

СЗ45г + СЗ45а + СЗ45к - *ЗМЕ*

84-555

6314/84

ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ



ДУБНА



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-84-555

Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, С.Л.Богомолов,
Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбемян, А.И.Иваненко,
В.В.Каманин, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, И.В.Колесов,
В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Е.А.Минин, А.М.Мордуев,
Р.Ц.Оганесян, А.С.Пасюк, Ю.Э.Пенионжкевич,
К.И.Семин, Б.В.Фефилов, В.А.Чугреев

**Циклотронный комплекс
тяжелых ионов
Лаборатории ядерных реакций
ОИЯИ**

Дубна 1984

В В Е Д Е Н И Е

Исследования на пучках тяжелых ионов в широком диапазоне масс вплоть до пучков ионов урана с энергией от 10-50 до 100-200 МэВ/нуклон представляют большие возможности для решения как фундаментальных проблем, так и народно-хозяйственных задач. Пучки наиболее тяжелых бомбардирующих частиц, таких, как ионы свинца и урана, перспективны для исследований в области синтеза и изучения свойств тяжелых и сверхтяжелых ядер, имеют первостепенное значение для решения вопроса о пределах стабильности химических элементов.

В настоящее время исследования с помощью тяжелых ионов стали значительной частью научных программ национальных центров США, ФРГ, Франции, Англии, Японии. На эти исследования затрачиваются громадные средства. Создаются новые ускорительные комплексы тяжелых ионов. В основе создаваемых и проектируемых ускорительных установок заложена идея каскадного ускорения. Рассматривая возможности этих проектов и сооружаемых ускорителей, следует отметить, что в ближайшие годы реальными являются исследования на пучках тяжелых ионов вплоть до урана при энергиях 100 МэВ/нуклон, и при интенсивностях пучков в области Xe-U , не превышающих $10^{10}-10^9 \text{ с}^{-1}$.

Вместе с тем, с получением интенсивных пучков тяжелых ионов связаны перспективы решения важнейших научно-технических и прикладных задач, среди которых - создание ядерных фильтров, проведение радиационных испытаний материалов.

Анализ возможностей существующих двухкаскадных ускорительных установок и тенденции развития ускорителей тяжелых ионов на низкие и средние энергии показывают, что при ускорении до энергий ~100 МэВ/нуклон наибольшая интенсивность пучка может быть достигнута на установках циклотронного типа.

Этот метод впервые использован в 1971 году в ЛЯР ОИЯИ для ускорения тяжелых ионов вплоть до ксенона на тандеме циклотронов и принят в других странах в качестве основы при сооружении целого класса новых ускорителей тяжелых ионов третьего поколения.

Ниже предлагается разработанный в ЛЯР ОИЯИ проект создания циклотронного комплекса тяжелых ионов, состоящего из двух изохронных циклотронов У-400 и У-400М, позволяющих ускорять до энергии 120-20 МэВ/нуклон пучки тяжелых ионов от кислорода до урана с интенсивностью, в десятки раз превосходящей ($5 \cdot 10^{12} + 10^{11} \text{ с}^{-1}$) другие ускорители мира.

С целью реализации данного проекта в течение следующей пятилетки в качестве второй ступени ускорения предлагается изохронный циклотрон У-400М, который может быть создан в результате модернизации существующего циклотрона ЛЯР У-300.

Флеров Г.Н. и др.

9-84-555

Циклотронный комплекс тяжелых ионов
Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ

Приводится описание циклотронного комплекса Лаборатории ядерных реакций, предназначенного для ускорения ионов всех элементов таблицы Д.И. Менделеева до энергии 20-120 МэВ/нуклон. Ускорительный комплекс состоит из двух изохронных циклотронов с диаметром полюсов 4 м. Один из них - циклотрон У-400 - является инжектором основного ускорителя - циклотрона У-400М, который будет создан на основе электромагнита классического циклотрона У-300. Ускорение ионов на установке будет проводиться в два этапа: сначала на циклотроне У-400 до энергии 1,7-2,5 МэВ/нуклон, а затем, после их вывода и перезарядки, позволяющей повысить заряд ионов в 4-8 раз, на основном ускорителе У-400М. Дается физико-техническое обоснование ускорительного комплекса и приводятся параметры систем.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Flerov G.N. et al.

9-84-555

Heavy Ions Cyclotron Facility
Laboratory of Nuclear Reactions JINR

The cyclotron facility of the Laboratory of Nuclear Reactions designed to accelerate ions of all elements of the Mendeleev Periodic Table to 20-120 MeV/nucleon energies is described. This facility consists of two isochronous cyclotrons with 4 m pole diameters, ion acceleration will be performed in two stages: at first, to 1,7-2,5 MeV/nucleon at the U-400 cyclotron, and then, after extraction and charge exchange to increase the ion charge by a factor of 4-8, at the main accelerator U-400M. The physico-technical justification and the main parameters of the accelerator system are given.

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

I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ФИЗИКИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Прогнозирование развития научных исследований, как известно, задача сложная. Особенно трудно предугадать ожидаемые результаты. Вследствие большой неопределенности (осторожности) в предсказаниях всегда возникает вопрос о том, в каком соотношении необходимо затрачивать усилия (которые всегда ограничены) на развитие традиционных направлений и на новые идеи (всегда многообещающие).

В относительно "молодом" направлении исследований физики тяжелых ионов, вся история которого насчитывает около 30 лет, решение этого вопроса до последнего времени не представляло больших трудностей. Возможности ядерных исследований с помощью тяжелых ионов оказались столь широки, что круг задач ограничивался в основном возможностями ускорительных установок.

В октябре 1957 года на Всесоюзной конференции по ядерным реакциям^{/1/} были представлены первые результаты исследований с помощью пучков тяжелых ионов, полученные на 150-см циклотроне Института атомной энергии.

В каждой работе (а они относились к самым различным областям физики) первый эксперимент являлся как бы "показателем перспективности", которую затем можно было представить в более конкретных очертаниях, принимая во внимание сооружение нового по тем временам мощного ускорителя тяжелых ионов в Дубне (У-300). По существу данные работы явились основой научной программы на последующие 10-15 лет. Эти годы оказались весьма плодотворными.

С тяжелыми ионами связан значительный прогресс в области деления ядер (явление изомерии формы, запаздывающее деление, закономерности спонтанного деления трансфермиевых элементов), в изучении свойств ядер вблизи границы устойчивости (эмиссия запаздывающих протонов и α -частиц, определение стабильности нейтронно-избыточных легких ядер), исследовании механизма взаимодействия сложных ядер (образование составных ядер с высоким угловым моментом, реакции передачи, ядерные квазимолекулы и др.), а также ряд методических разработок, нашедших в последующем применение в решении многих задач прикладного характера.

С созданием мощного ускорителя получил развитие принципиально новый метод синтеза элементов, образующихся в ядерных реакциях с тяжелыми ионами. На ускорителях в Дубне и Беркли были получены изотопы шести новых элементов таблицы Д.И. Менделеева.

Изучение химических свойств трансактинидных элементов явилось проверкой фундаментального Периодического закона Менделеева: теоретический анализ физических свойств тяжелых ядер (особенно спонтанно де-

лящихся) явился основой предсказания повышенной стабильности сверхтяжелых элементов в области магических чисел $Z=110-114$ и $N=184$. Все это, естественно, послужило стимулом для быстрого развития данного направления.

В настоящее время исследования с помощью тяжелых ионов стали частью научных программ крупных национальных центров в США (Беркли, Ок-Ридж, Техас, Мичиган, Аргонн), ФРГ (Дармштадт, Юлих, Гейдельберг, Карлсруэ, Мюнхен). Франция (Орсэ, Гренобль, Кан), Англия (Манчестер, Дарсбурри), Япония (Осака, Токио). На эти исследования затрачиваются громадные средства. В научных журналах "Ядерная физика", "Physical Review", "Zeitschrift für Physics", "Nuclear Physics", появились специальные разделы по тематике физических исследований с помощью тяжелых ионов. Создаются новые ускорительные комплексы тяжелых ионов для исследований в области релятивистских энергий, обсуждаются проекты использования пучков тяжелых ионов для управляемого термоядерного синтеза и т.д. Поэтому теперь все необходимо рассматривать в существенно большем масштабе. Возможно, однако, что и в этом случае разумно опираться на те области исследований, где сделан уже первый шаг, позволяющий оценить дальнейшую перспективу.

Область низких энергий (вблизи кулоновского барьера)

Пучки тяжелых ионов с энергией ниже кулоновского барьера ядерных реакций являются прекрасным инструментом для детальных исследований структуры электронных оболочек атома.

В последние годы получили развитие работы по исследованию рентгеновского излучения в процессе кулоновского рассеяния ядер^{/2/}. Экспериментальные спектры излучения, полученные в области известных ядер ($Z \leq 108$), показали большие возможности этого подхода для проверки фундаментальных закономерностей квантовой электродинамики - определения, в частности, значения $Z_{\text{крит.}}$, при котором энергетические состояния К-электронов сверхтяжелого атома попадают в область отрицательного континуума^{/3/}. Ожидаемый при этом яркий эффект - спонтанное рождение двух позитронов - явился предметом исследований на ускорителе в реакциях $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ ^{/4/}. Экспериментальное наблюдение данного явления оказалось затрудненным вследствие большого фона позитронов ядерного происхождения. Однако последние эксперименты, выполненные в Дармштадте в реакциях $^{232}\text{Th} + ^{238}\text{U}$; $^{238}\text{U} + ^{258}\text{U}$, указывают на присутствие в спектре позитронов монохроматической линии с энергией 300 кэВ, что может быть интерпретировано ожидаемым эффектом^{/5/} (рис. I). Для получения более определенных данных необходимы исследования образования тяжелых квазимолекул с более высокой чувствительностью и в более широком интервале энергий.

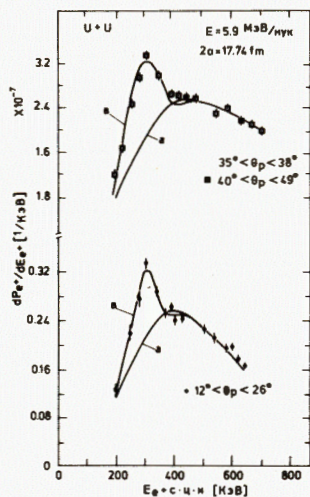


Рис. 1

Спектр позитронов, испускаемых в столкновениях ядер U+U при энергии 5,9 МэВ/нуклон в совпадении с частицами, регистрируемыми в указанном угловом диапазоне:

- теоретический спектр с учетом только резерфордского рассеяния;
- подгонка экспериментальных данных в предположении, что дополнительно испускаются позитроны, имеющие заданную спектральную функцию.

При кулоновском рассеянии тяжелых ионов с большой вероятностью, как известно, возбуждаются также ядерные состояния, в частности, высокоспиновые уровни ротационных полос. Для широкого круга ядер (особенно в области редкоземельной группы) в реакциях с ионами Хе и У возбуждаются состояния с угловым моментом до 32^+ , что соответствует энергии вращения, сравнимой с энергией связи нейтрона^{/6/}.

В области тяжелых ядер столь сильные возбуждения могут приводить к делению на два осколка. Кулоновское деление впервые наблюдалось в реакции $^{238}\text{U} + ^{184}\text{W}$ с сечением 10^{-33} см^{2/7/}. Дальнейшие эксперименты по изучению этого явления потребуют значительного увеличения интенсивности пучков (до 10^{12} – 10^{13} част/с) самых тяжелых ионов вплоть до урана.

Наконец, традиционные исследования упругого и квазиупругого рассеяния тяжелых ионов представляются весьма перспективными, вследствие применимости квазиклассического подхода (расчеты траекторий) для определения радиуса взаимодействия ядер с высокой степенью точности^{/8/}. Радиус взаимодействия, как известно, связан с радиусом ядра, величина которого может быть найдена на основании экспериментальных данных с помощью оптической модели и сопоставлена с известными данными по упругому рассеянию электронов^{/9/} и протонов с энергией 1 ГэВ^{/10/}. Для более прецизионных исследований ядерной поверхности представляется интересным экспериментальное исследование предсказанного теоретически эффекта дифракции тяжелых ионов (энергетические осцилляции при рассеянии назад), подобно так называемому "радарному рассеянию" электромагнитных волн на маленькой капле. Эти эксперименты требуют, однако, высокого энергетического разрешения (0,1–0,15) МэВ.

Область энергий $5 \leq E \leq 50$ МэВ/нуклон

Основные экспериментальные результаты прошедших лет получены при энергиях, соответствующих энергии вблизи кулоновского барьера реакции ($5 \leq E \leq 10$ МэВ/нуклон). Еще в ранних работах А.С.Карамяна с сотрудниками^{/11/} было показано, что при определенных условиях в процессе взаимодействия сложных ядер с большой вероятностью происходит их полное слияние с образованием составного ядра. В последующем этот процесс был исследован весьма детально экспериментально и теоретически. Из анализа известных к настоящему времени данных можно указать две возможности:

а) получение ядер с высокой энергией возбуждения и большим угловым моментом. Распад таких ядер в результате каскадного испарения нейтронов должен приводить к образованию сильно-нейтронно-дефицитных ядер, нестабильных в основном состоянии к испусканию протона. В ряде случаев, при сильном нейтронном дефиците возможно испускание двух протонов^{/12/} (двухпротонная радиоактивность);

б) получение слабовозбужденных ядер ($E^* \sim 15$ – 18 МэВ) в реакциях слияния Рь и Вi с ионами типа ^{48}Ca , ^{50}Ti , ^{58}Fe , ^{64}Ni , когда из составного ядра испускаются γ -кванты (радиационный захват)^{/13/} или всего один нейтрон^{/14/}. Подобные реакции являлись эффективным способом синтеза новых трансфермиевых элементов вплоть до $Z=109$ ^{/15/}.

Нам представляется, что в первом случае дальнейшее продвижение в область более высоких энергий до 50–60 МэВ/нуклон приведет в заметной доле случаев к образованию сильновозбужденных составных ядер ($E^* > 200$ МэВ), температура которых может оказаться сравнимой с энергией связи нейтронов (рис. 2).

Можно полагать, что механизм эмиссии нуклонов из такого ядра будет существенно отличаться от классического квазистационарного процесса испарения нейтронов, который имеет место в условиях, когда $E^* \ll E_{\text{связи}}$. Здесь, по-видимому, большую роль будут играть предравновесные процессы, зависящие от динамических характеристик и свойств ядер (диссипации вносимой энергии, сжимаемости ядра, теплопроводности ядерного вещества, характерных мод колебаний и вращений сильно нагретого ядра и др.).

Не исключено, что именно неравновесные процессы могут сыграть большую роль в образовании слабовозбужденных и даже "холодных" ядер. Эксперименты, проведенные нами, показали, что в реакциях с тяжелыми ионами при энергии ~ 7 МэВ/нуклон наблюдается испускание заряженных частиц (p, d, t, He), скорость которых превышает скорость бомбардиру-

большой делимости^{/20/}. Поэтому данный способ синтеза требует существенного повышения чувствительности в основном за счет повышения интенсивности пучка ионов урана.

Возможно также, что реакции глубоконеупругих передач окажутся более эффективными для получения новых тяжелых и относительно долгоживущих изотопов трансфермиевых элементов, особенно в случае использования более тяжелых мишеней (^{248}Cm или ^{249}Cf).

Если при энергии ионов ≤ 20 МэВ/нукл глубоконеупругие реакции находят описание в рамках статистических подходов, то с увеличением энергии до 100 МэВ/нукл значительную роль начинают играть неравновесные процессы (прямые реакции), характеризуемые большой дисперсией по массе, заряду и энергии образующихся ядер.

В реакциях фрагментации могут образовываться изотопы, сильно удаленные от линии стабильности, вплоть до границы ядерной стабильности. Это обстоятельство может быть использовано для получения сильно нейтронно-избыточных ядер, так как другие методы - протоны высокой энергии, мощные потоки нейтронов, тяжелые ионы малой энергии практически исчерпали свои возможности. Первые эксперименты и последующие расчеты показали, что ионы типа ^{48}Ca , ^{58}Fe или ^{64}Ni с энергией 80-120 МэВ/нукл способны вызвать реакцию, приводящую к образованию ядер с числом нейтронов вблизи ожидаемой границы нейтронной стабильности (рис. 4).

