

Исследования и разработка ускорителей электронов в НИИЯФ МГУ

Б. С. Ишханов^{1,a}, В. И. Шведун^{2,b}

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

¹ физический факультет, кафедра общей ядерной физики;

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^a bsi@depni.sinp.msu.ru, ^b shved@depni.sinp.msu.ru

Статья поступила 26.03.2012, подписана в печать 22.05.2012.

Рассмотрена история и современное состояние исследований и разработок ускорителей электронов в НИИЯФ МГУ.

Ключевые слова: ускоритель электронов, ускоряющая структура, линейный ускоритель, разрезной микротрон.

УДК: 539.1, 621.384.6. PACS: 29.20.–с.

Введение

В ноябре 2012 г. исполняется 120 лет со дня рождения Дмитрия Владимировича Скобельцына. Начало научной деятельности Д. В. Скобельцына приходится на 20-е гг. прошлого столетия и связано с периодом становления квантовой физики. Ему принадлежат пионерские работы по исследованию взаимодействия гамма-излучения радиоактивных источников с электронами вещества. Он измерил ионизационные потери энергии при движении заряженных частиц в среде, впервые применил камеру Вильсона, помещенную в магнитное поле для идентификации частиц. Этот метод получил широкое распространение и привел к фундаментальным открытиям в физике: была открыта первая частица антиматерии — позитрон, открыты новые частицы в составе космических лучей. Было открыто новое явление, которое не было известно в области меньших энергий, — образование ливней космических лучей. Наблюдение в составе космических лучей частиц высоких энергий в корне изменило представление о космическом излучении: из объекта геофизических исследований космические лучи превращаются в инструмент исследования структуры материи.

В 1940 г. Д. В. Скобельцын организовал на физическом факультете МГУ кафедру атомного ядра, которая затем была преобразована им в отделение строения вещества. В 1946 г. для организации экспериментальной базы для научных исследований создал в МГУ Научно-исследовательский институт ядерной физики, оснащенный самым современным научным оборудованием. В институте было установлено несколько ускорителей заряженных частиц — циклотрон, бетатрон, ускоритель Ван де Граафа и др., — которые во многом определили возможности ученых МГУ вести исследования на самых передовых направлениях науки. За годы существования отделения ядерной физики было подготовлено свыше трех тысяч студентов и аспирантов, во многом определивших исследования в СССР и в России в области ядерной физики, физики высоких энергий. Научная деятельность Д. В. Скобельцына стимулировала многие научные направления: создание новых типов ускорителей и детекторов, развитие теоретических исследований.

В настоящем обзоре, подготовленном в связи с празднованием 120-летия со дня рождения основателя и первого директора НИИЯФ МГУ Дмитрия Владимировича Скобельцына, рассмотрены история и современное состояние исследований и разработок ускорителей электронов в НИИЯФ МГУ.

Первым ускорителем электронов НИИЯФ МГУ, предназначенным для ядерно-физических исследований, был бетатрон на энергию 35 МэВ, введенный в строй в 1959 г. Бетатрон был спроектирован специальным КБ Московского трансформаторного завода по техническому заданию НИИЯФ МГУ. Выбор максимальной энергии ускоренных электронов, в 1.5–2 раза превышающей энергию большинства работавших в те годы бетатронов, давал несомненные преимущества исследователям НИИЯФ МГУ, способствовал более глубокому изучению механизма фоторасщепления атомных ядер и обеспечил более чем 25-летний срок эффективной эксплуатации установки, на которой было проведено свыше двухсот научных экспериментов. В результате исследований, выполненных на бетатроне НИИЯФ МГУ, была получена важнейшая информация о структуре атомного ядра и механизме фотоядерных реакций. Была обнаружена структура сечений фотонейтронных реакций на средних и тяжелых ядрах, изучено изоспиновое расщепление и открыто конфигурационное расщепление гигантского дипольного резонанса.

Однако к началу 1980-х гг. стало ясно, что дальнейший прогресс в исследовании механизма взаимодействия электромагнитного излучения с атомными ядрами возможен лишь при создании ускорителей электронов нового поколения, генерирующих в непрерывном режиме (коэффициент заполнения рабочего цикла $D = 100\%$) пучки электронов с малым энергетическим разбросом и малым эмиттансом. Увеличение D позволяет снизить загрузки детекторов и благодаря этому выполнять эксперименты на совпадении частиц, резко сокращать время проведения экспериментов. Малый энергетический разброс ($\sim 0.01\%$) дает возможность измерять сечения реакций с высоким энергетическим разрешением, малый эмиттанс (нормализованный эмиттанс 1–10 мм·мрад), означающий малые поперечные размеры и расходимость пучка, обеспечивает низкий

паразитный фон, генерируемый электронами, находящимися на периферии пучка, при их взаимодействии с элементами конструкции ускорителя и тракта транспортировки.

В начале 1980-х гг. после предварительных расчетов в НИИЯФ МГУ была выбрана принципиальная схема ускорителя для получения пучка с $D = 100\%$, энергией 175 МэВ и средним током около 100 мкА — оптимальная на то время схема нормально проводящего разрезного микротрона непрерывного действия [1]. В 1985 г. Ученый совет НИИЯФ МГУ принял решение о начале работ по сооружению нового ускорителя, и 35-МэВ бетатрон был демонтирован. Разработка и создание разрезного микротрона осуществлялись силами сотрудников отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ, поскольку из-за отсутствия опыта сооружения подобных ускорителей и при относительно скромном бюджете ни одна организация в СССР не бралась за реализацию данного проекта.

В течение 1985–1992 гг. были разработаны программные комплексы, выполнены расчеты, сконструированы, изготовлены, измерены и настроены все основные элементы разрезного микротрона [2]. В 1992 г. был осуществлен пуск инжектора на энергию 6.2 МэВ со средним током до 1 мА, монохроматичностью пучка 0.1% и нормализованным эмиттансом около 5 мм·мрад [3].

В 1992–1995 гг. на инжекторе были выполнены первые в России эксперименты по ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ). Эти эксперименты продемонстрировали высокое качество пучка инжектора и возможность получения уникальных физических результатов. Были измерены спектры ЯРФ для нескольких атомных ядер с A около 50–70. Получены новые, представляющие исключительно большой интерес сведения о коллективных магнитных дипольных $M1$ -возбужденных орбитального типа, присущих деформированным ядрам. Используя высокое качество пучка, удалось поставить эксперименты по измерению времени жизни возбужденных состояний атомных ядер методом самопоглощения. Характерный интервал времени жизни, который может быть измерен таким методом, составляет $10^{-10} - 10^{-17}$ с [4].

Кризис 1990-х гг. не позволил завершить проект разрезного микротрона непрерывного действия на энергию 175 МэВ. Изменившиеся условия финансирования и поддержки научных исследований в России заставили изменить подходы к дальнейшему развитию ускорительной тематики в отделе. Значительное внимание было уделено разработке ускорителей, которые могли бы найти применение не только в научных исследованиях, но и в промышленности, медицине и других прикладных видах деятельности. Эти разработки опираются на опыт, полученный при создании разрезного микротрона непрерывного действия, который определил специфическую нишу НИИЯФ МГУ в области ускорительной физики и техники. В частности, в НИИЯФ МГУ накоплен опыт по следующим направлениям: формирование пучков с малым поперечным и продольным эмиттансом; работа с ускоряющими структурами в непрерывном режиме; создание магнитных систем ускорителей элек-

тронов на основе редкоземельного магнитного материала; создание автоколебательных систем СВЧ-питания ускоряющих структур; разработка разрезных микротронов; разработка линейных ускорителей электронов со специальными группирующими и фокусирующими свойствами; разработка методов диагностики пучка; разработка систем управления ускорительными комплексами.

1. Методы формирования пучков с малым эмиттансом

Формирование электронных пучков с малым продольным и поперечным эмиттансом является одной из важнейших задач современной физики и техники ускорителей. Пучки с большим пространственным зарядом сгустков, характерная величина которого составляет 1 нК, нормализованным среднеквадратичным поперечным эмиттансом 1–10 мм·мрад и длительностью 0.1–10 пс, необходимы для источников синхротронного излучения четвертого поколения различного типа, включая рентгеновский лазер на свободных электронах, исследования новых методов ускорения частиц, будущих линейных коллайдеров, генерации квазимонохроматического рентгеновского излучения методом комптоновского рассеяния лазерного излучения, генерации субмиллиметрового излучения и др. В настоящее время такие пучки формируются с помощью импульсных нормальнопроводящих СВЧ-пушек с металлическим фотокатодом с высокой напряженностью ускоряющего поля и системой соленоидов, компенсирующих рост эмиттанта вследствие действия сил пространственного заряда, и лазерной системой, генерирующей пикосекундные импульсы ультрафиолетового излучения с энергией в десятки мкДж и синхронизированной с СВЧ-системой с джиттером менее 0.1 пс.

Меньший заряд сгустков, около 100 пК, при тех же требованиях к поперечному эмиттансу необходим для сверхпроводящего линейного ускорителя электронов с рекуперацией энергии, также рассматриваемого как возможный источник синхротронного излучения четвертого поколения. Однако в этом случае формирование сгустков и работа линейного ускорителя должны осуществляться в непрерывном режиме. В перспективе такие пучки могут быть получены с помощью сверхпроводящей СВЧ-пушки непрерывного действия с высокоэффективным фотокатодом. Создание таких пушек находится на стадии научных исследований, и для формирования сгустков используются высоковольтные (300–750 кВ) пушки с фотокатодом.

Пучки с зарядом сгустков 0.04–1 пК и малым эмиттансом, ускоренные до высокой энергии в непрерывном режиме, используются в ядерно-физических экспериментах, обеспечивая высокое энергетическое разрешение и низкий фон. Для формирования неполяризованных пучков используются электронные пушки на энергию около 100 кэВ с термокатодом. Поляризованные пучки получают при установке в такую пушку фотокатода на основе GaAs. В обоих случаях короткие сгустки длительностью в несколько пикосекунд, необходимые для дальнейшего ускорения в линейном ускорителе без потерь тока и с малым энергетическим разбросом, фор-

мируются из непрерывного пучка электронной пушки с помощью прерывателя и группирователя.

В НИИЯФ МГУ были реализованы два метода формирования сгустков с малым поперечным эмиттансом — метод, основанный на прерывателе и группирователе для получения сгустков с зарядом 0.04–0.4 пК в непрерывном режиме, и метод генерации сгустков с зарядом около 150 пК в импульсном режиме, основанный на СВЧ-пушке с фотокатодом.

