлекли внимание физиков от оригинального предложения Томаса, а выдающееся открытие^{11, 12}, сделанное независимо Векслером (1944 г.) и Мак-Милланом (1945 г.) заставило забыть более чем на десять лет эту замечательную работу.

В 1939 г. Лоуренс, Альварес и др. ввели в строй самый крупный в мире циклотрон с диаметром полюсов электромагнита 1500 мм¹³. Вес электромагнита составлял 200 т. Конструкция ускорительной камеры значительно отличалась от обычной. Основное ее преимущество заключалось в том, что дуанты с резонансными линиями могли быть извлечены из ускорительной камеры, в то время как камера оставалась в межполюсном пространстве электромагнита. Таким образом, эта операция не приводила к нарушению коррекции магнитного поля. Конструкция резонансной линии циклотрона позволяла юстировать положение дуантов без нарушения вакуума. Впервые отклоняющая система была установлена внутри дуанта. Таким образом, система была заэкранирована от «наводки» высокочастотного напряжения. Для этой установки Мак-Миллан и Сэйлис-бери усовершенствовали капиллярный источник ионов. В целях повышения эффективности извлечения ионов из источника был применен выступ на дуантах, увеличивающий градиент высокочастотного напряжения. Это усовершенствование позволило почти на порядок увеличить ток ускоренных частиц.

Начавшаяся к тому времени разработка мощных высоковакуумных насосов позволила установить для откачки циклотрона паромасляный насос производительностью 3000 л/сек. Ускорительная камера стала настолько громоздкой, что ее пришлось расположить на тележке специальной конструкции. Перед началом второй мировой войны на этом циклотроне дейтроны были ускорены до рекордной энергии 22 МэВ. Ток в выведенном пучке составлял 1 мкА.

В 1940 г. Альварес впервые в мировой практике ускорил ионы $^{12}\text{C}^{6+}$ до энергии 50 МэВ, положив этим опытом начало исследованиям взаимодействия многозарядных ионов с веществом. Интенсивность пучка ускоренных ионов на конечном радиусе циклотрона составляла 500 ионов в минуту.

В этом же году Вильсон¹⁴ опубликовал классическое исследование, в котором рассмотрел вопросы электрической и магнитной фокусировки, образования ионов в центральной части циклотрона и смещения траекторий движения заряженных частиц.

В 1943 г. в Институте атомной энергии под руководством И. В. Курчатова, Л. М. Неменова и А. А. Чубакова был спроектирован и в 1944 г. введен в действие циклотрон с диаметром полюсов 730 мм. Это был первый в СССР и Европе циклотрон, позволявший выводить пучок дейтронов из ускорительной камеры наружу. Этот ускоритель примечателен еще и тем, что с его помощью был получен первый в Европе «циклотронный» плутоний¹⁵.

В 1944 г. М. Ливингстон¹⁶ опубликовал данные о новой, наиболее совершенной для того времени, установке. На циклотроне с диаметром полюсов 1050 мм были получены выдающиеся результаты. При разработке конструкции этого циклотрона Ливингстон учел полученные ранее результаты теоретических исследований и опыт эксплуатации всех действующих установок. Особое внимание было уделено коррекции магнитного поля. Для подстройки частоты резонансного контура впервые были применены конденсаторы переменной емкости с дистанционным управлением. Подвижные закорачивающие элементы резонансных линий были

снабжены пружинящими контактами и перемещались без нарушения вакуума. Для приема мощных пучков заряженных частиц была сконструирована и впервые применена вращающаяся мишень. Большинство операций по наладке и управлению ускорителем производилось дистанционно с центрального пульта управления. Несмотря на скромные размеры магнитной системы ускорителя, Ливингстону удалось ускорить на ней дейтроны до энергии 15 МэВ. Ток в выведенном пучке составлял 100 мкА.

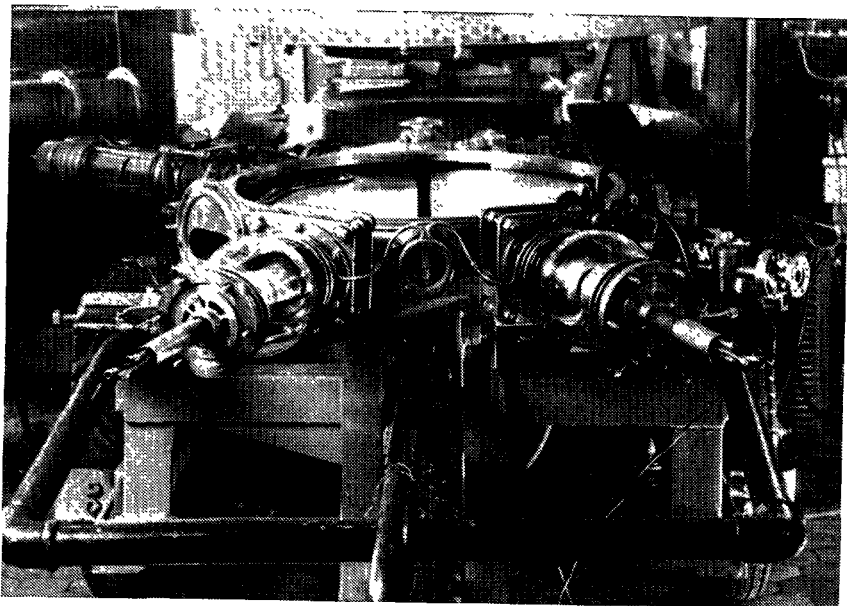


Рис. 3. Ускорительная камера циклотрона Института атомной энергии (Москва). Верхняя крышка камеры снята (1943 г.).

К этому же времени в США были разработаны и освоены гелиевые течеискатели, сильно облегчившие испытание на вакуум установок с большим откачиваемым объемом и многочисленными уплотнениями.

В 1947 г. под руководством Л. М. Неменова и А. А. Чубакова был введен в действие полутораметровый циклотрон Института атомной энергии АН СССР¹⁷. На этом циклотроне была применена отклоняющаяся система с неоднородным электрическим полем, осуществлявшая, помимо отклонения пучка заряженных частиц, их фокусировку в горизонтальном направлении. Проведенные исследования отклоняющей системы с гиперболическим сечением электродов в дальнейшем были положены в основу расчетов подобных систем в СССР. Были применены дополнительные, включенные навстречу друг другу, обмотки на полюсах электромагнита, позволявшие, не нарушая условия резонанса, перемещать медианную поверхность магнитного поля. Это устройство значительно облегчило корректировку магнитного поля. Циклотрон имел дистанционное управление с центрального пульта и самую совершенную биологическую защиту, примененную в мировой практике.

