

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

x - 236

9 - 3750

Р.В. Харьюзов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ СИСТЕМЫ
СИЛЬНОТОЧНОГО МИКРОТРОНА НА 30 МЭВ

260 - приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Дубна 1968

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
И.М.Матора

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Ю.Я.Стависский
кандидат физико-математических наук
В.П.Саранцев

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физический институт им. П.Н.Лебедева Академии Наук СССР.

Автореферат разослан 1968 года

Защита диссертации состоится 1968 года

на заседании Объединенного Учёного совета Лаборатории ядерных реакций и Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ

Адрес: г. Дубна, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета

Ю.Т.Чубурков

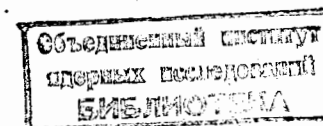
Р.В. Харьюзов

x-236

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ СИСТЕМЫ
СИЛЬНОТОЧНОГО МИКРОТРОНА НА 30 МЭВ

260 - приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук



В качестве мощного источника нейтронов в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований используется импульсный реактор на быстрых нейтронах (ИБР). Устройство обеспечивает работу в режиме периодических импульсов с частотой повторения от 3,3 до 83 импульсов в секунду при средней тепловой мощности до 6 кВт и полуширине нейтронных вспышек 60 мксек^{/1/}. Ряд первоклассных ядерных исследований, выполненный на ИБРе, показал его высокую эффективность как импульсного источника нейтронов, однако, для многих работ при измерениях по методу времени пролета желательное существенное сокращение длительности вспышки. В^{/2/} показана возможность сокращения последней в случае использования ИБРа в подкритическом режиме для размножения быстрых нейтронов, инжектируемых в реактор внешним источником (бустерный режим). Источником нейтронов может служить, например, урановая мишень, расположенная внутри неподвижной части активной зоны реактора, при бомбардировке ее короткими (1-2 мксек) импульсами ускоренных до энергии 25-30 Мэв электронов.

Практическое осуществление бустерного режима работы ИБРа с использованием микротрона в качестве инжектора^{/1/} позволило сократить полуширину нейтронной вспышки до 3 мксек при средней мощности реактора 1 кВт и тем самым существенно повысить эффективность нейтронного спектрометра, определяемую как отношение средней мощности реактора к квадрату полуширины нейтронной вспышки.

Проект сильноточного микротрона ЛНФ ОИЯИ на 30 Мэв был разработан в 1962 году сотрудниками Лаборатории нейтронной физики и Физической лаборатории Института физических проблем им. С.И.Вавилова АН СССР. Основные физические параметры ускорителя тождественны параметрам большого микротрона ИФП^{/3/}.

В ходе сооружения и наладки микротрона оказалось необходимым учесть ряд особых требований, которые были вызваны его использованием в качестве инжектора к ИБРу. В частности, высокая надежность механических и электрических систем ИБРа явилась источником повышенных требований к надежности систем ускорителя при его непрерывной многосуточной работе. В связи с этим в конструкцию ускорителя был внесен ряд существенных изменений. Так, проведенные в период с 1963 по 1967 год исследования условий работы СВЧ системы микротрона позволили создать оригинальный ее вариант, совместивший в себе необходимую надежность с высокой эффективностью и простотой обслуживания.

Результаты указанных исследований опубликованы в^{/4-10/} и составляют основное содержание настоящей диссертации.

1

Во введении дано краткое описание режимов работы ИБРа и приведены основные требования к параметрам инжектора при работе реактора в режиме размножения нейтронов. Обоснована целесообразность использования микротрона в качестве инжектора к ИБРу. Кратко изложен принцип микротронного режима ускорения, предложенный В.И.Векслером^{/11/}, приведены результаты исследований А.А.Коломенским автофазировки в микротроне^{/12/}, описан разработанный С.П.Капицей и В.Н.Мелехиным^{/13,14/} новый эффективный метод инжекции электронов в ускоряющий резонатор микротрона и предложенные ими так называемые "первый" и "второй" режимы ускорения. В заключительной части вводной главы в сжатой форме приведены основные направления, в которых велись исследования на микротроне ЛНФ, и факторы, определявшие необходимость этих исследований.

