

УСКОРИТЕЛИ

А. А. ВОРОБЬЕВ

§ 1. Введение

В разные эпохи человечество проявляло интерес к различным крупным сооружениям. Строительство ускорителей в наш век сравнивают с сооружением пирамид древними и соборов в средние века.

Установки, в электрическом поле которых заряженные частицы: электроны, позитроны, ядра или ионы увеличивают свою энергию, называют ускорителями заряженных частиц.

В результате торможения ускоренных заряженных частиц происходит излучение сплошного спектра электромагнитных колебаний. Таким путем получают рентгеновские лучи и электромагнитное излучение, энергия которого значительно превосходит γ -излучение при радиоактивном распаде некоторых ядер атомов.

Взаимодействие частиц высокой энергии или тормозного излучения от ускорителей с атомными ядрами может применяться для получения нейтронов, мезонов, антипротонов и других элементарных частиц.

В 1919 году Э. Резерфорд, бомбардируя α -частицами вещество, осуществил искусственную ядерную реакцию и поставил тем самым задачу получения быстрых частиц для ядерных превращений,

Среди физических проблем, которые могут разрабатываться с помощью ускорителей на высокие энергии, называют спектроскопию ядер, рассеяние протонов на протонах и электронах, электронов на протонах и позитронах, фоторассеяние, комптон-эффект, проблемы электродинамики, реакции электронов с мезонами и другие.

Главным аргументом за сооружение ускорителей высоких энергий является наличие частиц высоких энергий в природе. В космических лучах обнаружены протоны с энергией 10^{12} — 10^{14} эв и даже указывали 10^{17} на протон. Спектр космических протонов имеет максимум в области 500 Мэв.

В циклических ускорителях электроны и протоны пролетают за время ускорения космические расстояния с космическими скоростями. Это были первые сооружения человека, в которых достигнуты космические масштабы.

Электроны и протоны в ускорителях на энергию несколько Мэв и выше движутся со скоростями, близкими к световой.

Для управления движением ускоряемых частиц необходимо применять средства автоматики, действующие с соответствующими большими скоростями.

Ранее ускорению электронов до высоких энергий уделялось меньше внимания по сравнению с ускорением протонов. Между тем ускоренные электроны обладают интересными присущими им свойствами и могут иметь свое применение. Высокая проникающая способность быстрых электронов и фотонов, возникающая при их торможении, нашла применение в терапии, дефектоскопии. Под действием фотонов при фото-ядерных реакциях высоких энергий наблюдается рождение мезонов. С помощью быстрых электронов возможна спектроскопия ядер, изучение структуры нуклонов. Немаловажным здесь является тот факт, что размерами самого электрона можно пренебречь и считать его точечным.

Вопросы структуры элементарных частиц стали рассматриваться тогда, когда с помощью ускоренных частиц проникли в области с линейными размерами $1-0,1$ ферми (1 ферми $= 10^{-13}$ см). Повышение энергии электронов позволит проникнуть в области с еще меньшими размерами порядка $10^{-2}-10^{-3}$ ферми, что приведет к открытию новых физических явлений и создаст возможность изучения структуры самого электрона, проблем гравитации, массы, энергии и др.

Получение электронов очень больших энергий — пока единственный способ экспериментального проникновения в область малых линейных размеров и глубокого изучения микромира. Для энергии электронов пока верхнего предела не названо. Приведенные выше рассуждения показывают интерес физиков к получению электронов высоких энергий.

Ускорители обеспечивают прогресс современной ядерной физики, физики твердого тела. Они применяются для изучения структуры атомных ядер и внутриядерных сил, получения новых элементов и элементарных частиц, в радиационной химии и физике.

Ускорители электронов применяются для стерилизации продуктов питания и медицинских препаратов тканей при хирургических операциях и др.

Для увеличения энергии и интенсивности ускоренных пучков частиц создаются накопительные установки, усовершенствуются ускорители для более полного использования возможностей известных методов ускорения, а также предлагаются и разрабатываются принципиально новые методы ускорения.

Во всех областях, связанных с сооружением ускорителей, высказывались различные научные и технические идеи. Для осуществления некоторых из них оказывались подходящие условия, были необходимые технические средства, материалы, аппаратура, и они получали свое практическое осуществление. Другие предложенные методы ускорения откладывались до подходящего случая или до развития необходимых технических средств до нужного уровня.

Иногда «преждевременно» высказанные, физически возможные способы ускорения забывались и спустя некоторое время высказывались другими исследователями вновь. Авторство потом восстанавливалось только после специальных исторических изысканий.

Каждый раз, когда предлагался новый способ ускорения, некоторым казалось, что найдено абсолютное решение проблемы ускорения зарядов до сколь угодно больших энергий и что только инженерно-экономические проблемы задерживают сооружение ускорителя на любые желаемые параметры.

Затем по мере разработки каждого метода обнаруживались противоречия и, наконец, появлялось главное противоречие. Оно определяло физический предел достижимой частицами максимальной энергии. В случае циклических ускорителей главным противоречием является

излучение электромагнитной энергии зарядом, движущимся по криволинейной орбите.