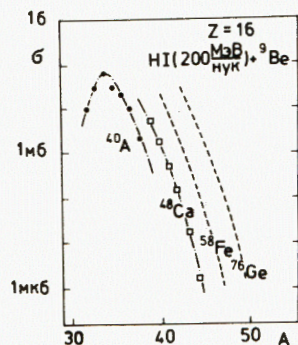


Рис. 4

Сечение образования изотопов серы в реакциях фрагментации с ионами ^{40}Ar , ^{48}Ca , ^{58}Fe и ^{76}Ge .

Другой качественно новый тип реакций между сложными ядрами связан с процессом перезарядки (однократный, двойной и, возможно, тройной), в результате которого соотношение протонов и нейтронов во взаимодействующих ядрах меняется скачкообразно на величину $\Delta Z = \Delta N = 1, 2, 3/21/$. Экспериментальное исследование этого превращения проводилось до по-

следнего времени на пучках π^+ , π^- - мезонов, полученных на мезонных фабриках^{/22/}. Однако, как было показано в ряде работ, реакции двойной перезарядки имеют сечение, сравнимое и даже большее в столкновениях ядер с энергией ≥ 10 МэВ/нуклон. В частности, проблема ядерной стабильности тяжелых изотопов He ($A=9, 10$) будет исследоваться в реакции типа $^9\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{10}\text{He}$.

Для этих же целей - стабильность малонуклонных систем с большим избытком нейтронов - могут быть использованы прямые реакции между легкими ядрами, когда взаимодействующие партнеры обладают большим избытком нейтронов. Последние могут быть получены как продукты реакции с энергией 5-10 МэВ/нукл^{/23/}. Так, например, из спектра протонов в реакции $^3\text{H}(^8\text{He}, ^{10}\text{He})^1\text{H}$ непосредственно может быть получена энергия связи ^{10}He .

Таким образом, при высокой интенсивности первичного пучка ионов можно получать пучки вторичных частиц - продуктов ядерных реакций - нестабильных относительно различных типов радиоактивного распада, но обладающих значительным избытком протонов или нейтронов, в зависимости от типа первичной реакции (составное ядро, осколки деления и т.д.).

Подобно тому, как на пучках протонов создаются "мезонные фабрики", так и на интенсивных пучках ионов могут быть созданы "ионные фабрики" уникальных ядер, не существующих в природе в виде стабильных образований.

Область энергий > 50 МэВ/нуклон

В настоящее время проявляется большой интерес к механизму взаимодействия тяжелых ядер при скоростях, превышающих скорость звука в ядерном веществе ($v > v_s$, где v_s , по оценкам, составляет около 0,15-0,2 с).

Не исключено, что исследование этого процесса даст некоторое представление об общих (фундаментальных) свойствах ядерного вещества (уравнение состояния), подобно тому, как это имело место в классической физике малой плотности или астрофизике, где объекты обладают, наоборот, большой плотностью в условиях громадного гравитационного давления. Если для ядерного вещества окажется применимой в какой-то степени классическая аналогия взаимодействия тел, протекающего при скоростях $v \geq v_s$ (переход звукового барьера, распространение ударных волн, кумуляция энергии в отдельных участках среды и т.д.), то, вероятно, при определенных условиях можно будет получить в короткий промежуток времени (сравнимый с временем взаимодействия ядер) локальную плотность, в несколько раз превышающую ядерную в равновесном состоянии^{/24/}.

Подобный "сгусток" вещества должен обладать необычными свойствами, которые проявятся в характеристиках его распада - в спектрах и угловых распределениях испускаемых частиц. С повышением плотности будет возрастать температура, и ядро (или его участок) окажется в необычном состоянии, как правило, неустойчивом. Однако при определенных условиях, обусловленных целым рядом теоретических предположений относительно характера нуклонного взаимодействия в ядре, находящемся к тому же в столь необычном состоянии, возможен фазовый переход (π -конденсация). В результате этого превращения ядро окажется в новом состоянии с повышенной плотностью, отделенным от состояния с обычной плотностью потенциальным барьером^{/25/}.

Исследования в этой области пока целиком определяются экспериментальными возможностями, которые весьма ограничены вследствие слабых интенсивностей ионных пучков ($\sim 10^8$ част/с), энергию которых к тому же необходимо значительно понижать с тем, чтобы приблизиться к области $v \approx v_a$. Но даже в этих условиях полученные в настоящее время результаты в Дубне^{/26/} и Беркли^{/27/} представляют несомненный интерес в свете "коллективных эффектов" взаимодействия сложных ядер в релятивистской области энергий.

Выше указывалась возможность повышения ядерной плотности в 2-5 раз. Вместе с тем, принимая во внимание большую удельную ионизацию тяжелых ионов, особенно в конце пробега (кривая Брегга), можно в принципе получить стократное и даже тысячекратное сжатие вещества под действием импульсного потока ионов большой мощности.

Эта идея широко обсуждается в настоящее время как наиболее перспективный способ осуществления управляемого термоядерного синтеза. Пороговая температура DT-реакции ($\sim 10^8$ К) достигается здесь за счет громадного повышения давления в центре образца (до 10^{12} атм.), путем всестороннего сжатия исходного вещества, находящегося в оболочке диаметром в несколько миллиметров, пучком ионов импульсной мощности 10^{13} - 10^{14} Вт^{/28/}.

Решение этой задачи требует создания сверхмощных ускорителей тяжелых ионов с энергией 50-100 МэВ/нукл, что является, по-видимому, делом будущего. Однако многие вопросы, связанные с характером взаимодействия сгустка тяжелых частиц с веществом могут быть исследованы при значительно меньших потоках путем создания накопителя тяжелых ионов. В настоящее время в Токио (Япония) создана действующая модель подобной установки TARN и рассматривается проект сооружения накопителя тяжелых ионов в Дармштадте (ФРГ).

Большие удельные потери тяжелых частиц позволяют исследовать вещество в экстремальных состояниях, в условиях сверхвысоких температур и

существенного изменения структуры образца. Здесь необходимо выделить весьма важную область - радиационное материаловедение - связанную с исследованием металлов и композиционных сплавов, подвергающихся воздействию больших нейтронных потоков. Известно, что в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛх) мощного реактора при интегральном потоке 10^{22} - 10^{23} нейтр/см² проявляются макроскопические дефекты структуры (разбухание, изменение упругих свойств и т.д.).

Эксперименты, проведенные в Дубне и Беркли с пучками ускоренных ионов углерода и железа, показали, что эти эффекты могут в ряде случаев успешно моделироваться на пучках тяжелых ионов, деструктивное воздействие которых в 10^6 - 10^7 раз выше, чем у нейтронов в условиях практически полного отсутствия радиоактивности исследуемого образца^{/29/}.

Ускоренные ионы тяжелее ксенона могут быть использованы для получения ядерных фильтров из сополимеров тефлона, устойчивых к сильно агрессивным средам и работающих при температуре до 400°C.

Наконец, пучки тяжелых ионов могут быть использованы для глубокой послышной имплантации в различные вещества, включая монокристаллы.

Это дает широкие возможности для исследований в физике твердого тела и полупроводниковой технике.

При интенсивности пучка ионов 10^{13} част./с в исследуемый образец можно внедрять более чем 10 мкг/ч инородного вещества в виде ускоренных частиц, глубина залегания которых строго определена и может варьироваться в широких пределах, от 0,01 до 10 мм.

Таким образом, из истории развития этого направления следует, что к настоящему времени исследования с помощью тяжелых ионов имеют большие потенциальные возможности во многих областях, связанных с фундаментальными проблемами современной физики.

Ядерные реакции с тяжелыми ионами позволяют исследовать взаимодействие сложных систем, состоящих из большого числа нуклонов, в которых проявляются коллективные эффекты, связанные со свойствами ядерной материи - кулоновскими и поверхностными силами, сжимаемостью и вязкостью ядерного вещества, свойствами ядерной поверхности и плотности.

Продуктами этих реакций являются новые ядра, которые могут находиться в экстремальных состояниях вблизи границы ядерной устойчивости с большим избытком протонов или нейтронов, обладающие большой энергией возбуждения и высоким угловым моментом ("бешено вращающиеся" ядра).

Реакции с тяжелыми ионами дают принципиально новые возможности в области синтеза тяжелых элементов, включая одну из важных задач ядерной физики - синтез и изучение свойств сверхтяжелых элементов.

Тяжелые ионы предоставляют также уникальные возможности для исследований в области атомной физики, квантовой электродинамики, для проверки новых идей о возможности существования сверхтяжелых атомов, сверхплотных ядер и др.

Пучки тяжелых ионов большой мощности могут явиться уникальным инструментом исследования макроскопических свойств вещества при сверхвысоких давлениях и температурах (кумулятивное сжатие), а также радиационной стойкости технологических материалов, включая создание прецизионных фильтров, создание новых материалов и многое другое.

2. РАЗВИТИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НИЗКИХ И СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

Решение вышеперечисленных проблем физики тяжелых ионов и научно-технических задач определяется созданием ускорительных установок, позволяющих получать интенсивные пучки ионов в широком диапазоне масс и энергий. Расширение диапазона ускоряемых частиц и интенсивность ускоряемого пучка, как известно, во многом определяются ионным источником. Повышение энергии ускорителей неизбежно связано с увеличением размера установки.

При ускорении до энергии 100–200 МэВ/нуклон наибольшая интенсивность пучка, как это будет показано ниже, может быть достигнута на установках циклотронного типа.

Этот метод был впервые использован в 1971 году в ДЯР ОИЯИ для получения пучков тяжелых ионов вплоть до Хе на тандеме циклотронов $U-300+U-200/30/$ и был принят для создания новых ускорителей тяжелых ионов.

Рассматривая различные ускорительные системы и современные достижения в области получения высокозарядных ионов, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективным для получения требуемых пучков является тандемный метод ускорения, предусматривающий использование предускорителя, генерирующего пучки ионов с энергией 2 МэВ/нуклон, с последующим повышением заряда ионов за счет потери электронов на твердой мишени, после чего проводится ускорение ионов до высоких энергий на второй ступени.

Конструктивно идея двухкаскадного ускорения получила весьма разнообразные решения: циклотрон + циклотрон, линейный ускоритель + циклотрон, тандем + циклотрон, тандем + линейный ускоритель, линейный + линейный ускорители.

В линейных ускорителях нет трудностей ввода и вывода пучков до и после обдирки, а вопрос согласования отдельных ступеней решается сравнительно просто. Примером совершенной конструкции подобного типа явля-

ется, на наш взгляд, ускоритель UNILAC в Дармштадте, созданный в 1975 году, на котором в настоящее время получены пучки различных ионов от ^{14}N до ^{238}U с энергией ~ 20 МэВ/нукл и интенсивностями $10^{13}-2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} /34/$. Однако установки подобного типа имеют в своей основе ряд принципиальных ограничений.

В каскадном ускорителе энергия пучка на первой ступени составляет 1,5–2 МэВ/нукл, что дает оптимальное изменение заряда иона при обдирке. При последующем ускорении энергия ионов определяется возможностями второй ступени, для линейного ускорителя, где $E \sim Z_i$, конечная энергия фактически пропорциональна длине установки. Длина ускорителя UNILAC составляет 120 м, мощность питания 8 МВт. Поэтому, естественно, существенное повышение энергии на линейном ускорителе (до 100–200 МэВ/нукл) представляет серьезную техническую проблему и связано с большими затратами. С другой стороны, предел интенсивности определяется возможностями первой ступени, где при высоких плотностях тока пучка и относительно низкой энергии ионов весьма значительно влияние кулоновского расталкивания. В ускорителях циклотронного типа факторы, определяющие предельную интенсивность первой ступени (объемный заряд, эмиттанс пучка на первых оборотах, темп ускорения и т.д.) значительно менее критичны по сравнению с линейными ускорителями, а поскольку конечная энергия в циклотроне $E \sim Zi^2$, то получение высокой энергии во второй ступени реализуется по сравнению с линейными ускорителями относительно просто. Поэтому в последнее время в ряде ведущих центров мира разрабатываются и создаются крупные циклотронные комплексы, специально предназначенные для получения пучков тяжелых ионов.

Во Франции (Кан) в конце 1982 года запущен ускорительный комплекс тяжелых ионов GANIL, состоящий из трех циклотронов (циклотрон-инжектор с $K=30$ и два циклотрона с разделенными секторами с $K=400$) (K - параметр, определяющий энергию в циклотроне, пропорционален $(BR)^2$). Этот комплекс предназначен для получения пучков ионов от ^{12}C до ^{238}U с энергиями (100–8) МэВ/нукл и интенсивностями $10^{12}-10^9 \text{ с}^{-1}$. В настоящее время на ускорителе получены пучки ионов ^{20}Ne , ^{40}Ar и ^{84}Kr с энергиями (45–30) МэВ/нукл и интенсивностями $5 \cdot 10^{11}$, 10^{11} и 10^{10} с^{-1} соответственно $/32/$. В Гренобле реализован циклотронный комплекс SARA, состоящий из циклотрона-инжектора с $K=90$ и постускорителя-циклотрона с разделенными секторами с $K=160$, на котором получены ускоренные ионы от ^{12}C до ^{40}Ar с энергиями (40–20) МэВ/нукл $/33/$.

В Японии (Токио) создается ускорительный комплекс RIKEN, в котором в качестве второй ступени используется циклотрон с разделенными секторами с $K=540$ (инжекторами являются линейный ускоритель и цик-

лотрон). По своим параметрам этот комплекс близок к комплексу GANIL. Он позволит получать пучки тяжелых ионов от ^{12}C до ^{238}U с энергиями (110-13) МэВ/нукл и интенсивностями (10^{12} - $5 \cdot 10^8$) с^{-1} соответственно. Запуск комплекса предполагается осуществить в 1986 году^{/34/}.

В Китае (Ланчжоу) начато сооружение комплекса, включающего циклотрон-инжектор с $K=69$ и постускоритель-циклотрон с разделенными секторами с $K=450$. Планируется, что он обеспечит получение тяжелых ионов от ^{12}C до ^{132}Xe с энергиями (100±5) МэВ/нукл и интенсивностями (10^{12} - 10^{10}) с^{-1} соответственно. Запуск комплекса намечен на 1987 г.^{/35/}

В США (Мичиган) создается комплекс, состоящий из двух сверхпроводящих циклотронов с $K=500$ и $K=800$. Циклотрон-инжектор с $K=500$ запущен в начале 1983 года и на нем получены ускоренные тяжелые ионы до ^{20}Ne с энергиями (15-40 МэВ)/нукл и интенсивностями до $2 \cdot 10^{11}$ с^{-1} . Постускоритель находится в стадии сооружения. Планируется, что данный ускорительный комплекс позволит получить пучки тяжелых ионов от ^{12}C до ^{238}U с энергиями (200-20) МэВ/нукл. Запуск комплекса планируется осуществить в 1987-1988 г.г.^{/36/}.

В ФРГ (Мюнхен) разрабатывается проект ускорительного комплекса, где в качестве инжектора используется существующий тандем с потенциалом 13 МВ, а постускорителя - сверхпроводящий циклотрон с разделенными секторами с $K=1200$. Планируется на этом комплексе получить ускоренные тяжелые ионы от ^{12}C до ^{238}U с энергиями (300-20) МэВ/нукл и интенсивностями (10^{10} - 10^8) с^{-1} ^{/37/}.

Ниже рассматривается проект комплекса из двух изохронных циклотронов, который предлагается для сооружения в ЛЯР ОИЯИ в течение следующей пятилетки.

3. ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ЛЯР ОИЯИ

Как следует из вышеприведенного рассмотрения, интенсивность пучка при каскадном ускорении определяется параметрами инжектора и ионного источника. Поэтому изохронный циклотрон тяжелых ионов У-400 с источником дугового типа, из которого в настоящее время получены наиболее интенсивные пучки, является уникальным инжектором ионов при создании ускорительных комплексов тяжелых ионов на средних энергиях.