1.1. Формирование пучка с помощью прерывателя и группирователя

Формирование пучков в непрерывном режиме с малым продольным и поперечным эмиттансом и зарядом сгустков 0.04–0.4 пК было осуществлено в инжекторе разрезного микротрона непрерывного действия НИИЯФ МГУ [5]. Линия формирования общей длиной около 4 м состояла из электронной пушки на энергию 100 кэВ с нормализованным эмиттансом непрерывного пучка около 4 мм·мрад при токе 1 мА и участка регулирования поперечного эмиттанта, прерывателя и группирователя пучка.

Участок регулирования эмиттанта состоял из двух коллиматоров и двух соленоидальных линз. За счет варьирования тока линз, приводящего к оседанию части тока пучка на коллиматорах, эмиттанс мог изменяться от максимального, примерно совпадающего с эмиттансом пушки, до некоторого минимального, зависящего от требуемого тока пучка. В процессе настройки нормализованный эмиттанс пучка был установлен равным 2 мм·мрад [6].

Формирование сгустков из непрерывного пучка осуществлялось прерывателем, включающим резонаторы круговой развертки, линзы и расположенный между резонаторами коллиматор с прорезью на окружности с угловым размером 60°. Пучок электронов, проходя через поперечное магнитное поле резонатора, вращающееся с частотой 2450 МГц, описывал на коллиматоре окружность радиуса 10 мм. Часть пучка, прошедшая прорезь коллиматора, с помощью линз фокусировалась на вход второго резонатора, работающего в противофазе с первым и компенсирующего поперечные скорости, сообщенные пучку этим резонатором.

Сгустки с фазовой протяженностью около 60° фокусировались линзой ко входу резонатора-группирователя, который осуществлял модуляцию потока частиц по скорости таким образом, что на участке дрейфа от выхода группирователя до выхода линии формирования сгустки сжимаются до фазовой протяженности в единицы градусов, что соответствует длительности сгустков единицы пикосекунд.

Контроль процесса формирования сгустков производился с помощью люминесцентных экранов, проволочных сканеров [7] и резонаторного датчика положения, тока и фазы пучка [8]. На выходе линии формирования был получен пучок, состоящий из коротких сгустков с номинальным зарядом сгустков 0.04 пК (средним током 100 мкА) и нормализованным эмиттансом 2.8 мм·мрад.

Реализованный принцип формирования сгустков электронов низкой энергии и с малым зарядом в непрерывном режиме близок к принципам, которые были

использованы в других проектах ускорителей электронов непрерывного действия, разработанных в конце 70-х–80-х гг., в частности на каскаде разрезных микротронов МАМІ [9] и со значительными модификациями на ускорителе СЕВАФ [10]. Опыт, полученный НИИЯФ МГУ при разработке линии формирования, был использован при модификации инжектора МАМІ с целью увеличения тока ускоренного пучка поляризованных электронов [11].

1.2. СВЧ-пушка с фотокатодом

Для разрезного микротрона на энергию 35 МэВ с большой яркостью пучка [12], созданного в НИИЯФ МГУ, был разработан импульсный инжектор, формирующий сгустки частиц с энергией 5 МэВ и зарядом 150 пК [13]. Одним из важных требований к ускорителю было требование низкой стоимости, поэтому выбор СВЧ-пушки с низкоэффективным металлическим фотокатодом и дорогостоящей лазерной системой, формирующей пикосекундные сгустки, был неприемлем. Была разработана СВЧ-пушка с эффективным фотокатодом и лазерная система на основе недорогого эксимерного лазера. Блок-схема инжектора показана на рис. 1.

СВЧ-пушка состоит из $1\frac{1}{2}$ ускоряющих ячеек и ячейки связи, работает на частоте 2856 МГц и обеспечивает пучок с энергией 1.6 МэВ. В пушке установлен вольфрамовый импрегнированный термокатод, работающий в режиме ниже порога эмиссии. Катод освещается импульсами эксимерного Кг/Ф лазера на длине волны 248 нм. Лазер обеспечивает среднюю мощность излучения 30 мДж при частоте повторения 150 Гц и длительности импульса до 8 нс. Поскольку период СВЧ-поля составляет 350 пс, при такой длительности формируется и ускоряется около 15 сгустков за один цикл работы ускорителя. Для обеспечения односгусткового режима на электрооптический модулятор подается короткий импульс высокого напряжения, вращающий плоскость поляризации, а поляризатор, находящийся после модулятора, устанавливается таким образом, чтобы через него проходили фотоны с повернутой плоскостью поляризации. В этом случае длительность импульса лазерного излучения уменьшается до 500 пс и при правильном положении импульса относительно ускоряющего полупериода СВЧ-поля происходит ускорение одиночного сгустка.

В обоих режимах выбивание фотоэлектронов из катода происходит в течение всего периода СВЧ-поля, поэтому ускоренные электроны имеют непрерывный спектр. Однако корреляция между энергией электронов и их положением в сгустке такова, что электроны большей энергии выходят из пушки в более ранние моменты времени. Это позволяет осуществить продольное сжатие сгустков с помощью магнитного поля. Для этих целей используется магнит с линейным нарастанием поля, главным свойством которого является то, что электроны, входящие в магнит под углом -40.7° по отношению к нормали к краю, выходят из него в точке падения под углом $+40.7^\circ$ независимо от их энергии. По форме траектории в магните он называется α -магнитом. Продольное сжатие сгустков происходит за счет того, что электроны меньшей энергии проходят в магните меньший путь. Коллимационная щель,

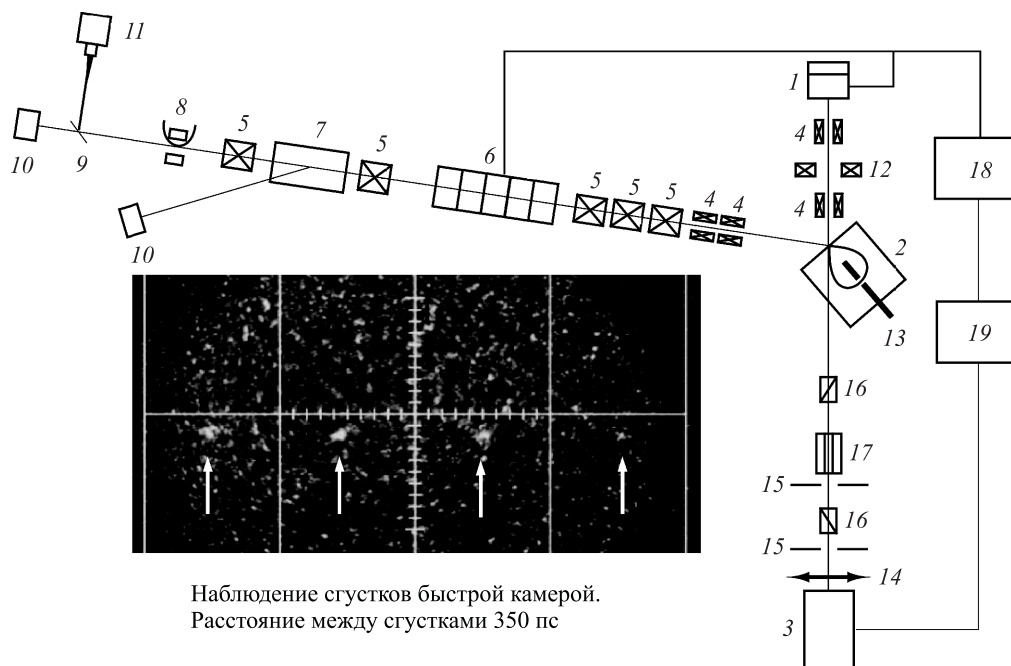


Рис. 1. Система формирования и измерения параметров сгустков с энергией 5 МэВ и зарядом 150 пК: 1 — СВЧ-пушка, 2 — группирующий магнит, 3 — лазер, 4 — корректоры пучка, 5 — квадрупольные линзы, 6 — бустерный линейный ускоритель, 7 — магнит спектрометра, 8 — индукционный датчик тока, 9 — экран для генерации переходного излучения, 10 — цилиндры Фарадея, 11 — CCD-камера или быстрая камера, 12 — соленоидальная линза, 13 — перемещаемый щелевой коллиматор, 14 — длиннофокусная линза, 15 — диафрагма, 16 — поляризаторы, 17 — электрооптический модулятор, 18 — система СВЧ-питания, 19 — система синхронизации. Показано изображение сгустков, полученное с помощью быстрой камеры

установленная на участке траектории с максимальной дисперсией, позволяет вырезать различные участки энергетического спектра.

Электроны, вышедшие из α -магнита, фокусируются триплетом квадрупольных линз и бустерным линейным ускорителем ускоряются до энергии, зависящей от фазы ускоряющего поля по отношению к фазе поля СВЧ-пушки. Для измерения энергетического спектра, заряда сгустков и эмиттанса пучка используются цилиндры Фарадея, дипольный магнит, квадрупольные линзы, экран для генерации переходного излучения, CCD-камера и быстрая камера.

На выходе инжектора получены сгустки с зарядом 150 пК, энергией, варьируемой в диапазоне 4.5–5.6 МэВ с нормализованным эмиттансом 8.3 мм·мрад, следующие с частотой 150 Гц.

2. Работа нормальнопроводящих ускоряющих структур в непрерывном режиме

Как было отмечено во введении, создание ускорителей электронов непрерывного действия исключительно важно для исследований в области ядерной физики. Быстрый прогресс технологии сверхпроводящих ускоряющих структур, начавшийся в середине 1980-х гг., сделал стандартным их использование для получения непрерывных пучков электронов высокой энергии с относительно небольшим средним током [14], а также в ускорителях с рекуперацией энергии [15].

Однако ускорители электронов непрерывного действия позволяют получать не только прецизионные пучки для научных исследований, но и пучки с большой средней мощностью для применения в промыш-

ленности. В том случае, если мощность ускоренного пучка заметно превышает потери мощности в стенках ускоряющей структуры, использование нормальнопроводящих структур не только оправданно, но и имеет ряд преимуществ перед сверхпроводящими структурами. В частности, конструкция нормальнопроводящих структур значительно проще, им не нужен криостат и рефрижератор, потери тока пучка в разумных пределах не приводят к серьезным последствиям для ускоряющей структуры. Линейные ускорители электронов непрерывного действия целесообразно использовать для получения пучков электронов с энергией в области от 1 до 10 МэВ с мощностью десятки и сотни киловатт [16].

