

3283

Экз. чит. зала

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9 - 3283



ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

В.Д. Ананьев, П.С. Анцупов, И.М. Матора,
Л.А. Меркулов, Р.В. Харьюзов

МИКРОТРОН
ЛАБОРАТОРИИ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ ОИЯИ

1967.

9 - 3283

**В.Д. Ананьев, П.С. Анцупов, И.М. Матора,
Л.А. Меркулов, Р.В. Харьюзов**

**МИКРОТРОН
ЛАБОРАТОРИИ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ ОИЯИ**

В в е д е н и е

Режим работы запущенного в начале 1965 г. микротрона-инжектора Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ^{/1/} имеет благоприятную особенность. Совместная его работа с реактором ИБР происходит не непрерывно, а перемежается многодневными периодами, когда импульсы нейтронов для экспериментаторов обеспечивает ИБР без микротрона. Это время было использовано для дальнейшего совершенствования ускорителя.

К настоящему времени система "ИБР-микротрон" проработала на эксперимент 1500 часов. Достигнуты импульсные токи сфокусированных на мишень электронов 60-80 ма при длительности импульсов 1,3-2,3 мксек и частоте их следования 50 гц, причем охлаждаемая воздухом урановая мишень нагревается током в 70 ма с длительностью импульсов 1,8 мксек до предельной температуры 500°С, совместимой с ее безопасной работой. В последнем режиме глобальный поток нейтронов после размножения в ИБРе при длительности импульсов 4 мксек составил $6 \cdot 10^{13}$ нейт./сек.

Указанные параметры при нормальной работе систем электропитания, водоохлаждения и вакуумной откачки, как правило, остаются постоянными без вмешательства оператора. Однако обычно через 1-2 часа работы, а в неблагоприятных условиях и чаще, возникает необходимость в корректировке режима ускорения.

§ 1. Магнитное поле и система вывода пучка

Конструкция магнита микротрона ЛНФ отличается от описанной, в^{/2/} лишь тем, что его средняя плоскость расположена вертикально, в магнитопроводе

имеется 8 отверстий вместо 6, система питания и водоохлаждения выполнена на основе круглых медных трубок и обечайка вакуумной камеры изготовлена не из латуни, а из нержавеющей стали.

Последнее обстоятельство привело к серьезным возмущениям в распределении магнитного поля на периферии рабочей области в окрестности отверстий патрубков камеры.

Другим источником возмущений явилась коническая стальная трубка магнитного канала. Кроме этого, вертикальная установка средней плоскости магнита привела к удалению значительных объемов стали из магнитопровода и, следовательно, к дополнительным искажениям конфигурации поля.

Все эти моменты заметно осложнили задачу формирования достаточно однородного и симметричного распределения магнитного поля ускорителя.

С помощью внесения в магнитный зазор подходящих стальных масс и независимо питаемых токовых витков мы получили приемлемое распределение магнитного поля в средней плоскости рабочей области. Однако следует подчеркнуть, что как прибор ИМИ-2, с помощью которого выполнялись магнитные измерения, так и другие известные приборы не пригодны для уверенного измерения положения так называемой средней магнитной плоскости в микротроне. Последнюю следовало бы называть не плоскостью, а поверхностью, ибо, как правило, в любом реальном магните даже с более неоднородным полем, чем в микротроне, геометрическое место точек, в которых радиальная составляющая напряженности магнитного поля равна нулю, заметно отличается от желаемой плоскости.

По свойствам траекторий ускоренных электронов мы убедились, что наша средняя магнитная поверхность лежит ближе к правой крышке магнита. Это послужило причиной введения помимо стальных шимм токовых витков, вызывающих регулируемую составляющую напряженности магнитного поля, параллельную средней плоскости магнита. Только употребление этих витков, а также регулировка положения средней магнитной поверхности на периферии с помощью встречного включения двух из восьми секций обмотки магнита позволили довести энергию ускоренных электронов до 30 Мэв.

1. Шиммирование естественного спада напряженности магнитного поля на периферии рабочей области

На краях крышек камеры мы установили кольцевые стальные шиммы, которые имеют ширину сечения 14 мм и толщину выступа над зеркалом крышек 4,5 мм. Измерения (рис. 1) показали, что в этом случае на конечном радиусе имеется в отличие от микротрона /2/ не возрастание, а небольшой спад магнитного поля. На рис. 1 и далее вдоль оси ординат отложено превышение магнитного поля в заданной точке над полем в центре камеры.