Как было показано в предыдущем разделе, наиболее эффективным постускорителем до энергий ~ 100 МэВ/нукл также является ускоритель циклотронного типа с $K=600$. В частности, таким ускорителем мог бы быть циклотрон с разделенными секторами со средним значением индукции магнитного поля ~ 10 кГс и диаметром ~ 10 м, в котором легко решается проблема вывода ускоренного пучка, так как здесь имеет место значительное разделение орбит.

В 1981-82 г.г. в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ был разработан проект создания циклотронного комплекса, включающего в качестве предускорителя мощный циклотрон тяжелых ионов У-400 и последующий ускоритель - циклотрон с разделенными секторами У-1000^{/38/}.

Вместе с тем, анализируя результаты, полученные в последнее время при создании различных установок на указанные энергии во многих лабораториях мира (Франция, ФРГ, Япония, США, Италия, Канада) и исходя из тенденций развития фундаментальных и физико-технических исследований, можно прийти к заключению о том, что решение этой задачи может быть достигнуто традиционным для нашей лаборатории способом создания более компактного циклотрона с уровнем средней индукции магнитного поля ~ 20 кГс в ускоряющем зазоре ускорителя.

Для получения эффективного вывода пучка (~ 70%) в этом случае необходимое разделение орбит достигается за счет использования четырехдвунтной ускоряющей системы.

На основе вышесказанного следует, что если в качестве второй ступени использовать модернизированный У-400М классический циклотрон У-300^{/39/}, то такой циклотронный комплекс может быть создан в значительно более короткий срок и значительно меньшими средствами, что подтверждается опытом создания в ОИЯИ У-400.

Подобный комплекс позволит получать все пучки ионов от кислорода до урана с интенсивностью $5 \cdot 10^{12}$ - 10^{11} с^{-1} и с энергией 120-20 МэВ/нукл соответственно. Он будет превосходить на порядок по интенсивности пучков все действующие и сооружаемые установки тяжелых ионов в этом диапазоне энергий.

4. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

4.1. Схема циклотронного комплекса

Циклотронный комплекс тяжелых ионов ЛЯР ОИЯИ состоит из двух циклотронов: У-400 и У-400М. Схема ускорительной установки приведена на рис. 5.

Циклотронный комплекс предназначен для ускорения сверхтяжелых ионов, таких, как Хе- Ус энергией 35±20 МэВ/нукл., так и легких - с энергией 120 МэВ/нукл.

Ионы, ускоренные в циклотроне-инжекторе У-400, выводятся электростатическим дефлектором и транспортируются по ионопроводу длиной ~ 120 м до циклотрона У-400М. После повышения заряда при прохождении через обдирочную фольгу в циклотроне У-400М ионы инжектируются на равновесную орбиту и ускоряются до конечной энергии. Некоторые пара-

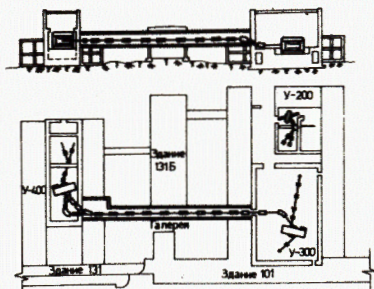


Рис. 5

Схема циклотронного комплекса
У-400 + У-400М.

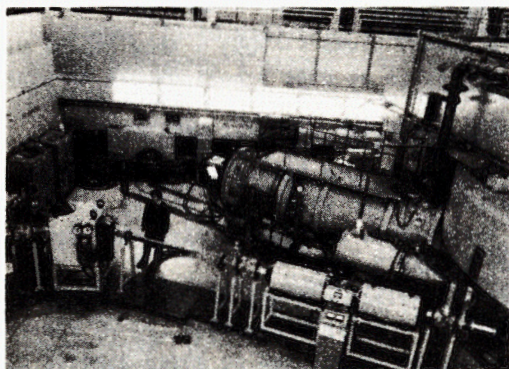


Рис. 6

Общий вид У-400.

метры ионов, ускоряемых в циклотронном комплексе, приведены в табл. I.

Таблица I

Ионы	У-400		У-400М	
	z_1	МэВ/нукл.	z_2	МэВ/нукл.
^{16}O	1	2,5	8	120
^{20}Ne	1	1,7	8	80
^{40}Ar	2	1,7	13	60
^{84}Kr	4	1,5	22	40
^{136}Xe	7	1,8	33	35
^{238}U	12	1,7	48	20

Для ускорения ионов до указанных энергий параметр $K \sim 0,5 \frac{B_k^2}{R_k^2}$ (B_k - индукция среднего магнитного поля, R_k - конечный радиус ускорения) циклотрона У-400М должен составлять 560.

В системе транспортировки внешних пучков ускорительного комплекса предполагается иметь не менее 10 каналов пучков на физические установки.

4.2. Циклотрон У-400

На основе экспериментальных результатов, полученных при создании и эксплуатации циклотрона У-200, в ЛЯР ОИЯИ сооружен в период 1975-1978 гг. четырехметровый изохронный циклотрон У-400, на котором получены все проектные параметры и который по интенсивности ускоренных пучков ионов элементов средних масс превосходит все существующие ускорители тяжелых ионов.

4.2.1. Автономный режим У-400

Циклотрон У-400/40/ предназначен для ускорения тяжелых ионов с массовыми числами $4 \leq A \leq 250$ и энергиями от 35 до 1,7 МэВ/нукл. соответственно.

Общий вид циклотрона У-400 представлен на рис. 6. Магнитная структура создается четырьмя парами секторов с прямыми границами и угловой протяженностью 45° . Изохронное магнитное поле в диапазоне 19-21,4 кГс (соответствующие значения флаттера составляют 0,11-0,06) обеспечивается размещенными на поверхности секторов кольцевыми шиммами и токовыми корректирующими катушками. Десять пар радиальных катушек с вкладом до 50 Гс каждая, размещены в зазоре между крышками камеры и секторами (4 пары катушек используются для коррекции медианной плоскости). Восемь пар азимутальных катушек, обеспечивающих коррекцию первой гармоники с амплитудой ~ 16 Гс, расположены в долинах. Максимальная мощность электромагнита составляет 850 кВт, мощность токовых катушек - 56 кВт.

Высокочастотная система циклотрона У-400 представляет собой два несвязанных контура, каждый из которых состоит из четвертьволновой коаксиальной линии, закороченной на одном конце и нагруженной емкостью дуанта угловой протяженностью 42° на другом. Дуанты находятся в двух противоположных долинах. Мощность высокочастотного генератора, обеспечивающего напряжение на каждом дуанте 100 кВ, составляет 150 кВт. Ускорение ионов осуществляется на 1, 2, 3 и 4 гармониках частоты обращения частиц.

Изменение частоты ВЧ системы циклотрона в диапазоне 6-12 МГц обеспечивается перемещением дисковых пластин с контактами, закорачивающими шток и бак. Подстройка частоты в пределах 3% осуществляется триммерами.

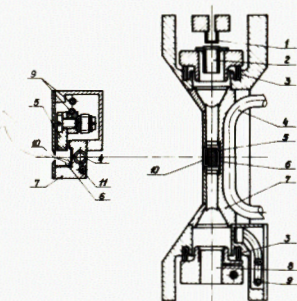


Рис. 7.

Основные элементы конструкции источника с катодным распылением циклотрона У-400. 1 - нить накала, 2 - катод, 3 - уплотняющий изолятор, 4 - охлаждение разрядной камеры, 5 - распыляемый электрод, 6 - сборник распыленного вещества, 7 - разрядная камера, 8 - антикатод, 9 - канал охлаждения распыляемого электрода, 10 - эмиссионная щель, 11 - канал ввода газа.

В циклотроне применяется модифицированный ионный источник многозарядных ионов (рис. 7), который позволяет получать интенсивные пучки ионов элементов как газообразных, так и твердых рабочих веществ. За счет снижения расхода газа, поддерживающего разряд, а также вследствие улучшения вакуума в зоне ускорения в несколько раз увеличена интенсивность пучков на конечных радиусах ускорения.

Исключение нерегулируемого распыления рабочего вещества возвратными ионами позволило снизить расход твердого рабочего вещества, который при работе с разделенными изотопами металлов составляет 10 ± 15 мг/ч.

Вакуумный объем циклотрона У-400, состоящий из камеры и двух резонансных баков, имеет внутреннюю поверхность 310 м^2 . Рабочее давление (с пучком) величиной $1 \cdot 10^{-6}$ Тор, обеспечивается 5 диффузионными паромасляными насосами с азотными ловушками заливного типа суммарной производительностью по азоту 20000 л.с.^{-1} (по конденсируемым компонентам 80000 л.с.^{-1}).

Указанное значение рабочего вакуума обеспечивает для ионов в диапазоне $14 \leq A \leq 84$ 30% прохождение пучка, что определяется потерями ионов за счет обдирки на остаточном газе.

Вывод пучков ионов из циклотрона У-400 осуществляется методом обдирки на тонких фольгах с возможностью вариации энергии за счет радиального и азимутального перемещения фольги. В качестве обдирающей фольги используются пленки из углерода толщиной $40-60 \text{ мкг/см}^2$. Срок службы фольги определяется типом и интенсивностью падающих ионов. Для пучка ионов $^{14}\text{N}^{2+}$ при интенсивности $6 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ срок службы фольги составляет (6-10) дней, для пучка ионов $^{55}\text{Mn}^{5+}$ с интенсивностью 10^{13} с^{-1} оно равно 5 дней. Коэффициент вывода определяется эффективностью обдирки ионов до нужного заряда и для различных ионов приведен на рис. 8. Монохроматичность выведенных пучков составляет 1%.

Система транспортировки внешних пучков выполнена на трех уровнях и включает 12 каналов. Транспортировка пучка по каналам диаметром 100 мм осуществляется магнитными линзами с максимальным градиентом 600 Гс/см и 45° и 90° электромагнитами с полем 13 кГс.

В настоящее время на циклотроне достигнуто ускорение пучков ионов с массой $A=14 \pm 84$ до энергий $14 \pm 5 \text{ МэВ/нукл}$. Параметры ускоренных пучков циклотрона У-400 приведены в табл. 2. Указанные значения интенсив-

Таблица 2

Ионы	E(МэВ)	E(МэВ/нукл)	I(с ⁻¹)
$^{14}\text{N}^{2+}$	176	12,6	$2 \cdot 10^{14}$
$^{15}\text{N}^{2+}$	126	8,4	$3 \cdot 10^{14}$
$^{16}\text{O}^{2+}$	126	7,9	$3 \cdot 10^{14}$
$^{20}\text{Ne}^{3+}$	268	13,4	$2 \cdot 10^{14}$
$^{22}\text{Ne}^{3+}$	180	8,2	$2 \cdot 10^{14}$
$^{31}\text{P}^{4+}$	228	7,4	$1 \cdot 10^{13}$
$^{40}\text{Ar}^{4+}$	212	5,3	$1,5 \cdot 10^{14}$
$^{40}\text{Ar}^{5+}$	317	7,9	$9 \cdot 10^{13}$
$^{48}\text{Ti}^{5+}$	269	5,6	$4 \cdot 10^{13}$
$^{48}\text{Ti}^{5+}$	264	5,4	$2 \cdot 10^{13}$
$^{50}\text{Ti}^{5+}$	248	5,0	$1 \cdot 10^{13}$
$^{51}\text{V}^{5+}$	280	5,5	$5 \cdot 10^{13}$
$^{52}\text{Cr}^{5+}$	358	6,8	$5 \cdot 10^{12}$
$^{52}\text{Cr}^{5+}$	280	5,3	$1 \cdot 10^{13}$
$^{54}\text{Cr}^{5+}$	286	5,3	$1 \cdot 10^{13}$
$^{55}\text{Mn}^{6+}$	304	5,5	$6 \cdot 10^{13}$
$^{56}\text{Fe}^{6+}$	298	5,3	$3 \cdot 10^{13}$
$^{58}\text{Fe}^{6+}$	307	5,3	$2 \cdot 10^{13}$
$^{58}\text{Ni}^{6+}$	300	5,2	$1 \cdot 10^{13}$
$^{60}\text{Ni}^{6+}$	340	5,3	$1 \cdot 10^{13}$
$^{64}\text{Zn}^{7+}$	396	6,2	$1 \cdot 10^{12}$
$^{70}\text{Zn}^{8+}$	365	5,2	$4 \cdot 10^{11}$
$^{76}\text{Ge}^{8+}$	400	5,3	$2 \cdot 10^{12}$
$^{84}\text{Kr}^{9+}$	503	6,0	$5 \cdot 10^{11}$

ностей соответствуют внутренним пучкам, энергия которых определялась требованиями физического эксперимента. Интенсивности выведенных пучков определялись температурной стойкостью обдирающей фольги и для ионов (N, O, Ne) составляли 10^{14} - $5 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$, а для ионов (Ar, Ti, Mn, Cr, Fe, Ni) 10^{13} - $6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ соответственно. Значения интенсивностей пучка У-400 по сравнению с циклотронами У-200, У-300 представлены на рис. 9.

4.2.2. Инжекторный режим У-400

При работе в инжекторном режиме циклотронного комплекса У-400 будут ускоряться ионы от кислорода до урана с отношением массы к заряду $A/Z = 16 \pm 20$.

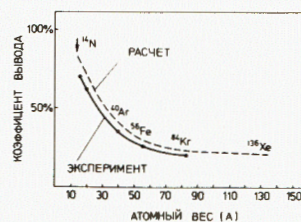


Рис. 8

Расчетные и экспериментально достигнутые коэффициенты вывода пучка ионов из циклотрона У-400 для различных масс А.

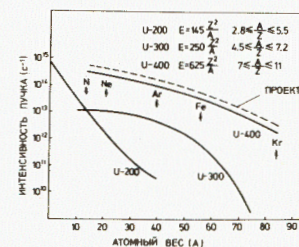


Рис. 9

Сравнение интенсивности пучков ионов циклотрона У-400 с интенсивностью пучков циклотронов У-300 и У-200.

Однако при ускорении тяжелых ионов малой зарядности ($Z=1+12$) до энергий (2,5+1,7) МэВ/нукл требования к величине давления остаточного газа внутри циклотрона возрастают. Например, средние интегральные сечения $\sigma_{\text{полн}} = \frac{1}{W_K} \int_0^{W_K} \sigma_{\text{полн}} dW$ для ионов указанного диапазона масс составляют $3+5 \cdot 10^{-16}$ см², что для эффективного ускорения требует создания давления в камере циклотрона У-400 на уровне 10^{-7} Тор.

Ниже будут представлены возможности и пути развития вакуумной системы и источников ионов циклотрона У-400, позволяющие получить из циклотрона-инжектора пучки ионов во всем ускоряемом диапазоне частиц с интенсивностью не менее 10^{13} частиц/секунду.

4.2.2.1. Вывод пучка из У-400

Наиболее простой схемой инжекции ионов в циклотрон У-400М является способ, когда вводимые ионы испытывают обдирку в центральной области. Поэтому вывод пучков ионов из циклотрона-инжектора должен осуществляться с помощью электростатического deflectора. Численное моделирование процесса вывода частиц из У-400 проводилось на ЭВМ. С целью эффективного вывода пучка с конечного радиуса ускорения и нацеливания его в канал транспортировки планируется использовать два deflectора (рис. 10а) с угловой протяженностью 38° , установленных в двух соседних долинах.

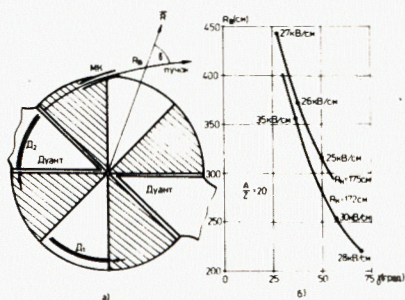


Рис. 10.

Схема вывода ионов из циклотрона У-400 электростатическим методом.

На рис. 10б в качестве примера представлены зависимости радиуса вывода пучков с отношением $A/Z=20$ от угла траектории к радиусу-вектору при различных напряженностях электрического поля на deflectорах.

Трехэлементный фокусирующий по радиусу магнитный канал устанавливается после второго по ходу пучка deflectора, где максимальный градиент магнитного поля составляет величину 1,5 кГс/см.

