

Л-591



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9 - 10162

ЛИНЕВ
Александр Федорович

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КИЕВСКОГО
240 - САНТИМЕТРОВОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА**

Специальность 01.04.13. электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Дубна 1976

Работа выполнена в Институте ядерных исследований Академии наук УССР.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук	Л.М.Немёнов,
доктор технических наук	Ю.Н.Денисов,
доктор технических наук	А.А.Арзуманов.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт ядерных исследований Академии наук СССР, Москва.

Автореферат разослан " " _____ 1976 года.

Защита диссертации состоится " " _____ 1976 года
в " " часов на заседании специализированного Совета
Д - 56/3 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного
института ядерных исследований, г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований.

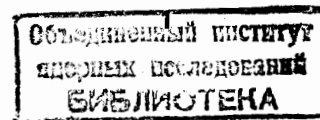
Ученый секретарь специализированного Совета
при Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ
кандидат физико-математических наук

Д.А.Батусов.

Исследование взаимодействия пучков ускоренных частиц с ядрами является наиболее распространенным и универсальным методом современной ядерной физики. В связи с этим ускорительные установки, обеспечивающие получение пучков частиц с заранее заданными и строго контролируемыми свойствами, играют исключительно важную, а в некоторых случаях определяющую роль при проведении экспериментов по изучению ядра.

На первых порах для ускорения частиц использовались стационарные электростатические поля высоковольтных установок. Однако техника получения высоких потенциалов ограничивала потолок энергии, в то время как условия проведения эксперимента постоянно требовали его увеличения. Значительным шагом в увеличении энергии ускоряемых частиц в электростатических ускорителях явилась разработка методов, основанных на перезарядке ионов. Перезарядный тандем-генератор при удвоенной энергии частиц обладает высокомонокроматичным пучком хорошего качества. Однако необходимость ускорения отрицательных ионов ограничивает возможность выбора ускоряемых частиц и их интенсивность. Тандем-генераторы завоевали большую популярность благодаря своим достоинствам. Более пятидесяти различных вариантов таких установок в настоящее время используются для исследования ядра в различных лабораториях мира. Технические усовершенствования тандем-генератора позволили повысить предельную энергию протонов до 30 МэВ, а в ближайшие годы ожидается, что эта величина будет доведена до 60 МэВ.

Важная роль в развитии ускорителей и дальнейшем увеличении энергии ускоренных частиц принадлежит циклическим методам, позволившим в принципе неограниченно наращивать энергию частиц. Возможность получения энергии протонов выше порога рождения новых час-



тиц по сути создала предпосылки для нового научного направления — физики элементарных частиц, в дальнейшем получившего самостоятельное развитие. Вместе с тем бурное развитие исследований элементарных частиц в некоторой степени притушило актуальность исследований в области средних энергий, имеющих важное научное и прикладное значение. Ряд специфических задач ядерной физики остался нерешенным. Нуждаются в экспериментальном подтверждении теоретические модели ядра, необходима новая количественная информация по рассеянию, реакциям поляризации, квантовым характеристикам возбужденных состояний ядер. Информация подобного рода в сочетании с теоретическими моделями является крайне важной для выяснения природы ядерных сил, состояния ядра и ядерных превращений.

Помимо фундаментальных исследований по ядерной физике все большая роль в решении различного рода прикладных задач отводится ускорителям частиц средних энергий.

Приблизительно тридцать лет тому назад было известно всего лишь около четырех десятков радиоактивных ядер конца периодической системы Менделеева. В настоящее время получено и исследовано более 1600 радиоактивных изотопов по всей таблице, включая легкие элементы. Были открыты такие явления, как протонная радиоактивность и спонтанное деление ядер в изомерном состоянии. Большая заслуга в получении новых изотопов принадлежит ускорителям средних энергий, на которых было получено более 70% всех изотопов. Спрос на получение изотопной продукции продолжает быстро расти.

С развитием атомной энергетики большое экономическое значение приобретает измерение ядерных констант. Неопределенность сечения захвата нейтронов приводит к неопределенности стоимости ядерного горючего. Ускорители средних энергий призваны сыграть важную роль в решении этой проблемы.

Существенный вклад ускорителей средних энергий ожидается также в материаловедении, исследованиях по радиационной стойкости и об-

работке материалов, радиационному повреждению, легированию полупроводников.

В медицине пучки тяжелых частиц средних энергий все в большей степени применяются для ранней диагностики заболеваний и терапии либо непосредственно пучком ускоренных ионов, либо пучками вторичных частиц.

Как это следует из материалов последних крупных совещаний и конференций, намечается тенденция к расширению использования ускорителей в практике. Нужно сказать, что пока это делается относительно робко, в силу сложившегося недопонимания задач и возможностей в этих сравнительно далеких друг от друга областях человеческой деятельности. Однако сам факт того, что в конференциях по ускорителям принимают участие крупные специалисты по биологии, медицине, промышленности, сельскому хозяйству свидетельствует о стремлении установить более тесные контакты.

Последние годы в ядерной физике все большие надежды возлагаются на применение тяжелых ускоренных ионов. Возросшие требования определили необходимость получения монохроматических пучков тяжелых ионов всей периодической таблицы элементов вплоть до ионов урана с энергией выше кулоновского барьера. Важность таких исследований по сути дела была ясна и раньше, однако технические трудности не позволяли построить ускоритель тяжелых ионов с подходящими параметрами. Только в последнее десятилетие наметились практические пути решения этой сложной в техническом отношении задачи, среди которых наиболее распространенным является метод, основанный на эффекте обдирки.

Привлекательность исследований с тяжелыми ионами состоит в том, что можно получать принципиально новые данные для фундаментальных исследований. Длина волны тяжелой частицы, обратно пропорциональная массе, значительно меньше, чем у легкой и, следовательно, улучшаются условия исследования ядра в области радиуса действия ядерных

сил. Малые скорости увеличивают сечение взаимодействия. Большие эффекты кулоновского возбуждения, большие вращательные моменты, реакции передачи и обмена нуклонами и ряд других факторов дают дополнительную информацию по структуре ядра и ядерным взаимодействиям. В реакциях с участием тяжелых ионов представляются богатые возможности для получения и исследования новых трансураниевых элементов, включая так называемые "островки стабильности" в области $Z = 114, 126, 164$. Полоса стабильности на изотопной кривой может быть существенно расширена в область протонно-избыточных ядер, которые можно получать только при помощи тяжелых ионов. Это означает, что количество радиоактивных изотопов возрастет ориентировочно до 6000. Обогатится выбор изотопов для практического применения в промышленности и медицине.

Имплантиция тяжелых ионов в различные материалы и особенно в полупроводники способна придавать им заранее заданные и хорошо контролируемые свойства. Причем оказывается возможным механическое введение химически несовместимых элементов. Это совершенно новая и мало исследованная возможность создания новых материалов.

В настоящее время признано, что исследования с тяжелыми ионами, наряду с физикой элементарных частиц, относятся к важнейшим направлениям развития современной ядерной физики.