2.1. Особенности непрерывного режима

Для создания нормальнопроводящих линейных ускорителей электронов непрерывного действия используются те же изготовленные из меди ускоряющие структуры со стоячей волной, что и для импульсных ускорителей, — это главным образом бипериодические структуры с внутренними и боковыми ячейками связи. Работа в непрерывном режиме имеет следующие особенности. Первая — высокие тепловые нагрузки, приводящие к заметному изменению электродинамических характеристик структуры: сдвигу резонансной частоты, появлению или изменению полосы запираания в дисперсионной характеристике, снижению эффективного шунтового сопротивления из-за увеличения сопротивления материала стенок. Другой особенностью является низкий уровень ускоряющего поля, обуславливающий низкий темп набора энергии частицами, в результате чего

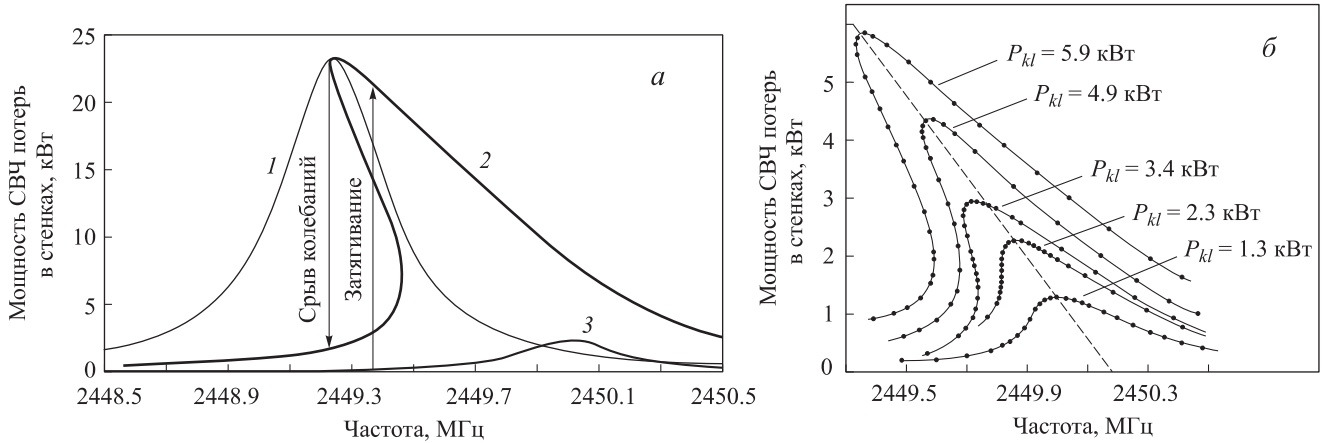


Рис. 2. а — Резонансная кривая ускоряющей структуры. Кривые 1 и 2 измерены при быстром и медленном изменении частоты генератора соответственно; 3 — резонансная кривая «холодной» структуры. б — Измеренные резонансные кривые, указана выходная мощность клистрона

на значительном участке структуры инжектированные частицы остаются нерелятивистскими.

Зависимость резонансной частоты от уровня высокочастотных потерь в стенках ускоряющей структуры приводит к так называемому нелинейному эффекту, экспериментально обнаруженному в НИИЯФ МГУ и описанному в работе [18]. Суть его заключается в следующем. Если проводить измерение резонансной кривой, давая возможность структуре в каждой измеряемой точке приходить в состояние теплового равновесия, то кривая будет иметь вид, характерный для нелинейного резонанса. На рис. 2, а показан вид резонансной кривой, измеренной при быстром (1) и медленном (2) изменении частоты задающего генератора. Для сравнения приведена также резонансная кривая «холодной» структуры (3).

Важной особенностью кривой 2 на рис. 2, а является то, что при снижении частоты возбуждающего сигнала ниже резонансной частоты разогретой структуры происходит срыв колебаний с переходом в состояние с существенно меньшим уровнем поля и практически полным отражением возбуждающего сигнала. С другой стороны, при подаче на вход холодной структуры сигнала с частотой, несколько превосходящей частоту разогретой структуры, происходит ее постепенный разогрев с последующим переходом на высокий уровень поля.

На рис. 2, б показаны резонансные кривые бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи с периферийным охлаждением, измеренные при различной мощности клистрона [19]. Структура, работающая в диапазоне частоты 2450 МГц, состояла из 7 ускоряющих ячеек и 6 ячеек связи и имела электрическую длину 0.482 м. Коэффициент сдвига частоты структуры при расходе воды около 0.15 л/с составил -65 кГц/кВт/м. Для измерения кривых в области неустойчивости использовалась система автоподстройки частоты задающего генератора с постоянной времени много меньшей постоянной времени тепловых процессов. Как видно, для структуры с периферийным охлаждением условия для срыва колебаний возникают уже при уровне СВЧ-потерь около 5 кВт/м. Такой уровень потерь достаточно часто достигается и у импульсных ускорителей, работающих с высоким

коэффициентом заполнения рабочего цикла, и должен учитываться при проектировании систем СВЧ-питания.

2.2. Автоколебательная схема системы СВЧ-питания

Широко используемая на ускорителях электронов НИИЯФ МГУ схема автоколебательного режима работы клистрона с ускоряющей структурой в цепи обратной связи, показанная на рис. 3, отличается простотой и надежностью, хорошо подходит для питания ускорителей с большой мощностью пучка и с большими ускоряющими градиентами, у которых возможны изменения частоты рабочего колебания в широких пределах. При использовании дополнительных цепей стабилизации схема может использоваться и для получения прецизионных электронных пучков.

В данной схеме (рис. 3, а) маломощный высокочастотный сигнал с петли связи (5), установленной в одной из ускоряющих ячеек структуры (3), через цепь обратной связи (6), включающей регулируемые аттенюатор, фазовращатель и ферритовое развязывающее устройство, подается на вход клистрона (2). Подбором величины ослабления и сдвига фазы цепи обратной связи обеспечиваются условия автоколебаний на рабочей частоте. Ячейка для установки петли связи выбирается исходя из условия низкой амплитуды поля соседних колебаний, попадающих в рабочую полосу частот клистрона. Частота автоколебаний автоматически следует за резонансной частотой структуры, изменяющейся вследствие тепловых процессов. При возникновении высокочастотных разрядов в ускоряющей структуре или волноводном тракте условия автоколебаний нарушаются и они прекращаются. Таким образом, при работе в непрерывном автоколебательном режиме величина отраженной от ускоряющей структуры мощности определяется степенью ее согласования с волноводным трактом, что при хорошем согласовании допускает работу клистрона на высокодооборотную нагрузку без ферритового развязывающего устройства (рис. 3, б), что удешевляет ускоритель и уменьшает его размеры.

Автоколебательная схема может использоваться и для питания многосекционного ускорителя при условии, что требования к стабильности относительных фаз поля невысоки. Один из вариантов питания многосек-

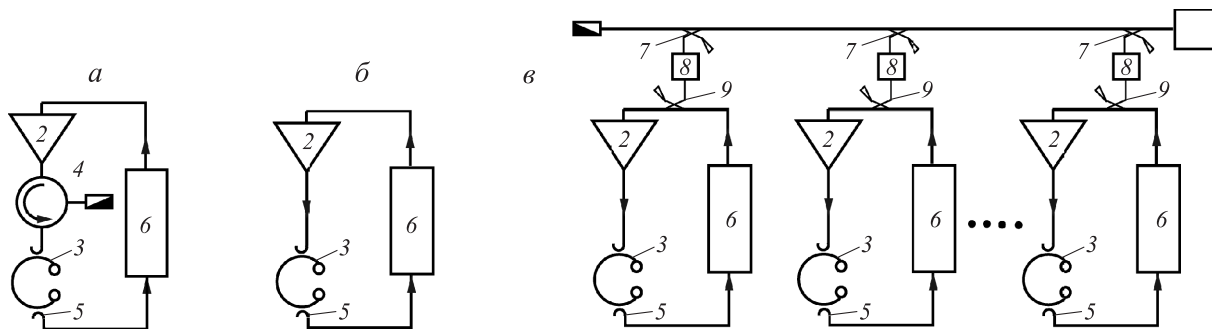


Рис. 3. Схемы высокочастотного питания с автоколебательным режимом работы клистрона: а — односекционный ускоритель с ферритовым развязывающим устройством; б — односекционный ускоритель без ферритового развязывающего устройства; в — многосекционный ускоритель: 1 — задающий генератор, 2 — клистрон, 3 — ускоряющая структура, 4 — циркулятор, 5 — петля связи, 6 — цепь обратной связи, 7, 9 — направленные ответвители, 8 — фазовращатель

ционного ускорителя показан на рис. 3, в. Маломощный высокостабильный сигнал от задающего генератора (1) через направленные ответвители (7, 9) подмешивается в цепь обратной связи каждой из секций многосекционного ускорителя, обеспечивая затягивание частоты автоколебаний на частоту задающего генератора. Фазовращатель (8) используется для подстройки относительных фаз поля отдельных секций для обеспечения максимального ускорения пучка. Преимуществом данной схемы питания многосекционного ускорителя перед схемой с внешним возбуждением клистронов от задающего генератора с постоянной частотой является отсутствие этапа предварительного разогрева ускоряющей структуры с целью ввода ее в резонанс с генератором и последующего регулирования резонансной частоты каждой из секций. Мощность подмешиваемого сигнала зависит от требуемой для конкретной модели клистрона входной мощности и степени отклонения частоты отдельной секции от частоты задающего генератора. Типичная величина мощности синхронизирующего сигнала составляет около 1/10 мощности в цепи обратной связи в месте расположения направленного ответвителя (9) при отклонении частоты около половины ширины резонансной кривой.

Наряду со схемой, показанной на рис. 3, в, возможны иные схемы взаимной синхронизации поля отдельных секций, например за счет подмешивания части мощности цепи обратной связи предыдущей секции в цепь обратной связи последующей. Такая схема удобна, например, для двухсекционного ускорителя [21].

При большом токе ускоренного пучка синхронизация полей отдельных секций с полем первой секции, в котором формируются ускоряемые сгустки, может происходить автоматически, с требуемыми для ускорения фазами, если выполняются определенные соотношения между током пучка и величиной отклонения частоты [22].

2.3. Особенности динамики пучка в непрерывном режиме

Особенности динамики пучка в линейном ускорителе непрерывного действия определяются низким темпом набора энергии. При характерной величине ускоряющего градиента 1 МэВ/м на частоте 2450 МГц прирост энергии на одну ячейку ускоряющей структуры по мере

ускорения частицы меняется от 30 до 60 кэВ. Поэтому инжектированные электроны на значительной длине ускоряющей структуры являются нерелятивистскими, и их скорость по мере ускорения значительно изменяется. Для обеспечения синхронизма ускоряемых частиц с ускоряющим полем расстояние между ускоряющими зазорами должно меняться в соответствии с изменением скорости, $L = \beta\lambda/2$, где β — относительная скорость частицы, λ — длина волны ускоряющего поля. Поскольку длина ускоряющей ячейки для структуры стоячей волной не может быть сделана заметно меньше половины длины волны, для обеспечения условий синхронизма энергия инжекции в непрерывном режиме, как правило, выбирается большей, около 100 кэВ, что соответствует $\beta = 0.548$.