В первой главе диссертации дано описание микротрона ЛНФ ОИЯИ. Установка работает во втором режиме ускорения, при котором прирост энергии электронов за оборот равен 1 Мэв. Это обстоятельство обеспечивает весьма малые размеры и вес магнита, необходимые для достижения электронами заданной энергии. При длине волны ускоряющего электрического поля в резонаторе ≈ 10 см диаметр рабочей области поля составляет ≈ 90 см, а вес магнита - 5 т.

Номинальное значение напряженности магнитного поля 2200 э стабилизировано во времени с точностью 0,03%. Измерения показали, что напряженность поля плавно уменьшается от центра магнита к конечному радиусу рабочей области на 0,1%, а амплитуда 1-й гармоники азимутальной неоднородности поля в окрестности конечного радиуса не превосходит 0,03%. Резкое понижение напряженности магнитного поля в окрестности магнитного канала скомпенсировано парой "полубесконечных" шимм.

При ускорении электронов выяснилось, что медианная магнитная поверхность в магните не совпадает с геометрической плоскостью симметрии камеры ускорителя. Поэтому пришлось около 2-5% ампер-витков магнита соединить по схеме, обеспечивающей возникновение лишь радиальной составляющей магнитного поля. Кроме этого весьма эффективным оказалось введение единичных токовых витков, создающих составляющую магнитного поля, параллельную общему диаметру орбит. Последние позволяют последовательно по орбитам компенсировать как эффекты смещения медианной поверхности, так и возможные ошибки в установке резонатора и магнитного канала. Отметим, что номинальное значение энергии электронов на выходе 30 Мэв легко было получено сразу после создания системы таких витков.

Магнитный канал, осуществляющий вывод частиц из ускорителя практически без потерь, представляет собой стальную коническую трубку длиной 600 мм. Наружный диаметр трубки

на входном конце равен 12 мм, на выходном — 30 мм, диаметры отверстий составляют соответственно 8 и 20 мм.

Поперечные размеры пучка на последней орбите (у входа в магнитный канал) составляют 4x5 мм. Радиальная расходимость выведенного пучка составляет 15 мм/м, аксиальная — 2 мм/м. Поскольку расстояние от микротрона до реактора велико (10 м), внутренний диаметр электропровода выбран равным 90 мм, и на полпути между микротроном и реактором установлены две квадрупольные линзы с апертурой 100 мм. Каждая линза питается стабилизированным ($\pm 0,1\%$) током 60 ма. Нацеливание пучка на мишень производится путем дистанционного перемещения линз относительно оси электропровода.

Передача энергии электромагнитных колебаний от СВЧ генератора мощностью 20 Мвт к резонатору осуществляется с помощью специально разработанного волноводного тракта, описанию которого посвящена третья глава диссертации.

Для ускорения электронов используются цилиндрические полые резонаторы, впервые примененные в микротроне С.П.Капицей^{15/}, с диаметром полости 82 мм и высотой 25 мм. Резонатор связан с волноводом окном связи, методика выбора размеров которого разработана в ЛНФ и приведена во второй главе диссертации. Амплитуда напряжения между крышками резонатора равна 1,2 Мэв. То обстоятельство, что необходимо было обеспечить надежную работу резонатора в столь напряженном режиме, поставило перед нами ряд трудных физических и технических проблем, решению которых посвящена часть четвертой главы настоящей работы.

В качестве катода используется стержень цилиндрической формы диаметром 3+ 4,5 мм и длиной 6,5 мм, изготовленный из гексаборида лантана. Цилиндр вставлен без пайки и заштифован в танталовой державке, которая с помощью двух танталовых проволочек диаметром 0,6 мм и длиной 15 мм крепится к катодной крышке резонатора. Подогрев катода — косвенный, с помощью электронного пучка. Мощность подогрева не

более 60 вт. Имеются устройства для защиты катода от случайного перегрева и для стабилизации амплитуды импульса катодного тока. Срок службы катода ≈ 500 часов.