Измерения радиального распределения поля были проделаны как при атмосферном давлении внутри камеры, так и при вакууме в ней. Оказалось (рис.2), что давление атмосферы вызывает дополнительный спад магнитного поля на периферии в 0,03%. Толщина стальных крышек камеры составляет 85 мм, а внутренний диаметр распирающей их обечайки камеры - 1000 мм.

2. Шиммирование локальных неоднородностей у отверстий для фланцев

На рис. 3 изображено азимутальное распределение магнитного поля у одного из патрубков в окрестности $\phi = -80^\circ$ на различных радиусах до коррекции (пунктир) и после нее (сплошные кривые). Еще более серьезные возмущения примыкают к двум широким патрубкам - у резонатора и у входного конца магнитного канала.

Расчет шимм для компенсации этих возмущений мы производили исходя из следующего: эти возмущения полностью были бы скомпенсированы, если бы обечайка была сплошной, т.е. возмущения вызваны не неоднородностями магнитных свойств нержавеющей стали, а тем, что в однородной по магнитной проницаемости $\mu > 1$ массе обечайки сделаны вырезы. Подчеркнем тут же, что другая точка зрения на причину возмущений как на локальные возмущения магнитной проницаемости нержавеющей стали на сварных швах патрубков не согласуется с измеренной конфигурацией возмущений. Все возмущения у патрубков представляют собой местные повышения, а не понижения напряженности поля, как это было бы в том случае, если бы они возникали по причине увеличения магнитной проницаемости замкнутых швов патрубков.

Исходя из этого, была найдена подходящая конфигурация компенсирующих шимм в виде тонкостенных колец, вставляемых в горловину патрубков и рассчитана толщина их стенок. Исходными данными при расчете были полный поток возмущенной напряженности магнитного поля у каждого фланца по данным измерений (в том числе прибором ИМИ-3) и экспериментальная величина магнитной индукции в теле шиммы (сталь-3) при номинальном уровне рабочей напряженности магнитного поля в микротроне. Величина индукции в стали шиммы была найдена равной 9000 гаусс. Последняя цифра была использована и при расчете компенсирующих "полубесконечных" шимм для магнитного канала.

Результаты измерений распределения поля с шиммами в патрубках иллюстрируются на рис. 1 и 3.

В связи с невозможностью установить такую шимму в резонаторный фланец конфигурация его шиммы специальным образом подогнана так, чтобы аксиальный размер отверстия фланца не уменьшался. Шимма 2 (рис. 4) выступает из отверстия внутрь камеры на 10 мм, что дало возможность расширить ее аксиальный просвет, необходимый для ввода резонатора.

3. Магнитный канал

Возмущение от конического канала конечной длины, установленного у нас, изображено на рис. 5. Расчет корректирующих шимм можно выполнить, пользуясь известной методикой расчета регенеративных отклоняющих систем в фазотроне.

Методика вкратце сводится к следующему. Предполагается, что возмущение можно скомпенсировать парами плоских тонких стальных листовых шимм, изображенных на рис. 6, в которых дипольный момент единицы объема \bar{M} однороден и направлен вдоль \bar{H}_0 (|| ось OZ).

Тогда, пользуясь известным выражением потенциала диполя

$$\Phi = \int_{V'} (\bar{M} \text{ grad } \frac{1}{|\bar{r} - \bar{r}'|}) dV', \quad (1)$$

где \bar{r} и \bar{r}' - координаты точки наблюдения и элементарного объема шиммы dV' соответственно, можно получить выражение возмущения $H_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}$,

вносимого парой шимм, сечение которых изображено на рис. 6. Например, для симметричного случая тонких бесконечно длинных шимм имеем:

$$H_z = 4M \left[\operatorname{arctg} \frac{x}{h} - \operatorname{arctg} \frac{x-\delta}{h} - \operatorname{arctg} \frac{x}{h_1} + \operatorname{arctg} \frac{x-\delta}{h_1} \right].$$

Для "полубесконечных" шимм (для которых $2h_1$ близко к полному зазору между стальными крышками камеры магнитна, а h - невелико) следует положить (из-за отражений) $h_1 \rightarrow \infty$ и здесь

$$H_z = 4M \left[\operatorname{arctg} \frac{x}{h} - \operatorname{arctg} \frac{x-\delta}{h} \right]. \quad (2)$$

После экспериментального определения M (индукция в железе $B = 4\pi M$) можно подбором расстояния от оси канала, толщины δ и зазора между шиммами $2h$ добиться хорошей компенсации возмущения от канала. Разумеется, толщина шимм должна от входного конца канала возрастать примерно пропорционально внешнему диаметру канала. У нас выбрано: расстояние от оси канала у входного его конца до плоскости шимм - 20 мм, далее плоскость шимм параллельна образующей внешней конической поверхности канала, $2h = 50$ мм, толщина на входе $\delta_{\text{вх}} = 0,4$ мм, толщина на расстоянии 230 мм от входа $\delta_{230} = 1,2$ мм.

