

длина порядка 10^2 см и энергия частиц порядка $10^2 - 10^3$ эв. Пучок движется вдоль магнитного поля напряженностью около $2 \cdot 10^3$ э. Плотность пучка на порядок — полтора меньше плотности плазмы и составляет примерно 10^{10} см $^{-3}$. Как показывают измерения, проведенные в работе [12], функция распределения частиц пучка имеет вид ступеньки в пространстве скоростей, что можно приписать результату развития ленгмюровских колебаний [13]. Варьируя равновесные параметры плазмы и пучка, можно перевести систему в «неустойчивое состояние», характеризующееся большим увеличением поперечных размеров (аномальная диффузия), наличием большого числа быстрых ионов (увеличение поперечной энергии ионов) и другими аномальными эффектами. Можно думать, что наблюдаемые в этих экспериментах аномальные эффекты являются следствием конвективного механизма раскачки колебаний пучком. Это подтверждается сравнением качественных следствий, вытекающих из теории, с экспериментом и оценкой порядка величины предполагаемых эффектов. К сожалению, на современном этапе развития теории, ограниченной в основном рамками линейного приближения, трудно провести количественное сравнение с экспериментом, тем более, что экспериментальные измерения не являются в достаточной степени полными.

По-видимому, конвективный механизм раскачки колебаний электронным пучком реализуется и в ряде других, проведенных к настоящему времени экспериментах. Это в первую очередь относится к эксперименту, описанному в работе [14], где вследствие прохождения пучка через плазму наблюдается аномальная диффузия плазмы и появляются быстрые ионы, ускоренные поперек магнитного поля.

Конвективный механизм раскачки может реализоваться и в том случае, когда роль пучка

играют убегающие электроны. Наличие аномальных эффектов, связанных с убегающими электронами, было отмечено в работе [15]. Драйсер [16] объясняет эти эффекты возникновением максимума на функции распределения за счет парных столкновений. Однако, как было показано выше, для неустойчивости вовсе не обязательно иметь функцию распределения с $\partial f_0 / \partial \ln v_z > 0$. Для этого достаточно уже пространственной неоднородности ($\partial f_0 / \partial r \neq 0$), которая всегда имеется в реальных условиях.

Поступила в Редакцию 3/VIII 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Б. Михайловский. В сб. «Вопросы теории плазмы». Вып. 3. М., Госатомиздат, 1963, стр. 141.
2. Я. Б. Файнберг. «Атомная энергия», 11, 313 (1961).
3. И. Ф. Харченко и др. Приложение за 1962 г. к журналу «Ядерный синтез». Т. 3. Вена, МАГАТЭ, 1963, стр. 1101.
4. А. Б. Михайловский, Э. А. Пашицкий. ЖЭТФ, 48, 1787 (1965).
5. А. Б. Михайловский. ЖЭТФ, 48, 380 (1965).
6. А. Б. Михайловский. ЖТФ, 35, 1933; 1945 (1965).
7. Е. Е. Ловецкий, А. А. Рухадзе. «Ядерный синтез», 5, № 4 (1965).
8. В. В. Владимиров. «Докл. АН СССР», 162, 785 (1965).
9. М. В. Незлин. ЖЭТФ, 41, 1015 (1961).
10. М. В. Незлин, А. М. Солнцев. ЖЭТФ, 45, 840 (1963).
11. М. В. Незлин. ЖЭТФ, 46, 36 (1964).
12. М. В. Незлин, А. М. Солнцев. ЖЭТФ, 48, 1237 (1965).
13. А. А. Веденов. В сб. «Вопросы теории плазмы». Вып. 3, М., Госатомиздат, 1963, стр. 203.
14. I. Alexeff, R. Neidigh. Phys. Rev. Letters, 13, 179 (1964).
15. T. Coor et al. Phys. Fluids, 1, 411 (1958).
16. H. Dreiser, R. Mjolsness. Phys. Fluids, 5, 1531 (1962).