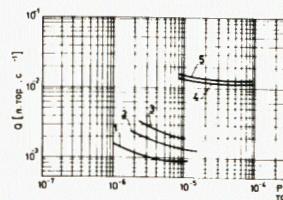
Возможность регулировки в широком диапазоне угла траектории вывода при различных конечных радиусах ускорения позволяет выбрать необходимое направление траектории, согласованное с направлением ионного потока

4.2.2.2. Вакуумная система У-400

На ускорителе тяжелых ионов У-400, имеющем вакуумный объем 25000 л и площадь вакуумной поверхности 310 м², система высоковакуумной откачки состоит из 5 диффузионных вакуумных агрегатов с азотными экранами в переходных патрубках и суммарной быстротой действия по азоту $S = 20000$ л·с⁻¹. Газовая нагрузка за счет газоотделения с поверхности при давлении $P = 1 \cdot 10^{-6}$ Тор составляет величину $q = 2 \cdot 10^{-3}$ л·Тор·с⁻¹, а средняя величина внешнего натекания $q_{\text{нат.}} = 1 \cdot 10^{-3}$ л·Тор·с⁻¹. Без подачи рабочего газа в источник ионов в камере циклотрона достигается давление $1 \cdot 10^{-7}$ Тор^{4/1}.

Расчетная проводимость щелевого затора камеры У-400 из центра на периферию составляет 35000 л·с⁻¹. При работе в режиме ускорения в центр камеры через источник ионов подается рабочий газ в количестве $0,15+0,8$ см³/мин. Величины газовых нагрузок при различных режимах работы ускорителя представлены на рис. 11. Для откачиваемой в течение

Рис. 11



Величины газовых нагрузок в различных режимах работы ускорителя: 1 - внешнее натекание и десорбция, 2 - с источником ионов, 3 - с ВЧ напряжением на дуантах, 4 - с подачей газа в источник ионов, 5 - с ускоренным ионным пучком.

10 суток камеры У-400 величина газовой нагрузки за счет внешнего натекания и десорбции с поверхности вакуумного объема представлена кривой 1. Увеличение потока при давлениях ниже $1 \cdot 10^{-6}$ Тор объясняется процессом десорбции составляющих газового потока с упругостью пара выше значения вакуума в ускорителе в данный момент. При этом предельный вакуум по периметру рабочей камеры У-400 поддерживается на уровне $1 \cdot 10^{-7}$ Тор.

Постановка источника ионов (кривая 2) и подача ВЧ-напряжения на дуанты (кривая 3) несколько увеличивает газовую нагрузку. В режиме горения дуги источника газовый поток значительно возрастает (кривая 4), что приводит к увеличению давления до $P = 7 \cdot 10^{-7}$ Тор. Кривая 5 соответ-

ствует газовой нагрузке в режиме ускорения пучка ионов аргона с интенсивностью 4 мкА до $R = 170$ см.

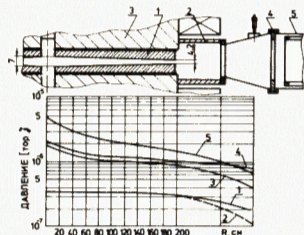


Рис. 12.

Распределение давления по радиусу камеры циклотрона У-400: 1 - без ионного источника, 2 - ионный источник в шлюзовой камере с открытым шибером, 3 - с подачей газа в источник ионов, 4 - при закрытии шиберов 2 и 3-вакуумных агрегатов, 5 - при имитации режима ускорения.

Распределение давления по радиусу в рабочем зазоре камеры ускорителя (рис. 12) было измерено с помощью манометрического преобразователя ПМИ-2, перемещаемого в зазоре холмов от центра камеры до конечного радиуса. При этом магнитное поле ускорителя отсутствовало, а в источник ионов подавался азот с имитацией расхода в рабочем режиме. Без ионного источника (кривая 1) давление по радиусу щелевого зазора изменяется от $3,3 \cdot 10^{-7}$ Тор в центре камеры до $3 \cdot 10^{-7}$ Тор на конечном радиусе и $2 \cdot 10^{-7}$ Тор в переходном патрубке при закрытом шиберном затворе вакуумного агрегата в месте измерения. При открытом шибере давление в переходном патрубке снижается до $1 \cdot 10^{-7}$ Тор (кривая 2), хотя на вакуум в рабочем зазоре это не влияет, так как откачка ускорителя производится еще двумя диффузионными агрегатами на камере и по одному - на каждом из двух резонансных баков. При подаче через ионный источник в центр камеры газового потока азота в количестве $0,3 \text{ см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$ распределение давления представлено кривой 3. При имитации условий работы ускорителя в режиме ускорения распределение давления по радиусу представлено кривой 5. При этом вклад в газовую нагрузку рабочего газа источника составляет величину $q_v = 1 \cdot 10^{-2} \text{ л} \cdot \text{Тор} \cdot \text{с}^{-1}$ ($0,8 \text{ см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$).

При закрытии шиберных затворов двух и трех вакуумных агрегатов уменьшается быстрота действия откачных средств камеры по азоту с 12000 до 4000 л·с⁻¹. Распределение давления в этом случае представлено кривой (4). Таким образом, величина газовой нагрузки из источника ионов в центр ускорителя является фактором, определяющим распределение давления по радиусу камеры У-400.

Дальнейшее улучшение вакуума в зоне ускорения пучка возможно за счет уменьшения расхода газа в ионном источнике, а также за счет повышения эффективности откачки центральной части камеры циклотрона при установке блоков электроразрядных насосов или системы криогенной откачки в долинах циклотрона.

4.2.2.3. Источники ионов У-400

Основные параметры и характеристики ионного источника У-400 определяются, во-первых, требованиями диапазона ускоряемых ионов всех элементов вплоть до $U(A/Z=10+20)$, во-вторых, необходимостью достижения в У-400 более высокого вакуума в зоне ускорения 10^{-7} Тор.

Возможности дугового источника ионов У-400 в требуемом диапазоне ускоряемых частиц представлены на рис. 13.

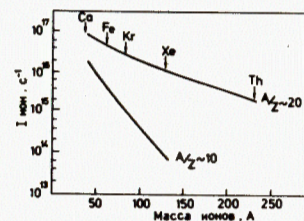


Рис. 13

Возможности дугового источника ионов У-400.

В табл. 3 представлены средняя интенсивность и зарядность некоторых наиболее характерных пучков, полученных из ионного источника в стендовых испытаниях.

Таблица 3
Выход тяжелых ионов из циклотронного дугового источника^{х)}

A/Z 10		A/Z 20	
Ca ⁴⁺	$2 \cdot 10^{16}$	Ca ²⁺	$7 \cdot 10^{16}$
Cr ⁵⁺	$1 \cdot 10^{16}$	Cr ³⁺	$2 \cdot 10^{16}$
Fe ⁶⁺	$3 \cdot 10^{15}$	Fe ³⁺	$3 \cdot 10^{16}$
Ge ⁷⁺	$4 \cdot 10^{14}$	Ge ⁴⁺	$2 \cdot 10^{16}$
Se ⁸⁺	$2 \cdot 10^{15}$	Se ⁴⁺	$4 \cdot 10^{16}$
Xe ¹⁴⁺	$7 \cdot 10^{13}$	Xe ⁷⁺	$2 \cdot 10^{16}$
-	-	Th ¹¹⁺	$3 \cdot 10^{15}$

х) Интенсивность дана в с⁻¹.

Исследования режимов работы ионного источника и способов подачи в разряд рабочего вещества показали, что для $A/Z = 20$ могут быть получены пучки ионов с током в несколько миллиампер. На рис. 14 представлен зарядовый спектр ионов Th, полученный из ионного источника с катодным распылением рабочего вещества при использовании в качестве вспомогательного газа аргона^{42/}.

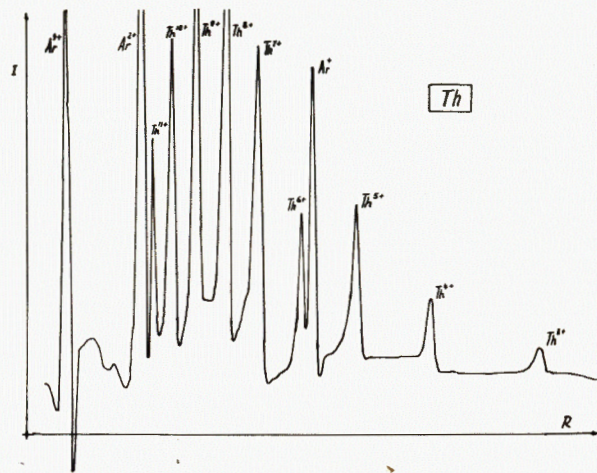


Рис. 14.

Зарядовое распределение ионов Th, полученное на модели источника У-400 на стенде (спектр записан при одном усилении). Интенсивности токов ионов тория по зарядностям составляют: 3+ -1,6 мА, 4+ -4,2 мА, 5+ -8,5 мА, 6+ -6,7 мА, 7+ -14,9 мА, 8+ -17,9 мА, 9+ -18,5 мА, 10+ -12,1 мА, 11+ -4,8 мА.

Изучение процесса ускорения тяжелых ионов на циклотроне У-400 показало, что интенсивность ускоренного пучка существенно зависит от уровня вакуума в зоне ускорения, так как путь, проходимый частицами, составляет несколько километров.

Таким образом, с точки зрения газовой нагрузки в центре циклотрона, к ионному источнику предъявляются высокие требования. Оценить эти требования можно из того, что при подаче в центр циклотрона $0,28 \text{ см}^3 \text{ мин}^{-1}$ вакуумная система циклотрона обеспечивает вакуум в ускоряющей зоне камеры порядка 10^{-6} Тор. Без газового потока из источника достигается вакуум $3,5 \cdot 10^{-7}$ Тор. Это означает, что с целью снижения потерь пучка вследствие перезарядки на остаточном газе поток его из источника в камеру циклотрона должен быть минимальным. С этой целью в ЛЯР проведены исследования и выполнена разработка источников ионов с малым расходом газа.

Так, на циклотронах У-400 и У-300 в настоящее время используются ионные источники ^{43}Ca , у которых газоразрядная камера в областях катода и антикатода герметизирована с помощью специальных кольцевых

уплотняющих изоляторов. При этом расход рабочего газа в таком источнике уменьшен, например, при работе на Хе в 2 раза и составляет $0,15 \text{ см}^3/\text{мин}$. На циклотроне У-400 эти источники позволили в несколько раз увеличить интенсивность ускоренного пучка на конечном радиусе. На циклотроне У-300 герметизация камеры используется при получении ускоренных пучков ионов радиоактивного изотопа углерода $^{14}\text{C}^{2+}$ и $^{14}\text{C}^{3+}$.

Другим способом снижения газового потока в циклотрон является импульсная подача газа в ионный источник ^{44}Ca . Для циклотрона У-400 создан макет ионного источника с различными модуляторами потока газа в разрядную камеру: с вращающимся барабаном (рис. 15), электромагнитным

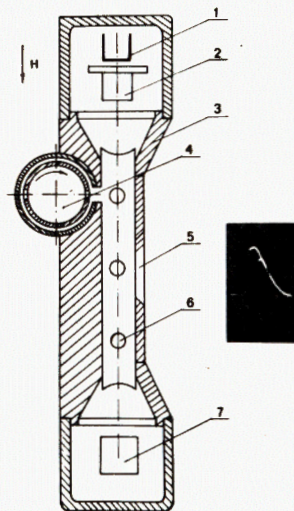


Рис. 15.

Схема источника с импульсной подачей газа. 1 - нить накала, 2 - катод, 3 - разрядная камера, 4 - модулятор, 5 - эмиссионная щель, 6 - фотодиод, 7 - антикатод. На вставке: совмещенные осциллограммы импульса тока тлеющего разряда (верхний) и импульса с фотодиода.

и пьезоклапанами. В источнике ионов такого типа газовый поток в разрядную камеру подается лишь в интервал времени, сравнимый с временем импульса разряда. Как показывают измерения, при этом примерно в 2 раза снижается расход газа в ионном источнике. В то же время за счет снижения перезарядки в плазме разряда из источника с импульсной подачей газа увеличивается выход ионов в высокозарядной части спектра (рис. 16).

Уменьшение потока газа из ионного источника в циклотрон может быть существенно при работе на парах металлов, которые подаются из специального тигля ^{45}Sc (рис. 17). Из такого источника на циклотроне У-300 были ускорены многозарядные ионы Р, Са, Mg и Zn. В случае ионного источ-

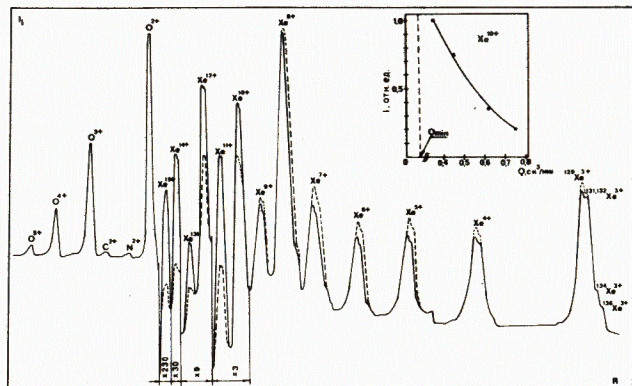


Рис. 16.

Спектр ионного пучка из источника при импульсном (сплошная линия) и непрерывном напуске газа в источник.

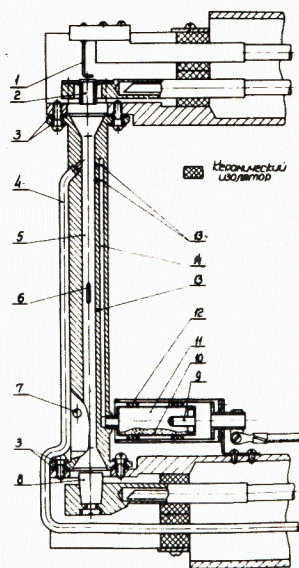


Рис. 17.

Схематическое изображение ионного источника с испарением рабочего вещества. I - нить накала, 2 - катод, 3 - теплоизолирующие шайбы, 4 - трубки подачи газа, 5 - камера, 6 - эмиссионная щель, 7 - термопара камеры, 8 - антикатод, 9 - термопара тигля, 10 - испаряемое вещество, II - тигель, 12 - нагреватель, 13 - отверстие напуска пара, 14 - паропровод.

ника с катодным распылением рабочего вещества разряд зажигается на вспомогательном газе, подача которого полностью прекращается при поступлении паров вещества из тигля. Пары металла быстро "откачиваются"

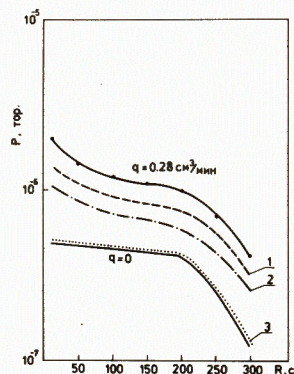


Рис. 18.

Возможности улучшения вакуума в циклотроне за счет уменьшения потока газа из ионного источника. 1 - герметизированный источник, 2 - источник с импульсной подачей газа, 3 - источник, работающий на парах металлов.

холодными поверхностями источника и циклотрона. Возможности улучшения вакуума в циклотроне за счет уменьшения потока газа из ионного источника представлены на рис. 18.

4.3. Система транспортировки пучка из У-400 в У-400М

Пучки ионов от кислорода до урана, выведенные из циклотрона У-400, будут транспортироваться до постускорителя У-400М по монопроводу диаметром 100 мм, проходящему по галерее длиной 120 м, соединяющей залы ускорителей. Система транспортировки пучка предусматривает возможность работы циклотрона У-400 как в автономном режиме, так и в режиме инжектора и состоит из следующих элементов:

- 1) поворота выведенных из У-400 пучков ионов в галерею;
- 2) транспортировки пучка по галерее;
- 3) снижения транспортируемого пучка на уровень медианной плоскости постускорителя У-400М;
- 4) поворота пучка и его нацеливания на перезарядную мишень, расположенную в центральной области У-400М.