Ускоритель работает при непрерывной откачке тремя электро-разрядными насосами, обеспечивающими давление в камере порядка 10^{-6} тор. Форвакуумная откачка ведется цеолитовыми насосами. В камере ускорителя имеется азотная ловушка, расположенная вблизи резонатора.

Распределение тока пучка по орбитам на микротроне ЛНФ измерялось коллектором, состоящим из двух ламелей, разделенных по медианной плоскости камеры 0,5 мм вакуумным промежутком. Обе ламели для устранения наводок были окружены единым заземленным медным кожухом толщиной 0,5 мм. Измерения показали, что максимальная величина тока на 30-й орбите (при оптимальных токах в элементах, корректирующих магнитное поле) составляет 30% от величины тока на 5-й орбите и 1,5-3% от величины тока катода. Вне ускорителя ток измерялся цилиндром Фарадея, расположенным на расстоянии 1 м от входа пучка в магнитный канал (толщина дна медного стакана 20 мм, крышка из медной фольги толщиной 0,5 мм). Урановая мишень диаметром 15 мм изолирована от корпуса реактора, что позволило непосредственно наблюдать импульс тока сфокусированного и нацеленного на нее пучка электронов.

3

Центральной физической проблемой работы ускорителя оказалось такое согласование его резонатора с волноводным трактом, чтобы подавляющая часть СВЧ мощности, ответвляемой в сторону резонатора, расходовалась на ускорение электронного пучка. Решению этой задачи посвящена вторая глава диссертации.

В первом параграфе приведены определения основных характеристик резонаторов: собственной длины волны λ_0 , собственной, нагруженной и внешней добротностей (Q_0 , Q_H и $Q_{вн}$), эквивалентной активной проводимости G и КПД резонатора $\eta_{рез}$.

Во втором параграфе в систематизированном виде приведены результаты исследований группы С.П.Капицы^{/14/}, К.А.Беловишцева^{/16/} и других авторов, с помощью которых могут быть вычислены мощность потерь в стенках резонатора P_p , мощность инжекции $P_{инж.}$, потери связи и т.д. На основании этих данных составлена эквивалентная схема резонатора микротрона. Приведено выражение для комплексной эквивалентной проводимости резонатора, нагруженного пучком ускоряемых электронов, полученное С.П.Капицей. Это выражение дает представление о характере изменения основных эквивалентных параметров резонатора от величины КПД.

Однако коэффициент полезного действия сверхвысокочастотной системы микротрона определяется не только КПД резонатора, но и эффективностью передачи СВЧ энергии из волновода в резонатор, т.е. согласованием. Роль согласующего элемента или трансформатора импедансов играет окно связи, параметры которого во время работы регулировать невозможно. Осуществление режимов ускорения, характеризуемых различными значениями $\eta_{рез.}$, приводит к различным значениям эквивалентной активной проводимости резонатора (реактивная составляющая проводимости пучка может быть скомпенсирована за счёт соответствующей расстройки резонатора). В то же время характеристическая проводимость волноводной линии остается неизменной. Следовательно, необходимое для согласования условие равенства эквивалентных проводимостей линии и резонатора может быть получено для каждого значения $\eta_{рез.}$ лишь путем заблаговременного подбора коэффициента трансформации K трансформатора импедансов.

К моменту начала наладочных работ на микротроне ЛНФ решения задачи о выборе оптимальных размеров окна связи по наперед заданной величине КПД резонатора не имелось. Необходимость же в простой и надежной методике, позволяющей выбрать оптимальные размеры окна связи, определялась не только стремлением получить высокий КПД СВЧ системы

микротрона, но и повышенными требованиями к ее надежности, т.к. работа волноводных элементов в условиях оптимального согласования всегда наиболее надежна.

