



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

B - 292

9-80-339

**ВЕНИКОВ**  
Николай Иванович

**УСКОРЕНИЕ ПОЛУТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ  
В ЦИКЛОТРОНЕ**

Специальность 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1980

Работа выполнена в Институте атомной энергии им. И.В.Курчатова

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Юрий Петрович Вахрушин  
доктор физико-математических наук Владимир Васильевич Кольга  
доктор технических наук Николай Николаевич Краснов

Ведущее предприятие: Ленинградский институт ядерной физики  
г. Гатчина

Защита состоится " " \_\_\_\_\_ 1980 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании специализированного совета  
Д.047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного  
института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛЯП ОИЯИ.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1980 года

Ученый секретарь  
специализированного  
совета  
кандидат физико-математических  
наук

И.А.Батусов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ.** В последние годы переходная область между легкими и тяжелыми ионами выделяется в самостоятельную, получившую название "полутяжелые ионы". Эти ионы в ядерных реакциях обладают одновременно свойствами как легких, для которых характер взаимодействия определяется индивидуальными свойствами и структурой этих ионов, так и тяжелых, для которых важны общие свойства ядерной материи. Были обнаружены явления, специфичные лишь для полутяжелых ионов. Хотя к полутяжелым ионам по некоторым признакам можно отнести ионы в диапазоне массовых чисел  $6 \leq A \leq 16$ , но наиболее характерное для этой области поведение имеют ионы изотопов лития и бериллия:

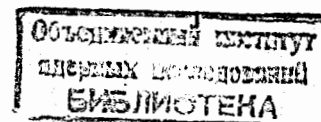
а) ядра этих ионов обладают ярко выраженной кластерной (квазимолекулярной) структурой с минимальной энергией диссоциации на простейшие кластеры ( $\alpha$ ,  $t$ ,  $\alpha$ ), и это открывает уникальную возможность для изучения квазимолекулярной природы ядер в реакциях передачи кластеров;

б) характер изменения межъядерных взаимодействий при переходе от легких к тяжелым ионам резко меняется. Недавние эксперименты с полутяжелыми ионами показали, что это происходит в области ядер лития и бериллия.

Полученные ионы открывают новые перспективы и в тех областях ядерной физики, где раньше использовались другие частицы: ядра изотопов лития, характеризующиеся довольно большим дефектом масс по сравнению с соседними устойчивыми ядрами, могут быть использованы для получения и исследования ядер, далеких от области стабильности;

использование  $^7\text{Li}$  вместо легких ядер при исследовании гигантских резонансов обеспечивает меньшие фоны из-за специфической природы этих ядер;

измерение многих ядерных констант - количественных характеристик ядерных процессов, которые используются в инженерных ра-



счетах ядерных и термоядерных реакторов, также упрощается при использовании этих ионов;

полутяжелые ионы могут иметь преимущество перед легкими в активационном анализе при определении примесей изотопов водорода в материалах.

Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с научно-тематическими планами Института атомной энергии им. И.В.Курчатова.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ заключается в научном обосновании наиболее целесообразных технических решений, обеспечивающих решение проблемы получения и ускорения полутяжелых ионов в циклотроне, а именно:

- а) способа получения полутяжелых ионов в циклотроне;
- б) способа перевода классического циклотрона в изохронный с широким регулированием энергии и типов ионов;
- в) способа измерения энергетического спектра пучка ускоренных полутяжелых ионов;
- г) способа реконструкции циклотрона для времяпролетных исследований с полутяжелыми ионами.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА исследований, относящихся к проблеме получения и ускорения полутяжелых ионов в циклотроне, определяется прежде всего тем, что эта проблема полностью была решена впервые в мире на циклотроне ИАЭ, что послужило толчком к развитию этих работ во многих других циклотронных лабораториях, т.е. было развито новое научно-техническое направление в области получения и ускорения пучков ионов в циклотронах.

Решение этой проблемы включает в себя также ряд частных решений, обладающих научной новизной, а именно:

Предложена новая схема источника ионов для циклотрона, обеспечивающая надежную работу циклотрона в режиме ускорения многозарядных полутяжелых ионов с высокими интенсивностями.

Предложен и исследован способ увеличения интенсивности ступков ионов в циклотроне путем их извлечения из источника короткими (существенно короче периода ускоряющего напряжения) высоковольтными импульсами с длительностью переднего фронта порядка ширины области фазового захвата в циклотроне.

Предложен и теоретически исследован для циклотрона новый

способ измерения энергии ионов с использованием рекомбинации их в пучке электронов с известной энергией.

Предложен и исследован способ двойного промигивания, позволяющий уменьшать частоту следования ступков ионов на мишени и одновременно уменьшать их длительность, улучшая разрешение времяпролетной методики.

Предложен и исследован способ ускорения ионов с их перезарядкой при двукратном использовании части магнитного поля циклотрона со смещенным источником ионов.

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

1. В результате решения проблемы ускорения полутяжелых ионов на циклотроне ИАЭ с 1965 г. на ионах лития, а с 1974 г. и на ионах бериллия выполнено большое количество научных и прикладных исследований.

2. Сооружен изохронный циклотрон с широким регулированием энергий и типов ионов (помимо полутяжелых — также легких и тяжелых, вплоть до неона) с рекордными интенсивностями полутяжелых ионов и с времяпролетной методикой, с 1977 г. используемый для решения как научных, так и прикладных задач, имеющих важное народнохозяйственное значение (например, измерение нейтронных констант термоядерного диапазона, изучение радиационной стойкости реакторных материалов, определение примесей в высокочистых полупроводниковых материалах с помощью активационного анализа и др.).

3. Ряд предложений и разработок помимо ИАЭ внедрен в ряде институтов Советского Союза и других стран СЭВ. Напр., газозвратная система внедрена на циклотронах ИЯФ АН КазССР (Алма-Ата), ИЯФ АН УзССР (Ташкент), ТПИ (Томск); источник полутяжелых ионов взят за основу при создании источника ионов лития циклотрона в Россендорфе (ГДР); метод измерения энергии ионов с использованием рекомбинации в пучке электронов с известной энергией использовался при исследовании электронного охлаждения в ИЯФ СО АН СССР.

АПРОБАЦИЯ. Основные результаты диссертационной работы докладывались на У, У1, УП и УШ Международных конференциях по изохронным циклотронам (1969 г. — Оксфорд, 1972 г. — Ванкувер, 1975 г. — Цюрих, 1978 г. — Блумингтон); на УП Международной конференции по ускорителям высоких энергий (Ереван, 1969 г.); на

XIII Международной школе молодых ученых по физике высоких энергий (Минск, 1979 г.); на XVI Европейском совещании по циклотронам (Виллиген, 1979 г.); на II, IV, VI Всесоюзных совещаниях по ускорителям (1970 г. - Москва, 1974 г. - Москва, 1978 г. - Дубна); на Всесоюзном совещании по циклотронам (Алма-Ата, 1967 г.); на III Совещании по циклотрону U120-M (Ческе Будейовице, 1973 г.); на II Всесоюзной конференции по нейтронной физике. (Киев, 1973г.).