Поворот пучка в галерею осуществляется на угол 60° . Система с таким углом поворота включает в себя ахроматическую часть (D_1-Q-D_2) (рис. 19), компенсирующую увеличение горизонтального размера, вызванное дисперсией^{/46,47/}.

Фокусировка транспортируемого по галерее пучка будет осуществляться дублетами квадрупольных линз.

Снижение пучка ионов на уровень медианной плоскости постускорителя У-400М будет реализовано параллельным переносом пучка в вертикальной плоскости с ахроматической частью элементов (D_3-Q-D_4) (рис. 20).

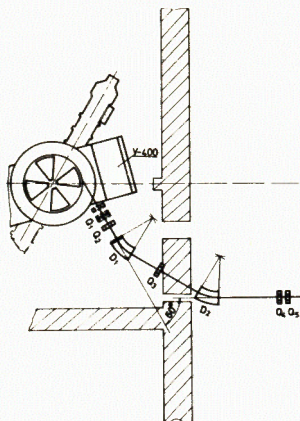


Рис. 19.
Схема поворота пучка в галерее.

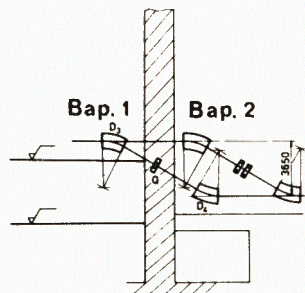


Рис. 20.
Система вертикального снижения пучка.

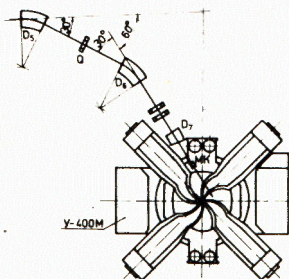


Рис. 21.
Система ввода пучка в постускоритель
У-400М.

Поворот пучка в область расположения перезарядной мишени возможен бездисперсионным отклонением системой (D_5-Q-D_6) (рис. 21).

Дублет квадрупольных линз $Q-Q$ согласует эмиттанс пучка с аксептансом циклотрона У-400М. Пучок направляется на перезарядную мишень диполем D_7 через пассивный магнитный канал (МК). Магнитный канал компенсирует расхождение пучка, вызванное прохождением его через рассеянное магнитное поле постускорителя У-400М.

Параметры транспортируемого пучка представлены в табл. 4.

Таблица 4

Магнитная жесткость пучка	3,7 Тм
Максимальная энергия на нуклон	2,5 МэВ для 16_0^+I 1,7 МэВ для 238_U^+I2
Эмиттанс пучка	40 мм·мрад - горизонтальный 16 мм·мрад - вертикальный
Разброс энергии (электростатический вывод)	0,5%

Магнитные свойства элементов системы транспортировки рассчитаны с использованием вычислительной программы "Транспорт"/48/. В выполненных расчетах положение точки L мы рассматривали как стартовую точку. Фазовый объем пучка на выходе циклотрона У-400 был взят в виде канонического.

Для данной системы транспортировки выбраны линзы ИК-30-600, изготовленные в СРР и используемые на У-400, а также магниты типа ЭМК-30/39/. Параметры этих элементов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Основные параметры магнитных элементов системы транспортировки

Линза ИК-30-600/39/

1. Максимальный градиент магнитного поля	$G_{\max} = 6$ Т/м
2. Длина полюса линзы	1 = 0,3 м
3. Апертура линзы	2а = 0,11 м

Отклоняющий магнит ЭМК-30

1. Радиус осевой траектории	3 м
2. Максимальная индукция	1,3 Т
3. Угол отклонения	30°
4. Воздушный зазор	0,08 м

Корректирующий магнит ЭМК-0,46^{/39/}

1. Индукция магнитного поля	0,05 Т
2. Длина магнита	0,18 м
3. Апертура	0,108 м

Для устойчивой транспортировки пучков системы питания магнитов должны иметь точность стабилизации тока $5 \cdot 10^{-4}$, линз $5 \cdot 10^{-3}$. Неточности в установке линз и магнитов приводят к сдвигу пучка в целом, который может быть скорректирован путем включения в систему транспортировки корректирующих электромагнитов типа ЭМК-0,46.

Расчеты требуют, чтобы выдерживались следующие допуски на расстановку элементов системы транспортировки:

- величина смещения линз в поперечном направлении - ± 1 мм;
- величина смещения магнитов по двум взаимно перпендикулярным направлениям - $\pm 0,5$ мм;
- угловые допуски - ± 1 мрад.

4.4. Циклотрон У-400М

В качестве второй ступени ускорительного комплекса тяжелых ионов используется изохронный циклотрон У-400М с диаметром полюсов 4 м, который создается на основе электромагнита классического циклотрона У-300.

Циклотрон У-400М предназначен для ускорения до энергии 120+20 МэВ/нукл ионов от кислорода до урана с отношением массы к заряду в диапазоне $A/Z=2+5$.

4.4.1. Электромагнит и структура магнитного поля У-400М

Изохронный циклотрон У-400М с диаметром полюсов 4 м создается на основе электромагнита существующего классического циклотрона У-300.

Одной из основных задач при создании циклотрона У-400М является формирование его магнитного поля, обеспечивающего пространственную и временную устойчивость движения ускоряемых ионов. На первом этапе разработки ускорителя проведено численное моделирование его магнитного поля на ЭВМ^{/49/} с целью выбора параметров магнитной структуры. Одной из проблем было получение величины напряженности среднего магнитного поля до 20 кГс. Расчеты показали, что для этого необходимо увеличение (на 10%) сечения магнитопровода электромагнита, увеличение числа витков обмотки возбуждения с 448 до 504 (за счет установки двух дополнительных секций) и повышения тока с 1900 до 2300А.

Для циклотрона У-400М выбрана магнитная структура с четырьмя слабо спиральными секторами ($\gamma_k = 40^\circ$), радиальные границы которых выпол-

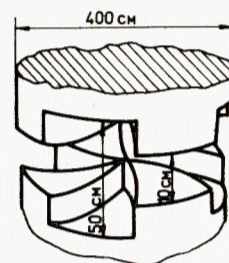


Рис. 22

Геометрия магнитного зазора циклотрона У-400М.

няются в виде дуг окружностей (рис. 22). Для фокусировки ускоряемых ионов всего диапазона энергий значение флаттера магнитного поля должно составлять 0,1-0,15, что обеспечивается выбором зазора в холме, равного $h_x = 100$ мм, а в долине - $h_g = 500$ мм^{/50/}. Изохронная форма среднего магнитного поля будет формироваться растущей по радиусу циклотрона толщиной секторов. В отличие от циклотронов У-200 и У-400, где дополнительная коррекция распределения среднего магнитного поля по радиусу осуществляется системой кольцевых токовых катушек, расположенных под секторами, для ускорителя У-400М выбран вариант их размещения на поверхности секторов, как это принято для циклотронов с разделенными секторами. В нашем случае такой способ коррекции поля является более эффективным по сравнению с системой кольцевых катушек, поскольку последние из-за большего расстояния до медианной плоскости ускорителя и экранирующего действия секторов дают меньший вклад в среднее магнитное поле.

С целью проверки требуемого уровня магнитного поля и основных параметров магнитной структуры была создана модель электромагнита циклотрона У-400М в масштабе 1:20. Измерение поля производилось датчиком Холла из антимонида индия, прокалиброванного на стенде магнитных измерений по датчику ЯМР. Датчик закрепляется на измерительной штанге, позволяющей осуществлять его перемещение по радиусу с шагом 5 мм, а по азимуту 4° . Магнитное поле модели измерялось на элементе периодичности. Зависимость средних магнитных полей от радиуса для различных уровней возбуждения электромагнита представлена на рис. 23. Характерной особенностью этих распределений, имеющей место и для циклотронов У-200 и У-400, является то, что при изменении уровня магнитного поля наклон кривых $\bar{B}(R)$ изменяется так, что есть возможность подобрать зависимость $\bar{B}=B(R)$ для изохронного ускорения ионов с различными отношениями A/Z до различных энергий при относительно небольшой мощности питания корректирующих катушек. При уровне магнитно-

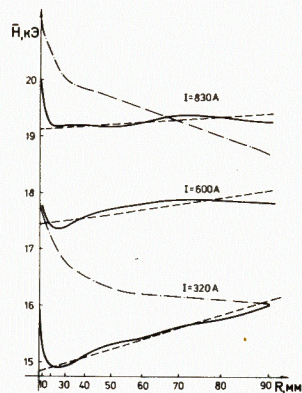


Рис. 23.

Зависимость средних магнитных полей от радиуса: (— — —) плоские секторы, (—) профилированные секторы, (— · — ·) изохронное поле.

го поля B_0 19 кГс изменение $B/B_0 = \gamma$ ($\gamma = E/E_0$, E — энергия ионов в МэВ/нукл, E_0 — энергия покоя) по радиусу минимально, поэтому ионы с отношениями $A/Z=5$ ускоряются до энергий 20 МэВ/нуклон, а при уменьшении уровня поля до 15–16 кГс рост поля с радиусом увеличивается, и ионы с $A/Z=2-3$ могут быть ускорены до энергий 120–80 МэВ/нукл. Следует заметить, что и флаттер магнитного поля при варьировании тока в основной обмотке возбуждения изменяется согласно требованиям увеличения фокусировки ускоряемых ионов при увеличении их энергии — с уменьшением уровня магнитного поля и, соответственно, с увеличением наклона кривой $B(R)$ значение флаттера растет. Это следует из зависимостей $F(R)$, представленных на рис. 24.

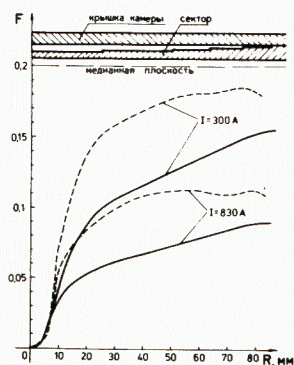


Рис. 24.

Зависимость флаттера магнитного поля от радиуса для плоских (— · — ·) и профилированных секторов (—)

Метод формирования распределения среднего магнитного поля по радиусу циклотрона У-400М с помощью профилирования секторов указал на

возможность получения изохронных магнитных полей для ускорения ионов в диапазоне энергий 20–120 МэВ/нукл. Число катушек, корректирующих распределение среднего магнитного поля, равное 12, выбрано из условий ограничения фазового движения ионов в процессе ускорения в пределах $\pm 10^\circ$. Для устранения возможных смещений медианной поверхности магнитного поля относительно средней геометрической плоскости циклотрона устанавливается 3 пары катушек, имеющих раздельное питание верхней и нижней частей, а для компенсации низших гармоник магнитного поля — 4 пары гармонических катушек. Проведенная работа на модели 1:20 показала, что масштаб моделирования магнитного поля циклотрона У-400М недостаточен для получения распределений магнитного поля в полном объеме, требуемом для разработки сложных систем инжекции и вывода частиц циклотрона У-400М. Поэтому более точное моделирование магнитной системы циклотрона У-400М, включая разработку технологии изготовления токовой корректирующей системы и измерение распределения полей от катушек, будет осуществлено на его модели в масштабе 1:2,92. Результаты исследований позволят определить профиль геометрии сектора.

4.4.2. Система инжекции пучка в У-400М

Наиболее простой схемой инжекции ионов в циклотрон является способ, когда вводимые ионы испытывают перезарядку в центральной области основного ускорителя.

Как видно из табл. I, кратность перезарядки ионов на тонкой мишени (40–60 мкг/см²) варьируется в широких пределах, поэтому радиус ее установки в центральной области циклотрона У-400М меняется от 30 до 100 см (рис. 25).

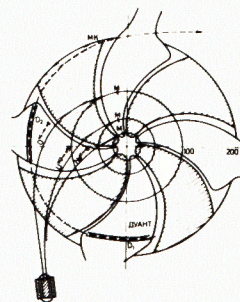


Рис. 25.

Схема ввода и вывода пучков циклотрона У-400М. М — перезарядная мишень, D_1, D_2 — электростатические deflectоры, МК — магнитный канал.

Опыт работы тандема циклотронов У-300 + У-200 показывает, что для точного согласования траекторий ионов, прошедших перезарядную мишень,

с их равновесной орбитой необходим тщательный расчет движения ионов, инжектируемых в ускоритель У-400М, а для нацеливания пучка на мишень требуется корректирующий электромагнит с углом отклонения пучков $\pm 3^\circ$.

Для эффективной инжекции ионов в циклотрон У-400М необходимо временное согласование режима его работы с ускорителем У-400. Это достигается при условии кратности частот обращения ионов

$$N = \frac{n_2 B_2 Z_2}{n_1 B_1 Z_1} = \frac{n_2 f_{062}}{n_1 f_{061}},$$

где члены с индексом "1" относятся к У-400, с "2" - к У-400М, n - номер гармоники ускоряющего напряжения; B - значение средней индукции магнитного поля; Z_1 и Z_2 - заряды ионов до и после обдирки соответственно.

Условие согласования частот обращения ионов может быть обеспечено выбором значений величин магнитных полей обоих ускорителей и заряда ионов (Z_2) пучка после прохождения стриппера. Например, для ускорения ионов элементов от Ar до U значение N равно 3 и 4 для $n_1=4$ и $n_2=3$.

4.4.3. Высокочастотная система У-400М

Высокочастотная система циклотрона У-400М должна обеспечить необходимый темп ускорения ионов с целью: минимизации фазового сдвига частиц в процессе ускорения, уменьшения потерь ионов за счет обдирки на остаточном газе и получения достаточного разделения орбит на конечном радиусе для осуществления эффективного электростатического вывода пучка. Как следует из расчетов, последнее требование для циклотрона У-400М является определяющим. Оценки показывают, что для достижения коэффициента вывода пучка около 70% при толщине септума дефлектора 1 мм распределение орбит на конечном радиусе должно быть не менее 3,3 мм. Это означает, что для ионов с $A/Z=2$ и энергией 120 МэВ/нукл прирост потенциала за оборот составит 750 кВ. Получение такого прироста потенциала для системы из двух дуантов угловой протяженностью 45° , расположенных в противоположных долинах, потребовало бы обеспечения амплитуды ускоряющего напряжения на каждом дуанте порядка 350-400 кВ, что трудно реализуемо. Поэтому нами выбран вариант четырехдуантной системы. В этом случае амплитудное значение ВЧ потенциала на каждом дуанте составит 150-200 кВ, что уже реализовано в ряде ускоряющих систем циклотронов [51, 52]. Опыт длительной эксплуатации циклотронов У-200, У-300 и У-400 показал, что напряженность ВЧ электрического поля вдоль направления магнитного поля составляет от 15 до

19 кВ/см, а в поперечном направлении она равна 50 кВ/см (для небольших участков, например, зазор источник-пулер, напряженность поля достигает 150-180 кВ/см). Эти данные являются основой при выборе геометрии и основных параметров резонансной ускоряющей структуры циклотрона У-400М. Для эффективного использования амплитуды ВЧ - напряжения ускорение осуществляется на второй-четвертой гармониках частоты обращения ионов. Таким образом, частотный диапазон ускоряющей системы составляет 15-25 МГц.

На основании расчетов на ЭВМ геометрических и энергетических характеристик резонансной структуры была выбрана схема, геометрия которой представлена на рис. 26. Она состоит из спирального дуанта угло-

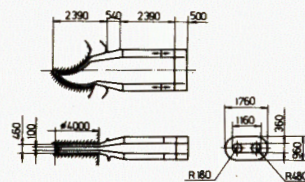


Рис. 26.
Геометрия резонансной системы циклотрона У-400М.

вой протяженностью 45° , закрепленного на плоском штоке короткозамкнутой коаксиальной линии. Перестройке частоты резонансной линии выполняется передвижной закорачивающей пластиной.

Некоторые геометрические характеристики резонансной линии приведены в табл. 6.