Окончательная конфигурация корректируется по результатам измерений, причем необходимые исправления рассчитываются по (1). Достаточно эффективным методом может быть также пропорциональное остаточному возмущению изменение толщины шимм на рассматриваемом азимуте рабочей области поля.

Вид распределения магнитного поля в окрестности канала после коррекции изображен на рис. 5. Отметим, что после шиммирования магнитное поле здесь оказалось столь однородным, что вплоть до предпоследней орбиты измерения были возможны стандартным прибором ИМИ-2.

При проектировании системы вывода предполагалось, что заметная доля электронов будет задевать стенки магнитного канала и нагревать его, поэтому была сконструирована система водоохлаждения входного конца канала. Однако фактическая эффективность вывода оказалась равной 100%, поэтому канал даже при многодневной круглосуточной работе не охлаждается.

Для магнитного канала обеспечены следующие регулировки без нарушения вакуума: перемещение вдоль оси в пределах ± 8 мм, смещение входного конца на ± 2 мм в направлении, перпендикулярном средней магнитной плоскости, перемещение входного конца в радиальном направлении на ± 15 мм и перемещение выходного конца на ± 6 мм в радиальном направлении. Все эти регулировки использовались не только при поисках оптимального положения канала при первичной наладке, но, в частности, перемещение канала вдоль его оси корректировалось при каждой замене резонатора.

§ 2. Система фокусировки пучка и эффективность работы урановой мишени.

Конфигурация сфокусированного на мишень пучка определяется действием пары 4-полюсных гиперболических магнитных линз и разбросом параметров выведенных из камеры ускорителя электронов.

Для успешного ускорения электронов до 30-й орбиты, как известно, стабилизация магнитного поля микротрона не требуется. Однако как расчеты, так и эксперимент показывают, что выведенный и сфокусированный на мишень пучок обеспечивает стабильную мощность ИБРА только при наличии хорошей стабилизации магнитного поля микротрона и фокусирующих линз. Энергия электронов на выходе из камеры микротрона E выражается с хорошей точностью формулой

$$E = e H \rho \quad (3)$$

(E - в эргах, e - заряд в электрона в CGSE, H в эрстедах, ρ - радиус последней орбиты в см).

Отличительной особенностью микротрона является то, что конфигурация равновесных орбит при изменениях величины напряженности постоянного в пространстве магнитного поля остается неизменной, так как она определяется только лишь длиной волны ускоряющего свч. напряжения, которая со временем не меняется. Поэтому имеющие у нас место сравнительно медленные изменения H во времени приводят лишь к пропорциональным изменениям энергии выведенных электронов. Эти пульсации энергии электронов и оказываются основной

причиной изменения мощности реактора, которая даже при незначительных неполадках стабилизирующей магнитное поле системы периодически снижается от своего максимального значения на величину 20% и более. Основным элементом системы фокусировки пучка на мишень (рис. 7) является пара квадрупольных магнитных линз.

4-полюсные магнитные линзы

Отличительной особенностью магнитных линз микротрона является отсутствие заметных отклонений распределения магнитного поля от идеального практически во всей их апертуре. Расстояние между полюсами в них - 100 мм, внутренний диаметр вакуумированного электропровода - 80 мм. Отсутствие искажений поля внутри электропровода достигнуто благодаря найденному в Лаборатории простому способу обработки полюсов с гиперболической направляющей вплоть до точки среза, расстояние которой от оси линзы равно $1,6a$, где a - полуапертура линзы. Длина полюса по железу - 200 мм.

Ввиду того, что линзы расположены в зале реактора, обмотки их имеют естественное воздушное охлаждение, хотя это обстоятельство привело к заметному возрастанию веса линз. Каждая линза весит 70 кг.

Для корректировки положения сфокусированного на мишень пучка было введено управляемое с пульта реактора дистанционное регулирование положения линз в поперечном к оси электропровода направлении. Одна из линз перемещается перпендикулярно средней магнитной плоскости микротрона, а другая - в направлении, сопряженном с первым.