Для линейного и циклического ускорений необходима устойчивость движения частиц, а практически возникают при движении неустойчивости, в том числе и за счет излучения. Разработка каждого метода происходила в борьбе противоречий процесса. Достигнутый уровень развития на каждом этапе определялся уровнем развития сопредельных отраслей науки и техники и экономическими факторами.

Интересно показать основную тенденцию развития методов и средств ускорения в результате борьбы главных противоречий, а именно требуемой устойчивости и возникающей неустойчивости при движении частиц и путей преодоления неустойчивости. Ускорительная практика за прошедший период хорошо иллюстрирует общие законы теории познания, показывая развитие метода ускорения в результате борьбы противоречий с учетом экономического фактора при этом.

Достижимый уровень на каждом этапе развития ускорителей определялся материальными ресурсами страны, состоянием ее экономики, техники и науки.

Острые научные дискуссии проблемы верхней границы энергий, достигаемой в ускорителях, содействовали тому, что сейчас имеются весьма детальные теории различных методов ускорения.

Время, когда ускорители строились на основании грубого расчета, уже миновало.

В настоящее время теория ускорения и вычислительная техника позволяют, до начала строительства, детально рассмотреть линейные и нелинейные задачи и промоделировать многие интересные явления в будущем ускорителе на аналоговых устройствах.

Опыт, полученный на уже работающих машинах, показывает, что теоретические исследования дают достаточно точные результаты. Машины и ускорители, построенные в соответствии с теоретическими расчетами, запускаются легко, их работа является надежной и удовлетворительно регулируемой.

В составлении этого очерка автор избегал описания многих осуществленных совершенных схем и конструкций ускорителей, имея в виду, что они будут заменены в ближайшее время еще более совершенными. Эти материалы уместны для более специальных и узких научных исследований. Важно и трудно было найти существенно необходимое, определявшее направление развития ускорителей.

С другой стороны следовало также дать фактические материалы, чтобы в изложении не получилась абстрактная схема, лишенная практического интереса.

В этой работе интересно было изложить историю методов ускорения и ускорителей не как сумму отдельных фактов, случайных открытий и событий, а как имевший свою логику процесс развития в результате борьбы противоречий.

При таком методе изложения предмета исследования удалось бы получить стройное единство, показать законы развития в прошлом и сделать научные прогнозы.

Поставленная задача будет рассмотрена на примере циклических ускорителей, различные типы которых А. А. Коломенский и А. Н. Лебедев объединяют в следующей таблице.

Виды циклических ускорителей

Управляющее траекторией магнитное поле	Тип фокусировки	
	слабая	сильная
Постоянное во времени	Циклотрон, фазотрон (синхроциклотрон), микро- трон, стахатрон, (со слабой фокусировкой)	Кольцевой фазотрон радиального и спирального типа с резонансным и индукционным ускорением, изо- хронный циклотрон с азимутальной или спиральной вариацией магнит- ного поля.
Переменное во времени	Синхротрон, синхрофазот- рон и бетатрон	Синхротрон, синхрофазотрон и бе- татрон

§ 2. Циклотроны

Сооружение линейных ускорителей большой длины имеет значительные трудности, поэтому были разработаны способы сворачивания траектории частиц в замкнутый круг, эллипс или развертывающуюся спираль. Управление траекторией тогда осуществляется с помощью постоянного или нарастающего во времени управляющего магнитного поля.

Первым ускорителем со спиральной траекторией был циклотрон Лоуренса, сооруженный в 1931 г. в Калифорнийском университете. В Европе первый циклотрон был пущен в 1937 г. в Ленинграде, в радиовом институте.

В циклотроне синхронное ускорение происходит в промежутке между двумя U-образными электродами, на которые подается переменное напряжение. Частицы пересекают этот промежуток дважды за один период переменного напряжения. Пока половину периода тока частица движется по дуге окружности внутри пустотелого дуанта напряжение на промежутке меняется на противоположное, поэтому частица каждый раз проходя промежуток увеличивает свою энергию.

В начале считалось необходимым, что ускорение в циклотроне должно происходить в условиях точного резонанса. Затем стали допускать возможным, настраивать циклотрон на работу в условиях не точного резонанса, а с некоторыми допусками по фазам между моментом появления частицы в ускорительном промежутке и фазой напряжения на ускорительном промежутке. В условиях строгого резонанса имеется статическая продольная и поперечная устойчивость. Необходимость соблюдения строгого резонанса ограничивала максимальную, достижимую энергию и число частиц, ускоренных в циклотронах.

Частицы с постоянной массой m и зарядом e в однородном магнитном поле движутся по окружности радиуса

$$R = \frac{mc v}{eB}, \quad (1)$$

где c и v — скорость света и частицы,

B — магнитная индукция.

С ускорением частицы растет радиус R орбиты.

Период обращения частицы

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi mc}{eB} \quad (2)$$

не зависит от скорости.

Максимальная энергия протонов, достигнутая в циклотроне при напряжении на дуантах 440 кВ составляет 22 МэВ.