**ПУБЛИКАЦИИ.** По теме диссертации опубликовано 52 работы, приведенных в списке литературы, получено 5 авторских свидетельств на изобретения.

**СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ.** Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 271 страницу, включая 118 рисунков и список литературных ссылок из 149 наименований.

Введение содержит постановку задачи, перечень рассмотренных проблем и обоснование структуры диссертации.

Первая глава диссертации посвящена исследованию различных способов получения и ускорения многозарядных ионов лития и бериллия в циклотронах и выбору наиболее оптимального способа для циклотрона ИАЗ. Во второй главе приведено описание разработанного источника многозарядных полутяжелых ионов и результаты его исследования. Третья глава посвящена созданию изохронного циклотрона с системой транспортировки полутяжелых ионов о широким регулированием их типа и энергий, а также методам измерения их энергетического спектра. Четвертая глава посвящена реконструкции циклотрона для времяпролетных исследований с полутяжелыми ионами.

В заключении приведен краткий перечень основных научных результатов.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

##### Глава I. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ ЛИТИЯ И БЕРИЛЛИЯ В ЦИКЛОТРОНАХ

Основными представителями полутяжелых ионов, обладающими всеми их достоинствами, являются ионы изотопов лития и бериллия. Но именно они долгое время не были доступны для ядерно-физических

исследований из-за ряда серьезных проблем, возникающих при их получении и ускорении в циклотроне, главными из которых являются: отсутствие газообразных соединений лития и бериллия при нормальной температуре, создающее невозможность использования обычного для циклотронов (газового) источника ионов; высокая химическая активность лития и ряда соединений бериллия; токсичность соединений бериллия; возможность выливания жидкого лития в ускорительную камеру из-за высокой смачиваемости им металлических поверхностей; возможность "микровзрывов" при разогреве гранул лития, покрытых пленками оксидов и нитридов; снижение электрической прочности высоковольтных промежутков при попадании на электроды и изоляторы соединений лития и бериллия; трудности получения высокозарядных полутяжелых ионов из-за высоких потенциалов ионизации; потери полутяжелых ионов на остаточном газе при их ускорении в циклотроне.

Автором было проведено теоретическое и экспериментальное исследование различных возможных способов получения и ускорения многозарядных ионов лития и бериллия:

**Способ ускорения с перезарядкой.** Источники однозарядных полутяжелых ионов разработать несравнимо проще, чем для многозарядных. Например, для ионов лития может быть использована термьонная эмиссия их с поверхности нагретого алемосиликата лития. При работе такого источника загрязнение ускорителя незначительное, однако ускорение однозарядных ионов в циклотроне не обеспечивает его эффективного использования, т.к. энергия в нем пропорциональна квадрату заряда иона. Для увеличения зарядности ионов лития и бериллия до 3 (с целью увеличения их энергии на порядок) можно использовать обдирку предварительно ускоренных ионов до энергии 0,3-0,5 МэВ/нукл. при их прохождении через тонкий ( $\sim 10$  мкг/см<sup>2</sup>) стриппер. Изучены три разновидности способа с перезарядкой:

Внешний ускоритель - инжектор для предускорения ионов до энергии 0,3-0,5 МэВ/нукл. - довольно громоздкая и дорогая установка, да и инжекция из нее в циклотрон с перезарядкой на твердом стриппере не проста в эксплуатации.

Способ с двукратным использованием рабочего магнитного поля, предложенный в ЛЯП ОИЯИ для ускорения тяжелых ионов, предполагающий предускорение малозарядных ионов на субгармонике ВЧ дуантного напряжения, их выпуск, разворот, перезарядную инжекцию



и ускорение уже высокозарядных ионов на основной частоте, требует довольно сложной системы разворота и инжекции, а, главное, из-за различных требуемых законов изменения средней индукции магнитного поля с радиусом обладает ограничением по энергии (применительно к циклотрону ИАЭ максимальная энергия ионов лития 50 МэВ).

Более простой способ, не имеющий такой низкой предельной энергии, был предложен автором и исследован в циклотроне. В нем используется источник малозарядных ионов, смещенный из центра магнитного поля, ускорение их на субгармонике ВЧ напряжения в течение нескольких оборотов, обдирка на стриппере и дальнейшее ускорение на основной частоте с центрированными орбитами. В способе имеются некоторые трудности с совмещением одновременного ускорения двух типов ионов и со стойкостью стрипперов.

Аксимальная инжекция полутяжелых ионов из внешнего источника. Она заманчива из-за того, что при ней практически исключено загрязнение деталей циклотрона и отсутствуют ограничения, имеющиеся при размещении источника внутри циклотрона. Однако эксперименты, проведенные на макете аксиальной инжекции, а также расчеты потерь полутяжелых ионов из-за перезарядки на остаточном газе по разработанной методике, экспериментально подтвержденные на циклотроне, показали наличие значительных потерь этих ионов при таком способе.

Применение внутреннего источника. Подача рабочего вещества в разряд при этом возможна путем разогрева его дуговым разрядом, с помощью распыления ионами, в виде однозарядных ионов с использованием термоионной эмиссии и путем испарения из нагретого тигля.

Существенным недостатком при использовании разогрева рабочего вещества дуговым разрядом является резкая зависимость скорости подачи рабочего вещества в разряд, а следовательно, и выхода ионов от параметров разряда. Кроме того, срок службы такого источника не превосходит нескольких часов.

Наилучшим источником в мире, использующим распыление рабочего вещества ионной бомбардировкой, является источник ЛЯР ОИЯИ. Однако имеется ряд проблем при его использовании для получения многозарядных ионов лития, связанных со спецификой рабочего вещества, содержащего литий. Более пригодным источник такого типа

может оказаться для ионов бериллия. При использовании этого способа была получена интенсивность трехзарядных ионов бериллия во внешнем пучке циклотрона ИАЭ 0,02 мкА, однако при малом сроке службы, поскольку для увеличения последнего требуется разогрев разрядной камеры свыше 1300°C, чего невозможно достичь.

Использование термоионной эмиссии однозарядных ионов в разряд, зажженный на вспомогательном газе, с последующей их ионизацией вызывает ряд проблем, связанных с надежностью работы такого источника.

Внутренний источник, в котором тигль с рабочим веществом располагается рядом с горячей разрядной камерой и нагревается электродпечью, выбран для получения многозарядных полутяжелых ионов для циклотрона после тщательного и всестороннего анализа всех возможных способов. Оптимальность выбора подтверждена тем, что при этом способе циклотрон ИАЭ обеспечивает рекордные интенсивности многозарядных полутяжелых ионов, по-видимому, при наибольшем сроке службы источника.