Современный ускоритель для ядерной физики средних энергий должен обладать следующими характеристиками: энергия ускоренных частиц до 100 МэВ, энергетический разброс пучка $10^{-3} + 10^{-4}$, эмиттанс 5-10 мм.мрад. при размере пучка в сечении 1 см^2 , регулирование энергии в широких пределах, интенсивность пучка $10^{13} - 10^{14} \text{ с}^{-1}$, набор ускоряемых ионов по массам $1 < A < 235$, относительно небольшая стоимость, удобство и простота управления.

Нужно сказать, что некоторые из этих требований противоречивы и вряд ли возможно построить такой универсальный ускоритель, полностью

им удовлетворяющий. В условиях ИЯИ АН УССР оптимальным является ускорительный комплекс, состоящий из изохронного циклотрона и тандем-генератора подходящих параметров, хотя не исключены, конечно, и другие альтернативные решения.

Современный изохронный циклотрон для энергий до 100 МэВ, построенный с учетом требований разделения орбит внутреннего пучка, при наличии внешних дополнительных устройств анализа и монохроматизации пучка обеспечивает получение интенсивных высокомономатричных пучков. Как правило, такой ускоритель сейчас стремится оснащать специальными устройствами на базе ЭМ для быстрого и плавного регулирования энергии в широком диапазоне, системами инъекции поляризованных и тяжелых ионов от внешнего источника, приборами для диагностики и контроля пучка.

Изохронный циклотрон с перестройкой магнитного поля и частоты ускоряющего напряжения превосходно приспособлен для ускорения тяжелых ионов в широком диапазоне масс. В этом случае важно, чтобы величина среднего магнитного поля была возможно большей. Из-за необходимости введения азимутальной вариации поля среднее поле в изохронном циклотроне всегда будет несколько ниже, чем в циклотроне без вариации. Так, например, в классическом циклотроне среднее поле достигает 22 кГс, в то время как в изохронном, в лучшем случае, 20. В связи с этим при прочих равных условиях конструктивный параметр изохронного циклотрона $K \sim BR$ всегда оказывается меньше. Вместе с тем отсутствие фазового движения в изохронном режиме позволяет широко использовать кратные гармоники при ускорении, что существенно расширяет выбор частиц по массам.

Последнее время изохронный циклотрон широко используется для до-ускорения тяжелых ионов в двухступенчатой системе с промежуточной обдиркой. В качестве первой ступени предварительного ускорения применяется циклотрон, линейный ускоритель или тандем-генератор. С точ-

ки зрения уменьшения потерь интенсивности предпочтение, как это будет видно из последующего, должно быть отдано тандем-генератору.

Ускорительный комплекс Института ядерных исследований АН УССР в составе 240-сантиметрового изохронного циклотрона и тандем-генератора на энергию протонов до 20 МэВ является уникальным сооружением. Разработка проекта ускорительных установок выполнялась НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, а также другими проектными организациями. Параметры установок в процессе их создания неоднократно корректировались с учетом новейших достижений в области ускорительной техники. Институт ядерных исследований АН УССР на правах заказчика осуществлял научное руководство проблемой создания ускорительного комплекса в целом. Кроме того, в ИЯИ АН УССР проводились самостоятельные исследования и разработка аппаратуры для формирования магнитных полей и диагностики параметров ускорителя, разрабатывалась программа формирования магнитного поля и запуска изохронного циклотрона, а также изучалась перспектива использования установок для ускорения тяжелых ионов.

Настоящая диссертация является обобщением совокупности исследований и научно-технических разработок, выполненных под руководством и непосредственном участии автора в период 1966-1976 г.г. при создании изохронного циклотрона и ускорительного комплекса Института ядерных исследований Академии наук Украинской ССР.

Большой изохронный циклотрон, обладающий уникальными параметрами и многоцелевым назначением, сооружается в нашей стране впервые. Его создание является крупным вкладом в развитие ядерной физики средних энергий.

Также впервые предложена и исследована возможность ускорения тяжелых ионов в системе, состоящей из тандем-генератора и изохронного циклотрона, обладающая некоторыми преимуществами перед другими способами ускорения тяжелых ионов.

В диссертации рассматриваются две проблемы, решение которых на-

правлено на наиболее полное и эффективное использование ускорительных установок ИЯИ АН УССР: а) создание, модернизация и запуск изохронного циклотрона, включая проблему формирования магнитного поля, разработку аппаратуры для магнитных измерений и диагностики параметров ускорителя; б) изучение перспективы совместного использования изохронного циклотрона и тандем-генератора для ускорения тяжелых ионов с применением промежуточной обдирки. Решение первой проблемы базируется на обширном экспериментальном материале, в то время как проблема ускорения тяжелых ионов исследуется главным образом теоретически.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ диссертации рассматриваются вопросы динамики частиц в изохронном циклотроне: устойчивость движения, резонансы, фазовое движение, аксиальная инжекция, движение частиц в центральной области, разделение орбит, выпуск пучка, особенность ускорения поляризованных и отрицательных ионов. Материал этой главы является теоретическим обобщением современных достижений в этой области. Результаты обобщения представлены, по-возможности, в виде, удобном для практического применения. При подготовке материалов этой главы преследовалась цель возможно более общего и цельного описания процессов, развивающихся при ускорении и выпуске пучка в изохронном циклотроне.

В отличие от классического циклотрона, в котором фокусировка достигается благодаря наличию радиального градиента магнитного поля, в изохронном циклотроне фокусирующие силы образуются за счет азимутальной вариации поля и спиральности секторной структуры. Форма магнитного поля изохронного циклотрона приобретает сложную конфигурацию. Орбита частицы в таком поле заметно отличается от круговой, так как в области холмов кривизна траектории сильно отличается от кривизны траектории в области долин.

Возмущения колебательного процесса за счет периодичности структуры магнитного поля носят периодический характер, а само движение

относительно равновесной орбиты в области периодических возмущений может оказаться резонансным. Резонансы представляют большую опасность и при определенных условиях могут полностью нарушить устойчивость движения частицы при ускорении.

Параметры бетатронных колебаний являются важным критерием при исследовании устойчивости движения и фокусирующих свойств ускорителя. Для предварительной оценки можно пользоваться гладким приближением значений частот бетатронных колебаний. Однако такое приближение является очень грубым, так как оно не учитывает деталей структуры реального магнитного поля. Количественный анализ основывается на представлении экспериментально измеренного поля в виде фурье-разложения по азимутальному углу. Приближенные аналитические выражения, полученные таким способом, являются достаточно точными для практического применения. Они широко используются при формировании магнитного поля изохронного циклотрона по результатам магнитных измерений. Более точные результаты могут быть получены численным решением уравнений движения частиц в измеренном магнитном поле, представляющих собой систему линейных дифференциальных уравнений /при малых возмущениях/ первого порядка в форме, удобной для программирования на ЭВМ. При наличии достаточно мощной ЭВМ параметры бетатронных колебаний лучше определять решением уравнений движения, так как этот метод дает лучшие результаты.