Релятивистское возрастание массы частицы с увеличением ее скорости приводит к отставанию по фазе и нарушению резонанса. Резонанс можно сохранить, если с ростом радиуса будет расти индукция так, чтобы в (2) отношение $\frac{m}{B}$ оставалось бы постоянным и сохранялась

изохронность $T = \text{const}$. Такое решение проблемы устойчивости движения невозможно, так как для магнитной фокусировки, обеспечивающей поперечную устойчивость движения частиц необходимо, чтобы магнитная индукция уменьшалась бы с увеличением радиуса, а не росла. Таким образом, возникает противоречие, а именно, меры, обеспечивающие фазовую продольную устойчивость, нарушают поперечную устойчивость.

В 1938 г. Томас предложил циклотрон с вариацией магнитного поля по азимуту, в котором можно преодолеть продольную неустойчивость, свойственную циклотрону со строгим резонансом. Для сохранения резонанса предложено периодическое изменение напряженности поля по азимуту. Закон изменения поля в соседних секторах задается такой, чтобы на их смежной границе возникали бы дополнительные слагающие скорости, направленные по радиусу к центру и к медианной плоскости.

Предложена также система со спиральной вариацией магнитных полей, обеспечивающая изохронность. В этой системе магнитное поле периодически изменяется около средней величины не только по азимуту, но и по радиусу.

Циклотроны с вариацией магнитного поля или с секторной фокусировкой (ЦСФ) последние годы привлекают большое внимание и уже работают во многих лабораториях. Теория позволяет надеяться на сооружение устойчиво работающих ускорителей протонов на энергию 800—900 МэВ.

В кольцевом изохронном циклотроне центральная область полюсов отсутствует. Частицы инжектируются в кольцо при энергии 70 МэВ от обычного ЦСФ и конечная энергия равна 500 МэВ, ограничивается резонансом $\gamma_r = 1,5$. Преимущества кольцевой машины по сравнению с обычной заключаются в возможности использовать несколько схем вывода и облегчения введения мишеней в камеру.

А. А. Глазов, Ю. Н. Денисов и др. разработали изохронный протонный циклотрон на энергию 700 МэВ.

Сейчас представляется, что наиболее перспективным ускорителем для получения пучков частиц с энергией до 1 ГэВ при токах порядка 1 мА, вместо 1 мкА, как это имеет место в синхроциклотронах, являются установки с непрерывным режимом работы типа изохронного циклотрона.

§ 3. Циклическое индукционное ускорение.

Бетатроны

Вокруг магнитного потока, меняющегося во времени, образуется вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты вокруг индуцирующего их потока. Электроны, двигаясь по силовым линиям вихревого поля, получают приращение своей энергии. Патент на метод индукционного ускорения взял в 1922 г. Слепьян.

В 1927 г. Видерое разработал теорию ускорителя и некоторые его конструктивные элементы.

В 1939 г. Рюденберг и Штеенбек предложили схему устройства индукционного ускорителя. В 1935 г. Штеенбек построил циклический индукционный ускоритель, содержащий основные узлы современного бетатрона и ту же схему действия.

В СССР исследования по индукционному методу в начале тридцатых годов начал инженер Московского трансформаторного завода В. В. Ясинский. В 1935 г. он опубликовал результаты теоретических исследований движения электрона в квазистационарном и переменном электромагнитном поле радиальной симметрии и предложил схему ускорителей.

В 1935 г. А. А. Воробьев и А. К. Красин в Томске начали исследования по индукционному методу.

Я. П. Терлецкий в 1941 г. опубликовал теоретические исследования движения релятивистских электронов в переменном магнитном поле осевой симметрии. Он показал, что в поле, напряженность которого уменьшается с увеличением радиуса и растет со временем, частица, пущенная перпендикулярно радиусу круговой орбиты, двигается по спирали на поверхности цилиндра, ось которого совпадает с осью поля. Величина такой спирали уменьшается с ростом скорости электрона. Я. П. Терлецкий дал релятивистское доказательство постоянства радиуса равновесной орбиты 2:1, исследовал поперечную устойчивость и заложил основы строгой теории индукционного циклического ускорения.

Первый действующий бетатрон был построен Керстом в 1941 г.

В СССР разработка бетатронов различного назначения и их внедрение в практику учреждений и предприятий главным образом связано с работами Томского политехнического института, изготовившего свыше 60 бетатронов, в котором эти разработки начались в 1945 г., а в начале 1947 г. начал работать бетатрон на 5 Мэв.

Учитывая биологическую опасность радиоактивных изотопов, А. А. Воробьев предложил и рассчитал возможность замены радиоактивных препаратов малогабаритными бетатронами. Такие бетатроны на энергию 3—10 Мэв были разработаны и сооружены под руководством Л. М. Ананьева и В. А. Москалева.

Б. А. Родимов и П. А. Черданцев построили теорию захвата электронов в ускорение, в которой считается, что основное влияние на захват оказывает взаимодействие электронных пучков. Ими была рассмотрена возможность бесколебательного захвата и даны предложения по сооружению сильноточного бетатрона.

В. А. Москалев разработал конструкции и соорудил бетатроны на 15,25 Мэв с большим ускоряемым зарядом. На выходе таких бетатронов получается заряд больше, чем 10^{12} электронов, и циркулирующий ток на орбите — сотни ампер.