## Глава II. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКА МНОГОЗАРЯДНЫХ ПОЛУТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

При создании источника с целью преодоления многочисленных трудностей получения многозарядных полутяжелых ионов были использованы следующие основные принципы:

1. Тигль, разрядная камера и паропровод могут нагреваться до температуры 800°C, обеспечивая достаточную упругость паров рабочего вещества (для ионов лития используется металлический литий, для ионов бериллия — соль  $\text{BeF}_2$ ). Детали источника, на которые может попадать нагретое рабочее вещество, изготавливаются из металлов, не взаимодействующих с ним (нержавеющая сталь или тантал).

2. Путем использования систем разогрева (электродпечь) и охлаждения (сжатый воздух) тигля создается необходимый температурный градиент, устраняющий возможность выливания расплавленного лития в разрядную камеру.

3. Осуществляется герметизация тигля и разрядной камеры для сведения к минимуму попадания паров рабочего вещества в ускорительную камеру, которые попадают в нее лишь через небольшую эмиссионную щель. Внутренняя полость разогретой разрядной камеры

является ловушкой для паров рабочего вещества. Эффективность использования рабочего вещества по сравнению с холодной разрядной камерой повышается во много раз.

4. Тигль с выключенным электронагревателем при зажженном дуговом разряде и включенном ВЧ дуантном напряжении нагревается не выше 300°С.

5. Загрузка рабочего вещества в тигль осуществляется в специальном боксе в течение короткого времени, чтобы свести к минимуму время соприкосновения с атмосферой химически активного рабочего вещества и для безопасности рабочих, обслуживающих источник.

6. Система электропитания обеспечивает импульсы дугового разряда с мгновенной мощностью несколько десятков кВт (напряжение 1 кВ, ток до 40 А) с маломощным постоянным ("дежурным") разрядом между импульсами.

7. Имеется вспомогательное газовое питание для зажигания и поддержания разряда. Используются инертные газы  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  с рециркуляцией и очисткой от примесей в специальной газозвратной системе.

8. Имеется дистанционное перемещение источника вдоль кромок дуантов, а катодов – как вдоль кромок, так и их поворот в поперечном направлении.

Наиболее ответственная и сложная часть источника, располагаемая в центральной области циклотрона, схематически представлена на рис. 1. В источнике используется дуговой разряд с прямо-накальными катодами с осцилляцией электронов в сильном магнитном поле.

Окончательная конструкция источника, форма и материал катодов, температурные условия, оптимальные параметры дугового разряда, выбор рабочего вещества и вспомогательного газа, допуски на перекося источника относительно магнитного поля были определены в результате исследований, проведенных сначала на исследовательском стенде, затем на циклотроне. Важными результатами исследований являются следующие:

1. Выход многозарядных ионов зависит от плотности мощности в разряде. Коллимированием разряда удается получать плотность импульсной мощности в разряде более 10 кВт/см<sup>3</sup>, что является, по-видимому, рекордом для дуговых источников с накаленными катодами.

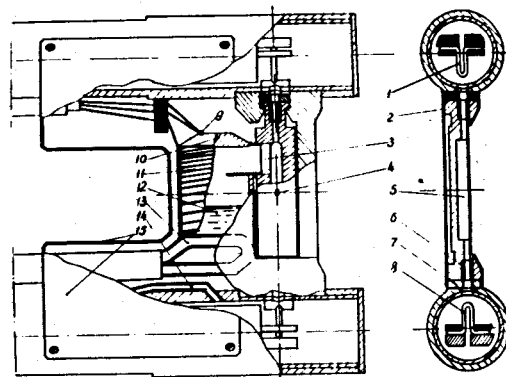


Рис. 1. Схема источника полутяжелых ионов. 1, 8 – катоды; 2, 15 – экраны; 3 – паропровод; 4 – эмиссионная цель; 5 – разрядный канал; 6 – коллиматор разряда; 7 – термоизоляция разрядной камеры; 9 – термопара; 10 – тигль; 11 – электропечь; 12 – литий или соль бериллия; 13 –

охлаждение дна тигля; 14 – ввод газа.

2. Маломощный дуговой разряд в промежутках между мощными импульсами (т.к. "дежурный" разряд) позволяет увеличить среднюю интенсивность пучка многозарядных ионов циклотрона в 1,5–2,5 раза.

3. Наилучшим вспомогательным газом для работы источника на литии и бериллии являются изотопы гелия как с точки зрения срока службы катодов, так и для удобства наладки режимов с близким отношением массы к заряду, и, конечно, с точки зрения отсутствия химического взаимодействия с рабочим веществом. Для получения максимальной интенсивности необходимо свести примесные газы в гелии до 2–3%, для чего необходима система газоочистки.

4. Допуск на перекося разрядной камеры относительно направления магнитного поля очень жесткий (0,5°).

5. Зарядовый состав ионов лития и бериллия, извлекаемых из источника, приведен в таблице 1.

Таблица 1

Зарядовый состав ионов лития и бериллия

Изотоп \ Зарядность	Зарядовый состав ионов лития и бериллия		
	1 <sup>+</sup>	2 <sup>+</sup>	3 <sup>+</sup>
$^6\text{Li}$	78%	19%	3%
$^9\text{Be}$	65%	30%	5%

6. Срок службы источника при работе на литии достигал 40 часов, на бериллии — 65 часов.

#### Исследование импульсного извлечения ионов из источника

Поскольку обычно в циклотроне извлечение положительных ионов происходит в течение всего отрицательного полупериода дуантного ВЧ напряжения, а область фаз ионов, пригодных для ускорения, составляет лишь от 2 до 10% периода ВЧ и находится вблизи амплитудного значения напряжения, то плазма источника в области эмиссионной щели обедняется ионами еще до начала фазового захвата. Беспольное извлечение ионов длится в среднем на порядок большее время, чем это необходимо для циклотрона. Для устранения этого недостатка автором был предложен и исследован на циклотроне способ извлечения ионов из источника короткими (значительно меньше периода ускоряющего ВЧ напряжения) высоковольтными импульсами с длительностью переднего фронта порядка ширины области фазового захвата ионов. Схема импульсного извлечения приведена на рис. 2. Короткие импульсы с амплитудой до 10 кВ, синхронизованные с ускоряющим ВЧ напряжением, подавались на извлекающий электрод, расположенный на расстоянии 1,5 мм от эмиссионной щели источника.

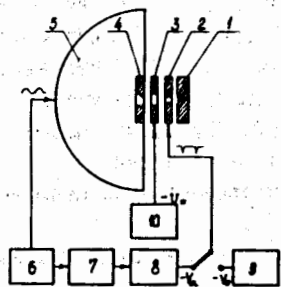


Рис. 2. Схема для исследования импульсного извлечения ионов источника. 1 — источник ионов; 2 — экстрактор; 3 — экранирующий электрод; 4 — пулер; 5 — дуант; 6 — ВЧ генератор; 7 — фазовращатель; 8 — генератор коротких импульсов; 9, 10 — источник постоянного напряжения.