В 1952 г. Р. Ливингстоном¹⁸ была описана самая крупная в мире циклотронная установка, созданная в Окридже (диаметр полюсов электромагнита 2100 мм). На ней была получена рекордная энергия протонов — 24 МэВ, при токе на конечном радиусе 1 мА. Установка была сконструирована специально для работ с внутренними мишенями. Электромагнит

имел С-образную форму. Чтобы избежать прогиба штоков, на которых крепятся дуанты, был выбран не обычный горизонтальный вариант расположения камеры между полюсами электромагнита, а вертикальный. Разность потенциалов между дуантами составляла 440 кВ. Чтобы обеспечить электрическую прочность, дуантам дополнительно сообщался постоянный отрицательный потенциал 1000 В. Это стало возможным в результате изоляции штоков от бака резонансной линии. Ливингстон поместил оба штока в один общий бак. Для снижения уровня наведенной активности впервые была применена экранировка графитом внутренних поверхностей дуантов. Этот циклотрон следует рассматривать как первый вариант установки промышленного типа для приготовления радиоизотопов.

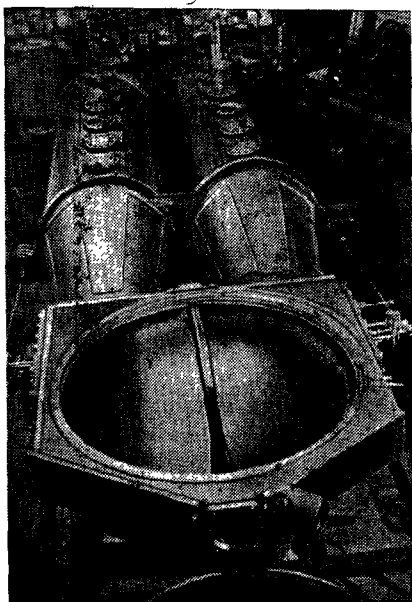


Рис. 4. Ускорительная камера с резонансными линиями и дуантами М. Ливингстона.

Верхняя крышка камеры снята. В этой камере получены дейтроны с энергией 15 МэВ при токе на конечном радиусе 1 мА (1944 г.).

ное число раз. Так, например, могут быть одновременно ускорены шестизарядные и двухзарядные ионы. Двухзарядные ионы при ускорении теряют электроны в результате «обдирки» на остаточном газе. Образованные таким образом шестизарядные ионы ускоряются до конечного радиуса. Этот метод позволил на Бирмингемском циклотроне ускорить ионы $^{12}\text{C}^{6+}$ до энергии порядка 120 МэВ.

В 1955 г. Каро, Мартин и Роуз опубликовали данные о Мельбурнском циклотроне. Энергия протонов менялась от 2 до 12,5 МэВ, а дейтронов — от 4 до 6,3 МэВ. Магнитное поле циклотрона при этом менялось с помощью электрических обмоток. Это была первая попытка создать классический циклотрон с регулируемой энергией ионов.

В том же году Торнтон и др. в Калифорнийском университете ²¹ построили циклотрон с диаметром полюсов 2250 мм. Установка предназначалась для получения моноэнергетических нейтронов в диапазоне энергий от 2 до 30 МэВ. Циклотрон позволял ускорять: протоны от 2,6 до 14 МэВ, дейтроны от 5,2 до 12,5 МэВ и ионы трития от 7,7 до 8,3 МэВ.

В том же году появилось сообщение из Стокгольма. Аттерлинг и Линдстрём ¹⁹ ввели в эксплуатацию циклотронную установку с полюсами электромагнита 2250 мм. Строительство этого циклотрона было начато в 1945 г. Установка фактически является аналогом циклотрона Р. Ливингстона в Окридже, за исключением того, что ускорительная камера расположена горизонтально, а электромагнит позволял получать большие индукции магнитного поля. Дейтроны на этом циклотроне были ускорены до 25 МэВ при токе на конечном радиусе 100 мкА. Циклотрон был предназначен для работы с внутренними мишенями и в дальнейшем был использован для исследований с многозарядными ионами.

В 1953 г. Уокер и Фремлин ²⁹ сообщили о новом способе ускорения многозарядных ионов, основанном на том, что в циклотроне можно одновременно ускорять ионы, частота обращения которых отличается в нечет-

Коррекция магнитного поля производилась электрическими обмотками, расположенными на крышках камеры.

Одновременно поступили сведения из Лос-Аламосской лаборатории о циклотроне с диаметром полюсов 1050 мм. Энергия ускоренных ионов менялась для протонов от 3,5 до 9 МэВ, дейтронов от 7 до 17,5 МэВ и ионов трития от 10,5 до 12 МэВ.

Но наибольшей достопримечательностью этого циклотрона было применение модификации азимутальной вариации магнитного поля по Томасу. По три 50-градусных железных сектора были расположены на каждой крышке вакуумной камеры. Это устройство обеспечивало, начиная с малых радиусов ускорения, фокусировку и увеличивало аксиальную устойчивость пучка. Этим же достигалось некоторое уменьшение порогового напряжения на дуантах. Для уменьшения расходимости выведенного пучка при прохождении им поля рассеяния магнита были применены железные клинья специальной формы. Это был прототип магнитного канала. Коррекция магнитного поля циклотрона осуществлялась специальными электрическими обмотками, расположенными как в вакуумной камере, так и в зазорах между полюсами магнита и крышками ускорительной камеры. На конечном радиусе этого циклотрона был получен ток ускоренных ионов 2 мА. Ток выведенного пучка составлял 100 мкА. Эту установку нельзя было еще назвать изохронным циклотроном, так как фазовые потери тока были еще очень велики, но попытка использовать идею Томаса была налицо.

С появлением магнитных квадрупольных линз задача фокусировки и транспортировки пучка резко упростилась. Исследуемые мишени и регистрирующая аппаратура устанавливаются в помещениях, экранированных защитными стенами, на значительных расстояниях от циклотрона.