Большая величина равновесного заряда на орбите получена за счет увеличения поперечного сечения ускорительной камеры и повышения на порядок напряжения инжекции. Одновременно решалась проблема вывода пучка из бетатронов.

В ТПИ были разработаны и осуществлены варианты трех методов вывода электронного пучка из камеры ускорителя:

1. С помощью электростатического отклонения пучка и различных типов дефлекторов, разработанных Б. А. Кононовым.

2. С использованием магнитных шунтов и безмагнитных туннелей, разработанных Л. С. Соколовым и Ю. М. Акимовым.

3. Методом возмущения магнитного поля дополнительными катушками, разработанным Л. С. Соколовым.

Величина среднего тока в выведенном пучке бетатрона на 15 Мэв достигает 10^{-8} а.

М. Ф. Филипповым была предложена теория, определяющая взаимозависимость основных размеров и параметров электромагнита бетатрона, камеры ускорителя и его находных параметров. В результате была получена простая система инженерного расчета вариантов ускорителя, хорошо оправдавшая себя в практике конструирования бетатронов.

Значительное влияние на развитие физической теории бетатрона имели работы А. П. Комара и его сотрудников, изучавших условия захвата электрона в ускорение в бетатронах.

ВСКБМЭЗ им. В. В. Куйбышева под руководством Б. Б. Гельнера разработаны и строятся бетатроны для дефектоскопии и терапии.

Теоретические исследования излучения релятивистских электронов в магнитном поле, опубликованные Д. Д. Иваненко и И. Я. Померанчуком, показали, что существует предел максимальной энергии, достижимой электронами в бетатроне. Этот предел определяется условием равенства величины прироста энергии на единицу пути и величины потерь энергии электрона на классическое излучение.

Работы Д. Д. Иваненко, И. П. Померанчука, Л. А. Арцимовича по излучению релятивистских заряженных частиц в циклических ускорителях, сыграли фундаментальную роль в их развитии, определив физически возможные пределы ускорения.

§ 4. Развитие циклических ускорителей релятивистских частиц

Наиболее существенной чертой циклического ускорителя на большие энергии является электромагнитное излучение частиц, мощность которого для электронов пропорциональна четвертой степени их энергии и обратно пропорциональна квадрату радиуса орбиты. Излучение нарушает устойчивость. Обеспечение устойчивости, компенсация потерь на излучение усложняют ускоритель, увеличивают потребляемую мощность.

Особенностью излучения электронов при высоких энергиях является его квантовый характер. На эту особенность обратили внимание в 1953 г. А. А. Соколов и И. М. Тернов. Ими было показано, что квантовый характер излучения приводит к возбуждению бетатронных колебаний электронов.

Для ускорителей частиц на высокие энергии важно учитывать квантовые эффекты. На основании квазиклассической теории излучения В. В. Владимирский и др. сначала считали, что квантовыми эффектами можно пренебречь, пока энергия кванта меньше энергии электрона, т. е. до энергии электронов в несколько тысяч Гэв. А. А. Соколов и И. М. Тернов, на основании строгой квантовой теории излучения, пришли к выводу, что квантовые эффекты для синхротрона со слабой фокусировкой должны проявляться в области энергий электрона ~ 1 Гэв.

Квантовые эффекты по А. А. Соколову влияют на интенсивность и угловое распределение излучения и бетатронные колебания. Квантовое уширение орбиты теоретически ограничивает предел энергии, достижимый в синхротроне со слабой фокусировкой на уровне 1—2 Гэв.

Коломенским А. А. и Лебедевым А. Н. эти же результаты были получены квазиклассическим методом.

Позже М. Сэндс на основе квазиклассической теории рассмотрел влияние квантовых флуктуаций на фазовые колебания. По его мнению квантовая раскачка фазовых колебаний должна ограничить предел

достижимой энергии 1 ГэВ в синхротроне со слабой фокусировкой. М. Сэндс на синхротроне 1,2 ГэВ исследовал зависимость времени жизни электронов от амплитуды ускоряющего напряжения на резонаторе. При энергии 1,2 ГэВ, вследствие возбуждения фазовых колебаний квантовыми флуктуациями излучения, происходит выпадение электронов из ускорения и снижение интенсивности излучения. К настоящему времени подробно разработана и теория, учитывающая влияние флуктуаций излучения на фазовые колебания.

Экспериментальные работы, выполненные Королевым Ф. А. на синхротроне ФИАН на 680 МэВ с использованием скоростной кинокамеры показали, что наблюдаемый поперечный размер пучка находится в хорошем согласии с теорией, учитывающей влияние излучения на бетатронные и фазовые колебания.

Работа, проводимая на синхротроне ТПИ на 1,5 ГэВ с одновременным использованием скоростной кинокамеры и электронно-оптического преобразователя с круговой разверткой, показала, что имеется хорошее согласие между теорией и экспериментом при определении влияния флуктуаций излучения как на бетатронные, так и фазовые колебания в отдельности.

Теоретически возможны варианты циклического ускорения электронов без выноса излучения из области движения электронов, с установлением режима их автоколебаний. Электрон, излучивший квант энергии, вновь получает его от когерентных источников. Осуществление варианта неизлучающего циклического ускорителя позволит поднять предел энергии, достижимый в ускорителе.