Реальная структура поля, полученная за счет секторных накладок на полюса магнита, отличается от синусоидальной или прямоугольной идеализации. Магнитное поле как функция азимута при фиксированном радиусе имеет сложную форму. Однако с достаточной точностью эта функция может быть описана методом фурье-разложения, причем точность представления функции зависит от числа гармонических компонент и может быть сколь угодно высокой. Представление магнитного поля в виде фурье-разложения позволяет получить достаточно точ-

ные и относительно простые выражения, которые используются для нахождения частот бетатронных колебаний как по приближенным формулам, так и путем решения уравнений движения численным интегрированием.

В начальном движении много плохо учитываемых неопределенностей. Поэтому при конструировании ускорителя следует предусмотреть максимальные возможности для оперативной подстройки ускорителя непосредственно по пучку. Так как оптимальная геометрия центра не может быть хорошо предсказана аналитически, следует предусмотреть оперативную регулировку положения источника, пулера, диафрагм. Такая регулировка важна также /а может быть, прежде всего/ потому, что в процессе ускорения нельзя компенсировать полностью плохое качество пучка, если причиной этого является неудовлетворительная установка ионного источника в центре ускорителя. Величина когерентных радиальных колебаний, вызванная неправильной установкой источника, может, например, достигать непоправимо больших величин. Центральная область в значительной степени создает определяющие предпосылки для получения эффективного вывода пучка. Предварительная селекция частиц пучка, которые заведомо не могут быть выведены из ускорителя и приводят только к активации конструкций и созданию вредного фона, может быть также осуществлена за счет правильного построения геометрии центральной области.

Фазовый захват можно увеличить за счет поворота источника по отношению к плоскости ускоряющего зазора. Одновременно должен быть повернут на такой же угол и пулер. Увеличение фокусировки за счет поворота источника для первых оборотов, где магнитная фокусировка еще очень мала, является чрезвычайно полезным.

Другим приемом, позволяющим также улучшить фокусировку, является создание в центре резко спадающего поля в форме конуса. Дополнительная магнитная фокусировка за счет "конусного" поля в центре обладает тем преимуществом перед электрической, что не зависит от

фазы иона. Резко спадающее поле в центре приводит к неизбежности прохождения резонанса $U_{\text{н}} = I$ в начальной области ускорения. Однако из-за относительно большого прироста энергии на первых оборотах этот резонанс большой опасности не представляет.

Таким образом, фокусировку в центре ускорителя обуславливают три компонента: электрическая, включая поворот источника, магнитная за счет флаттера и магнитная за счет "конусной" формы поля в центре. Электрическая фокусировка имеет фазовую зависимость, обладает тенденцией к уменьшению скважности и широко используется для фазовой селекции. Магнитный конус увеличивает частоту так, что после первого полуоборота начальная фаза смещается в сторону нуля. Обычно спад в области конуса составляет 1%, а суммарный фазовый сдвиг за 10-12 оборотов равен 20° .

В процессе ускорения и особенно при выпуске пучка из вакуумной камеры неизбежны потери, величина которых определяется качеством внутреннего пучка ускорителя. Большие амплитуды некогерентных колебаний и увеличение фазового объема пучка приводят к тому, что прироста энергии за один оборот оказывается недостаточно для того, чтобы орбиты были разделены в радиальном направлении. На одном и том же радиусе могут присутствовать частицы, совершившие разное число оборотов, а следовательно, обладающие различной энергией. Эффективность выпуска пучка резко падает. Интенсивно активируются узлы ускорителя, падает качество выведенного пучка, создается нежелательный для эксперимента фон. Качество внутреннего пучка можно улучшить предварительной селекцией в начальной стадии ускорения путем многократного диафрагмирования, которое в требуемых пределах ограничивает фазовый объем пучка. Естественно, что такая селекция приводит к уменьшению интенсивности пучка на конечном радиусе.

Для получения четкого разделения орбит требуется увеличивать прирост энергии за оборот и свести к минимуму факторы, влияющие на

энергетический разброс внутреннего пучка. Энергетическая неоднородность пучка является следствием прохождения частицами ускоряющего промежутка при различных фазах. С этой точки зрения следует либо сильно уменьшить фазовый акцептанс, либо изменить форму ускоряющего напряжения, например, путем подмешивания третьей гармоники. С другой стороны, совершенно очевидно, что временные флуктуации частоты и амплитуды ускоряющего напряжения, магнитного поля или центра орбиты приводят к смещению равновесной орбиты и, соответственно, ухудшат разделение. Требования на временную стабильность этих параметров существенно возрастают при работе ускорителя в режиме разделенных орбит.

Ускорение с пространственно разделенными орбитами позволяет получить высокое энергетическое разрешение внешнего пучка, увеличивает /вплоть до 100%/ эффективность выпуска. При проектировании ускорителя для таких целей следует стремиться к уменьшению числа оборотов, уменьшению общего уровня магнитного поля при соответствующем увеличении размеров магнита и возможно большему увеличению прироста энергии за один оборот.

Оптимальным, с точки зрения качества пучка и эффективности выпуска, является режим постоянства орбит. В этом режиме независимо от типа частицы и ее конечной энергии геометрия орбиты должна быть неизменной. Естественно, что для выполнения этих условий среднее поле и ускоряющее напряжение должны изменяться так, чтобы радиусы оставались постоянными.

За редким исключением условия эксперимента требуют того, чтобы пучок был выведен во внешнюю систему. К сожалению, проблема выпуска пучка для циклотронов в области средних энергий является очень тяжелой, так как на конечном радиусе ускорения орбиты разделены слабо. Это обстоятельство неизбежно приводит к потере пучка при прохождении системы вывода. Поэтому проблема повышения эффективности выпуска

пучка для изохронных циклотронов продолжает оставаться очень острой. Для каждого отдельного ускорителя система выпуска требует проведения дополнительного тщательного исследования.

В настоящее время с целью повышения эффективности выпуска пучка чаще всего прибегают к резонансной раскачке когерентных колебаний в области конечного радиуса, где $V_r \rightarrow 1$. Применяется также метод перезарядки ионов. Сначала ускоряются отрицательные ионы, а затем, после прохождения стриппера, меняется знак заряда иона и, соответственно, знак кривизны траектории. Эффективность такого выпуска может достигать 100%, однако проблемы получения и ускорения отрицательных ионов и надежности стриппера ограничивают применение вывода обдиркой. Поэтому чаще всего предпочтение отдается резонансному выводу пучка.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ описывается исследование магнитного поля ускорителя.

Магнитное поле изохронного циклотрона должно удовлетворять условиям устойчивости движения ионов в течение всего процесса ускорения и выпуска пучка из ускорительной камеры. Обеспечение аксиальной устойчивости, прохождение резонансов с ограниченным увеличением амплитуды бетатронных колебаний, сохранение постоянства периода обращения при релятивистском увеличении массы частицы, использование когерентного возрастания амплитуды в конце ускорения для повышения эффективности выпуска и другие факторы определяют жесткие допуски на точность магнитного поля во всем рабочем объеме ускорителя.

Большое число независимых параметров не позволяет осуществить точную настройку магнитного поля непосредственно по пучку ускоренных частиц. Поэтому требуемая конфигурация поля определяется расчетно, суперпозицией точно измеренных вкладов всех обмоток электромагнита циклотрона. Отсюда вытекают требования к точности магнитных измерений и стабильности токов в корректирующих обмотках, так как

найденные для различной энергии частиц токи предполагаются оптимальными и не требуют дальнейшей коррекции.