Проведенные исследования показали, что

1) интенсивность ионов в сгустке во внешнем пучке циклотрона при импульсном извлечении возрастает в 2-3 раза по сравнению с извлечением постоянным напряжением;

2) увеличение импульсной интенсивности происходит вследствие накопления ионов в плазме в области извлечения за время между извлекающими импульсами;

3) это увеличение существенно зависит от длительности переднего фронта извлекающего импульса (при ее уменьшении с 15 до 8 нс интенсивность возрастает в 1,5 раза);

4) изменением фазы извлекающих импульсов можно существенно (в 2-3 раза) уменьшить длительность сгустков ионов во внешнем пучке и таким образом улучшить разрешение времяпролетной методики;

5) используя извлечение импульсами с меньшей частотой, чем циклотронная, можно исследовать динамику пучка в циклотроне, в частности, определять число оборотов, за которое выпускается сгусток из циклотрона.

### Глава III. РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ЭНЕРГИЙ ПОЛУТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведение разнообразных экспериментов с использованием полутяжелых ионов, перечисленных выше, требует возможности регулирования их энергии в широком диапазоне, например для ионов лития от 5 до 90-100 МэВ, чего невозможно было достичь в классическом циклотроне. Хотя стоимость затрат на перевод уже работавшего длительного время классического циклотрона в изохронный с широким регулированием энергии ионов существенно меньше стоимости сооружения нового изохронного циклотрона, но экономически такой перевод становится целесообразным, если он занимает немного времени, ведь остановка циклотрона на длительный срок приводит к прекращению научных и прикладных исследований на это же время. Для значительного сокращения времени перевода классического циклотрона в изохронный было:

1) проведено предварительное тщательное моделирование элементов магнитной структуры на модели в 1/5 натуральной величины с одновременным анализом пространственной и фазовой устойчивости динамики ионов в формируемых полях с использованием ЭВМ;

2) использовано с минимальными переделками максимальное число систем и элементов работавшего циклотрона (электромагнит без полюсных наконечников, дуанты, ВЧ генератор, системы для времяпролетных работ), сохранено направление ионно-оптической системы транспортировки ионов из циклотрона;

3) максимальным образом сокращено время магнитных измерений

на циклотроне путем создания полностью автоматизированной системы измерений топографии магнитного поля, непосредственно связанной с ЭВМ для обработки результатов измерений;

4) сокращено время наладки изохронных режимов путем применения соответствующей диагностики пучка, в частности, системы одновременного измерения фазы и длительности сгустков ионов сразу на многих радиусах ускорения без прерывания пучка.

В результате исследований для изохронного циклотрона была определена магнитная структура, схематически показанная на рис. 3, и основные параметры которой приведены в таблице 2.

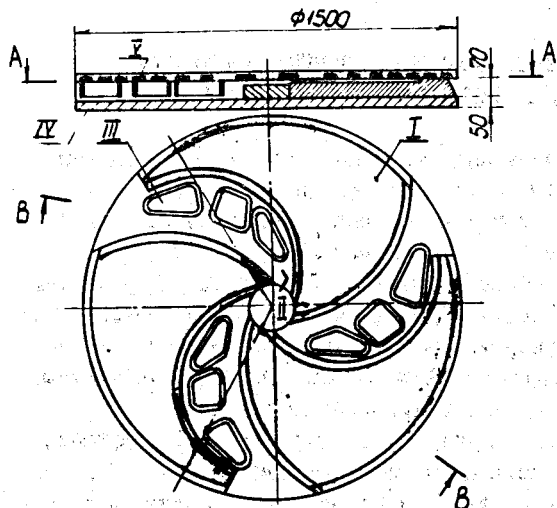


Рис. 3. Элементы формирования магнитного поля: I - сектор; II - центральный диск; III - гармонические обмотки; IV - основной диск; V - концентрические обмотки.

Важными особенностями магнитной структуры изохронного циклотрона ИАЗ являются следующие:

1. Ускорительная камера, включающая в себя элементы формирования магнитного поля, является подвижной системой, что позволяет удобно собирать все стальные (секторы, диски) и токовые элементы, а также прибор для магнитных измерений вне основного электромагнита с высокой точностью.

2. Специальная геометрия секторов, когда границы их, обработанные по окружности, сходятся не к центру магнита, а по касательной к центральному диску, позволила существенно увеличить угол спиральности на малых радиусах. Эта геометрия, в кото-

рой было осуществлено снятие фасок с краев секторов, свела эффекты насыщения к малой величине в широком диапазоне (0,7-1,8 Т) средних индукций магнитного поля.

Таблица 2

Основные параметры магнитной структуры изохронного циклотрона

Диаметр полюсных наконечников	150 см
Количество пар секторов	3
Зазор между секторами	20 см
Зазор между долинами	34 см
Максимальный угол спиральности	50°
Средняя индукция на выпускном радиусе	0,7-1,8 Т
Количество пар концентрических обмоток	8
Количество пар гармонических обмоток	9
Количество пар медианных обмоток	2
Максимальный ток обмоток	1000 А
Охлаждение обмоток	вода 18 атм

3. В центральной области отсутствует подъем магнитного поля, используемый в большинстве изохронных циклотронов для аксиальной фокусировки. Для ее осуществления применены целевые диафрагмы на дуантах, обеспечивающие прекрасную аксиальную фокусировку ионов на первых шести оборотах, после которых уже достаточно фокусировка переменным по азимуту магнитным полем. Кроме того, эти диафрагмы обеспечили режим постоянства орбит в циклотроне, а также предварительную фазовую селекцию для улучшения энергетических, геометрических и временных (для метода времени пролета) характеристик пучка.

4. Строго изохронное магнитное поле для всех типов ионов и их энергий, постоянно контролируемое путем наблюдения фазы сгустков ионов с помощью системы из 9 пикап-электродов, расположенных на различных радиусах ускорения внутри одного из дуантов циклотрона.

Выпуск пучка из циклотрона осуществляется с помощью электростатического deflectора с гиперболическими электродами, фокусирующего магнитного канала и корректирующих электромагнитов во



всем диапазоне энергий и типов ионов с эффективностью 30–60% без каких-либо механических перемещений элементов выпуска.

Все это вместе с разработанным высокоинтенсивным источником ионов привело к получению ионов во внешнем пучке циклотрона в широком диапазоне их масс и энергий (рис. 4) с высокими (для многих ионов с рекордными) интенсивностями, приведенными в таблице 3.