В результате теоретического исследования эквивалентной схемы резонатора, связанного с линией передачи эквивалентным трансформатором, получены нагрузочные характеристики резонатора. Этим термином мы назвали аналитические выражения, связывающие коэффициент стоячей волны Γ в волноводе, через который возбуждается резонатор, с относительной нагрузкой резонатора x для различных значений величины исходной связи резонатора с волноводом, определяемых коэффициентом стоячей волны в волноводе (Γ_0), нагруженном на ускоряющий резонатор без пучка. Под относительной нагрузкой резонатора x здесь подразумевается отношение мощности омических потерь в стенках резонатора к мощности СВЧ колебаний, поглощенной пучком ускоряемых электронов. Из анализа этих выражений следует, что для любой желаемой относительной нагрузки x (или КПД $-\eta_{рез.}$) может быть всегда найдена такая величина Γ_0 , которая обеспечит при работе ускорителя в заданном режиме наилучшее согласование ($\Gamma = 1$) резонатора с волноводом.

Экспериментальная проверка при "холодных" измерениях, когда роль нагрузки резонатора играл термисторный измеритель мощности, и на действующем ускорителе подтвердили справедливость этого утверждения.

Полученные результаты позволили создать простую методику выбора размеров окна связи резонатора с волноводом по наперед заданной величине относительной нагрузки x или КПД $-\eta_{рез.}$, которая обеспечивает в каждом случае как наилучшее использование мощности СВЧ колебаний, поступающей от генератора к резонатору, так и наименее напряженный режим работы волноводного тракта, поскольку при этом отражения от резонатора отсутствуют ($\Gamma = 1$). Кроме того, анализ нагрузочных характеристик позволил определить условия наиболее

устойчивой работы системы волновод-резонатор при случайных изменениях электронной нагрузки. Устойчивый режим имеет место на спадающем участке нагрузочных характеристик при связи резонатора с волноводом больше критической.

4

В третьей главе показано, что использование явления затягивания частоты СВЧ генератора, применяемое иногда в линейных ускорителях и некоторых микротронах, в случае мощного микротрона нецелесообразно. Кроме того, для введения ускорителя в действие требуется плавное изменение мощности СВЧ колебаний в резонаторе. В связи с этим была разработана и исследована новая схема волноводного тракта мощного микротрона, полностью изолирующая СВЧ генератор от колебаний, отраженных резонатором в случае нарушения нормального режима его работы. Роль вентиля здесь играет фазовый циркулятор^{/17/}. Введение в схему второго циркулятора, снабженного электромагнитом, величина и направление тока в котором могут изменяться, дало возможность плавно регулировать мощность в резонаторе в широких пределах без изменения режима работы СВЧ генератора.

Волноводный тракт включает в себя оригинальную систему контроля за работой ускорителя, основанную на анализе огибающей СВЧ импульсов, отраженных от резонатора. Система позволяет не только наилучшим образом вводить ускоритель в действие и контролировать режим его работы, но и находить всевозможные неисправности, возникающие в ускорителе. В тексте диссертации приведены типовые формы осциллограмм, соответствующие различным нормальным и аномальным режимам работы ускорителя. В частности, характерное увеличение длительности отраженного импульса при нарушениях электрической прочности резонатора использовано нами при создании устройства

для защиты резонатора, которое автоматически снижает вдвое мощность в нем на 2-3 секунды, разрывая цепь питания электромагнита циркулятора - делителя мощности, если имеет место нарушение электрической прочности в нескольких импульсах подряд. Восстановление исходного режима происходит также автоматически. Устройство освобождает оператора от непрерывного визуального наблюдения за режимом работы ускорителя и лишь в случае крайней необходимости с помощью звукового сигнала требует его вмешательства.

Дан краткий теоретический анализ работы фазового циркулятора в качестве делителя мощности с плавным изменением коэффициента деления. Приведены экспериментальные характеристики делителя, снятые при импульсной мощности СВЧ генератора 10 Мвт. Минимальные прямые потери (вся мощность генератора направлена в резонатор) составляют около 10%. Коэффициент деления k_m , определяемый отношением максимальной и минимальной мощности в резонаторе, равен 150.