Исследование магнитного поля изохронного циклотрона является наиболее ответственным и трудоемким этапом при запуске ускорителя. Объем магнитных измерений велик. Накопывается большое количество информации, качество которой может быть оценено лишь в конце длительного периода измерений. Тщательная подготовка к магнитным измерениям, быстроедействие и точность аппаратуры и совершенство математических программ обработки на ЭВМ во многом определяют успешное завершение работ по формированию магнитного поля изохронного циклотрона.

Для измерения магнитного поля была разработана и изготовлена полуавтоматическая аппаратура, обладающая погрешностью измерения не хуже 1 Гс и быстроедействием около 2 секунд на одно измерение. Датчик Холла, помещенный в парафиновый термостат /1/ с температурой $53 \pm 0,01^\circ\text{C}$, перемещается автоматически по радиусу с шагом $24 \pm 0,02$ мм. Масса датчика с термостатом 0,3 кг, привод электромеханический на основе механизма "мальтийского креста" (обычно используется в кинокамерах и кинопроекторах). Азимутальный шаг перемещения приспособления составляет $4 \pm 0,003$ град. Время, затрачиваемое на ручное перемещение приспособления по азимуту - 30 с, время измерения карты поля, состоящей из 7000 точек, около 4,5 часов, холловский потенциал измерялся пятиразрядным цифровым вольтметром. Координаты измеряемой точки и величина тока датчика Холла регистрируются на перфокарте.

Всего было измерено около 150 карт, что составило более миллиона измеренных точек. Измерения продолжались приблизительно 16 недель круглосуточно /2/.

Обработка результатов магнитных измерений проводилась на ЭВМ БЭСМ-4 по специальной программе /3/. Предварительная программа производит перевод холловского потенциала в значение индукции маг-

нитного поля, проверку порядковых номеров измеряемых точек, транспонирование матрицы данных из функции радиуса в функцию азимута, отыскание коэффициентов Фурье для данной карты поля, поиск "плохих" точек и их восстановление интерполяцией. Результатом предварительной обработки является архив данных в виде коэффициентов Фурье и их производных.

При расчете коэффициентов Фурье используется метод Симпсона, позволяющий оперировать с эмпирическими функциями. Интерполяция — двойная трехточечная по Лагранжу.

Данные архива используются для нахождения токов в корректирующих обмотках и параметров равновесной орбиты. Программа предусматривает ввод данных о параметрах частиц, ввод данных из архива, расчет тока основной обмотки, интерполяцию промежуточных уровней, сглаживание, нахождение идеального изохронного поля, нахождение токов корректирующих обмоток методом наименьших квадратов, пересчет коэффициентов Фурье с учетом коррекции, интегрирование уравнений движения методом Рунге-Кутты, коррекцию среднего поля по результатам интегрирования, уточнение токов корректирующих обмоток, расчет параметров орбит.

Непосредственно магнитным измерениям предшествовали юстировочные работы. Секторные накладки были установлены в зазор с отклонением от параллельности не более 0,08 мм и отклонением от зеркальности не более 0,3 мм. Упругая деформация балки магнита при полной нагрузке не превышает 0,48 мм. Сборка магнита с такой точностью удовлетворяет условиям стабильности параметров зазора магнита и допускам на первую гармонику, флаттер, спиральность /2,4/.

При магнитных измерениях всего исследовалось четырнадцать уровней основного поля, шесть из которых являются пусковыми. Назначение и характеристики уровней магнитного поля показаны в таблице I. Вклад концентрических обмоток (всего их 15) определялся для всех пусковых

уровней. Только для этого потребовалось измерить 90 карт по 7000 точек в каждой карте.

Таблица I. Характеристики и назначение исследуемых уровней магнитного поля: B_0 — поле в центре, J — ток основной обмотки; U_g — потенциал дуанта; f — частота ВЧ-генератора. Пусковые уровни — I, 4, 6, 9, II, 13.

№	B_0 (Гс)	J (А)	U_g (кВ)	f (МГц)	Назначение
I	5128	280	19	7,693	p 13 МэВ
2	5967	310			
3	6852	360			
4	7677	415			
5	8651	470			
6	9745	540	70	14,906	p 50 МэВ d 26 МэВ
7	10580	645			
8	11591	715			
9	12220	770	105	18,206	p 80 МэВ
10	13214	890			
11	14298	1060	72	10,600	d 50 МэВ p 100 МэВ (*)
12	15431	1350			
13	16476	1760	92	11,925	d 64 МэВ He ₃ 180 МэВ (*)
14	17152	2100			d 70 МэВ (*)

(*) при включенной долиной обмотке

На рис.1 показано отклонение сборного поля от изохронного, а на рис.2 - соответствующее ему фазовое движение сгустка при ускорении. В центральной области специально создается "конусная" форма поля, обеспечивающая дополнительную фокусировку. Отклонение поля в центре от изохронного равно 69,8 Гс, а фазовое смещение - около 10° . В рабочей области радиусов отклонение сборного поля от изохронного - в пределах ± 5 Гс, а фазовое движение - $\pm 5^\circ$. В конце ускорения, непосредственно перед выпуском, фазовое смещение достигает приблизительно 30° , а частота радиальных колебаний - 0,9. Выпуск пучка будет осуществляться с использованием прецессии и резонансной раскачки радиальных колебаний искусственным введением первой гармоники азимутальной неоднородности магнитного поля.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ рассматриваются вопросы диагностики внутреннего и внешнего пучков циклотрона, а также требования, предъявляемые к пучку ускоренных частиц. Для измерения параметров внутреннего пучка разработан универсальный многоламельный пробник. Частоты когерентных колебаний измеряются тремя пробниками. Амплитуда некогерентных колебаний определяется двумя пробниками методом затенения. Частота некогерентных колебаний измеряется дифференциальным пробником. Измерительная аппаратура и управление пробниками автоматизированы. Фазовые характеристики пучка измеряются пикап-электродами и методом расстройки циклотрона по магнитному полю или частоте ускоряющего напряжения.