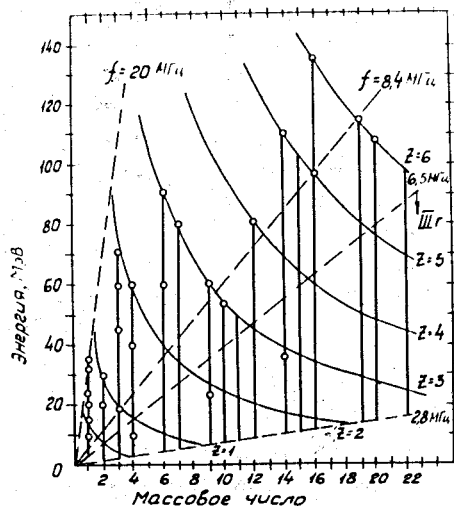


Рис. 4. Энергии ионов в циклотроне ИАЭ. Область между прямыми  $f = 20$  МГц и  $8,4$  МГц обеспечена тонкими дуантами, между  $f = 8,4$  МГц и  $6,5$  МГц — толстыми дуантами, между  $6,5$  МГц и  $2,8$  МГц — работа на III субгармонике ВЧ. Гиперболы — ограничения по максимальной индукции при указанных зарядах ионов.

Помимо полутяжелых ионов, во внешнем пучке циклотрона с тем же источником получены и легкие ионы с высокими интенсивностями (например, протоны до 500 мкА, а ионы  ${}^4\text{He}^{2+}$  — до 800 мкА в импульсе длительностью 1 мс с частотой 50 Гц).

Разработанная для циклотрона многоканальная система транспортировки ионов к мишеням экспериментаторов обеспечивает эффективное проведение самых разнообразных научных и прикладных ядерно-физических работ в результате осуществления в ней следующих возможностей:

1) малофоковой коллимации пучка на значительном расстоянии от мишени с магнитным отклонением частиц, рассеянных на краях диафрагм;

2) двух режимов транспортировки: как бездисперсионного с сохраненным эффективным эмиттансом, так и с монохроматизацией пучка до 0,1%;

3) получения однородного распределения интенсивности пучка на мишени с большой площадью (до 1000 мм<sup>2</sup>);

4) эффективной диагностики параметров пучка: размеров поперечного сечения — по овечению окиси бериллия или миналдунда; длительности и фазы микросгустков — с помощью пикап-электродов; эффективного поперечного эмиттанса — с помощью подвижных щелей и многоламельных измерителей, зарегистрировавших его составляющие в различных режимах, равными  $(2 + 3)\pi$  см·мрад.

Таблица 3

Средний ток (мкА) внешнего пучка в циклотроне ИАЭ и лучших зарубежных циклотронах (по материалам VIII Международной конференции по циклотронам, Блумингтон, 1978г.)

Циклотрон	Ион							
	${}^6\text{Li}^{2+}$	${}^6\text{Li}^{3+}$	${}^7\text{Li}^{2+}$	${}^7\text{Li}^{3+}$	${}^9\text{Be}^{2+}$	${}^9\text{Be}^{3+}$	${}^{12}\text{C}^{4+}$	${}^{14}\text{N}^{5+}$
И А Э	15	2	12	2	7	2	30	13
Б е р к л и	5	0,5	5	0,5	5	2	5	2
О к р и д ж							12	2
Т е х а с . у н и в е р с и т е т	0,04	0,001	5	0,003	2	0,01	3,5	5,2
У н и в е р с . ш т . И н д и а н а		0,2						
Т о к и о								4,3
Х а р у э л л		1						
К а р л с р у э		0,2						

Для измерения и контроля средней энергии полутяжелых ионов применен метод времени пролета с использованием пикап-электродов (точность измерения 0,4–1%) без прерывания пучка на время измерения; для измерения энергетического спектра используется измерение полупроводниковым детектором энергий ионов, упруго рассеянных на тонкой золотой фольге. Ширина энергетического спектра полутяжелых ионов, измеряемая таким способом с точностью 0,06%, обычно составляла 0,3–0,4% от средней энергии.

С целью измерения и контроля энергетического спектра ионов во время экспериментов без их прерывания был предложен и теоретически исследован применительно к циклотрону ИАЭ новый способ измерения энергетического спектра ионов с использованием радиа-

ционной рекомбинации их в пучке электронов с известной энергией. В основе способа лежит резкое увеличение коэффициента радиационной рекомбинации при выравнивании скоростей ионов и электронов. Схема установки для измерения энергии этим способом применительно к циклотрону ИАЗ приведена на рис. 5. Проведенные исследования показали, что этот способ может быть использован для измерения и контроля энергетического спектра пучка ионов циклотрона без его прерывания с точностью 0,1%.

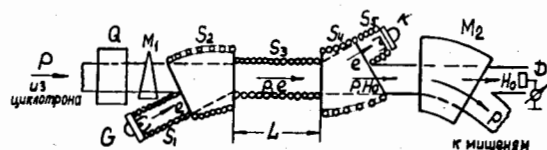


Рис. 5. Схема установки для измерения энергии ионов с использованием их рекомбинации в пучке электронов. Q — согласующая линза;  $M_1$  — корректирующий магнит;  $S_1, S_3, S_5$  — прямые соленоиды;  $S_2, S_4$  — изогнутые соленоиды; K — коллектор электронов; G — электронная пушка;  $M_2$  — поворотный магнит; D — детектор; L — длина совместного пролета ионов и электронов.

#### Глава IV. ЦИКЛОТРОН ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОЛУТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Проведение ряда важных ядерно-физических исследований на пучках полутяжелых ионов требует разработки методики с регистрацией энергетических спектров нейтронов, образующихся в ядерных реакциях. Наиболее пригодным способом измерения энергий быстрых нейтронов сейчас является метод времени пролета, в котором об энергии нейтронов судят по регистрируемому времени попадания нейтрона в детектор, находящийся на известном расстоянии от места образования нейтрона (мишени).

Возможны два типа времяпролетных работ: первый — с использованием квазиодноэнергетических пучков ионов, бомбардирующих тонкую мишень, и второй — с использованием сплошного нейтронного спектра, образуемого при бомбардировке толстой мишени ионами, которые могут иметь также широкий энергетический спектр.

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния различных параметров как самого циклотрона, так и системы транспортировки ионов, на основные характеристики метода — энергетическое разрешение и динамические диапазоны (диапазон энергий регистрируемых нейтронов); получены простые и удобные расчетные зависимости, хорошо подтвержденные экспериментально.

В результате теоретического и экспериментального исследования различных способов уменьшения частоты следования сгустков ионов на мишени с целью расширения динамического диапазона было показано, что наилучшими характеристиками (меньший радиационный фон, одновременное значительное укорочение сгустков) обладает способ двойного промигивания, предложенный автором и внедренный в циклотроне ИАЗ. Этот способ, схема устройств для которого приведена на рис. 6, заключается в уменьшении частоты сгустков на первом обороте ионов с помощью радиального ВЧ дефлектора и устранении сателлитов от расслоенного при выпуске сгустка ВЧ дефлектором, расположенным в системе транспортировки ионов к мишени. Таким способом удавалось получить длительность сгустка 1,2% от периода ВЧ.