Микротрон-инжектор на 30 Мэв для импульсного реактора на быстрых нейтронах

В. Д. АНАНЬЕВ, П. С. АНЦУПОВ, С. П. КАПИЦА*, И. М. МАТОРА,
В. Н. МЕЛЕХИН*, Л. А. МЕРКУЛОВ, Р. В. ХАРЬЮЗОВ

УДК 621.384.611.3

В статье кратко описаны основные особенности и параметры действующего в Лаборатории нейтронной

* Сотрудник Института физических проблем АН СССР им. С. И. Вавилова.

физики ОИЯИ микротрона-инжектора на 30 Мэв. Ток выведенных и сфокусированных на удаленную мишень электронов достигает 60 ма в импульсе. Оригинальная оптическая схема вывода, фокусировки и нацеливания пучка на мишень наряду с его хорошей монохроматич-

ностью (разброс по энергиям 0,3%) и малой угловой расходимостью обеспечивают 100%-ную эффективность использования электронов, имеющих на последней (30-й) орбите.

Применяя линейный электронный ускоритель или микротрон в качестве инжектора для импульсного реактора на быстрых нейтронах (ИБР) [1], можно существенно уменьшить длительность вспышки активности реактора и тем самым улучшить разрешающую способность в опытах с быстрыми нейтронами. При таком способе реактор не выходит в надкритический режим и используется по существу как размножитель нейтронов. Урановая мишень, установленная в центре активной зоны реактора ИБР, облучается ускоренными электронами в момент минимальной подкритичности реактора. Коэффициент умножения нейтронов составляет 100—200.

Проект микротрона, используемого в данной установке, был разработан в 1962 г. совместно сотрудниками Лаборатории нейтронной физики

Объединенного института ядерных исследований и физической лаборатории Института физических проблем АН СССР. Основные физические параметры ускорителя тождественны параметрам известного микротрона ИФП [2]. Сооружение и наладка ускорителя выполнены сотрудниками Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

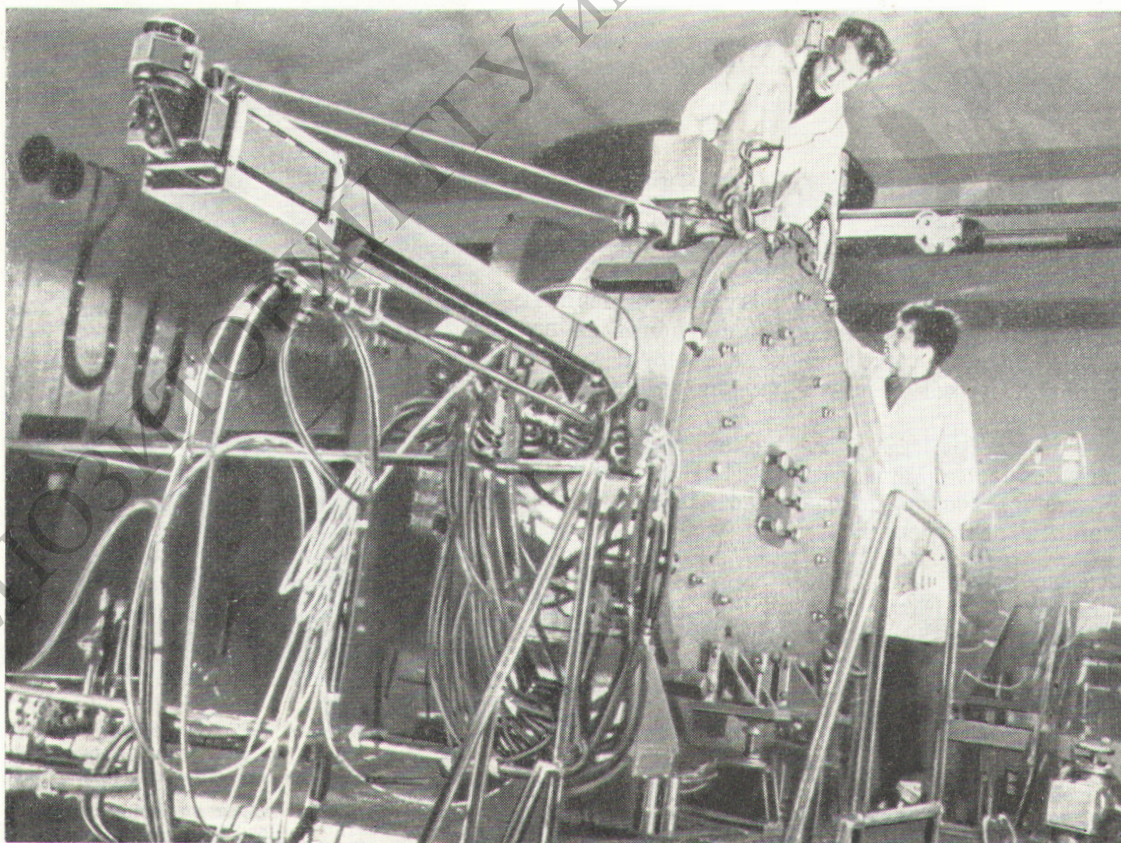
На рис. 1 показан общий вид ускорителя.