Ускоряющая структура с длиной ячеек, нарастающей пропорционально скорости частиц, обладает низким коэффициентом захвата: при инжекции в нее непрерывного пучка только около 30% частиц захватываются в режим ускорения, остальные частицы выходят из структуры с энергией, близкой к энергии инжекции, или оседают на стенках пролетных каналов [16]. Для получения пучков с высокой монохроматичностью и малыми потерями тока используют прерыватель и группирователь, описанные в разделе 1.1. Группирователь при этом настраивают таким образом, чтобы минимальная длина сгустков достигалась в области первой ускоряющей ячейки. Во избежание разгруппирования сгустков при их дальнейшем ускорении амплитуда модуляции пучка по энергии группирователем должна быть заметно меньше прироста энергии на ячейку, как правило, она составляет 2–3 кэВ, что приводит к увеличению длины пространства дрейфа, в котором происходит группирование, до ~ 1 м.

Описанные принципы оптимизации ускоряющей структуры и группирователя легли в основу инжектора разрезного микротрона непрерывного действия, созданного в НИИЯФ МГУ [23]. Выполненные затем исследования возможности создания на этих принципах ускорителей электронов для прикладных целей [16] показали, что для получения пучков большой мощности необходимо изменить подход к оптимизации ускоряющей структуры. Действительно, типичное значение ускоренного среднего тока для промышленных ускорителей составляет десятки–сотни миллиампер. При

энергии инжекции 100 кэВ, коэффициенте захвата 30% и ускоренном токе 50 мА мощность инжектируемого пучка составила бы 17 кВт, из которых около 12 кВт оседали бы в пролетном канале и на стенках системы вывода пучка в атмосферу, производя нагрев элементов ускорителя, паразитную радиацию, снижая КПД ускорителя. Установка отдельного группирующего резонатора для увеличения коэффициента захвата существенно усложнила бы систему СВЧ-питания и конструкцию ускорителя, увеличила бы его размеры. Решение проблемы было найдено за счет значительного снижения энергии инжекции, до величины 15 кэВ, что позволило интегрировать группирующий резонатор в состав ускоряющей структуры, а также за счет введения бустерного резонатора, увеличивающего энергию сгруппированного пучка для последующего ускорения по изложенным выше принципам [24, 25]. Использование описанного подхода позволило снизить энергию инжекции до 15 кэВ, и обеспечить коэффициент захвата более 50% [26].

2.4. Ускорители электронов непрерывного действия НИИЯФ МГУ

Первым ускорителем непрерывного действия, созданным в НИИЯФ МГУ, был инжектор разрезного микротрона [23] с максимальной энергией 6.2 МэВ — рекордной для нормальнопроводящих линейных ускорителей электронов. Одним из шагов на пути разработки ускорителя электронов непрерывного действия прикладного назначения стало создание ускорителя с магнитным зеркалом [20]. Ускоритель имел три выхода — прямой с энергией пучка, регулируемой в диапазоне 0.6–1.2 МэВ, выход под углом 15° к основному направлению пучка с энергией до 1.7 МэВ и выход под углом 336° с энергией пучка до 2.3 МэВ. Средний ток пучка за счет изменения накала электронной пушки мог варьироваться в пределах от единиц мкА до 8 мА (максимальная мощность пучка 10 кВт). На данном ускорителе, состоящем из трех секций, был реализован автоколебательный принцип работы клистрона с ускоряющей структурой в цепи обратной связи с фазированием поля секций подмешиванием в цепь обратной связи маломощного внешнего сигнала, формируемого в одной из них. Было также показано, что в режиме автоколебаний за счет выбора длины волноводного тракта возможна работа клистрона на высокочастотную нагрузку без использования ферритового развязывающего устройства, что позволяет создавать чрезвычайно компактную систему, состоящую из ускоряющей структуры и клистрона.

С учетом полученного опыта в 1999–2000 гг. в НИИЯФ МГУ был создан прототип промышленного ускорителя электронов на энергию 1.2 МэВ, на котором было достигнуто рекордное для линейных ускорителей S-диапазона значение среднего тока пучка 50 мА [27]. В настоящее время ускоритель используется для выполнения прикладных работ.

2.5. Перспективы развития ускорителей электронов непрерывного действия

Полученный опыт работы с ускоряющими структурами в непрерывном режиме позволяет оценить пре-

дельные характеристики ускорителей электронов непрерывного действия, которые могли бы использоваться в промышленности. Учитывая, что одним из важных параметров ускорителей, используемых в технологических процессах, является эффективность, электронный КПД $\eta_e = P_b/P_{RF}$, где P_b — мощность пучка, P_{RF} — полные затраты высокочастотной мощности, должен составлять не менее 80%. При охлаждении как периферии, так и стенок ускоряющей структуры ускоритель на энергию 3.5 МэВ может иметь длину 1 м, при этом мощность пучка составит 840 кВт при токе 240 мА, а полные затраты СВЧ-мощности около 1 МВт. При периферийном охлаждении ускоряющая структура длиной 1 м способна обеспечить пучок с энергией 2.2 МэВ, при этом мощность и ток пучка составят соответственно 280 кВт и 127 мА, а полные затраты высокочастотной мощности 350 кВт.

Рассмотренные в настоящей работе исследования были выполнены на так называемой промышленной частоте 2450 МГц, широко используемой для различных методов высокочастотного нагрева. Различные обстоятельства, например наличие мощных высокоэффективных СВЧ-источников, необходимость иметь значительную апертуру для пролета пучка или малые размеры ускорителя, могут потребовать выбора иного диапазона частот. Анализ, выполненный в работе [17], показывает, что максимально достижимый ускоряющий градиент слабо зависит от частоты, $G \sim f^{1/4}$, при этом предельные погонные затраты высокочастотной мощности от частоты не зависят. Следует, однако, отметить, что с уменьшением частоты эффективное шунтовое сопротивление убывает, $z_e \sim f^{1/2}$, это означает необходимость больших затрат СВЧ-мощности для достижения той же энергии. Поэтому для сохранения высокого КПД целесообразно использовать более низкие частоты при больших значениях тока пучка, что, впрочем, вытекает и из требований минимизации токоседания в пролетном канале, имеющем большой диаметр при низких частотах.

3. Разрезные микротроны

Разрезной микротрон занимает особое место среди ускорителей электронов. Обычно, анализируя его преимущества и недостатки, проводят сравнение с классическим микротроном и линейным ускорителем, схематически показанными на рис. 4.

По сравнению с классическим разрезной микротрон обладает двумя очевидными преимуществами. Во-первых, это возможность обеспечения значительного прироста энергии за оборот за счет использования вместо одиночного резонатора ускоряющей структуры, состоящей из большого числа связанных резонаторов. Это позволяет достигать высокой конечной энергии пучка за меньшее число оборотов и в существенно более компактной установке, поскольку величина магнитного поля, определяющая диаметр орбиты, пропорциональна приросту энергии за оборот. Во-вторых, это возможность установки фокусирующих элементов на оси линейного ускорителя и возвратных орбитах для обеспечения устойчивости поперечных колебаний на большом числе орбит.

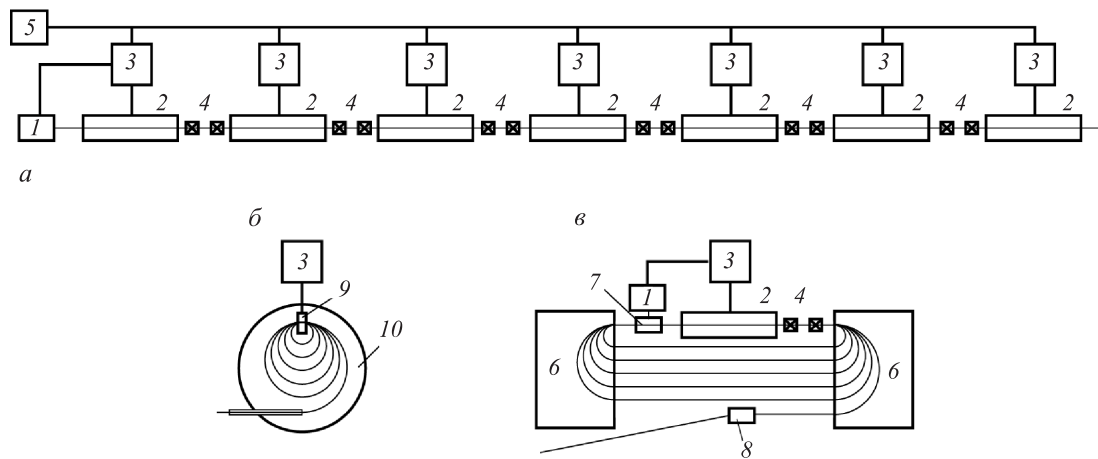


Рис. 4. а — Линейный ускоритель, б — классический микротрон, в — разрезной микротрон: 1 — электронная пушка, 2 — ускоряющая структура, 3 — система высокочастотного и высоковольтного питания, 4 — квадрупольные линзы, 5 — задающий генератор, 6, 10 — поворотные магниты, 7 — магнит инъекции, 8 — магнит вывода пучка, 9 — ускоряющий резонатор

По сравнению с линейным ускорителем преимущества заключаются в сокращении в предельном случае в N раз, где N — число орбит, количество секций ускоряющей структуры и связанных с каждой секцией элементов системы СВЧ-питания, включая источник СВЧ-мощности и источник высоковольтного питания. Поскольку стоимость ускоряющей структуры, источника СВЧ-мощности и системы его питания в основном определяют стоимость ускорителя, разрезной микротрон оказывается более дешевым по сравнению с линейным ускорителем. При большом числе орбит размеры разрезного микротрона намного меньше размеров линейного ускорителя. Наконец, в силу особенностей фазовых колебаний пучок имеет высокую монохроматичность, а за счет вывода с различных орбит энергия пучка может изменяться в широких пределах.

Однако у разрезного микротрона имеется ряд проблем, которые отсутствуют у классического микротрона и линейного ускорителя. Так, разделение магнита классического микротрона на две половины приводит к появлению краевого поля, которое действует на пучок как сильная дефокусирующая линза со сферическими аберрациями. Проблема дефокусировки решается введением на входе магнита поля обратной полярности, однако при этом аберрации увеличиваются, что приводит к росту среднеквадратичного эмиттанса пучка в вертикальной плоскости.