В 1955 г. в СССР было начато проектирование самого крупного в мире циклотрона с диаметром полюсов 3000 мм (У-300), предназначенного для ускорения тяжелых ионов с целью синтеза трансурановых элементов. Ускоритель был введен в строй под руководством Г. Н. Флёрова в Дубне в 1961 г.²²

Начиная с 1953—1954 гг. в странах социалистического содружества начали интенсивно развиваться исследования в области физики атомного ядра. Германская Демократическая Республика, Польская Народная Республика, Социалистическая Республика Румынии и Чехословацкая Социалистическая Республика обратились к Правительству Советского Союза с просьбой поставить для них циклотроны. Требовалось, чтобы эти циклотроны были надежны в работе, сравнительно просты в эксплуатации и имели достаточно эффективную биологическую защиту. Типовой проект такого циклотрона — У-120 был осуществлен сотрудниками НИИЭФА и сотрудниками Института атомной энергии²³. Эти циклотроны были введены в действие в период 1957—1958 гг. и позволили получить необходимые навыки в эксплуатации подобных установок и проведении ядернофизических экспериментов.

В 1955 г. на Женевской конференции Лоуренс сделал сообщение об опытах, проводимых на электронных моделях с целью создания циклотрона с азимутальной вариацией магнитного поля. Опыты, проведенные на модели с полюсами магнита в виде «клеверного листа», с убедительностью показали возможность создания циклотрона с постоянной частотой ускоряющего напряжения, который позволит принципиально ускорять заряженные частицы до энергий, получаемых на современных фазотронах, но с гораздо большими токами частиц. С момента опубликования²⁴ эту дату можно считать вторым рождением замечательной идеи Томаса.

Заслуживает внимания опубликованная в том же году работа Керста и Саймона²⁵, в которой впервые рассмотрена возможность использовать в циклических ускорителях магнитные поля с пространственной вариацией, напряженность которых периодически изменяется как по азимуту, так и по радиусу. Преимущество использования таких полей в ускорителях циклотронного типа заключается в принципиальной возможности увеличения предельной энергии протонов вплоть до 1000 МэВ.

В 1957 г. в Институте атомной энергии был разработан и введен в эксплуатацию самый эффективный источник с подогревным катодом для получения многозарядных ионов²⁶.

В том же году Е. М. Мороз и М. С. Рабинович сделали предложение об использовании стационарных магнитных полей с пространственной вариацией²⁷.

В том же 1957 г. было опубликовано сообщение о запуске классического циклотрона в Институте ядерной физики Чехословацкой Академии наук.

В 1958 г. НИИЭФА совместно с Институтом атомной энергии был закончен проект серийного, наиболее совершенного, классического циклотрона с диаметром полюсов 1500 мм (У-150). Циклотрон позволял ускорять дейтроны до энергии 20 МэВ. Таких циклотронов было изготовлено четыре. Два из них позволяли выводить пучок ионов в специальное помещение с биологической защитой, расположенное на расстоянии 25 м от ускорительной камеры циклотрона. Один из них был сооружен в Алма-Ате и был введен в эксплуатацию в 1965 г.²⁸ Второй в том же году был введен в строй под руководством Н. Н. Краснова в Физико-энергетическом институте (Обнинск). В дальнейшем этот ускоритель был усовершенствован и в основном служил для приготовления изотопов.

Заслуживает внимания опубликованный в 1958 г. Блоссером и др.²⁹ проект четырехсекторного циклотрона с азимутальной вариацией магнитного поля.

В 1959 г. Р. Уолтон и др. впервые применили ЭВМ для расчета динамики движения ускоренных частиц.

Первым циклотроном с азимутальной вариацией магнитного поля, без существенных фазовых потерь пучка ионов, следует считать циклотрон Хейна с четырьмя секторами, сооруженный в Дельфте в 1958 г.³⁰. На нем протоны были ускорены до энергии 12 МэВ.

На основе теории фазового движения и пространственной устойчивости, развитой в Дубне, Харуэлле и Окридже в период 1953—1958 гг., в Дубне в 1959 г. под руководством В. П. Желепова и В. П. Дмитриевского³¹ была создана на базе циклотрона У-120 действующая модель большого крутоспирального изохронного циклотрона с шестью спиралями, укрепленными на крышках ускорительной камеры. Дейтроны на этой модели были ускорены до энергии 13 МэВ при напряжении высокой частоты на дуантах всего 5 кВ. На модели фазовых потерь не наблюдалось. Режим ускорения был изохронным.

В том же году на реконструированном циклотроне Института атомной энергии Ю. А. Завенягиным, Р. А. Мещеровым, Е. С. Мироновым, Л. М. Неменовым и Ю. А. Холмовским^{32, 33} были ускорены дейтроны в магнитном поле с азимутальной вариацией до энергии 24 МэВ. Вариация магнитного поля создавалась тремя секторами. Глубина модуляции поля составляла $\pm 15\%$. Коррекция формы магнитного поля осуществлялась электрическими обмотками.

Эти исследования были продолжены³⁴ в 1960 г. Предельная энергия дейтронов, ускоренных на полутораметровом циклотроне, составила рекордную цифру — 32 МэВ. Регулирование энергии ускоряемых ионов

было проведено в интервале значений индукции магнитных полей от 5 до 17 кГс. Токи в выведенном пучке достигали 70 мкА.

В 1962 г. В. П. Дзелеповым, В. П. Дмитриевским, Б. М. Замолотчиковым и В. В. Кольгой была выдвинута идея создания нового типа ускорителя — кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой³⁵. Теоретическая разработка и экспериментальное изучение динамики частиц, проведенное на электронной модели ускорителя, показали реальную возможность создания циклотрона на энергию 800 МэВ по протонам³⁶.

В 1962 г. сделано сообщение Института ядерной физики (Краков) о работе (начиная с 1957 г.) классического циклотрона с диаметром полюсов 480 мм. Источник ионов циклотрона имел вертикальное исполнение.

В начале 1963 г. последовало сообщение о введении в строй в Окридже (США) самого совершенного изохронного циклотрона с регулируемой энергией ионов³⁷. Диаметр полюсов ускорителя составлял 1930 мм. Число секторов — 3, дуант — 1 протяженностью 180°. Циклотрон позволял ускорять протоны до энергии 75 МэВ, дейтроны — до 40 МэВ. Ток в выведенном пучке составлял 100 мкА. Для корректировки магнитного поля служили многочисленные электрические обмотки. В резонансной системе применялись контакты с гидравлическим прижимом. Здание циклотрона имело оригинальную планировку помещений и хорошо продуманную систему разводки пучков. Этот ускоритель лег в основу последующих конструкций изохронных циклотронов и в течение многих лет являлся лучшим в мировой практике изохронным ускорителем.