Для диагностики параметров внешнего пучка разработано электромеханическое сканирующее устройство /5/. Маятник с зондирующими электродами совершает колебания поперек направления пучка с частотой несколько Гц. Положение маятника в пространстве строго соответствует горизонтальному положению луча осциллографа, благодаря высокочастотному синхронизатору. Сканирующее устройство используется для определения формы и положения пучка в тракте разводки, а

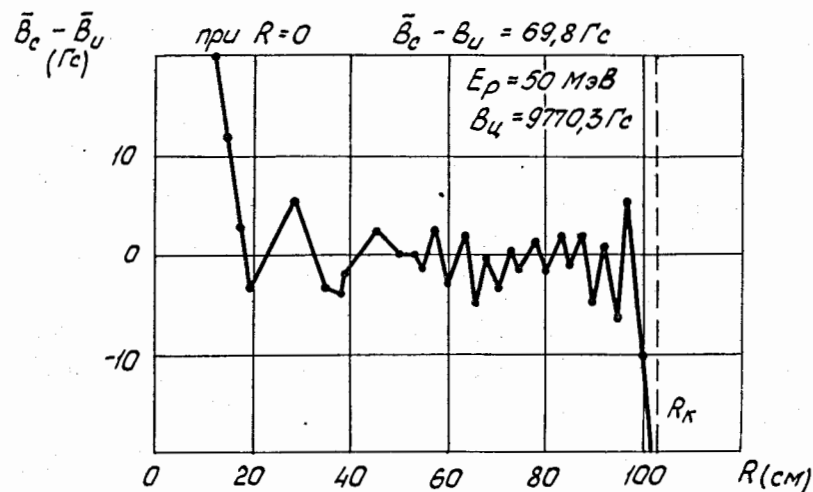


Рис.1. Отклонение сборного магнитного поля / \bar{B}_c / от изохронного / \bar{B}_u /.

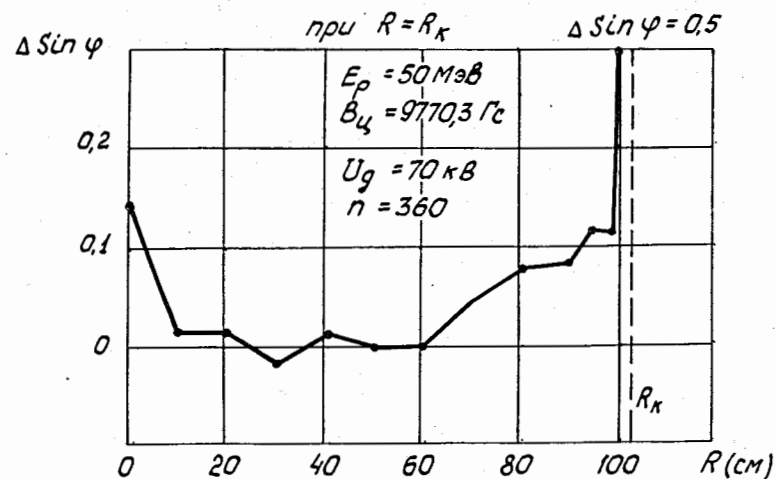


Рис.2. Фазовое движение сгустка: U_g - потенциал дуанта, n - число оборотов

также для измерения эмиттанса методом расстройки синглетов фокусирующих линз. Всего таких сканеров установлено в тракте разводки пучка около 30.

Калибровка величины ускоряющего напряжения производилась при помощи специально разработанного пикового измерительного детектора и цифровых вольтметров в измерительной и калибровочной цепях. Погрешность калибровки не превышает 5%.

Запуск осуществлялся при ускорении протонов до энергии 50 МэВ. На рис.3 показана зависимость тока пучка в функции радиуса, полученная при первом запуске ускорителя.

После получения пучка на начальных радиусах и подстройки положения пулера была измерена радиальная зависимость величины тока без подстройки магнитного поля и ускоряющей системы. Внутренняя селекция пучка не использовалась. Полученные результаты свидетельствуют о том, что сборное магнитное поле удовлетворяет условиям изохронизма в процессе ускорения. Изменение ускоряющего напряжения приблизительно на 10% к существенным изменениям радиальной зависимости тока не привело.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ дается общее описание ускорителя, режимов его работы, технических и физических характеристик, работ по модернизации параметров /6,7,8/.

240-сантиметровый изохронный циклотрон Института ядерных исследований АН УССР является многоцелевой установкой. Параметры циклотрона должны наиболее полно удовлетворять условиям проведения исследований в области ядерной физики средних энергий.

Набор оборудования и различных приспособлений позволяет осуществить один из трех основных режимов работы ускорителя: спектрометрический, нейтронно-импульсный и др. ускорения тяжелых ионов после тандем-генератора. Каждый из этих режимов требует установки в вакуумную камеру ускорителя специфического для данного режима работы обо-

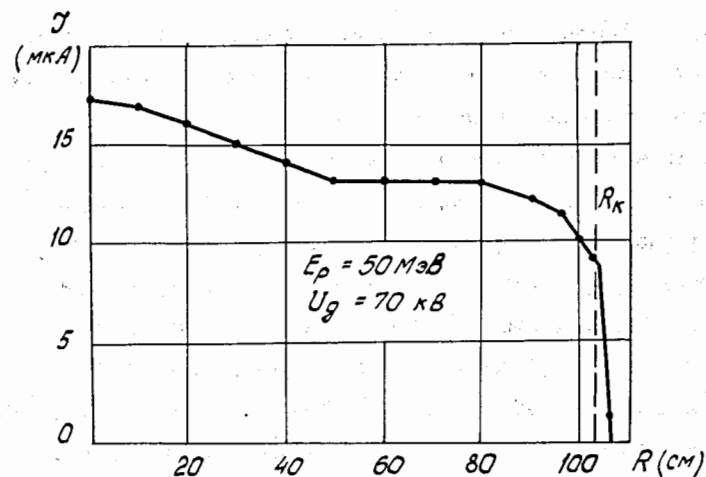


Рис.3. Ток пучка в зависимости от радиуса

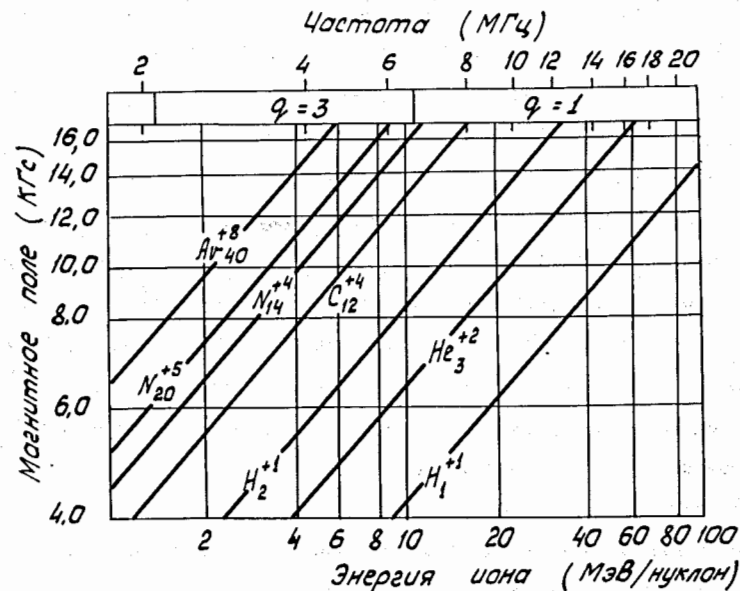


Рис.4. Диаграмма настройки циклотрона:

q - кратность ускорения

рудования. Поэтому изменение режима работы связано со значительной затратой времени, тем более, что демонтируемое оборудование будет обладать достаточно высокой активностью.