Так как микротрон было удобно поместить над реактором (рис. 2), в его конструкцию были внесены существенные изменения по сравнению с микротроном ИФП. В частности, применен магнит с вертикальной медианной плоскостью и введен электронно-оптический тракт длиной 10 м, соединяющий микротрон с реактором.

В ходе сооружения и наладки микротрона разработаны катод новой конструкции с большим сроком службы, прямоугольный резона-

Рис. 1. Вид микротрона со стороны консоли и фланца горизонтального пробника.

Под консолью — шток пробника.



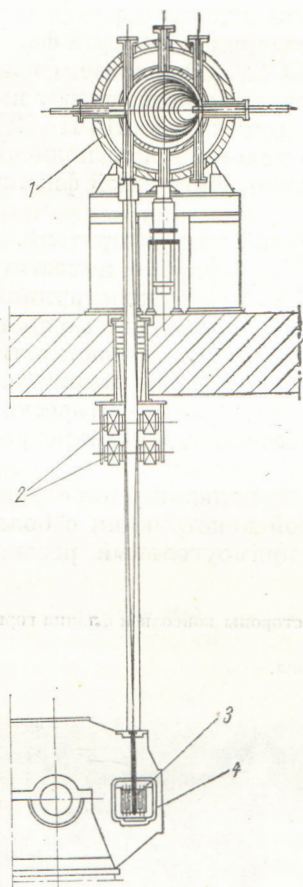


Рис. 2. Схема расположения узлов микротрона и реактора ИБР:

1 — электромагнит и камера; 2 — магнитные линзы; 3 — мишень; 4 — активная зона реактора.

тор с квадратным сечением полости, оригинальный СВЧ-тракт, благодаря которому плавно регулируется мощность, подводимая к резонатору, система токовых витков, обеспечивающая хорошее прохождение электронов по всем 30 орбитам, а также система вывода и фокусировки пучка в центр активной зоны реактора.

К октябрю 1965 г. ускоритель действовал совместно с реактором ИБР около 350 ч. Ниже приводятся характеристики пучка ускоренных электронов.

Энергия частиц	30 Мэв
Разброс по энергиям	0,3%
Ток на 30-й орбите (в импульсе)	40—60 ма
Поперечные размеры пучка вблизи урановой мишени	4×6 мм
Длительность импульса тока	1—3 мсек
Частота повторения импульсов	50 сек ⁻¹
Ток электронов перед урановой мишенью	40—60 ма
Эффективность системы вывода и фокусировки пучка составляет 100%.	

Характеристики магнитного поля

Ускоритель работает в так называемом втором режиме ускорения [3], при котором прирост энергии за оборот равен 1 Мэв. Длина волны ускоряющего напряжения лежит в десятисантиметровом диапазоне. Номинальное значение магнитного поля составляет 2200 га, т. е. вдвое больше, чем циклотронное поле, соответствующее частоте ускоряющего напряжения. Это обстоятельство, являющееся характерной особенностью второго режима ускорения, приводит к снижению габаритов и веса магнита. Диаметр рабочей области поля равен 90 см, а вес магнита 5 т.