В 1963 г. было сделано сообщение, что в Карлсруэ (ФРГ)³⁸ введен в действие изохронный циклотрон с диаметром полюсов 2250 мм. Циклотрон предназначался для ускорения дейтронов до фиксированной энергии 55 МэВ. Структура магнитного поля обеспечивалась тремя секторами протяженностью 60° каждый. Во впадинах размещались три дуанта. Резонансный контур включал в себя три коаксиальные линии. Каждый дуант мог извлекаться из ускорительной камеры индивидуально. Высокочастотное напряжение составляло 40 кВ. Благодаря наличию трех дуантов, частица за оборот получала приращение энергии в 240 кэВ. Для коррекции магнитного поля использовались 10 электрических обмоток. Размещение дуантов во впадинах позволило иметь минимальный зазор между полюсами магнита. На этом циклотроне были ускорены дейтроны до энергии 50 МэВ. Ток внутри ускорительной камеры составлял около 2 мА, а в выведенном пучке — 10 мкА. Источник ионов имел вертикальное исполнение. Многие идеи, заложенные в проект этого ускорителя, безусловно, оригинальны, но они привели к большому усложнению конструкций.

В этом же году Виллакс³⁹ сделал доклад о законченном проекте «мезонной фабрики», состоящей из двух ступеней. Первой ступенью — инжектором — служил изохронный циклотрон фирмы «Филлипс», ускоряющий протоны до энергии 70 МэВ. Второй ступенью являлся кольцевой изохронный циклотрон, ускорявший протоны до энергии 500 МэВ. С целью увеличения глубины вариации магнитного поля кольцевого циклотрона обычная магнитная система трансформировалась в систему с разделенными секторами. Такая магнитная структура позволила решить задачу создания высокоэффективной ускоряющей системы с помощью четырех резонаторов, расположенных в пространстве между магнитами. При этом набор энергии за оборот составлял 2,4 МэВ. Проект произвел сильное впечатление, но уже были заведомо видны трудности, с которыми должны были столкнуться авторы при его осуществлении.

1964 г. ознаменовался оригинальным исследованием, выполненным Г. Н. Вяловым, Ю. Ц. Оганесяном и Г. Н. Флэровым. Авторы впер-

вые в мировой практике предложили оригинальный вывод заряженных частиц методом перезарядки. Сделано это было на духметровом изохронном циклотроне в Дубне.

В 1965 г. появилось сообщение о сооружении в Милане (Италия) трехсекторного изохронного циклотрона с диаметром полюсов 1660 мм, на котором были ускорены протоны до энергии 45 МэВ.

В том же году был введен в эксплуатацию изохронный циклотрон в Харуэлле (Англия). Диаметр полюсов циклотрона составлял 1780 мм. Вариация магнитного поля осуществлялась тремя спиральными секторами. На этом ускорителе протоны были ускорены до энергии 50 МэВ. Ускорялись также многозарядные ионы.

Заслуживает особого внимания публикация Блоссера (1969 г.), о Мичиганском (США) трехсекторном изохронном циклотроне с диаметром полюсов 1700 мм, на котором протоны были ускорены до энергии 56 МэВ. За счет фазовой селекции пучка и отличной стабилизации параметров ускорителя были получены уникальные характеристики выведенного пучка (эмиттанс порядка 7 мм.мрад, энергетическая неоднородность — $2 \cdot 10^{-4}$).

В этом же году В. П. Дмитриевским ⁴⁰ было сделано сообщение о разработке проекта моноэнергетического циклотрона с уникальными параметрами. Максимальная энергия протонов — 80 МэВ, дейтронов — 60 МэВ, ³He — 120 МэВ и ⁶Li — 180 МэВ. Ток в выведенном пучке — порядка 100 мкА. Энергетический разброс в выведенном пучке $1 \cdot 10^{-4}$. Диапазон плавного изменения энергии 1 : 4.

В 1965 г. впервые в мировой практике на циклотроне Института атомной энергии (Москва) были ускорены ионы Li⁴¹.

В 1967 г. на VII Международной конференции по ускорителям высоких энергий (Кембридж) было опубликовано предложение о двухцикловом ускорении многозарядных ионов в одном циклотроне с промежуточной перезарядкой ионов ⁵⁴. Предложение было впервые реализовано в Окридже в 1972 г. ⁵⁵. Реализация этого предложения позволяет увеличивать предельную энергию ионов ускорителя в $(Z_2/Z_1)^2$ раз, где Z_1 — заряд иона до перезарядки, Z_2 — заряд иона после перезарядки.

В 1968 г. в Гренобле (Франция) был введен в эксплуатацию четырехсекторный изохронный циклотрон с диаметром полюсов 2120 мм. Протоны на этом циклотроне были ускорены до энергии 60 МэВ. Были ускорены также ионы ¹⁴N⁵⁺, ¹⁶O⁶⁺, ²⁰Ne⁶⁺ и ⁴⁰Ar⁶⁺. Циклотрон предназначался для ядернофизических исследований, а также для работы совместно с масс-спектрометром.

В том же году в Бонне (ФРГ) начал работать трехсекторный изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов. Диаметр полюсов магнита 2000 мм. На этом циклотроне протоны были ускорены в диапазоне энергий от 14 до 30 МэВ. Помимо этого ускорялись тяжелые ионы ¹²C⁴⁺ до 85 МэВ и ¹⁴N⁵⁺ до 100 МэВ. Циклотрон используется для спектрометрических исследований, исследований по времени пролета, работ совместно с масс-спектрометром и приготовления изотопов.

В 1969 г. в Институте ядерных исследований в Юлихе (ФРГ) введен в строй трехсекторный изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов. Диаметр полюсов электромагнита 3300 мм. Ускоритель имеет три дуанта. Конструкция этого циклотрона аналогична ускорителю, сооруженному в Карлсруэ (ФРГ) в 1963 г., но позволяет регулировать энергию ускоряемых ионов. Протоны на этом циклотроне ускорены в интервале энергий от 22,5 до 45 МэВ, дейтроны — от 45 до 90 МэВ, ³He — от 67 до 185 МэВ и ⁴He — от 90 до 180 МэВ. Ускоритель исполь-

зуется для ядернофизических исследований, приготовления изотопов и в области прикладной химии.