Усложнение ускорителя происходило постепенно, по мере возникновения новых идей, а конструкция вакуумной камеры осталась прежней, поэтому разместить оборудование, принадлежащее всем режимам работы, оказалось в таких условиях невозможным. В дальнейшем, если широкая универсальность ускорителя оправдается, по-видимому, следует проектировать специальную камеру, набор оборудования в которой можно будет изменять без разборки. Таким образом, любой из предполагаемых режимов работы может быть введен путем монтажа соответствующего оборудования вакуумной камеры ускорителя. Основные параметры ускорителя приведены в таблице 2.

В спектрометрическом режиме, обеспечивающем получение выведенного пучка высокого качества, ускорение осуществляется с постоянной геометрией орбиты. При изменении энергии и соответствующего магнитного поля амплитуда ускоряющего напряжения меняется так, что количество оборотов для достижения конечной энергии остается неизменным. Разделение орбит и улучшение качества выведенного пучка достигается за счет внутренней селекции и улучшения стабильности тока в обмотках, формирующих магнитное поле. Энергия протонов 80 МэВ и дейтронов 50 МэВ достигается без применения длинной обмотки, что существенно повышает качество структуры магнитного поля и обеспечивает получение минимальных амплитуд бетатронных колебаний, влияющих на качество внутреннего пучка ускорителя.

Токовый канал и магнитный экран системы выпуска пучка имеют компенсацию влияния этих элементов вывода на возмущение частиц, находящихся на последних орбитах. Положение дефлектора, магнитного канала и магнитного экрана дистанционно регулируется для оптимизации сопряжения с траекторией выводимых из ускорителя частиц. В случае

Таблица 2. Основные параметры циклотрона

Физические		Технические	
Энергия (МэВ):		<u>Магнит:</u>	
R 10-100		диаметр (см) 240	
d 20-70		конечный радиуса (см) 103	
He_3 20-180		зазор (мм) 537/237	
Тяжелые ионы I40 Z^2/A		спиральность (град) 45	
Интенсивность (мкА) 50/20		вариация 0,45/0,39	
Эмиттанс (мм.град) 20/20		концентрические обмотки 15	
Энергетический разброс (%)		гармонические -- 3 x 3	
0,2/0,01		мощность (кВт) 1700	
<u>Временная структура:</u>		стабильность тока (%) 0,01-0,002	
τ (нс) 2-10		<u>ВЧ-система:</u>	
f (МГц) 7-22		апертура дуанта (см) 5	
F (Гц) 25-300		мощность (кВт) 450	
T (мс) 0,5-32		потенциал дуанта (кВ) 20-125	
<u>Нейтронный спектрометр:</u>		стабильность частоты $2 \cdot 10^{-8}$	
τ (нс) 2		стабильность напряжения (%) 0,1	
F (кГц) 1-100		<u>Система выпуска:</u>	
База (м) 180		дефлектор $30^\circ, 90$ кВ	
поток \bar{n} (c^{-1}) 10^{14}		токовый канал $38^\circ, 200$ Гс/см	
<u>Время перестройки /час):</u>		магнитный экран 25 см, 350 Гс/см	
режимов -длительная		корректирующий магнит 65 см, 300 Гс/см	
энергия, частица 3,0		<u>Система транспортировки:</u>	
перевод пучка 1,0		поворотные магниты 14	
<u>Экспериментальные помещения:</u>		коммутирующие магниты 8	
площадь (m^2) 1200		квадруполи 49	
число 6		апертура ионопровода 15/20	
пучки 15		<u>Здание:</u>	
		площадь (m^2) 12000	
		объем (m^3) 126000	
		защита (м) 4,5	
		установленная мощность (кВт) 20000	
		водооборот ($m^3/час$) 1200	

изменения энергии ускоряемых частиц режим постоянства геометрии орбит не требует изменения положения элементов вывода. Потребуется лишь некоторая их коррекция для получения оптимальных условий вывода.

Начальный участок ионопровода системы транспортировки пучка имеет апертуру 20 см, а после анализатора на прямолинейном участке апертура ионопровода уменьшается до 15 см. Система разводки "коридорного" типа стандартизирует параметры пучка в различных экспериментальных помещениях. Это позволяет отказаться от необходимости специализировать помещения для конкретных экспериментов.

Система разводки позволяет направить предварительно проанализированный с разрешением $2 \cdot 10^{-4}$ пучок к любой из 16 мишеней. Кроме того, поворот пучка из коридора в измерительное помещение производится с компенсацией дисперсии монохроматичности. Бездисперсионный поворот пучка осуществляется системой, состоящей из магнита (45°), линзы и еще одного магнита (45°). В тракте используется система регулирования угла рассеяния частиц в пределах $\pm 50^\circ$ без изменения их направления.

В нейтронно-импульсном режиме работы протоны ускоряются до энергии 100 МэВ. Для обеспечения необходимой фокусировки при таких энергиях включаются долинные обмотки, которые увеличивают амплитуду основной гармоники до требуемой величины. Внутренний дефлектор формирует импульс, состоящий из сгустков 25-100 орбит. Затем эти сгустки отклоняются в аксиальном направлении внешним дефлектором, который перекрывает радиальную протяженность от 86 до 100 см, и попадают в охлаждаемую водой толстую мишень, генерирующую импульсный поток нейтронов с интенсивностью $3 \cdot 10^{18}$ с⁻¹. Протяженность импульса равна 2 нс при частоте посылок 1-100 КГц. Пучок нейтронов направляется в три нейтронопровода, откачиваемых до форвакуумного давления для уменьшения потерь при прохождении нейтронов. Нейтронно-

воды размещаются в специальной галерее с тремя измерительными павильонами, которая служит одновременно помещением для проводки тяжелых ионов от тандем-генератора к циклотрону по схеме "ТАЦИТ".

Режим ускорения тяжелых ионов подробно обсуждается в пятой главе.

Схема инжекции тяжелых ионов, размещения циклотрона, тандем-генератора и пролетных баз нейтронного спектрометра показана на рис. 5.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ рассматривается перспективная возможность ускорения тяжелых ионов на установках ИЯИ АН УССР.

Сложность ускорения тяжелых ионов состоит в том, что их удельный заряд невелик. Серьезную проблему представляет создание эффективно работающего источника многозарядных ионов, так как сечение ионообразования при многократной ионизации, в силу ступенчатости процесса, падает в 5-7 раз на каждую единицу заряда. В связи с тем, что частица с низким удельным зарядом на единицу длины линейного ускорителя или один период циклического ускорителя, приобретает меньшую энергию, размеры ускорителя возрастают пропорционально отношению A/Z со всеми вытекающими последствиями.

Последнее время широкое применение находят ускорители тяжелых ионов с использованием обдирки после предварительного ускорения, которая позволяет существенно увеличить удельный заряд ускоряемых ионов. Такая система обычно комбинируется из двух ускорителей.

Ускорительный комплекс ИЯИ АН УССР, состоящий из изохронного циклотрона и тандем-генератора, с успехом может быть использован для различных режимов ускорения тяжелых ионов. Тяжелые ионы могут быть ускорены как на тандем-генераторе, так и на изохронном циклотроне, но наиболее перспективной является система совместного использования обоих ускорителей с промежуточной обдиркой /9/.