Магнит классического микротрона технологически прост, и при его изготовлении обеспечивается высокая степень симметрии по отношению к медианной плоскости и плоскости, перпендикулярной оси резонатора и проходящей через его центр. Достижение близости полей двух магнитов разрезного микротрона на уровне лучше 0.1% требует не только сложной конструкции магнита, но и трудоемкой процедуры настройки. К ошибкам изготовления добавляются ошибки установки магнитов: непараллельность полюсов магнитов и несовпадение магнитной и геометрической медианных плоскостей на уровне десятых долей миллиметра приводят к недопустимым отклонениям пучка от идеальной орбиты и потерям тока, для компенсации отклонений

необходима установка корректоров пучка на орбитах и последующая их настройка.

По сравнению с линейным ускорителем у разрезного микротрона возникают следующие проблемы. Во-первых, область устойчивых фазовых колебаний разрезного микротрона невелика и составляет 32° , в то время как в линейном ускорителе релятивистский пучок может ускоряться (замедляться) без потерь тока в любой фазе.

Во-вторых, у разрезного микротрона существуют ограничения на ток пучка, вытекающие из проблем поперечной и продольной неустойчивости вследствие положительных обратных связей, вносимых поворотными магнитами. Проблема поперечной неустойчивости из-за возбуждения паразитных мод может иметь место и в линейном ускорителе, однако при значительно большем токе или при большой длине ускоряющей структуры.

В-третьих, в разрезном микротроне длина ускоряющей структуры составляет только 25–30% длины орбиты, таким образом, путь, проходимый пучком, оказывается в 3–4 раза больше, чем в линейном ускорителе на ту же энергию, при этом ошибки поля и ошибки установки поворотных магнитов являются дополнительными факторами, затрудняющими прохождение пучка через расположенные на его пути апертуры.

Также в разрезном микротроне существует проблема обхода пучком ускоряющей структуры на 1-й орбите и проблема инъекции пучка электронной пушки, вызванная тем, что через ускоряющую структуру должны проходить сгустки электронов с разных орбит.

Безусловно, перечисленные проблемы решаются тем или иным способом в зависимости от требований к ускоренному пучку. Однако, определяя место разрезного микротрона среди других ускорителей, можно указать, что он в наибольшей степени применим в тех случаях, когда требуется получить пучок достаточно высокой энергии при относительно небольшом токе, т.е. в случаях, когда в линейном ускорителе практически вся СВЧ-мощность рассеивалась бы в стенках ускоряющей структуры, а длина ускорителя была бы неприемлемо большой.

В НИИЯФ МГУ в настоящее время действуют разрезные микротроны на энергию 35, 55 и 70 МэВ, построенные вместе со специалистами из различных организаций, прежде всего ФИАН, МИФИ, ИТЭФ, МРТИ и СГУ, в которых различным образом решены проблемы инжекции, обхода линейного ускорителя, оптики пучка, построения системы СВЧ-питания. Ниже рассмотрены особенности этих ускорителей.

3.1. Разрезной микротрон на энергию 70 МэВ

Ускоритель, показанный на рис. 5, с параметрами, приведенными в табл. 1, работает следующим образом [28]. Пучок электронной пушки (1) проходит группирующий резонатор (2), фокусирующую линзу (4) и через магнит инжекции (3) поступает на вход ускоряющей структуры (7). Ускоренный пучок с помощью поворотных магнитов (5, 6) возвращается ко входу ускоряющей структуры, при этом его фаза подстраивается с помощью фазовращателя пучка (8). Для компенсации влияния магнита инжекции на ускоренный пучок используются компенсирующие дипольные магниты (10). Обход пучком ускоряющей структуры обеспечивается за счет использования узкой в плоскости орбит пучка прямоугольной структуры [29] и краевого поля поворотного магнита приближенного к идеальному прямоугольному распределению.

Таблица 1

Параметры импульсного разрезного микротрона на энергию 70 МэВ

Энергия инжекции	48–50 кэВ
Прирост энергии за оборот	4.8 МэВ
Число орбит	14
Энергия на выходе	14.8–68.3 МэВ
Ускоренный ток при 68.3 МэВ	5 мА
Длительность импульса	5–40 мкс
Увеличение длины орбиты за оборот	1 λ
Рабочая частота	2856 МГц
Максимальная мощность клистрона	6 МВт
Минимальная скважность	250
Индукция поля поворотных магнитов	0.963 Т
Размеры ускорителя (Д × Ш × В)	2.2 × 0.9 × 1.8 м

Оптика разрезного микротрона формируется несколькими элементами. Краевое поле поворотных магнитов оказывает слабое фокусирующее воздействие в вертикальной плоскости. Прямоугольная ускоряющая структура разрезного микротрона обладает свойствами высокочастотной квадрупольной линзы. За счет формы пролетных отверстий знак и величина фокусирующей силы выбираются таким образом, чтобы при синхронной фазе 16° обеспечить горизонтальную фокусировку и вертикальную дефокусировку пучка. Квадрупольная линза (10) фокусирует в вертикальной плоскости и дефокусирует в горизонтальной. Наконец, квадрупольные триплеты (12), установленные на четных орбитах, имеют бесконечное фокусное расстояние

в горизонтальной плоскости и одинаковое, равное 2 м, фокусное расстояние в вертикальной плоскости. Для дополнительной фокусировки выводимого пучка используется квадрупольная линза (16).

Подстройка положения пучка на орбитах производится горизонтальными и вертикальными корректорами (13). Для вывода пучка с определенной орбиты на нее устанавливается магнит вывода (14), отклоняющий пучок на 5°, в результате чего он минует ускоряющую структуру и выходит в общий для всех орбит тракт вывода.

Для измерения тока пучка на орбитах используются индукционные датчики (11). В конце тракта вывода пучка может быть установлен цилиндр Фарадея для измерения импульсного и среднего тока ускоренного пучка.

Отличительной особенностью данного ускорителя является широкое использование редкоземельного магнитного материала в конструкции его магнитных систем — поворотных магнитов, магнита инжекции, магнитов вывода, квадрупольных триплетов. Помимо этого ускоритель имеет следующие особенности [34]. Электронная пушка содержит управляющий электрод, позволяющий регулировать ток в диапазоне 50–300 мА при слабом изменении положения кроссовера и размеров пучка. Группирователь, модулирующий пучок пушки по энергии, увеличивает коэффициент захвата ускоряющей структуры с ~30 до ~60%. В качестве магнита инжекции используется бездисперсионный α-магнит [35], поскольку электроны после группирователя имеют различные энергии. Система СВЧ-питания основана на автоколебательном режиме работы импульсного клистрона с ускоряющей структурой в цепи обратной связи, подобно тому как это было описано в разделе 2.3 для линейного ускорителя непрерывного действия (рис. 3, б).

Поскольку частицы после первого ускорения приходят с запаздыванием на вход ускоряющей структуры, фазовращатель пучка должен удлинить траектории пучка на величину несколько большую, чем кратное число длин волн. Фазовращатель состоит пяти постоянных магнитов — трех 30° и двух 180°, образующих бездисперсионную систему [38]. Магниты размещаются в корпусе из магнитомягкой стали, экранирующей соседние орбиты от рассеянных полей. Для изменения длины траектории один из 180° магнитов фазовращателя может перемещаться дистанционно.

3.2. Разрезной микротрон на энергию 55 МэВ

Импульсный разрезной микротрон на энергию 55 МэВ, разработанный совместно с ФИАН, показан на рис. 6, основные параметры приведены в табл. 2 [33]. Эскизный проект ускорителя был подготовлен до создания рассмотренного выше 70 МэВ микротрона [32], однако проект со значительными модификациями, учитывающими опыт работы с 70 МэВ ускорителем, был реализован позже. Одной из целей сооружения этого ускорителя было сопоставление различных решений по системам ускорителя с целью выбора оптимального варианта.

Основные отличия этого ускорителя от ускорителя, рассмотренного в разделе 3.1, следующие. Поворот-

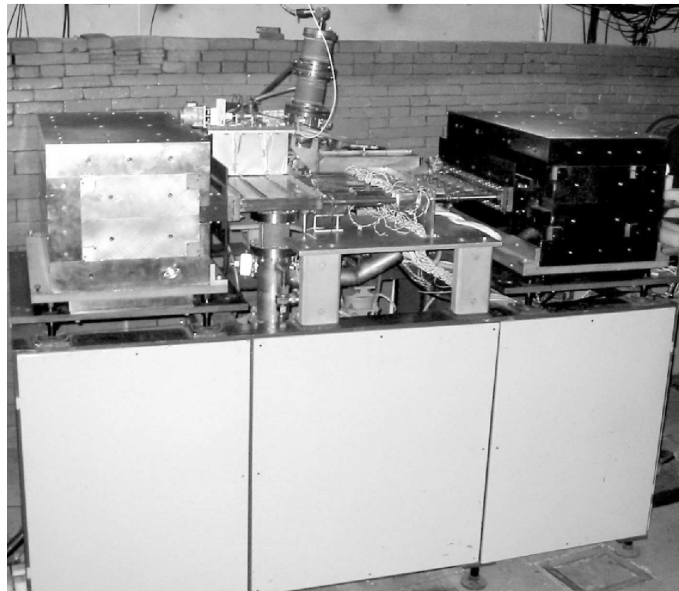
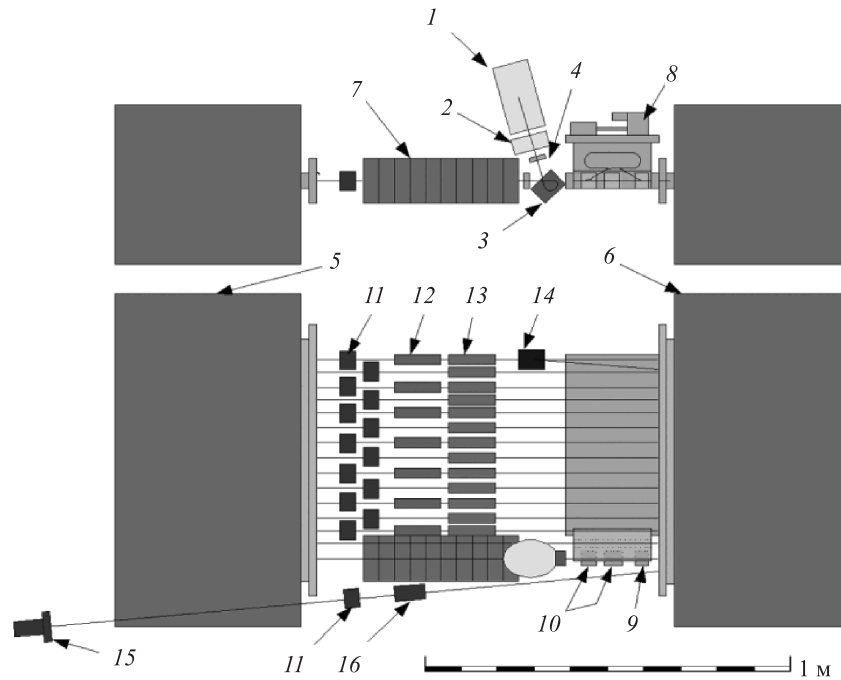