В 1971 г. в Дубне под руководством Г. Н. Флёрова ⁴² был осуществлен ускорительный комплекс, состоящий из двух циклотронов (классический циклотрон У-310 и изохронный циклотрон У-200). Ионы, ускоренные в первом циклотроне, инжектировались во второй. Во втором циклотроне устанавливалось перезарядное устройство, увеличивавшее зарядность ионов, что приводило к существенному увеличению энергии ускоряемых ионов. Система была создана для исследования взаимодействия тяжелых ионов с веществом и синтеза новых трансурановых элементов.

В 1972 г. в Институте ядерной физики (Алма-Ата), под руководством А. А. Арзуманова и Л. М. Неменова, впервые в СССР был введен в эксплуатацию полутораметровый, трехсекторный изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов ⁴³. На циклотроне были ускорены протоны от 7 до 30 МэВ, дейтроны — от 14 до 25 МэВ, α -частицы — от 29

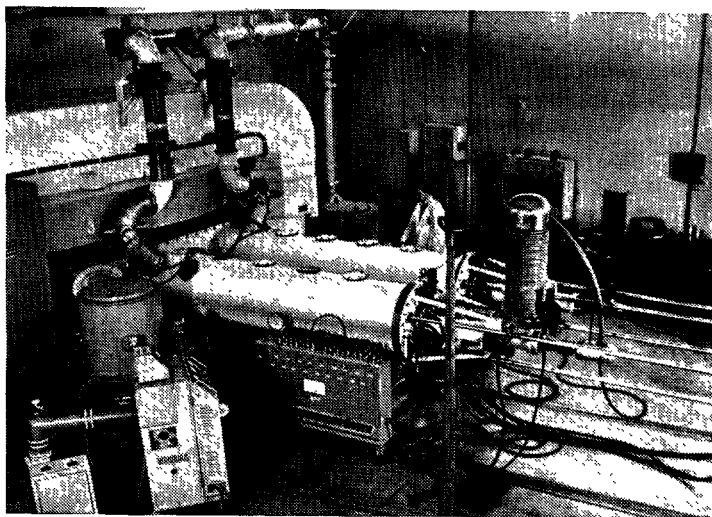


Рис. 5. Общий вид казахстанского (Алма-Ата) изохронного циклотрона (1971 г.). Видны разделенные секторы и резонаторы в промежутках между ними (1974 г.).

до 50 МэВ при токах в выведенном пучке до 50 мкА. Ионы гелия-3 ускорены в интервале энергии от 18 до 62 МэВ. Все операции по управлению циклотроном осуществлялись дистанционно. Пучок ускоренных ионов транспортировался в экспериментальный зал, удаленный на 25 м. Изохронный циклотрон был сооружен на базе полутораметрового классического циклотрона У-150.

В том же году была опубликована работа В. П. Дмитриевского, В. В. Кольги и Н. И. Полумордвиновой ⁴⁴, теоретически показавших возможность существенного разделения орбит в циклотроне с пространственной вариацией магнитного поля. При определенных условиях этот метод может обеспечить 100%-ный вывод пучка из циклотрона. В 1974 г. этот способ был проверен экспериментально на электронной модели циклотрона ⁴⁵.

В 1973 г. в Мериленде (США) вошел в строй четырехсекторный изохронный циклотрон с диаметром полюсов 2670 мм, позволяющий ускорять протоны до рекордной энергии — 100 МэВ.

В этом же году в Лувене (Бельгия) введен в строй изохронный циклотрон, ускоряющий протоны до энергии 80 МэВ, а в Гронингене (Голландия) закончен сооружением четырехсекторный изохронный циклотрон с диаметром полюсов 2800 мм, на котором протоны были ускорены до энергии 70 МэВ.

В этом же году в Национальном институте радиологических исследований (Япония) был введен в эксплуатацию изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов. Циклотрон имел диаметр полюсов магнита 2150 мм. Вариация магнитного поля создавалась четырьмя спиральными секторами. Протоны ускорялись от 8 до 70 МэВ, дейтроны — от 16 до 43 МэВ и ионы гелия — от 32 до 86 МэВ. Ускоритель в основном используется для приготовления изотопов и нейтронной терапии.

Выдающимся событием 1974 г. было введение в Цюрихе (Швейцария) в эксплуатацию первой в мире циклической мезонной фабрики (SIN), проект которой был доложен в Женеве в 1963 г. Протоны были ускорены до энергии 590 МэВ. Токи пучка достигали 100 мкА.

В 1975 г. закончен сооружением в Индиане (США) кольцевой изохронный циклотрон с разделенными секторами, позволяющий ускорять протоны до энергии 200 МэВ (конечный радиус ускорения 3300 мм). Ускорительный комплекс включал в себя помимо кольцевого циклотрона еще два предварительных каскада (высоковольтная трубка и циклотрон-инжектор).

В том же году поступает сообщение, что на изохронном циклотроне в Осаке (Япония) протоны были ускорены до энергии 75 МэВ.

Безусловно, крупным событием этого года было сообщение о сооружении в Ванкувере (Канада) изохронного циклотрона «Триумф»⁴⁶. Стремление получить высокоэффективный вывод пучка заряженных частиц привело к созданию оригинального проекта шестисекторного изохронного циклотрона с диаметром полюсов 17 м. Отрицательные ионы водорода ускорялись в циклотроне с индукцией магнитного поля, составлявшей лишь 5 кГс. На конечном радиусе ускорителя устанавливалась перезарядная мишень, после прохождения которой практически весь пучок выводился из ускорительной камеры. На этом циклотроне ионы водорода были ускорены до энергии 520 МэВ.

В последние годы (1978 г.) той же группой рассматривается проект создания трехступенчатого ускорителя, который позволит ускорять протоны до 8,5 ГэВ. Инжектором будет служить «Триумф», из которого протоны, ускоренные до 450 МэВ, будут поступать в кольцевой изохронный циклотрон радиусом 10 метров с 15-тью секторами. Протоны, ускоренные до 3 ГэВ, впускаются в следующий кольцевой ускоритель радиусом 20 метров с 30 секторами, где ускоряются до энергии 8,5 ГэВ. Предполагается, что магниты второй и третьей ступени будут иметь сверхпроводящие обмотки. Ускоряющая система кольцевых циклотронов состоит из резонаторов, аналогичных резонаторам ускорителя в Цюрихе.