Эффект обдирки заключается в том, что тяжелая частица при прохождении через вещество, еще до полной потери скорости, начинает

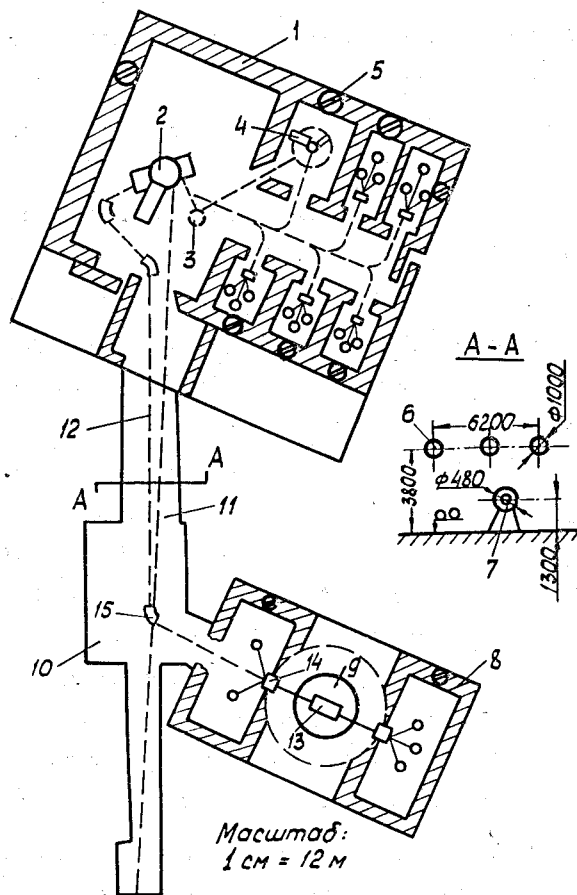


Рис.5. Схема инжекции тяжелых ионов: 1 - здание циклотрона, 2 - циклотрон, 3 - монохроматор, 4 - спектрометр, 5 - поворотная дверь, 6 - нейтронопровод, 7 - линза тракта тяжелых ионов, 8 - здание тандема, 9 - тандем, 10 - пролетные базы нейтронного спектрометра, 11 - направление нейтронного пучка, 12 - направление пучка тяжелых ионов, 13 - анализатор, 14 - коммутирующий магнит, 15 - поворотный магнит

равновесно изменять свое зарядовое состояние. Причем, в том случае, если скорость иона выше скорости данного орбитального электрона, в процессе равновесного изменения заряда более вероятна его потеря. А если эта скорость ниже, то более вероятен захват электрона из внешней среды. Таким образом, заряд иона, проходящего через любую среду, будет изменяться в функции скорости или энергии иона в данном веществе. Экспериментально определено, что для установления статистического равновесия достаточно 10^{17} атомов/см² любого вещества. Величина эффективного, наиболее вероятного, заряда для данной энергии будет зависеть от плотности вещества, причем в более плотной среде эффективный заряд растет. Так, например, обдирка в газовой мишени при определенных условиях может быть в два раза менее эффективной, чем в твердой.

Процессы образования равновесных состояний очень сложны и поэтому аналитическому описанию не поддаются. Для нахождения величины эффективного заряда и функции зарядового распределения используется полумпирический метод Дмитриева-Николаева.

Потеря энергии иона в стриппере обычно не более нескольких десятков КэВ, а увеличение энергетического разброса лежит в пределах /2-8/ % от этой величины. Угловое рассеяние ионов урана в случае углеродной мишени не превышает 0,02 рад. Эти оценочные величины свидетельствуют о том, что энергетические характеристики пучка при прохождении обдирающей фольги практически не ухудшаются. Однако следует отметить, что угол рассеяния может иметь достаточно большую величину при небольших энергиях относительно легких ионов.

Обдирающие мишени (стрипперы) из твердого вещества (фольги) подвержены быстрому разрушению. В этом отношении предпочтительны газовые стрипперы, которые имеют неограниченный срок службы. Однако газовый стриппер имеет существенно более низкую эффективность. Фольга в основном разрушается за счет выбивания атомов частицами

пучка. Срок службы фольги до полного разрушения обычно не превышает 10-15 часов, поэтому следует предусмотреть ее оперативную замену.

Даже при достаточно высоком вакууме плотность молекул остаточного газа в вакуумной системе продолжает оставаться достаточно большой. В таких условиях всегда имеется вероятность столкновения ускоренного иона с молекулами остаточного газа. При этом зарядность иона изменяется и, естественно, такая частица выбывает из процесса ускорения, так как для нее не выполняются резонансные условия в циклическом ускорителе или нарушаются оптические свойства тракта проводки пучка.

В силу того, что многозарядный ион является образованием весьма неустойчивым, для нарушения его состояния достаточно однократного столкновения, а потери интенсивности за счет остаточного газа будут пропорциональны $\exp(-10^4 \cdot p \cdot \tau)$, где p - давление в мм.рт.столба, τ - время ускорения в мкс.

Когда закладывался комплекс ускорителей, не предполагалось использовать тандем-генератор в качестве инжектора тяжелых ионов. Такая идея родилась значительно позже. Месторасположение ускорителей друг относительно друга было определено инженерными сетями и сооружениями, которые к этому времени были уже построены. Практически единственным местом, которое еще можно использовать для проводки пучка от тандема к циклотрону, оказались пролетные базы нейтронного спектрометра, а длина тракта несколько больше 150 метров.

В такой сложной схеме ускорения, как "ТАЦИТ", неизбежны потери пучка, важнейшими причинами которых являются: низкий вакуум, обдирка, несогласованность временной структуры и фазового объема.

Если принять, например, давление по всему тракту от источника в тандем-генераторе до выпуска пучка из циклотрона, равным 10^{-5} мм.рт.ст., то пропускная способность всего тракта из-за потерь на остаточном газе оказывается равной 0,03. Пропускная способ-

ность стриппера равна 0,2, а группирователя - 0,5. Полная пропускная способность при согласованном фазовом объеме пучков ускорителей и однократной обдирке составит 0,3%, а при двухкратной - 0,15%. При этом интенсивность пучка на выходе циклотрона можно ожидать равной 10^{12}с^{-1} .

240-сантиметровый изохронный циклотрон является универсальной установкой для проведения физических исследований. Один из режимов работы ускорителя предусматривает ускорение тяжелых ионов. При средней индукции магнитного поля 16,7 кГс и конечном радиусе 103 см, энергия ускоренных ионов будет равна $140 \frac{Z^2}{A} \text{МэВ}$. На рис. 4 показана энергия, магнитное поле и частота ускоряющего напряжения для различных ионов, ускоренных в циклотроне.

Перезарядный тандем-генератор в настоящее время только проектируется. Предполагается, что диаметр котла и конструкция кондуктора обеспечат получение потенциала до 15 мВ. Однако электрическая прочность колонны ограничивает увеличение потенциала кондуктора до 10 мВ. В дальнейшем с улучшением технологии изготовления ускорительной трубки, возможно, удастся использовать резерв электрической прочности котла и кондуктора.