Таблица 6

Угловая протяженность дуанта, град	42
Высота дуанта, мм	100
Вертикальный зазор	
дуант - плакировка, мм	180
Минимальный горизонтальный зазор	
дуант - плакировка, мм	50
Длина резонансного бака, мм	3000
Сечение резонансного бака, мм ²	1760 x 960
Сечение штока, мм ²	1200 x 360
Объем бака, м ³	3,2
Ход закорачивающей пластины, мм	1700

На основании предварительных расчетов была изготовлена модель резонансной линии в масштабе 1:4, на которой были проверены основные характеристики системы. На рис. 27 представлены зависимости резонанс-

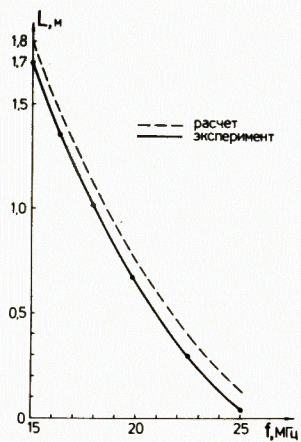


Рис. 27.

Зависимость частоты резонансной системы от положения закорачивающей пластины.

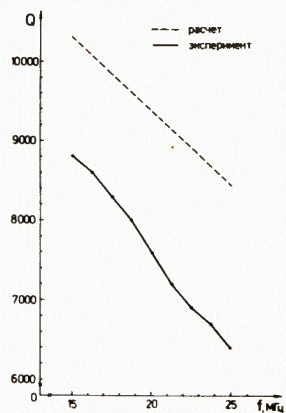


Рис. 28

Зависимость добротности резонансной системы от частоты.

ной частоты линии от положения закорачивающей пластины. Расчетные и экспериментальные зависимости добротности резонансной линии от частоты приведены на рис. 28, а зависимости ВЧ напряжения от радиуса для трех рабочих частот - 15, 20 и 25 МГц - на рис. 29. Как видно из рисунка, на верхней частоте 25 МГц наблюдается существенное радиальное падение ВЧ-потенциала, так как дуант как элемент резонансной линии составляет значительную ее часть. Энергетические расчеты проводились в предположении обеспечения в центральной области циклотрона амплитуды напряжений на дуантах на всех частотах 250 кВ. Следует отметить

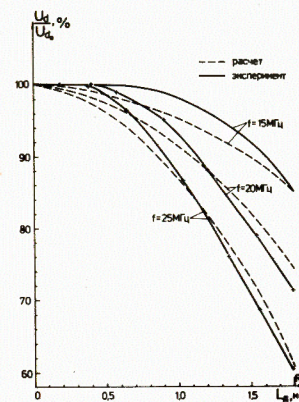


Рис. 29.

Радиальное распределение высокочастотного напряжения по дуанту для различных частот.

два аспекта:

а) Ввиду обычно применяемого режима работы ВЧ-системы циклотронов со скважностью больше 3, средняя потребляемая мощность всей системой ниже импульсной примерно на величину скважности.

б) Реализованные на циклотронах эффективные плотности токов через подвижные контакты обычно составляют величину, меньшую 20 А /см. Поэтому предложенная конструкция резонансных линий проверялась на этот параметр.

В табл. 7 приведены расчетные энергетические характеристики резонансных линий и ВЧ генераторов.

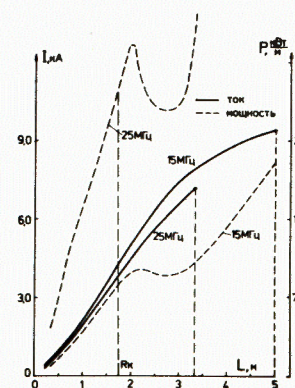


Рис. 30.

Распределение токов и ВЧ мощности вдоль резонансной линии.

Таблица 7

Диапазон частот, МГц	15-25
Напряжение на конечном радиусе I75 см, кВ	200-150
Мощность, потребляемая одной резонансной линией в импульсе, кВт	88-114
Минимальная скважность	3
Средняя мощность, потребляемая одной резонансной линией, кВт	28-38
Импульсная мощность, потребляемая всеми генераторами, кВт	480-640
Средняя мощность, потребляемая всеми генераторами, кВт	160-210
Ток через закорачивающую пластину каждой резонансной линии, А	7100-9200
Плотность тока через контакты закорачивающей пластины в импульсе, А/см	25-34
Эффективная плотность тока через контакты закорачивающей пластины, А/см	14-19
Количество воды, охлаждающей ВЧ генераторы, л/мин	200
Количество воды, охлаждающей все резонансные линии, л/мин	200

На рис. 30 представлены распределения ВЧ токов и выделяемой ВЧ мощности вдоль резонансной линии.

Комплекс системы ВЧ питания и управления циклотроном У-400М обеспечивает:

- 1) Мощность ВЧ питания каждой из 4 резонансных линий на уровне до 120 кВт в диапазоне частот 15+25 МГц.
- 2) Настройку и стабилизацию разности фаз ВЧ напряжений на дуантах с точностью $\pm 1^\circ$ (система АПФ).
- 3) Стабилизацию разности фаз ВЧ напряжения на дуанте и питающего напряжения с точностью $\pm 1^\circ$ (система АПЧ).
- 4) Стабилизацию амплитуды ВЧ напряжений на дуантах с точностью, лучше чем 10^{-3} .
- 5) Автоматическую перестройку резонансных систем и мощных каскадов при перестройке ускорителя на другую рабочую частоту.

Блок-схема ВЧ питания циклотрона У-400М представлена на рис. 31. Наиболее важной и энергоемкой частью системы ВЧ питания являются мощные оконечные каскады с системой связи генератора и резонатора. Предполагается установка этой части генератора в виде отдельного блока на каждую из четырех резонансных линий. Длину фидера связи в этом случае

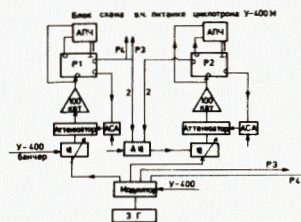


Рис. 31

Блок-схема высокочастотного питания циклотрона У-400М.

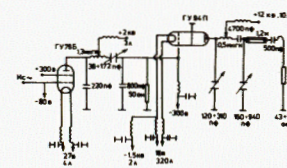


Рис. 32

Принципиальная схема усилителя ВЧ мощности

можно уменьшить до 1,2 м. Возбуждение резонансной линии осуществляется непереключаемой петлей площадью 200 см². Маломощная высокочастотная часть системы располагается на пультовой ускорителя в стойках. Обобщенные источники анодного и сеточного питания располагаются на расстоянии 100 м от ускорителя в отдельном помещении. Система управления располагается на пультовой ускорителя в стойках и на пульте управления. На рис. 32 представлена принципиальная схема возможного оконечного и предоконечного каскада на мощность 100 кВт в диапазоне частот 15+25 МГц для У-400М на основе тетродов ГУ78Б и ГУ94П^{39/}.

4.4.4. Вакуумная система У-400М

Вакуумный объем ускорителя тяжелых ионов У-400М представляет собой 12-угольную рабочую камеру с размером по диагонали 5,2 м, к которой присоединено 4 резонансных бака в форме эллипсов. Рабочий зазор камеры формируется железными дисками с шиммами в виде секторов. Апертура щелевого зазора от центра на периферию составляет 10 см.

Для расчета системы высоковакуумной откачки приняты следующие величины:

Объем вакуумной камеры, м ³	- 35
Поверхность вакуумного объема, м ²	- 375
Величина газовой нагрузки:	
внешнее натекание, л·Тор·с ⁻¹	- 4·10 ⁻⁴
газоотделение с поверхности вак. объема	- 4·10 ⁻³
Рабочий вакуум, Тор	- (1+5)·10 ⁻⁷
Производительность откачки средств высоковакуумной системы ускорителя рассчитывается по формуле:	

$$v = \frac{Q}{P \cdot k} = \frac{4,4 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-7} \cdot 0,5} = 88000 \text{ л.с}^{-1},$$

где Q - величина газовой нагрузки, P - рабочее давление, k - коэффициент проводимости. В суммарной газовой нагрузке при вакууме ниже $1 \cdot 10^{-6}$ Тор поток десорбированных с поверхности вакуумного объема молекул газа составляет около 90% и состоит из газовых компонентов, устойчиво вымораживающихся при $T=77$ К. За основу системы высоковакуумной откачки приняты диффузионные вакуумные агрегаты с азотными экранами в переходных патрубках.

Параметры вакуумного агрегата:

Предельный вакуум	- $8 \cdot 10^{-9}$ Тор
Скорость откачки по азоту	- 4000 л.с^{-1}
по конденсируемым газам	- 16000 л.с^{-1}
расход хладагента	- 2 л.ч^{-1}
запас хладагента	- 70 л
потребляемая мощность	- 4,5 кВт.

На каждом из 4 бочков устанавливается по одному агрегату и по 2 агрегата на камере в диаметрально противоположных направлениях. Таким образом, суммарная быстрота действий средств высоковакуумной откачки У-400М составляет 120000 л.с^{-1} и обеспечивает надежное получение рабочего давления в камере ускорителя на уровне $(1+5) \cdot 10^{-7}$ Тор. При этом вакууме потери пучка при ускорении не превысят 20%. Понижение давления ниже $1 \cdot 10^{-7}$ Тор возможно с применением криогенных панелей, работающих в рефрижераторном режиме охлаждения до $T=18+20$ К.

4.4.5. Источники ионов для наладки ускорителя У-400М в автономном режиме

Важным этапом работ при создании циклотронного комплекса является исследование режимов ускорения и получения проектных параметров выведенных из У-400М ионных пучков в автономном режиме при проведении пусконаладочных работ.

В диапазон ускоряемых на У-400М частиц входят ионы с отношением массы к заряду $A/Z=2+5$. Поэтому для наладки У-400М достаточно иметь источник ионов с накаливаемым катодом (рис. 33) для пучков He^{2+} или аналогичный источнику легких частиц циклотрона ЛЯР У-200, из которого могут быть получены ионы вплоть до Ar^{8+} .

Для проведения наладочных работ на У-400М может быть также применен источник ионов лазерного типа^{53/}, из которого к настоящему времени на циклотроне У-200 ускорены ионы различных элементов вплоть до Cr^{13+} .

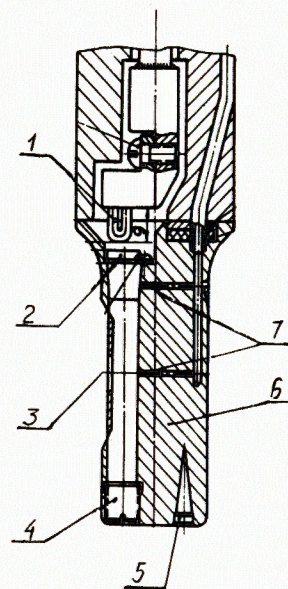


Рис. 33

Головка источника легких ионов циклотрона У-200, 1 - катод, 2 - диафрагма, 3 - эмиссионная щель, 4 - антикатод, 5 - канал охлаждения, 6 - анод, 7 - канал ввода газа.

4.4.6. Система вывода и транспортировки пучка из У-400М

Набор энергии ионом за оборот при четырехдунтной ускоряющей системе угловой протяженностью ψ составляет $w=8Z V \sin n\psi/2$. Для эффективного ускорения и вывода тяжелых ионов на циклотроне У-400М необходимо использовать режим ускорения на второй ($n=2$) и третьей ($n=3$) гармониках высокочастотного напряжения. Требуемый диапазон частот резонаторов циклотрона при этом составит 15-25 МГц. Прирост радиуса за оборот при ускорении ионов от Ne до U до энергий $20+60$ МэВ/нукл равен $3,5+8,5$ мм ($V = 150+200$ кВ), что позволит выводить ионы двумя электростатическими дефлекторами без дополнительного разделения орбит (см. рис. 25). В расчетах использовались реконструированная карта распределения магнитного поля У-400. Местоположение фокусирующих магнитных каналов (МК) соответствует максимальным градиентам магнитного поля. Для вывода частиц с энергией 120 МэВ/нукл требуется напряженность электрического поля в каждом дефлекторе 100 кВ/см. Комплекс транспортировки внешних пучков изохронного циклотрона У-400М состоит из разветвленной системы проводки пучков, позволяющей разводить к физическим установкам как пучки У-400, так и пуч-

ки У-400М. Общая структура системы транспортировки представлена на рис. 34. Расчет системы проводки пучков проведен для пучков У-400М с параметрами, представленными в табл. 8.

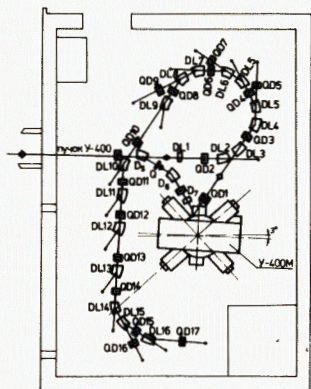


Рис. 34.

Общая структура системы транспортировки пучков циклотрона У-400М.

Таблица 8
Характеристики выведенного пучка У-400М

Максимальная жесткость пучка	3,455 Тм	для $^{238}\text{U} + ^{50}$
	3,268 Тм	для $^{16}\text{O} + ^8$
Максимальная энергия на нуклон	20 МэВ	для $^{238}\text{U} + ^{50}$
	120 МэВ	для $^{16}\text{O} + ^8$
Эмиттенс пучка	50 мм мрад	- горизонтальный
	17 мм мрад	- вертикальный
Разброс энергии	0,5%	

Фокусирующим элементом системы транспортировки выбран дублет квадрупольных линз (QD1-QD17) с апертурой 0,11 м, максимальным градиентом индукции магнитного поля 6 Т/м, активной длиной полюса 0,3 м.

Отклонение пучка в направлении физических установок осуществляется магнитами (DL1-DL16) с параметрами:

Отклоняющий магнит	Радиус поворота	Угол отклонения	Зазор между полюсами	Индукция поля
ЭМК-30	3 м	30°	0,08 м	1,3 Т

Отклоняющие магниты имеют вертикально-фокусирующие кривые срезы, позволяющие производить двойную фокусировку пучка.

Коррекция положения и смещения выведенных пучков осуществляются электромагнитами с параметрами:

Магнит коррекции	Угол коррекции	Индукция поля	Рабочий зазор
ЭМК-0.46	0,24	0,0500 Т	0,108 м

5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА И ПУЧКИ

Основные параметры ускорительного комплекса представлены в табл. 9. Зависимость кинетической энергии и интенсивность ускоренных ионов от массового числа для У-400 + У-400М в сравнении с созданными и проектируемыми ускорительными установками показана на рис. 35 и рис. 36. На основании экспериментальных данных, полученных на тандеме циклотронов ОИЯИ (У-300 + У-200), эффективность ускорения циклотрон-

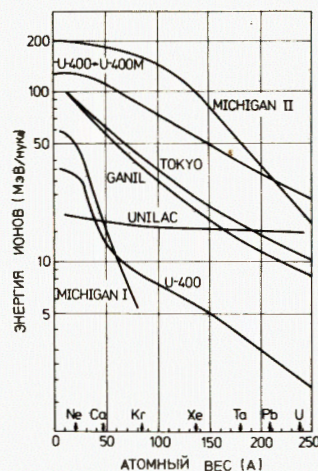


Рис. 35.

Зависимость кинетической энергии ускоренных ионов от массового числа для У-400 + У-400М в сравнении с созданными и проектируемыми установками.

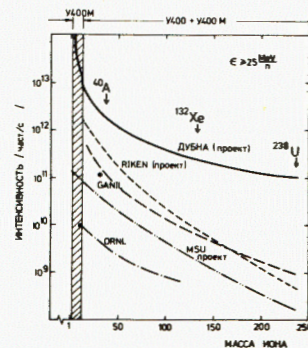


Рис. 36.

Зависимость интенсивности пучков ускоренных ионов от массового числа для У-400 + У-400М в сравнении с созданными и проектируемыми установками

ного комплекса (отношение величины тока выведенного пучка из У-400М к величине тока из ионного источника) составит 10^{-4} . Как следует из таблицы выхода ионов из источника, интенсивность пучков ионов вплоть до U из У-400М превысит 10^{11} с⁻¹.