В 1977 г. А. В. Степановым и др.⁴⁷ были опубликованы данные о сооруженном в 1974 г. в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова компактном изохронном циклотроне с диаметром полюсов 1030 мм, предназначенном для ускорения ионов водорода и гелия в широком диапазоне энергий. Структура магнитного поля трехсекторная — «слабоспиральная». Источник ионов аксиального типа. Вывод пучка при помощи электростатической отклоняющей системы и радиальнофокусирующего магнитного канала.

В 1978 г. в Киеве под руководством Ю. Г. Басаргина, А. Ф. Линева и Р. Н. Литуновского введен в действие самый крупный в СССР трехсекторный изохронный циклотрон У-240 с регулируемой энергией ионов. Диаметр полюсов циклотрона 2400 мм. Пока полностью отработаны

режимы эксплуатации с выведенным пучком до энергии 80 МэВ по протонам. Циклотрон оснащен самыми современными устройствами для диагностики и исследования качества пучка, а также соответствующей автоматикой.

В этом же году в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова под руководством Н. И. Веникова введен в эксплуатацию полутораметровый трехсекторный спиральный изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов ⁴⁸. Коррекция формы магнитного поля осуществляется 18 парами электрических обмоток. В ускорительной камере установлено 9 пар пикап-электродов для индикации изохронности режима.

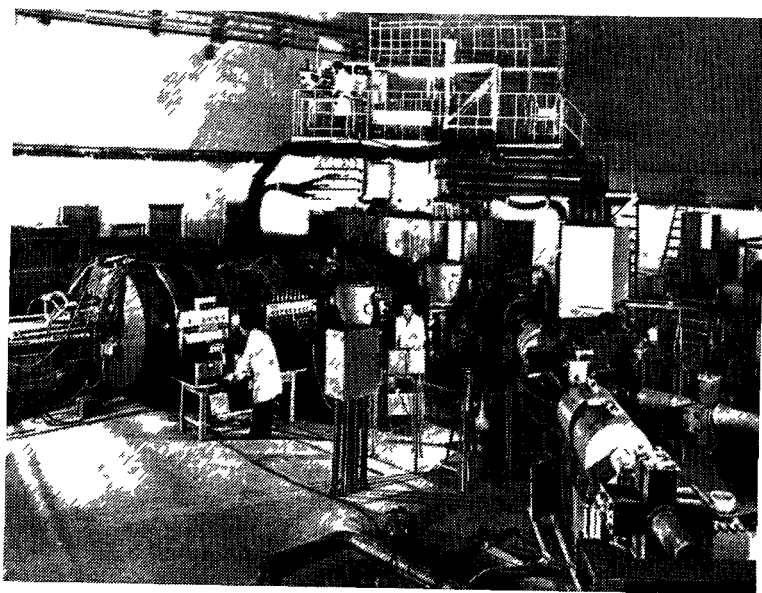


Рис. 6. Общий вид изохронного циклотрона У-240 (1977 г.).

На дуантах установлены щелевые фокусирующие диафрагмы. Энергия ускоряемых ионов регулируется в широком диапазоне. Протоны ускорены до энергии 35 МэВ, ионы ³He — до 70 МэВ, дейтроны — до 30 МэВ. Получены лучшие в мировой практике интенсивности в пучке таких ионов, как ⁷Li³⁺, ⁹Be³⁺, ¹²C⁴⁺, ¹⁴N⁵⁺, ¹⁶O⁶⁺.

В Калькутте (Индия) введен в эксплуатацию трехсекторный изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов. Диаметр полюсных наконечников 2240 мм. Протоны ускорены от 6 до 60 МэВ, дейтроны — от 12 до 65 МэВ. Ток в выведенном пучке 100 мкА.

В Институте ядерных исследований им. Гана и Мейтнер (Западный Берлин) вошел в строй изохронный циклотрон с разделенными секторами. Диаметр полюсов 3800 мм. Инжектором служит электростатический генератор на 6 МэВ. Протоны ускорены до 50 МэВ, He — до 200 МэВ и Ag — до 200 МэВ.

В этом же году научными сотрудниками Дубны и Чехословацкой Социалистической Республики на базе классического циклотрона У-120 разработан и создан изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов. Циклотрон позволяет ускорять протоны от 12,5 до 40 МэВ, дейтроны — от 8,4 до 20,3 МэВ и ионы ³He⁺² — от 16,9 до 54,4 МэВ. Впер-

вые в мировой практике на циклотроне с диаметром полюсов 1200 мм с регулируемой энергией ионов протоны ускорены до 40 МэВ ⁴⁹

Один из крупнейших комплексов для ускорения многозарядных ионов (Ганил) сооружается в Каэне (Франция) ⁵⁰. Ускоритель будет иметь три ступени: первая — небольшой циклотрон, вторая — изохронный циклотрон с разделенными секторами диаметром 6900 мм. После обдирки ионы инжектируются в третью ступень — изохронный циклотрон, аналогичный второй ступени. Комплекс обеспечит ускорение ионов С до 100 МэВ/нуклон, ионов Кг — до 50 МэВ/нуклон, ионов U — до 8 МэВ/нуклон. Ускоритель предполагается ввести в действие в 1982 г.

Как известно, для увеличения энергии ускоряемых в циклотроне ионов существуют два пути: увеличение конечного радиуса ускорения и увеличение напряженности магнитного поля. Ускорительная техника вначале шла по первому пути, увеличивая размер полюсных наконечников магнита. Дальнейшее увеличение размеров вело к чрезмерному весу электромагнита и к громадной мощности источников питания обмоток. Эксплуатация таких установок становилась чрезвычайно дорогой.

В последние годы учеными многих стран с целью повысить напряженность магнитного поля рассматривается вопрос об использовании электромагнитов со сверхпроводящими обмотками. Такое решение вопроса позволяет значительно уменьшить габариты электромагнитов и удешевить их эксплуатацию. Экономические подсчеты показали, что применение таких магнитов, несмотря на конструктивные трудности и дорогостоящие обмотки, представляется рентабельным.

В 1978 г. на VIII Международной конференции по циклотронам и их применению (Блумингтон, Индиана, США) были сделаны два доклада об изохронных циклотронах со сверхпроводящими обмотками.