Форма полюсов магнита и точность его обработки выбраны с таким расчетом, чтобы магнитное поле было достаточно близко к одно-

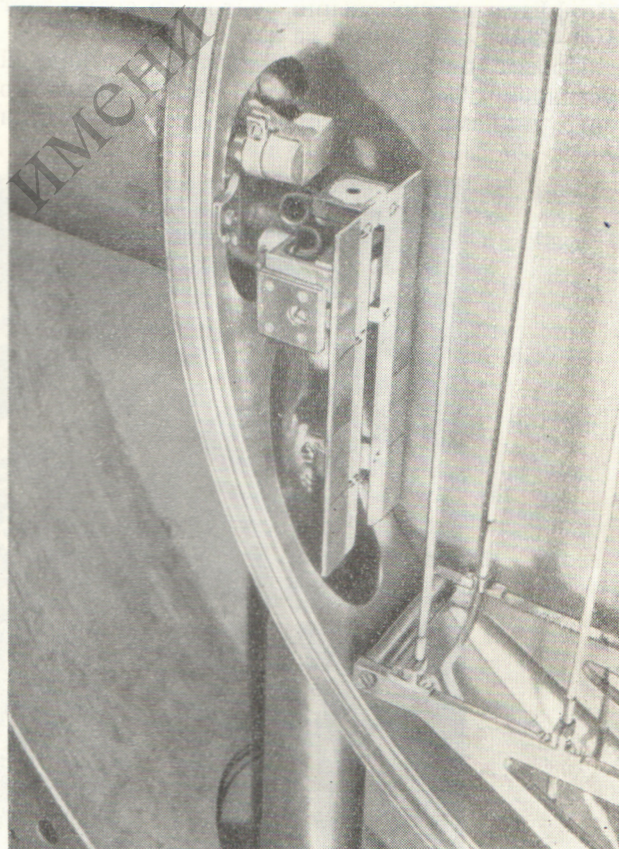


Рис. 3. Верхняя часть магнитного канала.

Входное круглое отверстие окружено белым люминофором. На «полубесконечных» шиммах заметны ступеньки, так как их толщина сверху вниз возрастает. Вверху слева от входного отверстия канала виден экранирующий кожух коллектора горизонтального пробника. Справа от канала видна часть ближайшего к каналу токового витка.

родному. Измерения показали, что напряженность поля плавно уменьшается от центра магнита к конечному радиусу рабочей области на 0,1%. В окрестности последней орбиты амплитуда первой гармоники азимутальной неоднородности поля не превосходит 0,03%.

Магнитный канал (рис. 3), осуществляющий вывод частиц из ускорителя, представляет собой стальную коническую трубку длиной 600 мм. Наружный диаметр трубки на входном конце равен 12 мм, на выходном — 30 мм, диаметр отверстий составляет соответственно 8 и 20 мм. Возмущение магнитного поля вблизи канала практически полностью скомпенсировано двумя «полубесконечными» шиммами, представляющими собой стальные пластины, ориентированные вдоль магнитного поля и расположенные параллельно образующей конической поверхности магнитного канала на расстоянии 14 мм от нее. Зазор между пластинами 50 мм, а толщина пластин изменяется вдоль магнитного канала, увеличиваясь от 0,4 мм у входного конца до 1,2 мм у середины канала.

Стенки вакуумной камеры изготовлены из нержавеющей стали. Поскольку магнитная проницаемость нержавеющей стали несколько превышает единицу, в области отверстий для фланцев возникают локальные увеличения поля до 0,5—0,6%. Эти возмущения ликвидируются тонкими стальными кольцами, вставляемыми внутрь отверстий для фланцев (рис. 4).

В процессе работ по запуску ускорителя выяснилось, что средняя магнитная поверхность имеет заметные искажения, вызванные, по-видимому, асимметрией конструкции магнита.