Рис. 5. Схема и фотография разрезного микротрона на энергию 70 МэВ: 1 — электронная пушка, 2 — группирователь, 3 — α -магнит, 4 — фокусирующая линза, 5, 6 — поворотные магниты, 7 — ускоряющая структура, 8 — устройство сдвига фазы пучка на 1-й орбите, 9, 16 — квадрупольная линза, 10 — система коррекции положения пучка на общей орбите, 11 — датчик тока пучка, 12 — квадрупольный триплет, 13 — корректоры положения пучка, 14 — магнит вывода, 15 — цилиндр Фарадея

ные магниты являются электромагнитами; используется круглая ускоряющая структура, практически не оказывающая фокусирующего воздействия на релятивистский пучок, для фокусировки пучка используется дублет квадрупольных линз, установленных на оси ускоряющей структуры; используется схема инъекции с отражением пучка от поворотного магнита и удвоением энергии на 1-й орбите; отсутствует группирователь; магнит инъекции и магниты, компенсирующие его действие, выполнены как одно целое и питаются от одного источника тока; вывод пучка осуществляется только с последней орбиты; в систему СВЧ-питания,

работающую по автоколебательному принципу, включен циркулятор, как это показано на рис. 3, а, добавлены диагностика пучка по синхротронному излучению и датчик тока на оси ускоряющей структуры.

Отсутствие группирователя снижает коэффициент захвата разрезного микротрона, однако упрощает настройку ускорителя. Дополнительные упрощения возникают благодаря отсутствию фазовращателя пучка: фаза пучка на входе в ускоряющую структуру после первого ускорения подстраивается перемещением поворотного магнита, отражающего пучок. Точность расчета положения магнитов относительно ускоряющей

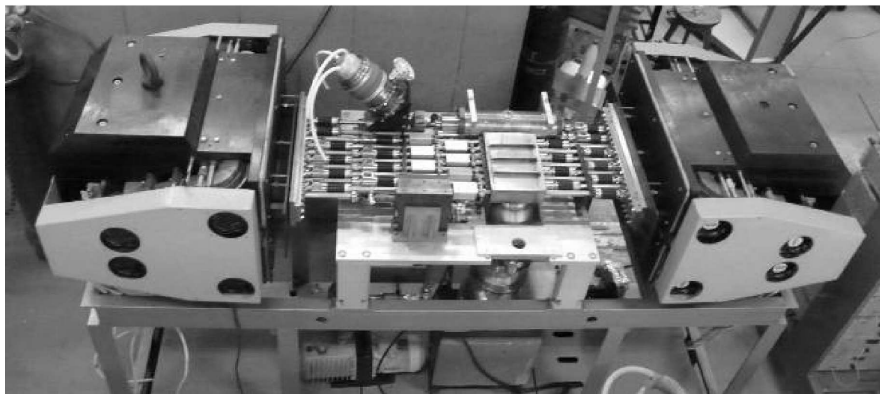
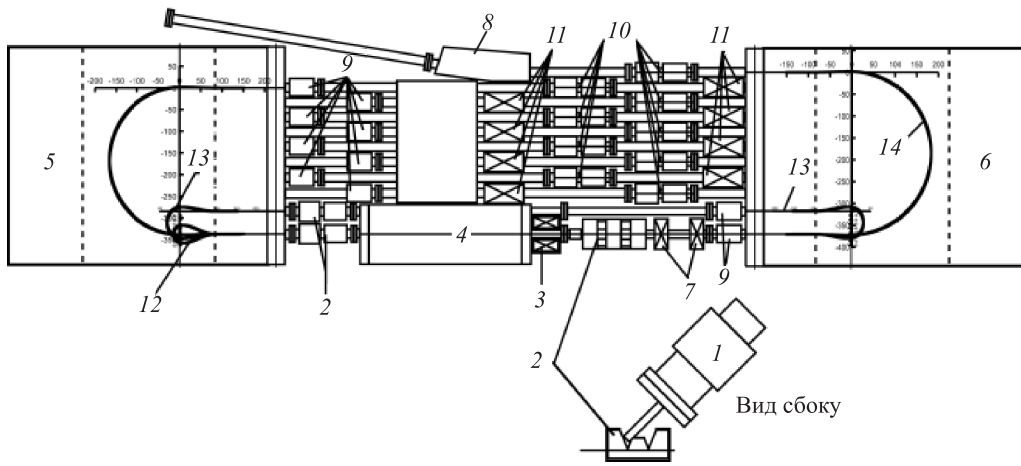


Рис. 6. Схема и фотография разрезного микротрона на энергию 55 МэВ: 1 — электронная пушка, 2 — магниты инжекции, 3 — соленоидальная линза, 4 — ускоряющая структура, 5, 6 — поворотные магниты, 7 — квадрупольные линзы, 8 — магнит вывода, 9 — сильфоны, 10 — датчики тока пучка, 11 — корректоры положения пучка, 12 — орбита пучка после 1-го ускорения, 13 — 1-я орбита, 14 — последняя орбита

Таблица 2

Параметры импульсного разрезного микротрона на энергию 55 МэВ

Энергия инжекции	48–50 кэВ
Прирост энергии за оборот	5 МэВ
Число орбит	10
Энергия на выходе	55.6 МэВ
Ускоренный ток при 68.3 МэВ	10 мА
Длительность импульса	5 мкс
Увеличение длины орбиты за оборот	1 л
Рабочая частота	2856 МГц
Максимальная мощность клистрона	6 МВт
Минимальная скважность	1000
Индукция поля поворотных магнитов	1 Т
Размеры ускорителя (Д × Ш × В)	2.7 × 0.9 × 1.7 м

3.3. Разрезной микротрон на энергию 35 МэВ

Принципиальным отличием импульсного разрезного микротрона на энергию 35 МэВ от рассмотренных выше микротронов является наличие системы инжекции, формирующей сгустки с энергией около 5 МэВ с большим зарядом и малым поперечным эмиттансом. Схема и фотография микротрона показаны на рис. 7, основные параметры приведены в табл. 3 [12], инжектор ускорителя описан в разделе 1.2.

Инжектированные в разрезной микротрон сгустки с малой фазовой протяженностью, малым энергетическим разбросом и малым эмиттансом могут ускоряться в нем практически без потерь. Однако большой заряд коротких сгустков приводит к появлению мощного когерентного синхротронного излучения в поворотных магнитах на длинах волн, больших длины сгустка, и вызванного им кильватерного поля, действие которого на электроны зависит от их положения в сгустке. В результате действия кильватерного поля происходит рост эмиттанта, приводящий к потерям тока. Для подавления когерентного синхротронного излучения в вакуумных камерах поворотных магнитов с двух сторон от медианной плоскости установлены параллельные перемещаемые алюминиевые пластины. Подавление когерентного излучения происходит при расстоянии между пластинами близком к длине сгустка.

структуры обеспечивает получение правильной фазы входа пучка в ускоряющую структуру после отражения от магнита и условий для последующего синхронного ускорения без дополнительной подстройки. С другой стороны, гистерезисные явления при включении и выключении тока обмоток поворотного магнита влияют на воспроизводимость настройки ускорителя.

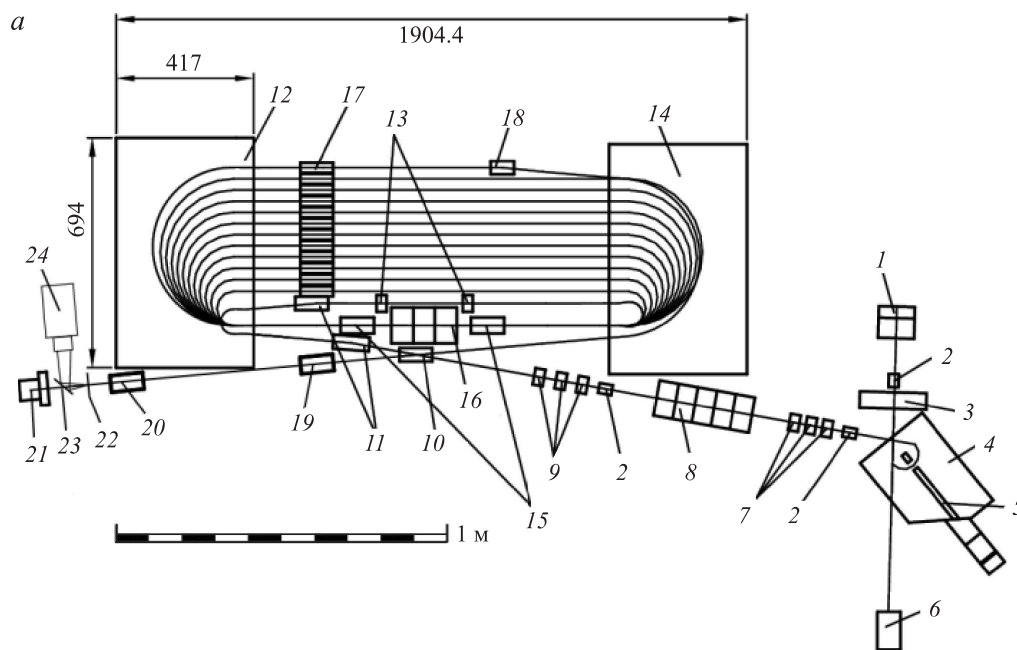


Рис. 7. Схема и фотография разрезного микротрона на энергию 35 МэВ: 1 — СВЧ-пушка, 2 — корректоры пучка, 3 — соленоидальная линза, 4 — группирующий магнит, 5 — коллимационная щель, 6 — лазерная система, 7, 9, 13, 15, 19, 20 — квадрупольные линзы, 8 — ускоряющая структура инжектора, 10 — магнит вывода пучка инжектора, 11 — магниты инжекции, 12, 14 — поворотные магниты, 16 — ускоряющая структура разрезного микротрона, 17 — корректоры положения пучка, 18 — магнит вывода, 21 — цилиндр Фарадея, 22 — выходное окно, 23 — экран переходного излучения, 24 — CCD-камера

3.4. Использование редкоземельных магнитов в разрезных микротронах

Редкоземельные магнитные материалы (РММ) используются как источники поля в магнитных системах ионных ускорителей и ондуляторов с конца 1970-х гг. В пионерских работах, выполненных в НИИЯФ МГУ при участии специалистов из различных организаций России и США, в конце 1990-х — начале 2000-х гг. впервые была показана перспективность использования РММ в конструкции магнитных систем разрезного

микротрона. Использование РММ позволяет создавать сложные конфигурации магнитного поля с помощью компактных устройств с характеристиками, недостижимыми в электромагнитных системах, помещать магниты внутрь вакуумных камер. Магниты на основе РММ не требуют питания, им не присущи гистерезисные явления, они обеспечивают высокую повторяемость и стабильность параметров пучка ускорителя от включения к включению и в процессе работы.