Х. Г. Блоссер сделал сообщение ⁵¹ о трехсекторном изохронном циклотроне со сверхпроводящими обмотками для ускорения тяжелых ионов (Мичиган, США). Диаметр полюсов циклотрона 1420 мм. Максимальная напряженность магнитного поля — 58 кЭ, минимальная — 49 кЭ, среднее поле — 43 кЭ. Вес обмотки (Ne, Ti) — 8 тонн. В криостате при температуре жидкого гелия находятся только обмотки. Ионы $^{12}\text{C}^{5+}$ будут ускорены до 800 МэВ, $^{20}\text{Ne}^{6+}$ — до 900 МэВ, $^{40}\text{Ar}^{8+}$ — до 800 МэВ и $^{78}\text{Kr}^{8+}$ — до 410 МэВ. Ускоритель войдет в строй в 1980 г. Этот циклотрон в дальнейшем предполагается использовать как инжектор в больший ускоритель с разделенными секторами.

На этой же конференции группой ученых было сделано сообщение о четырехсекторном изохронном циклотроне со сверхпроводящими обмотками в Чок-Ривер (Канада) ⁵². Диаметр полюсов электромагнита — 1386 мм. Максимальная напряженность магнитного поля — 60 кЭ, минимальная — 50 кЭ, среднее поле — 43 кЭ. Вес обмотки (Nb, Ti) — 10 т. Инжектором в циклотрон служит электростатический генератор на 13 МэВ. Циклотрон предназначен для ускорения тяжелых ионов от Li (50 МэВ/нуклон) до U (10 МэВ/нуклон). До температуры жидкого гелия охлаждаются только обмотки магнита, помещенные в криостат. Ускоритель предполагается ввести в действие в 1984 г.

В 1979 г. в Дубне (СССР), под руководством Г. Н. Флёрова и Ю. Ц. Оганесяна, введен в действие один из крупнейших в мире изохронных циклотронов для ускорения тяжелых ионов — У-400 ⁵³. Диаметр полюсов электромагнита составляет 4000 мм. В отличие от подобных ускорителей, среднее магнитное поле циклотрона очень велико — 20 — 22 кЭ. Вывод пучка из циклотрона осуществляется путем перезарядки ионов на внутренней мишени. Получен ток до $3 \cdot 10^{13}$ частиц/с для ионов $^{40}\text{Ar}^{4+}$ и $^{40}\text{Ca}^{4+}$, ускоренных до энергии 5,5 МэВ/нуклон.

Предполагается в дальнейшем использовать циклотрон У-400 как инжектор в изохронный циклотрон с разделенными секторами и сверхпроводящими обмотками. Конечный радиус ускорения 5500 мм. Такой комплекс позволит осуществить ускорение ионов в диапазоне от He до U, при энергии ускоренных ионов от 256 до 50 МэВ/нуклон.

В настоящее время на всех континентах земного шара зарегистрировано и эксплуатируются около 100 циклотронов. Помимо ядернофизических исследований циклотроны широко применяются для решения прикладных задач (приготовление радиоактивных изотопов, имплантация примесей в полупроводники, создание фильтров и т. д.), а также в медицине для терапевтического лечения.

В заключение нельзя не остановиться на факторах, способствовавших развитию циклотронной техники. В первую очередь это были все более высокие требования к ускорителям, предъявляемые физиками, исследующими взаимодействие заряженных частиц с веществом. Способствовали этому также многочисленные теоретические исследования, раскрывавшие новые возможности циклотрона.

Все чаще к сооружению ускорителей привлекается промышленность. Выдающиеся достижения радиоэлектроники позволяют осуществлять устройства, которые в недалеком прошлом казались фантазией. Совершенствование электронно-вычислительных машин раздвинуло границы исследований динамики частиц. Расчеты, занимавшие годы, стали осуществляться за недели. Трудоемкие процессы по формированию и измерению магнитных полей с появлением полуавтоматов и автоматов, связанных «на прямую» с ЭВМ, позволили решать эту сложную задачу в обозримые сроки. На основе электроники появились надежные способы стабилизации параметров ускорителя, комплексы для диагностики и исследования качества пучка. Все это оснащается современной автоматикой. Развитие ионной оптики позволило решать вопросы фокусировки и транспортировки выведенных пучков на совершенно новом уровне. Таким образом, очевидно, что успехи ускорительной техники неотделимы от технической революции, осуществившейся за последние десятилетия.

Какие же требования нужно предъявлять к вновь сооружаемым ускорителям?

По-видимому, новый ускоритель должен качественно отличаться от своих предшественников и давать возможность расширить исследования как в области фундаментальных, так и прикладных наук.

Основными требованиями, предъявляемыми к современному ускорителю, являются: предельно достижимая энергия ускоренных ионов, интенсивность выведенного пучка, минимальный энергетический разброс ионов в выведенном пучке и заданный эмиттанс пучка в зависимости от характера проводимых исследований. Необходимо иметь возможность регулировать энергию ускоряемых ионов в широком диапазоне и обеспечить ускорение как легких, так и тяжелых ионов от водорода до урана.

Создание ускорителя, удовлетворяющего одновременно всем этим требованиям, практически не является реальным, поэтому в каждом отдельном случае приходится находить компромиссное решение.