Таблица 9

	У-400	У-400М
<u>Электромагнит</u>		
Диаметр полюсов, мм	4000	4000
Конечный радиус ускорения, мм	1750	1750
Вес магнита, т	2100	2300
Средний воздушный зазор, мм	200	300
Число витков основной катушки возбуждения	2x252	2x252
Рабочий ток в обмотке электромагнита, А	2500	2300
Максимальное среднее магнитное поле в центре, кГс	21,3	19,5
Число секторов	4	4
Угол спиральности, град.	-	40
Число корректирующих обмоток	18	18
<u>Высокочастотная система</u>		
Число дуэнтов	2	4
Азимутальная протяженность, град.	42	42
Напряжение на дуэнте, кВ	100	150-200
Диапазон частот, МГц	6-12	15-25
Апертура дуэнта, мм	120	100
Зазор дуэнт-земля, мм	50	180
<u>Вакуумная система</u>		
Объем вакуумной камеры, м ³	25	35
Давление в камере, Тор	(10^{-7}) [*]	$5 \cdot 10^{-7}$
Количество насосов	5	6
Скорость откачки, л.с ⁻¹	$1 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
<u>Система вывода и транспортировки пучка</u>		
Азимутальная протяженность дефлекторов, град	2x38	2x38
Входной зазор, мм	10	8
Напряжение на дефлекторе, кВ	60	80
Азимутальная протяженность фокусирующего магнитного канала, град	45	45
Градиент поля в канале, Гс/см	500-800	600-900
Эффективность вывода, %	70±80	70
Число каналов внешних пучков	12	более 10

* С применением дополнительных мер по улучшению вакуума.

	У-400	У-400М
<u>Пучки</u>		
Масса ускоряемых ионов	16-238	16-238
Энергия ускоренных ионов, МэВ/нукл	1,7-2,5	20-120
Интенсивность пучков, частиц/с	10^{13} - 10^{14}	10^{11} - $5 \cdot 10^{12}$
Отношение массы к заряду, А/З	16±20	2±5
Разброс энергии, %	0,5	0,5
Стоимость часа работы, руб.	100	100
Потребляемая электрическая мощность, МВт	1	1

6. ВТОРИЧНЫЕ ПУЧКИ И ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

С созданием циклотронного комплекса У-400 + У-400М и ускорением пучков ионов всех элементов вплоть до урана открываются новые возможности получения пучков вторичных частиц, а также увеличения интенсивности и энергии ускоряемых ионов путем создания накопителя тяжелых ионов или последующего доускорения в кольцевом ускорителе циклотронного типа.

6.1. Возможности получения вторичных пучков

Высокая интенсивность пучков циклотрона У-400 (10^{13} + 10^{14} част/с) позволяет при использовании вместо перезарядной фольги различных тонких мишеней получать пучки компаунд-ядер, осколков деления и других продуктов ядерных реакций, формировать и использовать их либо непосредственно в эксперименте, либо для последующего ускорения во второй ступени (У-400М). Оценки показывают, что при интенсивности первичного пучка тяжелых ионов в 10^{14} с⁻¹ интенсивность экзотических частиц во вторичном пучке может составлять 10^5 + 10^9 част/с в зависимости от ядра мишени-конвертора и выбранной реакции.

При энергиях в несколько десятков МэВ на нуклон появляется возможность исследований (подобно использованию М и П-мезонов на протонных ускорителях) на пучках вторичных ионов - радиоактивных продуктах реакций и осколках деления, отличающихся большой вариацией по параметру А/З. Это ионы таких изотопов, как ^{6,8}He, ^{11,16}C, ¹³N, ¹⁵O, ¹⁴⁵Xe, ¹³⁹I, ⁹⁴Kr и др.

Вторичные пучки нейтроноизбыточных и нейтронообогащенных ядер представляют большой интерес для задач ядерной спектроскопии, астрофи-

зики, имплантации и др. Новые интересные возможности могут быть предложены также для синтеза тяжелых и сверхтяжелых ядер, так как при использовании очень нейтронообогатенных бомбардирующих частиц чувствительность эксперимента, как показывают оценки, может увеличиваться на несколько порядков.

Что касается имплантации радиоактивных ядер на циклотронном комплексе, то таким образом можно ускорять ионы изотопов с временем жизни 10^{-4} с.

6.2. Дальнейшие пути развития циклотронного комплекса тяжелых ионов

Перспективы развития У-400 + У-400М связаны как с повышением энергии ускоряемых частиц, так и интенсивности получаемых пучков.

Величина энергии ионов на выходе У-400М спадает с ростом массы ускоряемых частиц. Выход ионов из дугового циклотронного источника сильно уменьшается с ростом заряда частиц.

Поэтому наряду с возможностью повышения интенсивности пучка при создании накопителя и повышения энергии частиц посредством создания последующей ступени ускорения существуют пути развития циклотронного комплекса за счет собственных систем и, в частности, инжектора ионных пучков.

Выше были показаны новые разработки дугового источника ионов, направленные на повышение интенсивности пучка циклотронного комплекса тяжелых ионов. Для повышения энергии пучков тяжелых ионов на выходе У-400М определенный интерес представляет развитие нового поколения источников многозарядных ионов.

В настоящее время успешно ведутся работы по созданию для циклотронов интенсивных ионных источников лазерного типа и ECR-источника, в котором используется разогрев электронов на частоте циклотронного резонанса^{/55,56/}. Новый способ получения интенсивных ионных пучков предложен на основе использования малых токамаков, например, ТМ-4, где, как показывают оценки^{/57/}, поток выходящих ионов железа может составлять 10^{13} см⁻² с⁻¹.

Выход ионов тяжелых элементов из источников многозарядных ионов различных типов^{/58/} представлен на рис. 37. Видно, что наибольший интерес для циклотронного метода ускорения тяжелых ионов с точки зрения перспектив развития представляют лазерный, ECR и источник на основе тороидальной ловушки.

Применение лазерного источника на циклотроне У-400 связано с меньшими техническими трудностями, так как этот источник является внутренним. В настоящее время исследованы основные особенности ионо-

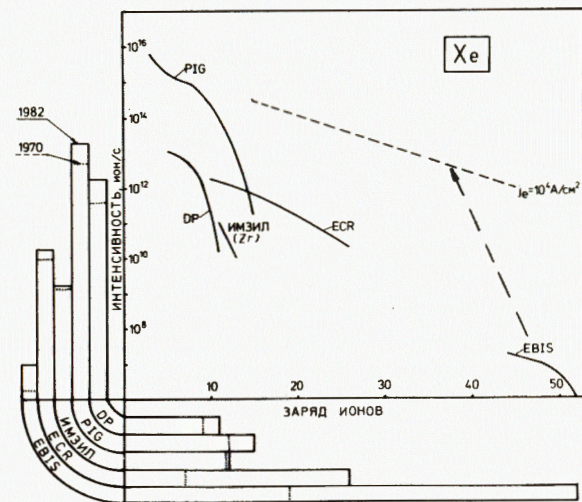


Рис. 37.

Выход ионов и темп получения интенсивных и высокозарядных ионов Xe и Zr из различных источников.

образования в лазерной плазме в условиях магнитного поля. Из макета лазерного источника на циклотроне У-200 ускорены ионы C^{3+} , Mg^{6+} , Si^{7+} , Ca^{10+} , Ti^{12+} , Cr^{13+} . Количество ускоренных ионов составило до 10^{10} частиц в импульсе длительностью до 10 мкс.

Для повышения интенсивности пучков из лазерного источника ионов необходима дальнейшая его оптимизация, а также увеличение частоты посылок лазера.

Определенные перспективы также представляются возможными при использовании лазерного излучения в дуговом источнике многозарядных ионов.

Использование на циклотроне ECR-источника и источника на основе токамака связано с необходимостью создания системы внешней инжекции в плоскость ускорения. В этом направлении в последнее время достигнут значительный успех. В табл. 10 обобщены данные, полученные в циклотронных лабораториях Бельгии и ФРГ с использованием ECR-источников и внешней инжекции в циклотрон^{/55/}.

Для двухциклотронных систем ускорения тяжелых ионов, создаваемых во Франции и США, наряду с источниками PIG и ECR-типа рассматри-

Таблица 10

Внешняя инъекция пучков в циклотроне

Центр	Ионный пучок	Ток из источника	Ток перед инфлектором	Ток за инфлектором	Ток на мишени	Прохождение пучка
Лувен	N^{7+}	100 нА	-	-	4 нА	5±25%
	S^{9+}	5,1 мкА	4,4 мкА	1,5 мкА	0,6 мкА	12%
Карлсруэ	N^{7+}	20 нА	-	-	0,1 нА	0,5%
	He^{2+}	21 мкА	6,7 мкА	-	0,7 мкА	3%

вается также источник EBIS (рис. 38). С использованием источников ионов новых типов предлагается повысить энергию пучков ионов на этих установках для тяжелых элементов^{159/}.

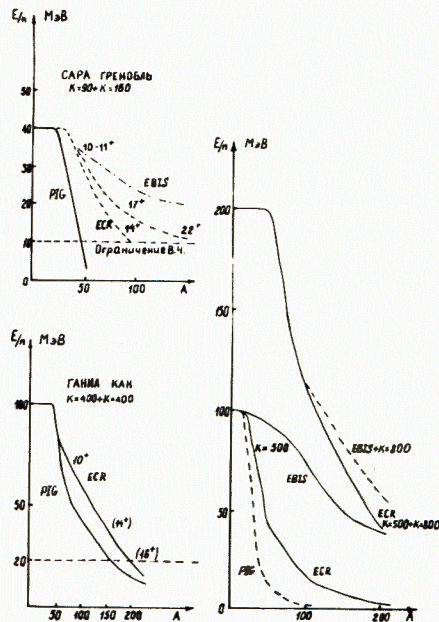


Рис. 38

Сравнение возможностей источников PIG, ECR и EBIS для двухциклотронных систем.

Вместе с тем, для ускорителей ионов непрерывного действия наиболее перспективными представляются источники типа ECR ввиду их способности генерировать в непрерывном режиме достаточно интенсивные (10^{14} с^{-1}) пучки средних и тяжелых ионов с $Z/A = 0,2 \pm 0,3$. Эти источники могут развиваться без видимых принципиальных трудностей в направлении повышения электронной температуры до уровня в сотни кэВ и повышения времени обдирки до величин в несколько секунд.

Основой для такого развития могут служить результаты, полученные уже сегодня на источниках типа ECR, используемых на ряде циклотронов.

Успешное дальнейшее развитие и применение источников ионов с электронно-циклотронным резонансом может позволить на циклотронном комплексе ЛЯР ОИЯИ поднять энергию пучков ионов тяжелее Хе до 50 МэВ/нуклон.

Прямым способом повышения энергии пучка после У-400М является возможность создания III ступени ускорения.

Параметры пучков У-400М после последующей обдирки позволяют осуществить очередное ускорение в кольцевом ускорителе циклотронного типа.

Ряд расчетов, проведенных к настоящему времени, показывает возможность достижения таким способом энергий до 1 ГэВ/нукл с интенсивностью, лишь на 1-2 порядка меньшей по сравнению с интенсивностью пучков из циклотронного комплекса У-400 + У-400М.

Поскольку интенсивность пучков ионов, ускоряемых на циклотронном комплексе тяжелых ионов У-400 + У-400М, близка к предельной, дальнейшее повышение интенсивности возможно при использовании накопительного кольца. В этом случае ускоренные до энергии 20 ± 100 МэВ/нукл пучки ионов или продукты ядерных реакций вводятся в накопитель, в котором плотность потока частиц поднимается до критического значения, обусловленного ограничениями объемного заряда.

При этом для энергии 100 МэВ/нукл в накопительном кольце интенсивность циркулирующего пучка может составить до 10^{12} частиц, что позволяет получать интенсивные сгустки ионов.

7. СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ, МОДЕЛИРОВАНИЮ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА

Циклотронный комплекс тяжелых ионов, несмотря на то, что является сложной системой, может быть относительно легко реализуемым, поскольку ряд его составных частей существует, и без каких-либо изменений или с небольшими доработками может быть использован.

Ускоритель У-400 - инжектор этого комплекса - является действующим. На нем дополнительно необходимо провести работы по дальнейшему повышению вакуума и осуществить систему электростатического вывода ускоренных ионов.

Галерея и канал для транспортировки пучков ускоренных ионов циклотрона У-400 в настоящее время начали создаваться по разработанному проекту. Ожидается завершение их строительства к концу 1985 года или в начале 1986 года.

Вторая ступень ускорения тяжелых ионов - циклотрон У-400М - создается на базе ныне действующего циклотрона У-300 путем его реконструкции. Эта составная часть является наиболее важной и сложной во всем комплексе. В настоящее время ведется рабочее проектирование и моделирование составных узлов и систем. Вследствие сложности и важности выбора решений по магнитной и высокочастотной системам, отработка их ведется на моделях. Первый этап моделирования магнитной структуры выполнен на модели в масштабе 1:20. На ней проверен уровень среднего магнитного поля и осуществлен выбор основных параметров магнитной структуры. Вторым этапом моделирования магнитного поля будет выполнен на созданной в настоящее время модели в масштабе 1:2,92, на которой будет сформировано магнитное поле в рабочем диапазоне с помощью железных масс и токовых корректирующих катушек. Результаты явятся основой для рабочего проектирования и изготовления элементов магнитной структуры циклотрона У-400М.

Моделирование высокочастотной системы циклотрона У-400М также ведется в два этапа. На первом этапе оно выполнено в масштабе 1:4, проверены расчетные высокочастотные характеристики - частотный диапазон, добротность, а также распределение напряжения по длине резонатора. Окончательная отработка высокочастотной системы будет возможна на одном опытном резонаторе в натуральную величину, на котором будут выполнены измерения всех основных параметров (амплитуда ВЧ напряжения, мощность, добротность) в рабочем режиме.

Выполненные первые этапы моделирования магнитной и высокочастотной систем позволили выработать основные требования на все системы и узлы циклотрона У-400М и приступить к рабочему их проектированию. Предполагается, что проекты основных узлов циклотрона У-400М будут завершены в начале 1985 года. Не менее сложной и важной составной частью циклотронного комплекса являются системы обеспечения его работы. Все они нашли свое отражение в разработанном проектными институтами проекте циклотронного комплекса.

С целью обеспечения возрастающего энергопотребления и надежности электропитания предусмотрено осуществить дополнительный ввод электро-

питания от понижающей подстанции и установить новый силовой трансформатор мощностью 2000 кВА. Для питания основной и дополнительных обмоток электромагнита У-400М, элементов систем ввода и вывода пучка, элементов канала пучка и т.д. предусмотрено использовать статические преобразователи, которые заменят находящиеся в эксплуатации вращающиеся преобразователи. Они будут установлены в машинном зале и других помещениях здания IOI.

Управление циклотронным комплексом будет осуществляться с центрального пульта. В автономном режиме работы циклотронов У-400 управление его работой будет производиться существующего пульта. В системе управления и контроля предусматривается использование электронных систем и ЭВМ. На первом этапе будет осуществляться автоматический сбор информации и представляться персоналу в удобном для восприятия виде. На втором этапе будет разработана автоматизированная система управления и контроля циклотронным комплексом, поддержание оптимального режима работы и автоматической проверки состояния элементов и параметров комплекса. Система управления циклотронным комплексом будет решаться по модульному принципу с учетом прогресса в электронике и ЭВМ.

Что касается радиационной обстановки на комплексе У-400 - У-400М, то основными источниками излучений ускорителя У-400М при работе на физическую установку являются:

1. Вакуумная камера ускорителя, в которой теряется 2% интенсивности ускоренного до конечной энергии пучка ионов.
2. Электростатические дефлекторы, потери интенсивности в которых составляют 30%.
3. Вход в магнитный канал (2% потери интенсивности).
4. Поворотные магниты (1% потери интенсивности).
5. Диагностические устройства (не более 1% потери интенсивности).
6. Мишень экспериментальной установки, где поглощается весь проведенный пучок ионов (70%).

Как показано в работе ^{60/}, определяющей защиту компонентой излучения является пучок быстрых нейтронов, поэтому при оценке величин радиационных полей можно пренебречь вкладом других видов излучения. Расчет защиты выполнялся по нормам мощности эквивалентной дозы $D=P=1,4 \text{ мбэр/ч}^{61/}$.