Для разрезного микротрона на энергию 70 МэВ

Таблица 3
**Параметры импульсного разрезного микротрона
 на энергию 35 МэВ**

Энергия инъекции	4.85 МэВ
Прирост энергии за оборот	2.43 МэВ
Энергия выведенного пучка	4.85–34.20 МэВ
Нормализованный эмиттанс	10 мм·мрад
Продольный эмиттанс	200 кэВ·град
Длительность сгустка	5 пс
Частота повторения сгустков	1–150 Гц
Заряд сгустка	150 пК
Рабочая частота	2.856 ГГц
Импульсная СВЧ-мощность	< 3 МВт
Индукция поля магнитов	0.486 Т

были созданы следующие магнитные системы на основе РММ: 180° поворотные магниты [30], магнит инъекции (α -магнит) [35], фазовращатель пучка [31], квадрупольные триплеты [36] и магниты вывода пучка. В разрезном микротроне на энергию 35 МэВ РММ был использован в конструкции 180° поворотных магнитов [37], группирующего магнита (α -магнита) [38] и магнитов вывода.

Опыт разработки магнитных элементов разрезного микротрона на основе РММ выявил ряд проблем, из которых одна из наиболее важных связана с необходимостью на этапе настройки элемента устанавливать абсолютное значение поля с высокой точностью в соответствии со значением, полученным на основании расчета динамики пучка. Связано это с тем, что магнитные системы на основании РММ, как правило, не содержат устройств оперативной подстройки поля, которые могли бы быть использованы в процессе оптимизации работы ускорителя с пучком, в отличие от электромагнита, поле которого может подстраиваться изменением тока обмоток.

Кроме того, поля должны обладать высокой степенью однородности и симметрии относительно геометрических плоскостей симметрии. Требуемая точность однородности и симметрии не обеспечивается ни однородностью намагничивания, ни возможностью контроля абсолютной величины намагничивания элементов РММ, получаемых от изготовителя. В результате для достижения требуемых характеристик поля необходим трудоемкий итерационный процесс измерений и настройки теми или иными методами, включающий также этапы частичной разборки магнитной системы.

Решение проблем заключается, во-первых, в использовании гибридных конструкций, в которых однородность поля определяется элементами из стали, которые могут быть изготовлены и установлены с высокой точностью; во-вторых, в использовании настроечных элементов, таких как вращающиеся намагниченные стержни или настроечные плунжеры, позволяющие менять потенциалы полюсов без разборки конструкции; в-третьих, в разработке экспресс-методов оценки характеристик поля, включая оценки симметрии поля, с необходимой точностью.

4. Импульсные линейные ускорители электронов

Импульсные линейные ускорители являются наиболее распространенным типом ускорителей электронов. Более 10 тыс. таких ускорителей ежедневно используются в лучевой терапии, работают на станциях стерилизации и на промышленных предприятиях, в системах безопасности и т. д. Основная часть прикладных линейных ускорителей работает в режиме стоячей волны. Некоторые прикладные линейные ускорители, разработанные в 60–70-е гг., а также ускорители на высокую энергию, в первую очередь инжекторы синхротронов и накопительных колец работают в режиме бегущей волны.

Достоинством линейных ускорителей со стоячей волной являются высокая эффективность преобразования СВЧ-энергии в энергию ускоренного пучка, малые размеры, отсутствие фокусирующего соленоида. Основным недостатком по сравнению с ускорителями с бегущей волной является узкополосность, требующая установки ферритового развязывающего устройства между ускоряющей структурой и СВЧ-источником и той или иной схемы подстройки частоты СВЧ-источника или ускоряющей структуры.

В НИИЯФ МГУ в сотрудничестве с другими организациями первоначально создавались импульсные линейные ускорители электронов как составная часть разрезных микротронов, описанных выше в разделе 3. В дальнейшем были выполнены разработки линейных ускорителей для стерилизации, досмотровых комплексов и радиологии.

Все импульсные линейные ускорители, созданные при участии НИИЯФ МГУ, работают в режиме стоячей волны и основаны на бипериодической ускоряющей структуре с внутренними ячейками связи. Специфический опыт НИИЯФ МГУ в области импульсных линейных ускорителей заключается в разработке ускорителей, работающих с большим коэффициентом заполнения рабочего цикла при высокой тепловой нагрузке ускоряющей структуры. Этот опыт вытекает из опыта работы в непрерывном режиме, особенности которого были описаны в разделе 2. Одной из особенностей, в частности, является широкое использование автоколебательного режима работы клистрона с ускоряющей структурой в цепи обратной связи, обеспечивающего автоматическое выполнение резонансных условий, и в ряде случаев допускающего работу клистрона без развязывающего устройства. Данный опыт важен для разработки ускорителей с большой средней мощностью пучка.

Кроме того, в НИИЯФ МГУ имеется опыт расчета и оптимизации ускоряющих структур со специальными группирующими и фокусирующими свойствами. Этот опыт особенно важен при разработке ускорителей, энергия пучка которых должна изменяться в широком диапазоне при сохранении высокого значения коэффициента захвата, узкого энергетического спектра, малых поперечных размеров пучка.

4.1. Линейный ускоритель на энергию 10 МэВ

Линейный ускоритель на энергию 10 МэВ был разработан совместно с ФГУП НПП «Торий» [40]. На

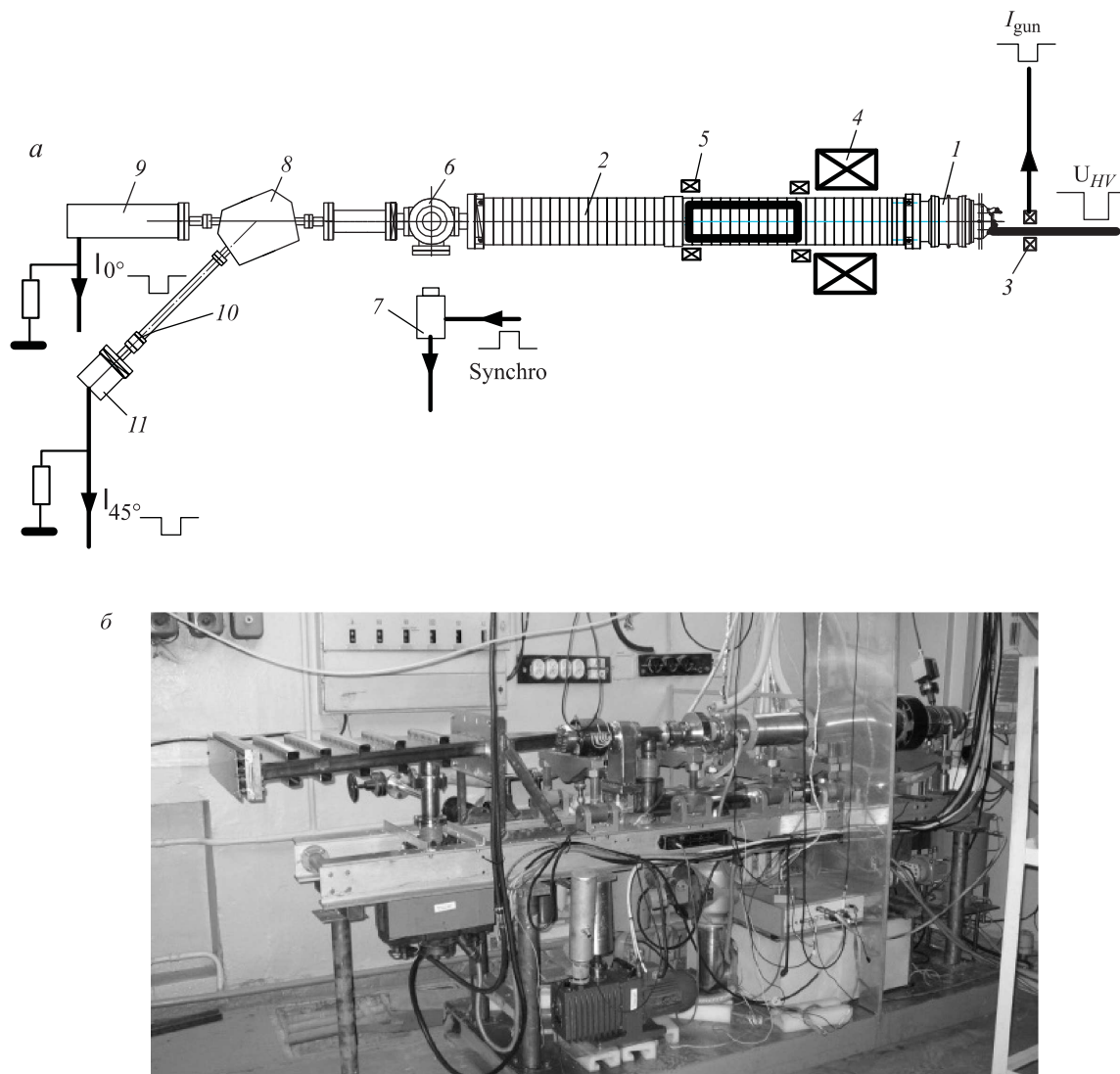


Рис. 8. Импульсный линейный ускоритель на энергию 10 МэВ: *а* — стенд для измерения параметров пучка; *б* — ускоритель с устройством вывода пучка в атмосферу: 1 — электронная пушка, 2 — ускоряющая структура, 3 — датчик тока пушки, 4 — соленоидальная линза, 5 — корректор пучка, 6 — вакуумная камера с перемещаемым экраном переходного излучения, 7 — CCD-камера, 8 — 45° поворотный магнит, 9, 11 — цилиндр Фарадея, 10 — щелевой коллиматор

рис. 8, *а* приведена блок-схема стенда для измерения параметров пучка, на рис. 8, *б* показана фотография прототипа ускорителя с устройством вывода пучка в атмосферу, установленного в НИИЯФ МГУ. Параметры ускорителя указаны в табл. 4. За счет выбора параметров первых ускоряющих ячеек коэффициент захвата пучка электронной пушки в режим ускорения

составил более 55% при 10 МэВ, а размер пучка — около 3 мм без включения соленоидальной линзы. При включенной линзе энергия пучка может регулироваться в диапазоне 4–11 МэВ.