Для компенсации этих искажений около 2—5% ампервитков магнита было соединено

по схеме встречного включения, обеспечивающей возникновение вблизи плоскости орбит лишь радиальной составляющей магнитного

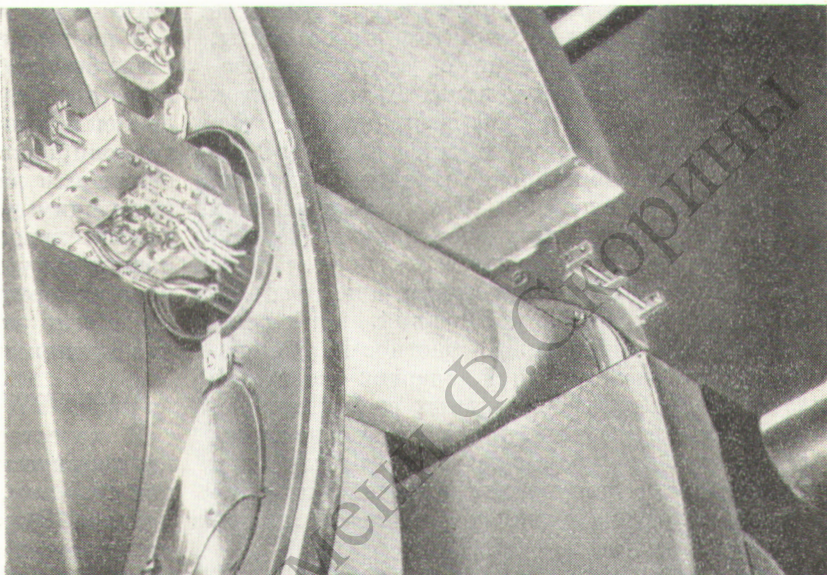


Рис. 4. Резонатор со стороны катодной крышки.

По двум правым водоохлаждаемым трубкам подводится ток накала вольфрамовой нити и ускоряющее напряжение. Трубка слева служит для заземления катода через сопротивление 75 ом. В отверстиях фланцев видны окаймляющие их тонкие стальные шиммы.

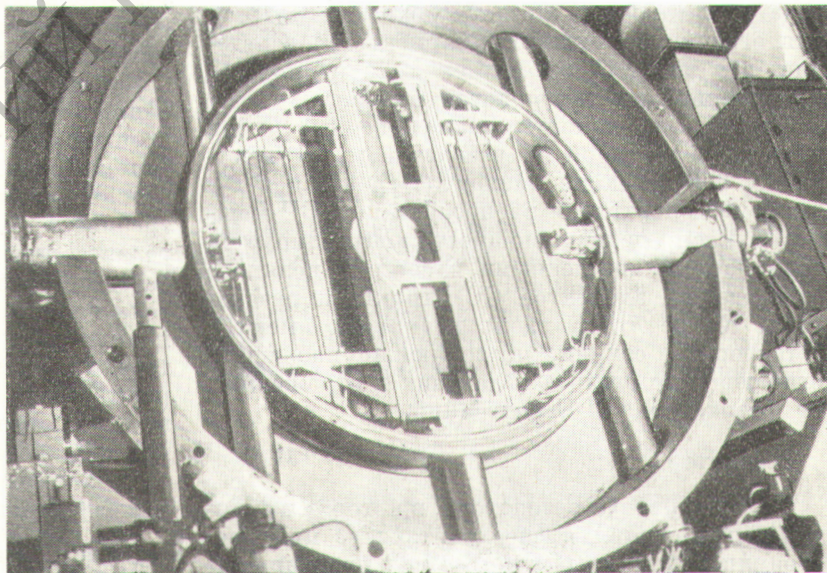


Рис. 5. Внутренний вид камеры ускорителя

Видны 7 витков для коррекции медианной магнитной поверхности и витки для коррекции возмущений магнитного поля других типов. Все витки крепятся к единому медному каркасу.

поля. Кроме того, весьма эффективным оказалось введение единичных токовых витков (рис. 5), плоскость которых перпендикулярна общему диаметру орбит. Эти витки позволяют последовательно по орбитам компенсировать как искажения средней магнитной поверхности, так и возможные ошибки в установке резонатора и магнитного канала. Каждый виток питается от собственного выпрямителя, ток которого регулируется в пределах ± 10 а. Отметим, что номинальное значение энергии электронов, равное 30 Мэв, на последней орбите легко было получено сразу после введения системы таких витков.