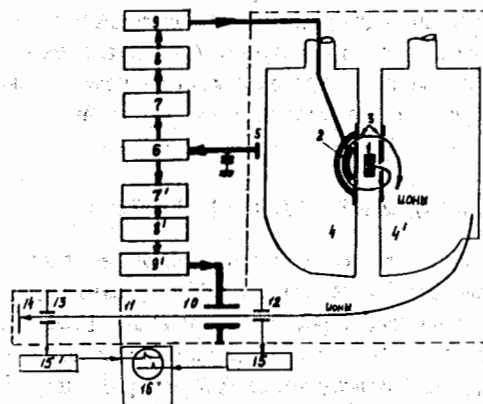


Рис. 6. Схема устройств для двойного промигивания. 1 — источник ионов; 2 — внутренний дефлектор; 3 — первый селектор сгустков; 4 и 4' — дуанты; 5 — датчик ВЧ напряжения; 6 — делитель частоты; 7 и 7' — линии задержки; 8 и 8' — усилители мощности; 9 и 9' — настроечные контуры; 10 — внешний дефлектор; 11 — второй селектор сгустков; 12 и 13 — емкостные датчики (пикап-электроды) пучка; 14 — мишень; 15 и 15' — стробоскопические преобразователи.

С целью предотвращения увеличения длительности ступков ионов при транспортировке ионов к мишени применена бездисперсная система транспортировки, а для предотвращения ухудшения временного разрешения за длительное время экспозиции обеспечена высокая стабильность параметров циклотрона, особенно индукции магнитного поля ( $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ ) и амплитуды дуантного ВЧ напряжения ( $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ ).

Для уменьшения длительности ступков ионов перспективно извлечение ионов из источника короткими высоковольтными импульсами с очень коротким (меньше области фазовой селекции) передним фронтом. В проведенных экспериментах такое извлечение приводило к уменьшению длительности ступков ионов более чем вдвое, по сравнению с извлечением постоянным напряжением.

В ряде исследований при использовании нейтронов со сплошным энергетическим спектром полутяжелые ионы имеют преимущество перед легкими — при фиксированной максимальной магнитной индукции циклотрона они образуют нейтроны с более жестким энергетическим спектром (максимальная энергия нейтронов при использовании ионов лития в циклотроне ИАЗ втрое превосходит максимальную энергию нейтронов, получаемых в реакциях с дейтронами).

С целью увеличения импульсной интенсивности нейтронов со сплошным энергетическим спектром для циклотрона ИАЗ разработана и прошла экспериментальную проверку с пучком ионов система группировки отклонением ионов сразу с нескольких конечных орбит в циклотроне.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Проблема ускорения полутяжелых ионов в циклотроне впервые в мире полностью была решена на циклотроне ИАЗ (физические эксперименты на пучках лития на циклотроне ИАЗ начаты в 1965 г., на пучках бериллия — в 1974 г.), что послужило толчком к развитию этих работ во многих других циклотронных лабораториях мира, т.е. было развито новое перспективное научно-техническое направление в области получения и ускорения пучков ионов в циклотронах.

2. Предложена схема, осуществлены разработка и исследование высокоинтенсивного источника многозарядных полутяжелых ионов с горячей разрядной камерой и примыкающим к ней тиглем с рабочим веществом. Для существенного увеличения выхода многозарядных

ионов применены высокая плотность импульсной мощности ( $\sim 10$  кВт/см<sup>3</sup>) и дежурный разряд между импульсами.

3. Предложен и исследован новый способ повышения интенсивности ступков ионов циклотрона — их извлечение из источника короткими ( $\ll$  периода ВЧ дуантного напряжения) высоковольтными импульсами с длительностью переднего фронта короче ширины области фазового захвата в циклотроне. Такой способ извлечения позволяет также регулировать длительность ступков ионов, исследовать фазовую селекцию в циклотроне и оборотность выпуска пучка из циклотрона.

4. Под руководством и при непосредственном участии автора осуществлены разработка, запуск и ввод в эксплуатацию изохронного циклотрона с широким регулированием энергий и типов ионов. При этом максимальным образом использовались узлы и помещения классического полутораметрового циклотрона, что вместе с тщательным предварительным моделированием магнитного поля и динамики пучка, а также с применением автоматизированной системы магнитных измерений, связанной с ЭИМ, позволило осуществить реконструкцию циклотрона за рекордно короткое время (менее 9 месяцев), подтвердив экономическую целесообразность такого способа перевода классического циклотрона в изохронный.

Для улучшения аксиальной фокусировки пучка ионов в центральной области циклотрона и для обеспечения постоянства орбит при изменении энергии и типов ионов в циклотроне применены фокусирующие щелевые диафрагмы на дуантах.

5. Разработанная под руководством автора многоканальная система транспортировки ионов к мишеням обеспечивает как бездисперсионный, так и режим с монохроматизацией пучка; малофоновою коллимацию пучка; однородное облучение образцов с большой площадью.

6. Проведен анализ различных способов измерения энергетического спектра полутяжелых ионов. Предложен и теоретически исследован новый способ измерения энергии ионов с использованием радиационной рекомбинации ионов в пучке электронов с известной энергией, который может позволить измерение средней энергии и формы энергетического спектра с точностью  $\sim 0,1\%$  без прерывания пучка.

7. Проведены теоретические и экспериментальные исследования, разработаны устройства и осуществлены мероприятия, в резуль-

тате чего изохронный циклотрон ИАЗ эффективно используется на полутяжелых ионах для спектрометрии быстрых нейтронов методом времени пролета.

Наиболее эффективным способом одновременного уменьшения частоты следования сгустков ионов на мишени, требуемого для расширения динамического диапазона времяпролетного спектрометра, и для укорочения сгустков ионов с целью улучшения энергетического разрешения метода является предложенный автором метод двойного промигивания, с помощью которого удавалось получать сгустки длительностью  $1,2\%$  от периода ВЧ.

8. В ряде исследований на нейтронах со сплошным энергетическим спектром полутяжелые ионы могут иметь преимущество перед легкими — при фиксированной максимальной индукции циклотрона они образуют нейтроны с более жестким спектром. С целью увеличения импульсной интенсивности нейтронов со сплошным энергетическим спектром для циклотрона ИАЗ под руководством автора разработана и успешно прошла экспериментальную проверку система группировки ионов отклонением с нескольких конечных орбит в циклотроне.