Показано, что волноводы сечением 72x34 мм, при наполнении их шестифтористой серой при давлении 2,5 ати, обладают высокой надежностью при работе с мощностью до 20 Мвт в импульсе.

5

Четвертая глава посвящена практическим итогам длительной эксплуатации микротрона. Описаны режим тренировки резонатора и режим нормальной работы системы ИБР - микротрон, приведены фотографии осциллограмм огибающей импульса отраженных от резонатора колебаний для различных моментов введения ускорителя в действие, импульсов тока катода и тока ускоренных электронов на выходе ускорителя и на мишени ИБР. Перечислены основные причины нарушения нормальной работы микротрона. Исследованы основные причины

выхода из строя резонаторов. Показано, что главная причина заключается в потере резонатором электрической прочности в результате постепенного загрязнения внутренних поверхностей полости. Скорость загрязнения зависит от состава и плотности остаточного газа в камере ускорителя и режима работы катода. Так, улучшение вакуума в камере микротрона от $7 \cdot 10^{-6}$ тор до $3 \cdot 10^{-6}$ тор привело к двукратному увеличению срока службы резонатора (от 30 до 60 часов). Уменьшение плотности эмиссии с катода при увеличении диаметра последнего от 3 до 3,54 мм позволило увеличить средний срок службы резонатора от 60 до 100 ± 150 часов. Автоматические устройства для предохранения катода от случайных перегревов и распыления и для защиты резонатора, которые были разработаны в ЛНФ, способствовали продлению срока службы резонатора и существенно упростили эксплуатацию ускорителя. Кроме того оказалось, что температура резонатора радикально влияет на электрическую прочность, причём повышение температуры охлаждающей резонатор воды на $1 \pm 2^\circ\text{C}$ (например, с 15°C , при которой работа ускорителя надежная, до $16-17^\circ\text{C}$) часто приводило к потере электрической прочности. Экспериментально показано, что требования к стабильности параметров СВЧ генератора в основном соответствуют расчётным.

В заключительной части четвертой главы обсуждаются возможные направления дальнейших исследований.

6

Основные результаты диссертации можно сформулировать следующим образом:

1. Исследован вопрос о влиянии изменяющейся электронной нагрузки на согласование ускоряющего резонатора высоко-точного микротрона с волноводным трактом. Получены аналитические выражения для нагрузочных характеристик системы резонатор - волноводный тракт. Отмечено, что при определенных условиях система обладает стабилизирующим свойством по отношению к случайным изменениям электронной нагрузки.

2. Показано совпадение теории с экспериментальными результатами, полученными с помощью специально разработанных методик при "холодных" измерениях и на действующем ускорителе.

3. На основании полученных результатов разработана простая методика выбора оптимальных размеров окна связи по наперед заданной желаемой величине КПД резонатора. Правильность методики подтверждена результатами измерений на ускорителе. Важное следствие, вытекающее из решения перечисленных задач, состоит в том, что были обеспечены такие режимы ускорения, при которых мощность, отдаваемая резонатором электронному пучку, в 5-7 раз превышает мощность потерь в стенках резонатора. Это соответствует КПД резонатора $\sim 80 \pm 85\%$ при согласовании резонатора с волноводным трактом, близким к идеальному.

4. Показана возможность использования фазового циркулятора с ферритовыми элементами в плоскости H в качестве делителя СВЧ мощности до 20 Мвт с плавным изменением коэффициента деления для десятисантиметрового диапазона волн. Исследованы основные характеристики циркулятора в этом режиме работы (коэффициент перекрытия по мощности $k_m = \frac{P_{\text{макс}}}{P_{\text{мин}}} = 150$, минимальные прямые потери $\approx 10\%$).

5. Разработан, изготовлен и испытан в условиях длительной эксплуатации новый волноводный тракт по схеме с двумя фазовыми циркуляторами, обеспечивающий полную развязку генератора от резонатора и позволяющий плавно изменять мощность в резонаторе в 150 раз при неизменном оптимальном режиме работы генератора с мощностью в импульсе до 20 Мвт.