В циклическом ускорителе электрон, излучивший квант энергии, переходит на орбиту меньшего радиуса. Эта внешняя аналогия позволяет ускоритель сравнивать с атомом водорода по Бору. В атомной системе возможно движение электронов по кругу без излучения.

В сороковых годах А. А. Воробьев рассматривал ускоритель и накопитель как аналог атома и искал условия устойчивого обращения электронов без излучения.

Развитие циклических ускорителей релятивистских частиц происходило в следующих направлениях:

1. Разработки общей теории релятивистских ускорителей.
2. Совершенствования ускоряющих электрических и управляющих магнитных систем.
3. Внедрение идей и средств автоматического регулирования в ускорительную технику.
4. Разработки накопителей заряженных частиц.
5. Модернизация действующих ускорителей.
6. Разработка новых методов ускорения.

В развитии управляющих и ускоряющих систем можно отметить следующие интересные идеи. В 1950 г. Н. Кристофилос предложил при ускорении частиц периодически применять меры по увеличению аксиальной и радиальной устойчивости. Как и многие другие, это открытие было подготовлено предыдущим развитием науки. Наиболее полно обосновали принцип повышения устойчивости движения заряженной частицы в знакопеременных полях, получивший название сильной или жесткой фокусировки, летом 1952 г. Курант, Ливингстон и Снайдер.

Сильная фокусировка представляет собой частный случай проявления динамической устойчивости в поле быстроменяющихся сил для механических, электрических и оптических систем.

В первых резонансных циклических ускорителях-циклотронах оказалось возможным получать частицы с энергией несколько больше десяти МэВ. После формулирования принципа автофазировки, опре-

делившего условия продольной (азимутальной) устойчивости, оказалось возможным построить синхрофазотроны со слабой фокусировкой до 10 Гэв. Использование сильной фокусировки, автоматически обеспечивающей поперечную (радиальную и аксиальную) устойчивость, позволило построить ускоритель на несколько десятков Гэв и, вероятно, можно построить до 1000 Гэв.

Распространение сильной фокусировки на фазотроны было сделано в 1953 г. А. А. Коломенским, В. А. Петуховым и М. С. Рабиновичем в конструкции кольцевого фазотрона, магнитное поле которого изменяется не во времени, а в пространстве.

Конструкции сильноточных безжелезных циклических ускорителей, разработанные под руководством Будкера Г. И. и Наумова А. А., позволяют получать напряженности магнитного поля 140—200 Кэ в больших объемах. Это позволило построить компактные ускорители, размеры которых в 14—20 раз меньше по сравнению с существующими ускорителями на такие же энергии. Так как стоимость магнита в основном определяет стоимость ускорителя и сильно уменьшается с уменьшением радиуса; то безжелезные установки даже на энергии 100—1000 Гэв будут иметь еще приемлемые стоимости и размеры.

В сороковых годах А. А. Воробьев предложил для целей управления движением частицы в циклическом ускорителе применять магнитное поле цилиндрического резонатора или волновода. Позднее теория такой системы была разработана А. А. Воробьевым и Е. С. Коваленко.

К работам по усовершенствованию магнитных систем существующих ускорителей относятся исследования Орлова Ю. Ф. по нелинейной фокусировке.

В ускорителях с нелинейной фокусировкой частицы совершают устойчивые колебания из-за наличия знакопеременной фокусировки. В отличие от сильной фокусировки здесь частицы испытывают действие знакопеременных сил не из-за того, что проходят по азимуту последовательность фокусирующих и дефокусирующих секторов, а из-за того, что совершают большие радиальные колебания. Нелинейная фокусировка позволяет получать то же, что и сильная фокусировка, но достигается это в постоянных во времени аксиально однородных магнитных полях. Это позволяет также ускорять встречные пучки частиц.

Усовершенствование высокочастотных систем происходило в направлении:

- а) выбора оптимальных частот ускоряющих систем;
- б) использования волноводных ускоряющих устройств в циклических ускорителях.

На первой стадии развития релятивистских ускорителей вообще и синхротронов в частности выбору частоты уделяли мало внимания.

Частота ускоряющей системы выбиралась в основном в зависимости от наличия достаточно мощных высокочастотных генераторов. Обычно частота в. ч. генератора выбиралась равной частоте обращения частиц.

Основы для выбора частоты и мощности в. ч. питания теоретически были разработаны А. А. Воробьевым и А. Н. Диденко, Е. С. Коваленко, показавших, что для каждого синхротрона существует оптимальная частота, при которой мощность в. ч. генератора минимальна. Были предложены простые формулы для волноводных линейных и циклических ускорителей, позволяющие определять оптимальные частоты не только с учетом квантовых флуктуаций, но и других случайных факторов. Показано, что для ускорителей на энергии нескольких Гэв оптимальные частоты лежат в диапазоне 500—1000 мГц.