К стабилизации поля в микротроне предъявляются менее жесткие требования, чем к обеспечению однородности. В частности, ускорение частиц до конечной энергии возможно и без применения специальных стабилизирующих устройств. Однако при фокусировке пучка электронов на урановую мишень или при необходимости получения хорошей монохроматичности пучка магнитное поле стабилизируется с точностью $\pm 0,03\%$.

СВЧ-тракт

Ускоряющий резонатор микротрона (см. рис. 4) возбуждается магнетронным генератором, который связан с резонатором волноводным трактом длиной около 8 м. Часть волновода, примыкающая к резонатору, используется для откачки последнего. Кварцевое окно отделяет эту часть от остальной части волновода, наполненной шестифтористой серой.

Ферритовые элементы, расположенные в цепи между генератором и резонатором, осуществляют согласование элементов тракта и регулируемое оператором распределение СВЧ-мощности. Распределение мощности контролируется термопарами, введенными в систему водяного охлаждения элементов СВЧ-тракта и резонатора. Кроме того, вдоль волновода имеются детекторные секции, позволяющие наблюдать огибающую импульса падающих и отраженных от резонатора СВЧ-колебаний.

Резонатор

Условия работы резонатора, в котором амплитуда напряжения превосходит 1 Мв при расстоянии между крышками 20 мм, предъявляют высокие требования к качеству внутренней поверхности резонатора. Если не приняты специальные меры, то ускорение в данном режиме практически невозможно осуществить из-за со-

путствующих возбуждению резонатора явлений, наиболее неприятным из которых является резонансный СВЧ-разряд, возникающий вблизи пролетных отверстий вдоль силовых линий магнитного поля.

В настоящее время резонатор способен работать без добавочной обработки поверхности в течение 70—100 ч. Такой срок службы обусловлен применением бескислородной меди, электрополировкой поверхности резонатора и его отжигом в вакууме. Следует подчеркнуть, что решающим условием, необходимым для продолжительной работы резонатора, является хороший вакуум. Только после получения в камере ускорителя давления $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. мы смогли эксплуатировать ускоритель в течение длительного времени.

Термокатод

В качестве катода используется стержень цилиндрической формы диаметром 3 мм, длиной 6,5 мм, изготовленный из гексаборида лантана. Эмиссия электронов происходит с торца стержня непосредственно под действием ускоряющего поля резонатора. Катод укрепляется на тонком танталовом держателе, который без пайки обеспечивает надежный электрический контакт и фиксирует положение стержня. Теплоотвод через держатель во всем диапазоне рабочих температур является незначительным. Катод нагревается электронным пучком, параллельным силовым линиям магнитного поля.

Пучок испускается плоской вольфрамовой спиралью, расположенной в 22 мм от основного катода. Между основным и вспомогательным катодами приложено напряжение в 600 в от специального выпрямителя. Мощность, потребляемая системой электронного нагрева катода, составляет 20 вт. Изменением режима системы подогрева ток эмиссии основного катода плавно регулируется вплоть до 10 а при практически неограниченном сроке службы катода. При установке катода возможна плавная регулировка положения его рабочей поверхности по отношению к внутренней поверхности крышки резонатора. Это позволяет получать оптимальную фокусировку пучка инжектируемых электронов.

Средства наблюдения за пучком

В процессе наладки ускорителя ток пучка на любой орбите измерялся с помощью коллектора, укрепленного на горизонтальном штоке, который перемещал коллектор вдоль общего

диаметра орбит (см. рис. 2). Кроме измерения величины тока конструкция пробника позволяла при помощи типовой промышленной телевизионной установки наблюдать сечение пучка на коллекторе, который для этой цели был покрыт люминофором.

Первоначально использовался одноламельный неэкранированный коллектор. Однако в окончательном варианте пробника коллектор электронов заключен в сплошной заземленный кожух из медной фольги толщиной 0,5 мм, которая экранирует коллектор от высокочастотных наводок и в то же время пропускает на него ускоренные электроны. Кроме этого, коллектор разрезан вдоль медианной плоскости камеры ускорителя, и ток с обеих ламелей снимается по двум независимым цепям, что позволяет судить не только о величине тока на каждой орбите, но и о смещении пучка от средней плоскости.