В работе ^{62/} показано, что число быстрых нейтронов, образующихся в различных комбинациях между ядрами мишени и иона при одинаковой энергии налетающих ионов, отличается не более, чем на фактор 2. Для оценки защиты под различными углами по отношению к направлению пучка от источника излучений использовались нейтроны, полученные в реакции с ионами ¹²C мишени из ⁵⁶Fe - при энергии ионов 135 МэВ/нукл ^{62/}. Учи-

тивалось два вида радиационного излучения - радиальное, ослабленное защитой, и излучение на местности, рассеянное атмосферой. Плотность радиального потока частиц в контролируемой точке вычислялась с помощью выражения^{/63/}:

$$\Phi_p = \frac{\Phi_0}{r^2} \exp\left(-\frac{X}{\lambda}\right) \left[\frac{H}{\text{см}^2\text{с}}\right] \quad (\text{а})$$

где Φ_0 - поток нейтронов от источника в элементе телесного угла (Н/ср.с), r - расстояние от источника до контрольной точки, λ - длина релаксации нейтронов в материале защиты (см), равная 17 см^{/64/}, X - толщина защиты (см.).

Плотность потока нейтронов в контрольной точке на местности Φ_m ^{/63/} на расстоянии r от источника рассчитывалась с помощью выражения

$$\Phi_m = \frac{Q}{\pi r^2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r}{\alpha}\right) \right\} \exp\left(-\frac{r}{\lambda}\right) \left[\frac{H}{\text{см}^2\text{с}}\right], \quad (\text{в})$$

где Q - выход нейтронов из источника в единицу времени (н/с), величины параметров $\alpha=2,8$; $\alpha=56$ м и $\lambda=267-850$ м - длина релаксации нейтронов в воздухе взяты из работы^{/64/}.

Учитывая интенсивность ускоренных ионов 10^{12} с⁻¹ и наименьшее расстояние от источника излучения до контрольной точки, расположенной за защитой 10 м, можно получить следующие величины мощности эквивалентной дозы для радиального потока с учетом толщины существующих стен зала (2 м) на расстоянии от мишени экспериментальной установки

θ	Φ_p (н/см ² с)	P мбэр/ч	P/Д
0°	1300	230	160
90°	200	36	25
180°	260	48	34

б) от остальных источников с потерями, равными 2% и менее

θ	Φ_p (н/см ² с)	P мбэр/ч	P/Д
0°	38	7	5
90°	6	1	0,8
180°	8	1,2	1

Для потока нейтронов, отраженных от атмосферы, падающего в контрольной точке на расстоянии 50 м от источников излучений без защиты сверху источников излучения:

$$\Phi_m = 2,6 \cdot 10^3 \text{ н/см}^2\text{с} \quad \text{или} \quad P = 0,5 \cdot 10^3 \text{ мбэр/ч.}$$

Основной вклад в эту величину дает излучение от физических установок, вкладом излучения от источников, расположенных внутри циклотрона, в расчетах пренебрегалось, так как ярмо и основные обмотки магнита являются в данном рассмотрении достаточно эффективной защитой.

Таким образом, для максимальной интенсивности ионов радиальная составляющая потока нейтронов за защитой от физустановок превышает установленную норму, и это превышение устраняется установкой локальной защиты с толщинами бетонных стен ($\rho = 2,4$ г/см²) под $\theta = 0^\circ - 0,86$ м, $\theta = 90^\circ - 0,55$ м и $\theta = 180^\circ - 0,60$ м. Потребуется также установка защиты от излучения, от электростатического дефлектора под $0^\circ - 0,7$ м бетона и под $180^\circ - 0,5$ м. Толщина локальной защиты от излучения остальных источников будет составлять 0,3 м.

Оценки величин потоков нейтронов Φ_m показывают, что более толстую локальную защиту потребуется установить сверху: над источниками излучения с потерями 2% и менее интенсивности - защита из бетона толщиной ~ 0,4 м, над источниками излучений, связанными с физическими установками - толщиной ~ 1 м.

Таким образом, при работе ускорительного комплекса основным источником излучений являются физические установки. При работе с ускоренными ионами тяжелее Ar, учитывая их энергии и интенсивность при существующей защите, вкладом в радиационную обстановку за защитой можно пренебречь. При работе с ускоренными ионами легче Ar необходима локальная защита экспериментальных установок.

Для циклотронного комплекса тяжелых ионов У-400 + У-400М предусмотрено использовать современную автоматизированную систему дозиметрического контроля, которая будет осуществлять контроль в более чем 80 точках зданий IOI, I3I и I3IB и прилегающей к лаборатории территории. Автоматизированная система дозиметрического контроля будет со-стыкована с системой управления комплексом.

Все остальные системы обеспечения работы циклотрона У-300 практически без существенных изменений будут использованы для работы циклотрона У-400М.

Тепловая нагрузка циклотрона У-400М и оборудования каналов пучков будет сниматься охлаждающей водой существующей в здании IOI двухконтурной системой.

Для реализации разработанного циклотронного комплекса потребуются относительно небольшие материальные и трудовые затраты, поскольку, как сказано выше, часть его составных частей уже имеется или будет использована с незначительными доработками, в том числе для циклотро-

на У-400М будет использован электромагнит циклотрона У-300. При создании циклотрона У-400М и каналов пучков будет максимально использован опыт создания циклотрона У-400, когда многие узлы и системы создавались силами лаборатории, опытного производства и других подразделений ОИЯИ, а элементы каналов пучков У-400 были изготовлены в Центральном институте физики Румынии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С созданием комплекса У-400 + У-400М в значительной степени решается проблема ускорения тяжелых ионов для задач ядерной физики и широкого круга исследований в смежных областях: атомной физики, физики твердого тела, радиохимии, радиационного материаловедения и др.

По параметрам пучков ускоренных ионов (диапазон ускоряемых частиц, интенсивность и энергия) реализуемый комплекс будет превосходить действующие и проектируемые ускорительные комплексы тяжелых ионов в области дорелятивистских энергий.

Вместе с тем, предлагаемый проект обладает возможностью дальнейшего развития путем создания накопителя для повышения интенсивности пучка или последующей ступени ускорения - циклотронной установки кольцевого типа для увеличения энергии пучков до 1 ГэВ/нуклон.

Циклотронный комплекс тяжелых ионов может быть относительно легко реализован и потребует сравнительно небольших материальных затрат, поскольку циклотрон У-400 является действующим, а ускоритель У-400М создается на основе циклотрона У-300, многие узлы, системы и технологические помещения которого будут использованы.

Учитывая опыт создания тандем-циклотронов У-300 - У-200, а также сооружения изохронного циклотрона тяжелых ионов У-400, многие узлы и системы которого создавались силами Лаборатории, Опытного производства и других подразделений Института, циклотронный комплекс тяжелых ионов У-400 + У-400М может быть создан в ОИЯИ до конца следующей пятилетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труды Всесоюзной конференции по ядерным реакциям. Москва, 1957, Изд-во АН СССР, М., 1958.
2. К.Каун и др. ЭЧАЯ, 1977, т. 8, с. I264.
B.Müller. Talk at Workshop on High Resolution Heavy Ion Physics at 20-100 MeV/A at Saclay, 31 May - 2 June 1978.
3. W.Pieper, W.Greiner. Z.F. Physik, 1969. 218, p. 327.

4. Backe et al. GSI-J-1-77, Jahresbericht 1976, p. 101 (1977).
5. P.Kienle. Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта. ОИЯИ, Д7-83-644, Дубна, 1983, с. 216.
6. H.Emling et al. Jahresbericht 1977, GSI-J-1-78, Mai 1978, p. 62.
L.Hubert et al. Nucl. Phys. 1979. A321, p. 213.
7. H.Backe et al. Phys. Rev. Lett., 1979, v. 43, p. 1077.
V.Metag. Nucl. Phys., 1981, A354, p. 271.
8. Y.Ts.Oganessian et al. Nucl. Phys., 1978, A303, p. 259.
9. R.S.Frosch et al. Phys. Rev. 1968. 174, p. 1380.
10. Г.Д.Алхазов и др. Препринт ЛИАФ, I55, Ленинград, 1975.
11. А.А.Барабошкин и др., ЖЭТФ, 1957, т. 32, с. I294.
А.С.Карамян и др. ЖЭТФ, 1959, т. 36, с. 629.
12. В.И.Гольдманский, УФН, 1965, т. 87, с. 87.
13. J.G.Keller et al. Z. Phys. 1983, A311, Phys. Rev., 1984. C29, p. 1569.
14. G.Münzenberg et al., in "Actinides in Perspective" (N.N.Edelstein ed), Pergamon Press, Oxford, 1982, p. 223.
15. Ю.Ц.Оганесян. Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов, Алушта, ОИЯИ, Д7-83-644, 1983, Дубна, с. 55.
Yu.Ts.Oganessian et al. Preprint, JINR, E7-84-307, Dubna, 1984.
16. V.V.Volkov. Physics Reports, 1978, v. 44, No. 2, 95.
17. G.Wolschin, W.Nörenberg. Z.F.Physik, 1978, A284. Phys. Rev. Lett., 1978, v. 41, p. 691.
18. В.В.Волков. ЭЧАЯ, 1971, т. 2, вып. 2, с. 285.
19. G.Herrmann Proc. Int. Symp. on Superheavy Elements, Lubbock, Texas, March 9-11, 1978; Preprint GSI-M-3-78, Apr. 1978.
20. G.Herrmann. Proc of the 4th Int. Conf. on Nuclei far from Stability (Helsingor, 1981), v. 2. Report CERN 81-09, Geneva, 1981, p. 772.
21. C.Brendel et al. Proc. of the 4th Int. Conf. on Nuclei far from Stability (Helsingor, 1981), p. 664.
22. Ю.А.Батусов и др. ЯФ, 1965, I, с. 271.
H.Nann. Atomic masses and fundamental constants. Ed. J.A.Nolen, Jr.W.Benenson. Plenum Press, New York and London, 1979, v.6,p.51.
23. C.Borcea et al. Nucl. Phys. A415, 1984, p. 169.
24. W.Scheid, J.Hoffmann. Proc. of 2nd Symp. on Physics with Relatively Heavy Ions. L.Schroeder (Ed.) Berkeley, USA, 1974.
25. А.Б.Мигдал, ЖЭТФ, 1972, т. 34, с. II84.
26. А.М.Балдин. Proc. of VIIth Int. Conf on High Energy Physics and Nuclear Structure, Zürich, 1977.

27. R.Stock et al. Proc. of Sympon Relativistic Heavy Ion Research GSI Darmstadt, 1978, v. 1, p. 66.
28. M.J.Glauser. Phys. Rev. Lett., 1975, v. 35, No. 13, 848.
29. D.J.Norris. Radiation Effects, 1972, v. 14, No. 1.
30. I.A.Shelaev et al. Proc. of the Sixth International Cyclotron Conference, New York, 1972, p. 232.
31. GSI Jahresbericht. GSI-82-15, Darmstadt, 1982, s. 52.
32. The GANIL group. Proc. of the 1983. Particle Accelerator Conference, IEEE Trans. on Nucl. Sci, 1983, v. NS-30 N4, p. 2102.
33. M.Lieubin. Proc. of the 1983. Particle Accelerator Conference, IEEE Trans on Nucl. Sci, 1983. v. NS-30, N4, p. 2072.
34. H.Kamitsubo. Proc. of the Ninth International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Caen, France, p. 13, 1981.
35. B.W.Wei. Proc. of the Ninth International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Caen, France, p. 23, 1981.
36. M.L.Mallory. Proc. of the 1983 Particle Accelerator Conference, IEEE Trans. on Nucl. Sci, 1983. v. NS-30, N4, p. 2061.
37. U.Trinks et al. Proc. of the 1983. Particle Accelerator Conference, IEEE Trans. on Nucl. Sci, 1983, v. NS-30, N4.
38. Ю.Ц.Оганесян, ОИЯИ, P9-12843, Дубна, 1979.
39. Ю.Ц.Оганесян и др. Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна, 1983, т. I, с. 47-57.
40. Ю.Ц.Оганесян и др. Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-83-644, Дубна, 1983, с. 531-536.
41. Гульбекян Г.Г. и др. ОИЯИ, I3-80-843, Дубна, 1980.
42. С.Л.Богомолов и др. В кн.: Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1983, т. I, с. II2.
43. Ю.П.Третьяков и др. В кн.: Труды УП Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц ОИЯИ, Дубна, 1981, т. I, с. 81.
44. A.S.Pasyuk et al. In Proc. XVI Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gaser. Dusseldorf, 1983, v. 5, p. 770.
45. А.С.Пасюк и др. Атомная энергия, 1970, т. 28, в. I, с. 75.
46. Х.К.Штеффен. Оптика пучков высокой энергии. "Мир", М, 1969.
47. В.Н.Котов, В.В.Миллер. Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий, М., Атомиздат, 1969.
48. K.L.Brown, B.K.Kear, K.Howry. "TRANSPORT/360A Computer Program for Designing Beam Transport Systems" SLAC-91, 1970.
49. С.И.Козлов и др. ОИЯИ, 9-83-125, Дубна, 1983.
50. Ю.Ц.Оганесян и др., ОИЯИ, 9-82-756, Дубна, 1982.
51. BIETH C. et al. LES SYSTEMES ACCELERATEURS CANIL 80R/148/HF/23, October 1980.

52. M.Lieuvin. Proc. of the Ninth International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Caen, France, p. 81, 1981.
53. Б.Н.Гикел и др. В кн.: Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна, 1983, т. I, с. II6-II0.
54. Eine Beschleunigeranlage für Schwere Ionen Hoher Energie. GSI-82-2 Report, Darmstadt, 1981, S. B-39.
55. 5-th ECR ION Sourcer Workshop, Loubain-La-Neuve April 21-22, 1983. B-1348 Louvain-La-Neuve, 1983.
56. V.Dugar - Zhaban et al. Nucl. Instr. and Meth. 1984, 219, p. 263-268.
57. Р.А.Демирханов и др. Препринт № I СФТИ-I, Сухуми, 1984.
58. В.Б.Кутнер. ОИЯИ, P9-81-139, Дубна, 1981.
59. Loiseaux I.M. Nucl. Physics, 1981. A354, p. 4150-4320.
60. R.C.Alsmiller, Nucl. Instr. & Meth., 1969, v. 72, p. 213.
61. НРБ-76 и ОСП-72/80, Москва, Энергоиздат, 1981, с. 58.
62. C.J.Lindenbaum, Ann. Rev. Sci., 1961, v. 11, p. 213.
63. S.Fujita et al. IPCR, 14, 1980, p. 203.
64. В.Ф.Козлов, Справочник по радиационной безопасности, Москва, Атомиздат, 1977, с. 219.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 августа 1984 года.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
В В Е Д Е Н И Е	3
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ФИЗИКИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ .	4
2. РАЗВИТИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НИЗКИХ И СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ	14
3. ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ЛЯР ОИЯИ	16
4. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ	17
4.1. Схема циклотронного комплекса	17
4.2. Циклотрон У-400	19
4.2.1. Автономный режим У-400	19
4.2.2. Инжекторный режим У-400	21
4.2.2.1. Вывод пучка из У-400	22
4.2.2.2. Вакуумная система У-400	23
4.2.2.3. Источники ионов У-400	25
4.3. Система транспортировки пучка из У-400 в У-400М	29
4.4. Циклотрон У-400М	32
4.4.1. Электромагнит и структура магнитного поля У-400М	32
4.4.2. Система инъекции пучка в У-400М	35
4.4.3. ВЧ-система У-400М	36
4.4.4. Вакуумная система У-400М	41
4.4.5. Источники ионов для наладки ускорителя У-400М в автономном режиме	42
4.4.6. Система вывода и транспортировки пучка из У-400М	43
5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА И ПУЧКИ	45
6. ВТОРИЧНЫЕ ПУЧКИ И ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ	47
6.1. Возможности получения вторичных пучков	47
6.2. Дальнейшие пути развития циклотронного комплекса тяжелых ионов	48
7. СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ, МОДЕЛИРОВАНИЮ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА	51
З А К Л Ю Ч Е Н И Е	56