9. В результате проведенных работ во внешнем пучке изохронного циклотрона получены рекордные интенсивности полутяжелых ионов в широком диапазоне энергий, что вместе с введенным времяпролетным режимом и разработанной системой транспортировки пучков обеспечивает решение крупной научной проблемы — проведение как научных, так и прикладных ядерно-физических исследований на полутяжелых ионах, имеющих важное народнохозяйственное значение.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Веников Н.И. Об уменьшении длительности сгустков ионов и частоты их следования в циклотроне. — Атомная энергия, 1964, т. II, с. 421-425.
2. Веников Н.И., Чумаков Н.И. Улучшение монохроматичности пучков ионов в циклотроне. — Атомная энергия, 1961, т. II, с. 217-248.
3. Веников Н.И., Голованов Г.Н., Коняев В.П., Старостин П.В., Чумаков Н.И. Ускорение  $^3\text{He}$  на полутораметровом циклотроне до энергии 35 МэВ. — Атомная энергия, 1961, т. II, с. 213-216.

4. Бабичев А.П., Веников Н.И., Князятков А.С., Мещеров Р.А., Миронов Е.С., Неменов Л.М., Федоров Н.Д., Холмовский Ю.А. Регулирование напряженности магнитного поля циклотрона. — Атомная энергия, 1962, т. I3, с. 125-134.
5. Веников Н.И., Старостин Н.В. Влияние примесей на выход ионов гелия в циклотронном источнике. — ПТЭ, 1963, № 2, с. 25-26.
6. А.с. 158959 (СССР). Способ измерения энергии ионов, ускоренных в циклотроне. Н.И.Веников. — Оpubл. в Б.И., 1963, № 23.
7. А.с. 174289 с приорит. 1963 г. Способ ускорения ионов лития в циклотроне. Н.И.Веников. — Оpubл. в Б.И., 1980, № 8.
8. Веников Н.И., Карташев Н.В. Влияние основных параметров циклотрона на длительность и фазу сгустка ускоренных ионов. — Атомная энергия, 1963, т. I4, с. 521-524.
9. Веников Н.И., Голованов Г.Н., Чумаков Н.И. Улучшение вертикального движения ионов в циклотроне. М., 1963. — 12 с. (Препринт. Ин-т атомной энергии: ИАЗ-506).
10. Brill O.D., Venikov N.I., Kurashov A.A., Ogloblin A.A., Pankratov V.M., Rudakov V.P. Search for light neutron nucleu. — Phys. Letters, 1964, v. 12, p. 51-53.
11. Веников Н.И., Миронов Е.С. Приближенный метод расчета фокусирующей системы из двух квадрупольных магнитов. — ЖЭТФ, 1964, т. 34, с. 530-535.
12. Басаргин Д.Г., Веников Н.И. Применение подстроечного элемента в фокусирующей системе, состоящей из квадрупольных магнитов. — ЖТФ, 1964, т. 34, с. 1998-2002.
13. Антонов А.В., Блохов М.В., Веников Н.И., Калинин С.П., Куралов А.А., Перов П.Е., Чесалов А.А. Уменьшение частоты следования сгустков ионов в циклотроне. — ПТЭ, 1964, № 6, с. 301-302.
14. Веников Н.И., Чумаков Н.И. Применение метода времени пролета для измерения зависимости пробег — энергия для ионов. — Атомная энергия, 1964, т. I7, с. 503-504.

15. Веников Н.И. Ускорение отрицательных ионов в циклотроне. - ПТЭ, 1964, № 1, с. 38-39.
16. Бриль О.Д., Веников Н.И., Курашов А.А., Оглоблин А.А., Панкратов В.М., Рудаков В.И. Поиски легких нейтронных ядер. М., 1964 - 8 с. (Препринт. Институт атомной энергии: ИАЭ-546).
17. Веников Н.И., Чумаков Н.И., Хорошавин Б.И. Перезарядка ионов кислорода на тонких алундовых пленках. - Атомная энергия, 1964, № 17, с. 504-505.
18. Антонов А.В., Васильев П.И., Веников Н.И., Хорошавин Б.И., Калинин С.П., Соколов Н.И., Халдин Н.Н., Чумаков Н.И. Перевод циклотрона ИАЭ в режим с регулируемой энергией ионов. - ПТЭ, 1964, № 6, с. 28-29.
19. А.с. 197786 (СССР). Источник многозарядных ионов лития. Н.И.Веников, Б.И.Хорошавин, В.И.Чуев, Н.И.Чумаков. - Опубл. в Б.И., 1967, № 13.
20. Веников Н.И., Хорошавин Б.И., Чумаков Н.И. Ускорение тяжелых ионов в циклотроне ИАЭ. М., 1967, 12 с. (Препринт. Институт атомной энергии: ИАЭ-1360).
21. Веников Н.И., Хамидов А.З. Ионно-оптическая система циклотрона У-240 для ИАЭ. - М., 1967, - 12 с. (Препринт. Институт атомной энергии: ИАЭ-4361).
22. Веников Н.И. Об ускорении тяжелых ионов. М., 1967 - 42 с. (Препринт. Институт атомной энергии: ИАЭ-1359).
23. Васильев П.И., Веников Н.И., Зевякин Д.В., Оглоблин А.А., Халдин Н.Н., Хорошавин Б.И., Чуев В.И., Чумаков Н.И. Ускорение ионов лития в циклотроне. - ПТЭ, 1969, № 6, с. 16-18.
24. Vasiljev P., Venikov N.I., Zevjakin D., Ogloblin A., Khalidin N., Khoroshavin B., Chumakov N., Chuev V. Acceleration of lithium ions in a Cyclotron. - Nucl. Instr. and Meth., 1969, v. 71, p. 201-204.
25. Веников Н.И., Оглоблин А.А., Халдин Н.Н., Кондрашов Л.Ф. Проект лаборатории изохронного циклотрона. - Труды УИ Международной конференции по ускорителям. Ереван, 1969, т. 1, с. 329-340.