Колонна на уровне половинного потенциала имеет промежуточную станцию для размещения транспортеров заряда и дополнительного обдирочного устройства. Размеры колонны позволяют установить до четырех транспортеров заряда, работающих параллельно. Производительность каждого транспортера по заряду при номинальном напряжении на кондукторе может достигать 500 мкА. Одновременно каждый транспортер способен передать на кондуктор электрическую мощность (мотор-генератор на валу) до 5 кВт. Такие дополнения вносятся в конструкцию тандем-генератора специально для режима ускорения тяжелых ионов.

Внутри кондуктора, имеющего объем около 10 м^3 , будет получена мощность до 20 кВт, необходимая для работы источника многозарядных

ионов с системой инжекции, управления и откачки газа. Часть поднятого к кондуктору заряда будет расходоваться на различные утечки и стабилизацию коронным разрядом, а полезная интенсивность пучка тяжелых ионов должна достигать нескольких сотен микроампер.

Все дополнения вносятся в конструкцию тандем-генератора таким образом, что высокое качество пучка, присущее таким ускорителям, не ухудшается. Он может быть использован как независимо работающая установка для спектрометрических исследований высокого разрешения.

При использовании тандем-генератора в качестве инжектора циклотрона (система "ТАЦИТ") возможны следующие варианты /9, II/: источник отрицательных ионов установлен на входе, источник многозарядных ионов установлен внутри кондуктора. Кроме того, оба эти варианта оценивались при потенциалах кондуктора 10 и 15 мВ, а также исследовалась эффективность промежуточной обдирки между кондуктором и выходом тандем-генератора /10/.

Проведенные оценки показали, что лучшие результаты будут получены при размещении источника тяжелых ионов непосредственно в кондукторе с применением промежуточной обдирки. При потенциале кондуктора 10 мВ частицы с массой 200 будут иметь энергию выше кулоновского барьера на урановой мишени, а при 15 мВ - для всех элементов периодической системы вплоть до урана.

Энергия ускоренных в циклотроне, тандем-генераторе и системе "ТАЦИТ" тяжелых ионов показана на рис.6.

Таким образом, получение тяжелых ионов на ускорительных установках комплекса можно осуществить: до $A < 40$ непосредственно на циклотроне, при $40 < A < 200$ в системе "ТАЦИТ". Последний вариант требует наибольших затрат, но обеспечивает лучшие характеристики пучка. Тандем-генератор может использоваться не только как инжектор в системе "ТАЦИТ", но и как самостоятельно работающая установка, обеспечивающая получение прецизионных пучков протонов, дейтонов и тяжелых ионов с $A < 18$.

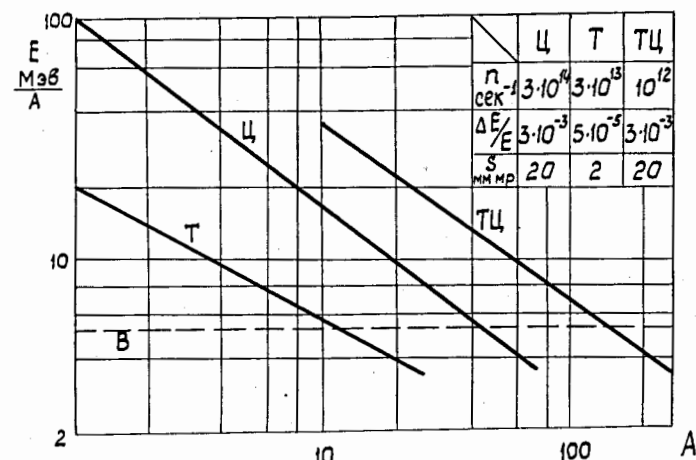


Рис.6. Характеристики ускорителей комплекса: Т - тандем, Ц - циклотрон, ТЦ - "ТАЦИТ", n - интенсивность, $\Delta E/E$ - разрешение, S - эмиттанс.

Важнейшими результатами выполненной работы являются:

1). При научном руководстве и непосредственном участии автора диссертации создан уникальный для нашей страны ускоритель - киевский 240-сантиметровый изохронный циклотрон, рассчитанный на получение протонов с энергией 100 МэВ, дейтонов - 70 МэВ и других ионов. Ввод ускорителя в число действующих является существенным вкладом в развитие ядерной физики средних и низких энергий.

В процессе создания циклотрона автором диссертации были проведены следующие исследования и разработки:

- формирование и исследование изохронных магнитных полей с погрешностью не более 10 Гс;
- разработка аппаратуры для магнитных измерений, обладающей быстродействием 2 секунды на одно измерение и погрешностью не хуже 1 Гс;
- разработка аппаратуры для диагностики параметров внутреннего и внешнего пучков;

- модернизация отдельных узлов и систем ускорителя с целью улучшения его характеристик и повышения надежности работы;

-19 марта 1976 года произведен запуск ускорителя при энергии протонов 50 МэВ и токе пучка 10 мкА. В последующем были также получены ускоренные протоны до энергии 75 МэВ, альфа-частицы до 128 МэВ, дейтроны до 64 МэВ.

2) Предложена и изучена возможность ускорения тяжелых ионов в системе, состоящей из электростатического перезарядного ускорителя (тандем-генератора) и изохронного циклотрона (система "ТАЦИТ"). Настоящее исследование было предпринято в связи с предполагаемым строительством тандем-генератора на энергию протонов 20 МэВ. Расчеты показали, что ионы с массой $A < 200$ будут ускоряться до энергии выше кулоновского барьера на урановой мишени при интенсивности пучка не менее 10^{12}с^{-1} . Результаты проведенных исследований будут использованы при проектировании тандем-генератора и системы "ТАЦИТ".

Все работы выполнены в отделе физики ускорителей института ядерных исследований АН УССР. Основные материалы диссертации докладывались на Международной конференции по изохронным циклотронам (Ванкувер, 1972), Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1974), а также опубликованы в II печатных работах, список которых прилагается.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.И.Быков, А.Ф.Линев, ПТЭ, 5, 223, (1973).
2. А.Е.Вальков, А.Ф.Линев, Е.Е.Олейник, Препринт ИФ 70-10, Киев, 1970.
3. А.Е.Вальков, А.Ф.Линев, Е.Е.Олейник, "Наукова думка", Киев, 1972.
4. А.Е.Вальков, А.Ф.Линев, Е.Е.Олейник, Препринт ИФ 70-9, Киев, 1970.
5. А.Ф.Линев, В.И.Сахно, ПТЭ, 6, 18, 1973.

6. В.В.Колотый, А.Ф.Линев и др., Труды VI Международной конференции по изохронным циклотронам, Ванкувер (Канада), 87, 1972.

7. Ю.Г.Басаргин, Р.Н.Литуновский, А.Ф.Линев, О.Ф.Немец, В.А.Пашин, Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, Атомиздат, 1974.

8. А.Ф.Линев, АЭ, 6, 1976.

9. А.Ф.Линев, "ТАЦИТ", Препринт КИЯИ 73-9А, 1973.

10. А.Ф.Линев, Е.Е.Олейник, В.А.Пашин, Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, Атомиздат, 1974.

11. А.Ф.Линев, Е.Е.Олейник, Препринт КИЯИ-74-31, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 ноября 1976 года.