Вне ускорителя ток электронов измеряется двумя цилиндрами Фарадея, расположенными на расстоянии 1 и 9,5 м от входа пучка в магнитный канал. Коллектор каждого из них представляет собой медный стакан с толщиной дна 20 мм и наклонной крышкой из медной фольги толщиной 0,5 мм, соединенной со стаканом. Крышка покрывается люминофором для наблюдения сечения пучка при помощи телевизионной установки.

Электроновод

Поперечные размеры пучка на последней орбите (у входа в магнитный канал) составляют 3×4 мм. Радиальная расходимость выведенного пучка составляет 10–15 мм/м, а в поперечном направлении — 1 мм/м. Поскольку расстояние от микротрона до реактора велико (10 м), внутренний диаметр электроновода (рис. 6) выбран равным 90 мм и на полпути между микротроном и реактором под потолком зала установлены две квадрупольные линзы с апертурой 100 мм.

Положение верхней линзы может дистанционно регулироваться в пределах $\pm 1,5$ мм в направлении, вдоль которого она фокусирует (перпендикулярном оси электроновода). Положение нижней линзы может дистанционно регулироваться в пределах ± 1 мм перпендикулярно оси электроновода в направлении, вдоль которого верхняя линза дефокусирует. Этих регулировочных элементов достаточно, чтобы с пульта реактора ИБР точно сфокусировать и нацелить пучок на урановую мишень, установленную в центре активной зоны реактора.

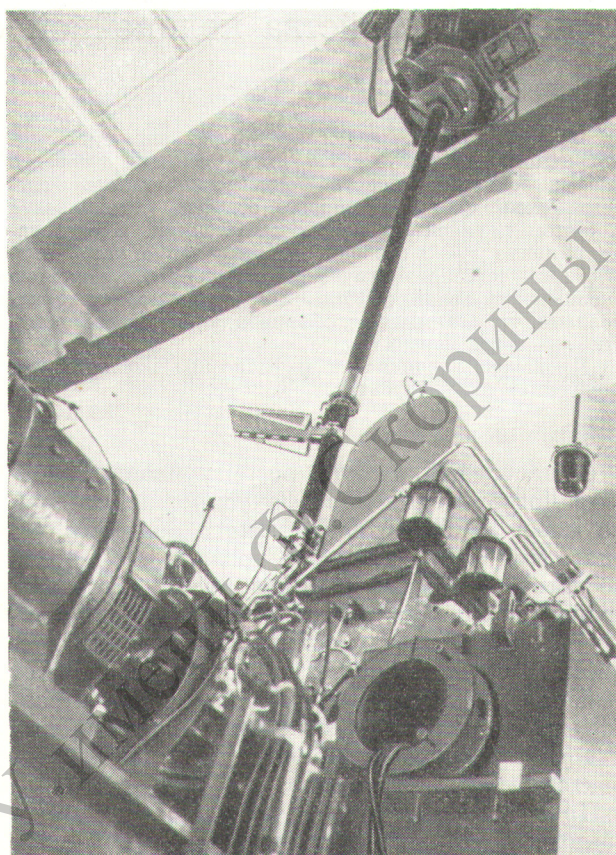


Рис. 6. Нижняя часть электроновода.

Под потолком зала реактора — каркас для магнитных линз. Прямоугольные выступы на нем — механизм для дистанционного регулирования положения линз. Вертикальная труба — электроновод.

Каждая линза питается стабилизированным ($\pm 0,1\%$) током 60 ма.

В заключение приносим искреннюю благодарность Д. И. Блохинцеву, П. Л. Капице, И. М. Франку, Ф. Л. Шапиро за постоянный интерес к работе и помощь, а также С. К. Николаеву, Б. И. Воронову и Б. Н. Бунину, заботы которых способствовали созданию ускорителя.

Поступила в Редакцию 9/VIII 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Н. Б у н и н и др. Доклад № 324, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
2. Л. М. З ы к и н и др. В кн. «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963)». М., Госатомиздат, 1964, стр. 1049.
3. С. П. К а п и ц а, В. П. Б ы к о в, В. Н. М е л е х и н. ЖЭТФ, 39, 997 (1960).