В Томском политехническом институте исследована электродинамика замкнутых волноводных ускоряющих устройств и динамика электронов в них, предложенных А. А. Воробьевым в качестве ускорительной системы релятивистских циклических ускорителей. Из сравнения электронного синхротрона на энергию 1 ГэВ с синхротроном на энергию 6—10 ГэВ следует, что синхротрон на большие энергии не является геометрически подобным синхротрону на энергии 1 ГэВ. В установках на 1 ГэВ используются большие резонаторы, поперечные размеры которых значительно больше размеров камеры. В больших установках эта разница уменьшается. Объясняется это тем, что с возрастанием энергии увеличивается оптимальная частота, при которой мощность в. ч. генератора будет минимальной, а следовательно, и уменьшаются размеры резонаторов. Возникает мысль: нельзя ли применить такую ускоряющую систему, которая могла бы размещаться в межполюсном пространстве и позволяла бы ускорять частицы не только на прямолинейных участках, а непрерывно. Это позволяет сократить время ускорения и проще компенсировать потери на излучение. Исследования показали возможность ускорения в замкнутых гладких волноводах и заполненных замедляющими системами, которые позволяют снизить фазовую скорость нужной электромагнитной волны до скорости частиц. Волноводные системы обладают по сравнению с резонаторами более высокими шунтовыми сопротивлениями. Это позволяет в таких системах получать те же приросты энергии наоборот, используя менее мощные в. ч. генераторы. Такие системы могут быть использованы там, где резонансные системы могут быть использованы вообще, как это имеет место в безжелезных ускорителях.

Теоретические закономерности, изученные А. Н. Диденко и др., подтверждены на работающем в Томском политехническом институте волноводном циклическом ускорителе на 10 МэВ с диафрагмированным и гладким волноводами и ускорителе с гладким волноводом на 3 МэВ, построенном в Праге.

Для обеспечения устойчивого ускорения протонов в ускорителях на энергии сотни и больше ГэВ необходимо искать новые пути. В ускорителях на эти энергии, после обеспечения малой амплитуды свободных колебаний указанными выше средствами, существенное значение приобретают вынужденные колебания частиц из-за неоднородности магнитного поля и его градиента, увеличивающие бетатронные колебания.

Флуктуации частоты и амплитуды ускоряющего напряжения увеличивают синхротронные колебания.

В середине пятидесятых годов предложения о применении теории и средств автоматического регулирования в ускорителях были сделаны автором в связи с проектом ускорителя.

Э. Л. Бурштейн, А. А. Васильев, А. Л. Минц предложили искать решение проблемы гашения вынужденных колебаний и поддержания режима ускорения путем автоматического регулирования параметров ускорителя по данным о мгновенном положении пучка. Автоматическое регулирование синхротронных колебаний уже осуществлено в ускорителе на 30 ГэВ ЦЕРН с сильной фокусировкой.

Бурштейн Э. Л., Васильев А. А., Минц А. Л., Петухов В. А., Рубчинский С. М. рассмотрели возможность автоматического регулирования бетатронных колебаний. Автоматическое регулирование бетатронных колебаний в процессе ускорения сводится к стабилизации числа колебаний за оборот и равновесной орбиты. Сигналы от пучка позволяют установить наличие отклонений и с помощью системы обратной связи погасить отклонения от расчетного, равновесного движения.

Применение средств автоматического регулирования и стабилизации движения пучка, позволит ослабить допуски на точность воспроизведения магнитного поля, градиента, на точность установки магнитов, повысить надежность, уменьшить размеры камеры и проч.

§ 5. Заключение

Применение ускорителей в науке пока определяется энергией и интенсивностью пучка ускоренных частиц. В практическом их использовании необходимо учитывать технико-экономические и эксплуатационные характеристики.

Научная методика сравнения и выбора ускорителей пока отсутствует. Взяв за основу оценки и сравнения одно или несколько свойств или характеристик ускорителей, ученые иногда приходили к взаимно противоположным выводам о достоинствах сравниваемых ускорителей.

А. А. Воробьев предложил технико-экономическую оценку ускорителей по затратам, отнесенным к одной ускоренной частице определенной энергии на выходе за единицу времени, по формулам типа КПД:

$$q = \frac{EN}{\kappa},$$

где N — число частиц в импульсе; E — энергия, κ — затраты, подлежащие сравнению, например, стоимость, вес, потребляемая установкой мощность и др.

Сравнение показателей девяти синхрофазотронов на энергию больше 1 Гэв привело к выводам, что высокие экономические показатели имеют американские ускорители на 12 и 12,5 Гэв и английский на 7 Гэв. Самые высокие показатели, близкие к показателям электронных ускорителей, имеет Ок-Риджский протонный ускоритель на 12 Гэв.

Это объясняется тем, что инжектором Ок-Риджского ускорителя служит изохронный циклотрон на энергию 850 Мэв с числом частиц в импульсе 10^{12} и частотой импульсов 60 имп/сек.

Электронные синхротроны имеют более высокие показатели, чем протонные (синхрофазотроны). Линейные электронные ускорители до энергии меньше 10 Гэв имеют худшие, а при энергии больше 10 Гэв лучшие экономические показатели, чем циклические.