4.2. Линейный ускоритель для ИДК

Линейный ускоритель для инспекционно-досмотрового комплекса (ИДК) был разработан совместно с ЗАО «Инновационный центр мощных электровакуумных приборов», его основные параметры приведены в табл. 5 [41].

Одним из обязательных требований к современным ИДК, осуществляющим досмотр контейнеров и большого грузного транспорта, является способность распознавания эффективного атомного номера содержимого. Возможность распознавания атомного номера для больших толщин объекта была продемонстрирована в работе [39]. Для реализации метода необходим ускоритель электронов, энергия которого могла бы переключаться

Таблица 4
Параметры импульсного линейного ускорителя на энергию 10 МэВ

Диапазон изменения энергии	4–11 МэВ
Импульсный ток пучка	430 мА
Коэффициент захвата	> 55%
Длина ускоряющей структуры	1.24 м
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Минимальная скважность	250

Таблица 5

Параметры импульсного линейного ускорителя для ИДК

Энергия пучка	3.5/6 МэВ
Мощность дозы на расстоянии 1 м	0.2–2 Гр/мин
Рабочая частота	2856 МГц
Частота следования импульсов	50–400 Гц
Размеры ускорителя (Д × Ш × В)	1000 × 600 × 900 мм
Масса с радиационной защитой	900 кг

от импульса к импульсу между двумя или большим числом значений с частотой сотни герц.

Разработанный ускоритель является источником тормозного излучения, генерируемого ускоренными электронами при взаимодействии с расположенной в вакууме охлаждаемой мишенью из вольфрама. Ускоритель может работать как в режиме одной энергии — 3.5 или 6 МэВ, так и в режиме переключения энергии от импульса к импульсу между этими значениями. В качестве источника высокочастотной мощности в ускорителе используется компактный многолучевой клистрон с низким напряжением луча. Принцип переключения энергии основан на изменении уровня входной СВЧ-мощности клистрона с помощью быстрого рп-аттенюатора, в результате чего изменяются его выходная мощность и уровень ускоряющего поля. Ускоряющая структура оптимизирована таким образом, чтобы обеспечить коэффициент захвата более 60%, а размеры пучка на тормозной мишени менее 2 мм в диапазоне энергий 3.5–6 МэВ. Для обеспечения равенства мощности дозы при низкой и высокой энергии одновременно с переключением входной мощности клистрона переключается напряжение на управляющем электроде электронной пушки, при этом ток пушки при низкой энергии примерно в пять раз выше, чем при высокой энергии. Линейный ускоритель с электронной пушкой и тормозной мишенью помещен в локальную радиационную защиту из вольфрама и свинца, снижающую мощность дозы тормозного излучения вне рабочей зоны в $5 \cdot 10^4$ раз по сравнению с мощностью дозы на оси ускорителя.

4.3. Линейный ускоритель для радиационной дефектоскопии

Линейный ускоритель электронов для радиационной дефектоскопии УЭЛР-8-2Д, разработанный совместно с ЗАО «Владыкинский механический завод», показан на рис. 9 [42], основные параметры приведены в табл. 6. Ускоритель имеет локальную радиационную защиту, ослабляющую мощность дозы тормозного излучения вне рабочей зоны в 10^4 раз по сравнению с мощностью дозы на оси ускорителя. Ускоритель размещается на подвеске вместе с твердотельным высоковольтным модулятором производства компании «ScandiNova» (Швеция) [43].



Рис. 9. Линейный ускоритель для радиационной дефектоскопии УЭЛР-8-2Д

Таблица 6

Параметры ускорителя для радиационной дефектоскопии УЭЛР-8-2Д

Максимальная энергия пучка	8 МэВ
Диапазон регулирования энергии	3–8 МэВ
Максимальная мощность дозы на 1 м при 8 МэВ	10 Гр/мин
Диапазон регулирования мощности дозы при 8 МэВ	1–10 Гр/мин
Размер эффективного фокусного пятна	< 2 мм
Размеры ускорителя с модулятором (Д × Ш × В)	1090 × 640 × 1460 мм
Масса с радиационной защитой и модулятором	1122 кг

Заключение

За более чем 25-летний период исследований и разработок ускорителей в НИИЯФ МГУ пройден путь от создания ускорителей для фундаментальных исследований в области ядерной физики до разработок ускорителей прикладного назначения. Создание современных ускорителей является сложной задачей, требующей выполнения сложных конструкторских и технологических разработок, наличия уникальных технологий, используемых в электровакуумной промышленности, требующей проведения сертификации изделий. Очевидно, что решение всего комплекса проблем разработки

ускорителей возможно только в тесном сотрудничестве с предприятиями электронной промышленности.

Наряду с описанными в данном обзоре работами в НИИЯФ МГУ проводятся также исследования в области диагностики пучков заряженных частиц, в области лазерных методов ускорения электронов.

Помимо этого на установках, действующих в НИИЯФ МГУ, ведутся исследования в области ядерной физики, медицины, космического материаловедения и в других направлениях.

Список литературы

1. Горбатов Ю.И., Гришин В.К., Ишханов Б.С. и др. Разрезной микротрон непрерывного действия НИИЯФ МГУ (физическое обоснование). М., 1984.
2. Alimov A.S., Cherpurnov A.S., Chubarov O.V. et al. // Proc. PAC93. P. 2059.
3. Alimov A.S., Cherpurnov A.S., Chubarov O.V. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1993. **A326**. P. 391.
4. Алимов А.С., Грибов И.В., Ишханов Б.С. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1993. **34**. С. 33.
5. Alimov A.S., Georkyan V.G., Gorbatov Yu.I. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1989. **A278**. P. 379.
6. Геворкян В.Г., Грибов И.В., Зиновьев С.В. и др. // ПТЭ. 1987. № 6. С. 28.
7. Грибов И.В., Зиновьев С.В., Савицкий А.Б. и др. // ПТЭ. 1989. № 4. С. 37.
8. Алимов А.С., Грибов И.В., Корнеев В.А. и др. // ПТЭ. 1989. № 3. С. 28.
9. Braun H., Herminghaus H., Streun A. // Proc. EPAC88. P. 997.
10. Abbott R. // Proc. LINAC94. **2**. P. 777.
11. Shvedunov V.I., Iht M.O., Euteneuer H., Kaiser K.-H. // Proc. EPAC96. P. 1559.
12. Shvedunov V.I., Barday R.A., Frolov D.A. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2004. **A531**. P. 346.
13. Shvedunov V.I., Barday R.A., Gorbachev V.P. et al. // Proc. PAC01. P. 1601.
14. Legg R. // Proc. EPAC96. P. 130.
15. Crittenden J.A., Bazarov I.V., Belomestnykh S.A. et al. // Proc. PAC09. P. 106.
16. Алимов А.С., Гудков К.А., Ермаков Д.И. и др. // ПТЭ. 1994. № 5. С. 7.
17. Labrie J.-P., Euteneuer H. // Nucl. Instr. Meth. 1986. **A247**. P. 281.
18. Алимов А.С., Грибов И.В., Курбатов А.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. **13**, № 23. С. 1417.
19. Alimov A.S., Ishkhanov B.S., Piskarev I.M. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1993. **A328**. P. 385.
20. Алимов А.С., Ермаков Д.И., Ишханов Б.С., Шведун В.И. // ПТЭ. 1998. № 6. С. 43.
21. Alimov A.S., Cherpurnov A.S., Chubarov O.V. et al. // Proc. EPAC94. P. 766.
22. Alimov A.S., Chubarov O.V., Shvedunov V.I. // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1997. **44**, N 3. P. 1033.
23. Alimov A.S., Cherpurnov A.S., Chubarov O.V. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1993. **A326**. P. 391.
24. Alimov A.S., Ishkhanov B.S., Sakharov V.P. et al. // US Patent Application No: 2010/0207, 553.
25. Alimov A.S., Ishkhanov B.S., Sakharov V.P. et al. // US Patent Application No: 2010/0289, 436.
26. Алимов А.С., Ермаков Д.И., Ишханов Б.С. и др. // ПТЭ. 2002. № 5. С. 121.
27. Алимов А.С., Ермаков Д.И., Ишханов Б.С. и др. // ПТЭ. 2002. № 5. С. 114.
28. Shvedunov V.I., Ermakov A.N., Gribov I.V. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2005. **A550**. P. 39.
29. Kostin D.V., Sobenin N.P., Shvedunov V.I., Trower W.P. // Proc. PAC99. P. 910.
30. Novikov G.A., Chubarov O.V., Halbach K. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1998. **B139**. P. 527.
31. Novikov G.A., Ermakov A.N., Pakhomov N.I. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2004. **A524**. P. 60.
32. Trower W.P., Karev A.I., Melekhin V.N. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1995. **B99**. P. 736.
33. Karev A.I., Lebedev A.N., Raevsky V.G. et al. // Proc. RuPAC10. P. 316.
34. Ермаков А.Н., Ермаков Д.И., Ишханов Б.С. и др. // ПТЭ. 2002. № 4. С. 51.
35. Skachkov V.S., Ermakov A.N., Shvedunov V.I. // Proc. EPAC00. P. 2125.
36. Skachkov V.S., Ermakov A.N., Shvedunov V.I. // Nucl. Instr. Meth. 2004. **A524**. P. 39.
37. Skachkov V.S., Novikov G.A. // Nucl. Instr. Meth. 2004. **A526**. P. 199.
38. Skachkov V.S. // Proc. EPAC00. P. 2122.
39. Ogorodnikov S., Petrunin V. // Phys. Rev. Special Topics. Accelerators and Beams. 2002. **5**. P. 104701.
40. Alimov A.S., Alimov E.A., Kamanin A.N. et al. // Proc. RuPAC08. P. 267.
41. Maslennikov O.Yu., Shvedunov V.I. // WIPO Patent Application WO/2012/005629.
42. Ускоритель электронов для радиационной дефектоскопии УЭЛР-8-2Д. Технические условия ТУ 4267-001-07619122-2011.
43. www.sc-nova.com

Research and development of electron accelerators at SINP MSU

B. S. Ishkhanov^{1,a}, **V. I. Shvedunov**^{2,b}

¹Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

²D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^absi@depni.sinp.msu.ru, ^bshved@depni.sinp.msu.ru.

History and present status of electron accelerators research and development at SINP MSU are reported.

Keywords: electron accelerator, accelerating structure, linear accelerator, race-track microtron.

PACS: 29.20.-c.

Received 26 March 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2012).

Сведения об авторах

1. Ишханов Борис Саркисович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-50-95, e-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru.

2. Шведун Василий Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: shved@depni.sinp.msu.ru.