На наш взгляд, при проектировании нового ускорителя следует действовать целенаправленно, не создавая универсальной установки. Универсальность, как правило, усложняет и удорожает установку и не позволяет создавать ускоритель с уникальными параметрами. К тому же универсальные установки за счет своей сложности работают менее надежно. Наиболее рациональным является четкий выбор круга решаемых задач и создание ускорителя целевого назначения. Анализ истории развития циклотрона дает тому убедительные доказательства.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Lawrens E. O., Edlefsen N. E.— *Science*, 1930, v. 72, p. 376.
2. Lawrens E. O., Cooksey D.— *Phys. Rev.*, 1936, v. 50, p. 1131.
3. Lawrens E. O., Cooksey D.— *Ibid.*, 1937, v. 86, p. 411.
4. Rukavishnikov V. N.— *Phys. Rev.*, 1937, v. 52, p. 1077.
5. Циклотронная лаборатория ФТИ им. А. Ф. Иоффе.— Л., 1966.
6. Dunning I. R., Anderson— *Phys. Rev.*, 1938, v. 53, p. 334.
7. Rose M. E.— *Ibid.*, p. 675, 715.
8. Хургин Я. Л.— *ДАН СССР*, 1938, т. 19, с. 237.
9. Wilson R. R.— *Phys. Rev.*, 1938, v. 53, p. 213; 240, 408.
10. Thomas L. N.— *Ibid.*, 1938, v. 54, p. 580, 588.
11. Векслер В. И.— *ДАН СССР*, 1944, т. 43, с. 363; т. 44, с. 393.
12. McMillan E. M.— *Phys. Rev.*, 1945, v. 68, p. 143.
13. Lawrens E. O. et al.— *Ibid.*, 1939, v. 56, p. 124.
14. Wilson R. R.— *J. Appl. Phys.*, 1940, v. 11/12, p. 781.
15. Неменов Л. М.— *АЭ*, 1978, т. 44, с. 17.
16. Livingston R. S.— *J. Appl. Phys.*, 1944, v. 15, p. 128.
17. Неменов Л. М., Калинин С. П., Кондрашев Л. Ф., Миropов Е. С., Наумов А. А., Панасюк В. С., Федоров Н. Д., Халдин Н. Н., Чубаков А. А.— *АЭ*, 1957, т. 11, с. 36.
18. Livingston R. S.— *Nature*, 1952, v. 169, No. 4299, p. 476; v. 170, No. 4319, p. 221.
19. Atterling H., Lindström G.— *Nature*, 1952, v. 169, No. 4298, p. 432.
20. Walker D., Fremlin I. H.— *Nature*, 1953, v. 171, p. 189.
21. Thornton R. L. et al. *Cyclotrons Designed for Precision Fast Neutron Cross Section Measurements. 1955: Доклад 584, представленный США на Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии. Женева.*
22. Вялов Г. Н.— *Природа*, 1966, № 10, с. 42.
23. Алексеев А. Г., Гашев М. А., Дондыш Д. Л., Малышев И. Ф. и др.— *АЭ*, 1959, т. 7, с. 148.
24. Smith B. N., MacKenzie K. R.— *Rev. Sci. Instr.*, 1956, v. 27, p. 485.
Ruby L., Heusikveld et al.— *Ibid.*, p. 490.
Kelli E. L., Pyle R. V. et al.— *Ibid.*, p. 493.
25. Kerst D. W. et al.— *Bull. Am. Phys. Soc.*, 1955, v. 30, No. 1.
26. Морозов П. М., Маков Б. Н., Иоффе М. С.— *АЭ*, 1957, с. 272.
27. Мороз Е. М., Рабинович М. С.— *ПТЭ*, 1957, № 1, с. 15.
28. Неменов Л. М., Анисимов О. К., Арзуманов А. А. и др.— *Изв. АН КазССР*, 1966, № 2, с. 3.
29. Blosser H. G., Worsham R., Goodman G., Livingston R. S. et al.— *Rev. Sci. Instr.*, 1958, v. 29, p. 819.
30. Нейн F., Khoe Kong Tat.— *Ibid.*, p. 662.
31. Василевская Д. П., Глазов А. А., Данилов В. И., Денисов Ю. Н., Джелепов В. П., Дмитриевский В. П. и др.— *АЭ*, 1959, т. 6, с. 657.
32. Zavenyagin Z. A., Metsherov R. A., Mironov E. S., Nemecnov L. M., Kholmovsky I. A. In *Proc. of the Intern. Conference on High Energy Accelerators and Instrumentation — CERN, 1959.*— p. 225.
33. Мещеров Р. А., Миронов Е. С., Неменов Л. М., Рыбин С. Н., Холмовский Ю. А.— *АЭ*, 1960, т. 8, с. 201.
34. Арзуманов А. А., Мещеров Р. А., Миронов Е. С., Неменов Л. М., Рыбин С. Н., Холмовский Ю. А.— *АЭ*, 1962, т. 12, с. 12.
35. Джелепов В. П., Дмитриевский В. П., Замолодчиков Б. М., Кольга В. В.— *УФН*, 1965, т. 85, с. 651.
36. Аносов В. Н., Заплатин Н. Л. и др.— *АЭ*, 1968, т. 25, с. 593.
37. Livingston R. S.— In: *International Conference on Sector-Focused Cyclotrons and Meson Factories — CERN, 1963.*— P. 1.
38. Steimel H.— *Ibid.*— P. 23.
39. Willax H. A.— *Ibid.*— P. 386.
40. Дмитриевский В. П.— В кн. *Материалы рабочего совещания по ионоэнергетическому циклотрону.*— Дубна, 1969.
41. Vasiljev P. et al.— *Nucl. Instr. and Meth.*, 1969, v. 71, p. 201.
42. Шелаев И. А. и др. *Преприят ОИЯИ Р9-6062.*— Дубна, 1961.
43. Арзуманов А. А., Неменов Л. М., Баталов С. С. и др.— В кн. *Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц.*— 1972.— Ч. II, с. 231.
44. Дмитриевский В. П., Кольга В. В., Полумордвинова Н. И. *Преприят ОИЯИ Р9-6733*— Дубна, 1972.

45. Vasilenko A. T., Zaplatin N. L. et al. Preprint JINR Dubna, 1974, E9-8443.
46. Burgerjon J. J. et al.—IEEE Trans., 1973, v. NS-3, p. 243.
47. Галаев А. Н., Гальчук А. В., Степанов А. В. и др. Препринт НИИЭФА В-0347.—Ленинград, 1978.
48. Бузлуков Ю. П., Венников Н. И. и др.—АЭ, 1978, т. 44, с. 270.
49. Аленицкий Ю. Г., Аносов В. Н., Василенко А. Т. и др. Препринт Р9-10382.—Дубна, 1977.
50. GANIL: A Proposal for a French Heavy-Ion Laboratory. In: Proc. of the 7th Intern. Conference on Cyclotrons and Their Applications.—Zürich, 1975.—P. 111.
51. Blosser H. G. In: Proc. of the 8th Intern. Conference on Cyclotrons and their Applications.—Bloomington, Indiana, USA, 1978.—P. 2040.
52. Ogmrod J. H.—Ibid.—P. 2034.
53. Оганесян Ю. Ц. Препринт РЭ-12843.—Дубна, 1979.
54. Желепов В. П., Дмитриевский В. П., Замолотчиков Б. И., Кольга В. В.—In CEAL-2000 — P. 215.
55. Hudson E. D. et al.—IEEE Trans., 1973, v. NS-20, p. 173.