Увеличение интенсивности пучков частиц, ускоренных до высоких энергий, является важнейшей задачей при разработке новых методов ускорения и новых ускорителей. Значительная мощность питания, требуемая для больших ускорителей и затруднения с ее подводом вызывают необходимость переходить к импульсному питанию с применением накопителей энергии. С увеличением энергии частиц возрастает и скважность подачи импульсов возбуждения электромагнита ускорителя. Поэтому повышение энергии частиц в циклическом ускорителе сопровождается уменьшением их числа, быстрым увеличением веса и размеров установки и мощности питания. Например, для получения частиц с энергией 10^{16} эв, при напряженности управляющего поля, равной 10^4 эрстэд, пришлось бы построить ускоритель, диаметр которого превосходил бы диаметр земного шара. Выход ускоренных частиц из такого ускорителя равнялся бы одному протону в сутки, что будет сравнимо с интенсивностью космических лучей.

Современная теория и практика электронных ускорителей не удовлетворяют запросов ядерной физики и других областей, где могут быть использованы пучки электронов с большим пробегом. Необходимы новые физические идеи и новые пути в сооружение ускорителей.

Для ускорения до 10 Мэв наибольшее применение пока получили высоковольтные ускорители, циклотроны, бетатроны, линейные ускорители и микротроны.

В диапазоне до 100 Мэв: циклотроны, бетатроны, синхротроны, линейные ускорители и микротроны.

В диапазоне до 1000 Мэв: синхротроны, фазотроны, изохронные циклотроны, линейные ускорители.

Выше 1000 Мэв: синхрофазотроны, синхротроны, линейные ускорители.

В области выше 100 Гэв вероятными являются следующие пути развития:

1. Разработка сильнофокусирующего синхрофазотрона с радиусом в несколько километров, в том числе установки с ускорительной системой в виде замкнутого волновода.

2. Создание каскада синхрофазотронов, в котором предыдущий является инжектором для последующего. Преимущество такой установки заключается в следующем. С увеличением энергии частиц пучок сжимается. Поэтому применяется меньшее сечение ускорительной камеры. Это приведет к значительной экономии при сооружении кольцевого конечного ускорителя. Возникают существенно новые трудности, связанные с выводом и вводом пучков частиц высокой энергии.

3. Третий путь, разносторонне разрабатываемый в последние годы, связан с отрегулированием режима ускорения по сигналам от пучка частиц. Датчики воспринимают отклонения пучка от расчетного режима. Получаемые сигналы воздействуют через средства автоматизации на соответствующие устройства ускорителя, ликвидируя опасные отклонения.

В проектировании протонных циклических ускорителей с энергией на 1000 Гэв в СССР определились следующие направления.

Радиотехнический институт АН СССР, Бурштейн Э. Л., А. А. Васильев, А. Л. Минц считают, что масштабное копирование синхротронов, работающих в области десятков Гэв, в область сотен и 1000 Гэв невозможно. Они предложили кибернетический протонный ускоритель на 1000 Гэв строить по трехкаскадной схеме: начальный линейный ускоритель, предварительный циклический ускоритель (бустер) и конечный циклический ускоритель.

Другие ученые считают возможным строить синхрофазотроны с сильной фокусировкой на энергию до 500—700 Гэв, повысив энергию инжекции до 15 Гэв. Таким инжектором может служить серпуховский синхротрон на 70 Гэв, работающий в режиме 15 Гэв, при времени ускорения составляющего $1/5$ от номинального. В таком случае будет получено удовлетворительное заполнение ускорительной дорожки большого синхротрона.

В. В. Владимирский, Д. Г. Кошкарёв, Е. К. Тарасов находят возможным строить протонные синхротроны с сильной фокусировкой до 700 Гэв при сохранении в разумных пределах габаритов и стоимости установки.

Путь развития установок на очень большие энергии подсказывает удачный опыт Г. И. Будкера и А. А. Наумова по разработке безжелезных бетатронов и синхротронов. Эти разработки велись и за границей, но наилучшие результаты сейчас получены в ИЯФ СО АН СССР. Надежно управляемые, циклические безжелезные ускорители с радиусом орбиты в несколько десятков раз меньше, чем установки со стальным магнитопроводом, имеют большие перспективы для развития в области сверхвысоких энергий.

Увеличение напряженности управляющего магнитного поля в магнитных системах без стального магнитопровода типа предложенных Олифантом в Австралии, разработанных Г. И. Будкером и А. А. Наумовым, или криогенных установок с катушками из сверхпроводящих материалов, является одним из путей развития циклических ускорителей, которые были намечены еще в конце сороковых — начале пятидесятих годов.

Применение волноводной замкнутой ускоряющей системы совместно с сильными магнитными управляющими полями является одним из возможных путей создания криогенных ускорителей в ближайшем будущем.

Из новых методов ускорения отметим работы Г. И. Будкера по стабилизированному электронному пучку, работы А. А. Коломенского по авторезонансному ускорению с помощью лазеров и особенно успешно развиваемые в последнее время работы В. И. Векслера по коллективному методу ускорения.

В СССР образовались центры научных исследований в области ускорения и ускорителей. Среди них укажем ведущее научное учреждение физический институт Академии Наук СССР, из которого вышли важнейшие теоретические исследования В. И. Векслера, М. С. Рабиновича, А. А. Коломенского, А. Н. Лебедева, Е. Л. Фейнберга, В. А. Петухова, определивших предыдущую эпоху разработки и строительства ускорителей. Экспериментальные исследования на электронных ускорителях ФИАН, производились под руководством член-корр. П. А. Черенкова, В. Е. Писарева, В. А. Петухова.