26. Basargin Yu., Bogdanova V., Venikov N., Severgin Yu., Korol K., Poselsky N. External Beam Monochromatization System. - Proc. V Int. Cyclotron Conf., Oxford, 1969, p. 341-347.
27. Веников Н.И., Яблоков Б.Н. Изохронные циклотроны и использование их в химии, металлургии и биологии. - Атомная энергия, 1970, т. 28, с. 270-280.
28. Александрова Г.И., Веников Н.И., Шмаченкова Г.И. Использование ускоренных ионов гелия-3 для анализа высокочистых материалов. - В кн. Аналитическая химия редких и полупроводниковых материалов. М., Изд. МДНТП, 1970, с. 194-199.
29. А.с. 366822 с приорит. 1970 г. Устройство для уменьшения частоты следования ионов в циклотроне. Н.И.Веников. - Опубл. в Б.И., 1979, № 35.
30. Басаргин Ю.Г., Богданова В.И., Веников Н.И., Севергин Ю.П., Король К.Н., Посельский Н.Н. Система монохроматизации внешнего пучка 2,4-м изохронного циклотрона ИАЭ. - Атомная энергия, 1970, т. 29, с. III-III6.
31. Басаргин Ю.Г., Богданова В.И., Веников Н.И., Миняев О.А., Посельский Н.Н., Севергин Ю.П., Ходаков Е.М. Аберрации и допуски в системе монохроматизации внешнего пучка изохронного циклотрона. - Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям. М., Наука, 1972, с. 198-200.
32. Basargin Ju., Litunovsky R., Severgin Ju., Venikov N. The aspects of optimization of beam acceleration and extraction conditions in cyclotron. - A.I.P. Conference Proceedings N9, New York 1972, p. 315-321.
33. Бреславцев И.Д., Веников Н.И., Дворников В.Д., Кулешов И.Л., Лапушкин С.Т., Резвов В.А., Чумаков Н.И., Олин Л.И. Применение "группировки отклонением" для получения интенсивных коротких импульсов нейтронов в циклотроне ИАЭ. - ПТЭ, 1972, № 4, с. 26-32.
34. Веников Н.И., Оглоблин А.А. Использование циклотронов для изучения ядерных реакций и в прикладных исследованиях. - В кн.: Материалы III Международного совещания по циклотрону У-120М. Дубна, 1973, Р9-7339, с. 181-199.



35. А.с. 497910 (СССР) с приоритетом 1973 г. Устройство для вытягивания ионов из источника циклотрона. Н.И.Веников, С.Т.Латушкин, В.А.Резвов. - Оpubл. в Б.И., 1979, № 3.
36. Басаргин Ю.Т., Веников Н.И., Литуновский Р.Н., Севергин Ю.П. Вопросы оптимизации условий ускорения в циклотроне с системой внешней монохроматизации. - ЖТФ, 1973, т. 43, с. 2133-2138.
37. Веников Н.И., Оглоблин А.А., Юдин Л.И. Применение циклотронов для измерения нейтронных констант термоядерного диапазона. - В кн. Нейтронная физика, ч. 4. Обнинск, 1974, с. 223-229.
38. Веников Н.И., Кондратьев Л.Г., Латушкин С.Т., Резвов В.А., Сон В.Г., Унежев В.Н., Халдин Н.Н., Чумаков Н.И., Юдин Л.И. Система транспортировки пучка циклотрона ИАЭ. - ПТЭ, 1972, № 1, с. 23-26.
39. Веников Н.И., Глухов Ю.А., Новацкий Б.Г., Манько В.И., Оглоблин А.А., Сакута С.Б., Степанов Д.Н., Унежев В.Н., Чумаков Н.И. Ядерные реакции с ионами бериллия. - Ядерная физика, 1975, т. 22, с. 924-933.
40. Веников Н.И., Латушкин С.Т., Рыбаков Е.И., Резвов В.А., Унежев В.Н., Чумаков Н.И. Работа циклотрона в режиме двойного промигивания. - ПТЭ, 1975, № 3, с. 22-23.
41. Веников Н.И., Унежев В.Н., Чумаков Н.И. Ускорение ионов бериллия в циклотроне. - ПТЭ, 1975, № 3, с. 24-25.
42. Busulukov Ju., Venikov N., Putjatin M., Hodakov J., Yupinov Ju. Magnetic field design and measurement for the Kurchatov Institute Cyclotron. - Proc. VII Int. Conf. on Cyclotron, 1975, Zürich, p. 205-206.
43. Веников Н.И., Дворников В.Д., Латушкин С.Т., Резвов В.А., Унежев В.Н., Чумаков Н.И., Юдин Л.И. Исследование импульсного извлечения ионов из источника в циклотроне. - ЖТФ, 1976, т. 46, с. 772-776.
44. Бузулуков Ю.П., Веников Н.И., Рогов Ю.К., Ходаков Е.М., Юпинов Ю.Л. Результаты измерений магнитного поля изохронного циклотрона ИАЭ. М., 1977 - 13 с. (Препринт. Институт атомной энергии: ИАЭ-2905).
45. Бузулуков Ю.П., Веников Н.И., Наумов И.В., Петушков С.А., Виноградов А.А., Карпов Н.И., Ходаков Е.М., Парамонов В.В., Шапкин И.М., Ярош В.Е. Аппаратура для измерений магнитного поля циклотрона, ИАЭ. М., 1977. - 13 с (Препринт. Институт атомной энергии: ИАЭ-2904).
46. Бузулуков Ю.П., Веников Н.И., Виноградов А.А., Наумов И.В., Парамонов В.В., Ходаков Е.М., Шапкин И.М., Ярош В.Е. Автоматизированная система магнитных измерений изохронного циклотрона ИАЭ. - ПТЭ, 1977, № 3, с. 28-31.
47. Бузулуков Ю.П., Веников Н.И., Кондратьев Л.Г., Латушкин С.Т., Резвов В.А., Унежев В.Н., Ходаков Е.М., Юпинов Ю.Л., Юдин Л.И., Чумаков Н.И. Основные параметры 150-сантиметрового циклотрона ИАЭ. - Атомная энергия, 1978, т. 44, с. 270-272.
48. Веников Н.И., Волкович А.Г., Гушин А.Н., Дворников В.Д., Колобанов Г.И., Кондратьев Л.Г., Кондратов Л.Ф., Латушкин С.Т., Наумов И.В., Резвов В.А., Унежев В.Н., Халдин Н.Н., Хмара В.И., Ходаков Е.М., Чумаков Н.И., Юдин Л.И., Юпинов Ю.Л. Изохронный циклотрон. - М., 1978, - 36 с. (Препринт. Институт атомной энергии: ИАЭ-2942).
49. Веников Н.И., Латушкин С.Т., Кондратьев Л.Г., Резвов В.А., Унежев В.Н., Ходаков Е.М., Чумаков Н.И., Юдин Л.И., Юпинов Ю.Л. Модернизация циклотрона ИАЭ. - Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям. Дубна, 1979, с. 50-53.
50. Venikov N., Latushkin S., Rezvov V., Unezhev V., Hodakov E., Chumakov N., Yudin L., Yupinov Ju. Heavy ion acceleration in the Kurchatov Inst. Cyclotron. -IEEE Trans.on Nucl.Sci., 1979, v.NS-26, p. 1996-1999.
51. Веников Н.И. Источники ионов для ускорителей. М., 1979, - 54 с. (Препринт. Институт атомной энергии: ИАЭ-3217).
52. Веников Н.И., Дмитриев И.С., Ярош В.Е. Перезарядка полутяжелых ионов при их ускорении в циклотроне. - М., 1979. - 19 с. (Препринт. Институт атомной энергии: ИАЭ-3214).

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 мая 1980 года.