6. Разработана эффективная методика контроля и поддержания оптимального режима работы микротрона, основанная на результатах анализа формы огибающей СВЧ импульса отраженных от резонатора колебаний.

7. Исследованы причины выхода из строя ускоряющих резонаторов и найдены средства продления их срока службы от

20+30 часов в первый период работы ускорителя до 100+150 часов в настоящее время.

8. Созданы и используются устройства:

для автоматического предохранения катода от перегрева и распыления;

для автоматического снижения мощности в резонаторе на 2-3 секунды (до восстановления рабочего вакуума) при нарушениях его электрической прочности;

для автоматической стабилизации температуры резонатора при кратковременных остановках;

для автоматической стабилизации тока катода.

В настоящее время сильноточный микротрон ЛНФ ОИЯИ на 30 МэВ является единственным ускорителем этого класса, используемым при проведении длительных физических экспериментов. Он отработал с ИБРом более 2500 часов при следующих параметрах:

Энергия электронов	- 24 + 30 МэВ
Ток электронов в импульсе	- 60 + 80 ма
Длительность импульсов тока	- 1,7 + 1,9 мксек
Частота повторения	- 50 1/сек
Длительность непрерывного цикла работы	- 100+150 часов
Средняя мощность системы ИБР-микротрон при полуширине вспышки нейтронов 3 мксек	- 1 квт

Л и т е р а т у р а

1. Л.Б.Пикельнер, И.М.Франк, Ф.Л.Шапиро, Э.И.Шарапов. Препринт ОИЯИ Р-2830, Дубна 1966.
2. Б.Н.Буниц, И.М.Матора, С.К.Николаев, Л.Б. Пикельнер, И.М.Франк, Е.П.Шабалин, Ф.Л.Шапиро, Ю.С. Язвидкий. Доклад на Третьей Международной конференции ООН по использованию атомной энергии в мирных целях, 28/P/324, май 1964.

3. Л.М.Зыкин, С.П.Капица, В.Н.Мелехин, А.Г.Неделяев. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963, 1049.
4. В.Д.Ананьев, П.С.Анцупов, С.П.Капица, И.М.Матора, В.Н.Мелехин, Л.А.Меркулов, Р.В.Харьюзов. Препринт ОИЯИ Р-2313, Дубна, 1965.
5. В.Д.Ананьев, П.С.Анцупов, И.М.Матора, Л.А.Меркулов, Р.В.Харьюзов. Препринт ОИЯИ 9-3283, Дубна, 1967.
6. И.М.Матора, Р.В.Харьюзов. ПТЭ № 3, 1967.
7. И.М.Матора, Р.В.Харьюзов, А.И.Гринберг. Препринт ОИЯИ 9-3376, Дубна, 1967.
8. И.М.Матора, Р.В.Харьюзов. Препринт ОИЯИ Р9-3567, Дубна, 1967.
9. В.Д.Ананьев, П.С.Анцупов, С.П.Капица, И.М.Матора, Л.А.Меркулов, Р.В.Харьюзов. "Атомная энергия", 20, 1966.
10. И.М.Матора, Р.В.Харьюзов, Препринт Б1-2737, Дубна 1966.
11. В.И.Векслер. ДАН СССР, 49, 346, 1944.
12. А.А. Коломенский. ЖТФ, XXX, 9, 1347, 1960.
13. С.П.Капица, В.П.Быков, В.Н.Мелехин. ЖЭТФ, 39, 997, 1960.
14. С.П.Капица, В.П.Быков, В.Н.Мелехин. ЖЭТФ 41, 368, 1961.
15. С.П.Капица. Вестник Академии Наук СССР, № 10, 65, 1961.
16. К.А.Беловинцев и др. Материалы Международной конференции по ускорителям. Дубна 1963, 1056.
17. Л.А.Микаэлян. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах, ГЭИ, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 марта 1968 года.