В Московском инженерно-физическом институте проф. Г. А. Тягунов и О. А. Вальднер разработали и построили линейные ускорители электронов.

В Радиотехническом институте АН СССР под руководством А. Л. Минца разработаны важнейшие проблемы радиотехники действующих мощных ускорителей и разрабатывается интересная идея кибернетического ускорителя. В настоящее время уже существует действующая модель кибернетического ускорителя на 1 Гэв.

В институте теоретической и экспериментальной физики АН СССР под руководством А. И. Алиханова и В. В. Владимирского разработан и построен ускоритель с жесткой фокусировкой, в котором протоны получают энергию 7 Гэв, построен самый большой в мире Серпуховский протонный ускоритель на энергию 60—70 Гэв, на котором уже выполняются первые физические эксперименты.

В Объединенном институте ядерных исследований в Дубне построены под руководством Д. В. Ефремова, М. Г. Мещерякова и А. Л. Минца фазотрон, дающий протоны с энергией 680 Мэв и синхрофазотрон на 10 Гэв, построенный под руководством В. И. Векслера, Д. В. Ефремова и А. Л. Минца. В институте проводятся исследования по высоковольтному ускорению и ускорителям, разработан и построен циклотрон с вариацией магнитного поля по азимуту.

В институте атомной энергии им. И. В. Курчатова начаты были исследования Г. И. Будкера и А. А. Наумова по ускорению плазмы, безжелезным циклическим ускорителям и накопителям. Затем эти исследования были перенесены в Новосибирск, послужив основой работ ИЯФ СО АН СССР.

В настоящее время в институте на накопительных установках проводятся физические эксперименты по электрон-электронным взаимодействиям с энергией 2×160 Мэв и электрон-позитронным взаимодействием с энергией 2×380 Мэв. Сооружается накопитель, предназначенный для экспериментов по взаимодействию протонов и антипрото-

нов с энергией 2×25 Гэв, на котором планируется проведение работ также по электрон-позитронным взаимодействиям с энергией 2×6 Гэв.

В Ленинграде работа по разработке и сооружению ускорителей проводится в институте электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, под руководством Е. Г. Комара.

Исследования по физике электронных ускорителей проводятся в ленинградском физико-техническом институте под руководством А. П. Комара. Построен фазотрон на 1 Гэв.

В Ташкенте под руководством С. В. Стародубцева разработаны мощные высоковольтные ускорители ионов и оригинальная конструкция циклотрона на большие токи.

В институте физических проблем под руководством С. П. Капица разрабатывают микротроны на большие токи.

В Томске в СФТИ работы по высоковольтному ускорению были начаты под руководством М. И. Корсунского в 1930 г. Им было выдвинуто несколько интересных идей, в том числе конструктивное соединение ускорительной трубки и высоковольтной обмотки, использование вакуума для целей изоляции.

После войны, исследования по ускорению развернулись в политехническом институте в области высоковольтного ускорения. Были созданы импульсные генераторы на 3,2 Мэв и импульсный трансформатор на 1,5 Мэв, электростатические машины и параметрические генераторы, большое количество бетатронов, циклотрон, а также сооружен и успешно действует синхротрон на 1,5 Гэв.

Разработаны ускоряющие системы синхротронов в виде одного или нескольких пролетных промежутков и замкнутых изогнутых волноводов, сооружены синхротроны с такими ускорительными устройствами.

В Ереване под руководством А. Н. Алиханьяна разработан, сооружен и запущен синхротрон на 6 Гэв.

Сооружение ускорителей, особенно крупных, превратилось в отрасль квалифицированного электромашиностроения и радиотехнической промышленности.

В создании этой промышленности в СССР большая роль принадлежит Д. В. Ефремову, А. Л. Минцу и Е. Г. Комару, которые руководили сооружением крупнейших в мире ускорителей, построенных в СССР.

Как и тридцать лет назад, сейчас задача сводится к получению пучков частиц большой интенсивности и большой энергии и обусловлено это стремление физиков-экспериментаторов глубже изучать явления микромира.

Для технологических целей радиационной физике или химии необходимы ускорители на энергию пятнадцать Мэв. Для терапии жестким излучением необходим ускоритель на энергию до 20—30 Мэв, а терапии электронным пучком, вероятно, до 60 Мэв.

Для дефектоскопии нужно тормозное излучение с максимальной энергией 30 Мэв. Во всех этих практических применениях нужны установки с высокой интенсивностью излучения и высокой надежностью, следовательно, и производительностью. Это сейчас главное в разработке ускорителей на малые энергии.

Решение основной задачи строить ускорители, дающие возможно большее число частиц на выходе и все более высоких энергий, проходило среди многих противоречий, главные из которых серьезно тормозили развитие методов и техники ускорения. Они определяли достигнутый уровень развития ускорения в зависимости от экономического потенциала и положения в сопредельных отраслях науки и техники.