Эффективность мишени

В связи с упомянутой выше чрезвычайно резкой чувствительностью мощности ИБРа по отношению к качеству фокусировки пучка электронов на мишень во время наладки системы был проделан следующий эксперимент.

Пользуясь возможностью поперечного перемещения магнитных линз поперек электропровода, мы сняли зависимость мощности W ИБРа от положения

оси сфокусированного на мишень пучка относительно оси цилиндрической мишени при постоянном токе электронов. Результаты этого эксперимента изображены на рис. 8. Измерения были проделаны на мишени, диаметр которой составлял 10 мм. Ее размещение в активной зоне ИБРа видно из рис. 9. Диаметр пучка на алюминиевой перегородке ≈ 5 мм. Учитывая, что минимальная толщина алюминиевой фольги $\approx 0,1$ мм, расходимость электронного пучка вследствие многократного рассеяния на длине $L = 200$ мм составит ≈ 5 мм (средний квадрат угла рассеяния $\bar{\theta}^2 = 1,65 \cdot 10^{-4}$), а диаметр пучка на мишени 10 мм. В таком случае легко видеть, что смещение оптической оси пучка на 2,5 мм приводит к прямому "прострелу" в кольцевой зазор 38% всех электронов, а в связи с расходимостью пучка в самой мишени за счет рассеяния электронов и утечкой γ -квантов вдоль кольцевой щели величина потерь может достигать 50%.

Коэффициент преобразования электронов в нейтроны $R_{ЭН}$, характеризующий эффективность мишени, может быть определен из соотношения:

$$W_{\text{ср}} = s_0 \frac{t}{|\epsilon_0|} \pi = \frac{75 I K t \pi}{|\epsilon_0|}, \quad (4)$$

где $W_{\text{ср}}$ - средняя мощность реактора в вт, s_0 - мощность нейтронного импульса мишени в нейтрон/сек, t - длительность импульса тока микротрона в мксек, π - частота импульсов 1/сек, I - сила тока электронов в импульсе в а, $|\epsilon_0|$ - реактивность по мгновенным нейтронам.

При полученных на этой мишени параметрах системы реактор-микротрон

$$W_{\text{ср}} = 600 \text{ вт}; \quad t = 2,5 \text{ мксек}; \quad \epsilon_0 = 5 \cdot 10^{-3}; \quad I = 60 \text{ ма по формуле (4)}$$

$$K_{\text{ЭН}} \sim 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ нейтрон/электрон, что значительно меньше расчетного.}$$

$K_{\text{ЭН}} \sim 1,85 - 2 \cdot 10^{-2}$ для мишени из урана полубесконечной геометрии. Такое расхождение обусловлено тем, что пучок электронов ($d_{\text{пучка}} = d_{\text{мишени}}$), проходя одну радиационную единицу, примерно равную длине пробега электронов с $E_0 = 30$ Мэв в уране, расширяется из-за рассеяния, выходя за пределы мишени. Электроны, выбывшие "из игры", снижают интенсивность тормозного излучения; помимо этого у фотонов, рожденных на периферии, имеется большая вероятность "проваливаться" в кольцевую щель.

Из соображений повышения выхода нейтронов диаметр мишени был увеличен до 15 мм, а слои алюминия (0,1 мм) и гелия (200 мм) были устранены

(расположение мишени видно на рис. 10). Отсутствие фольги из Al исключило многократное рассеяние перед мишенью, и с учетом рассеяния в толще мишени максимальный диаметр пучка в конце торможения электронов не превышает 13-14 мм. В результате, как и следовало ожидать, выигрыш в выходе нейтронов из мишени большего диаметра.

$$\frac{K_{\text{Эн}2}}{K_{\text{Эн}1}} = \frac{W_2}{W_1} \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \frac{I_1}{I_2} \frac{t_1}{t_2} = 2,58 \approx \frac{F_2}{F_1},$$

где F_2 и F_1 - площади мишеней.

Абсолютное значение $K_{\text{Эн}2} \sim 1,5 \cdot 10^{-2}$ по-прежнему ниже расчетного.

По экспериментальным данным Рассела и др. для U-238 большой толщины $k = 0,0152$ нейтронов/электрон при начальной энергии электронов $E_0 = 29 \text{ Мэв}^{1/3}$.

Температурный режим мишени

Расчеты показали, что максимум температуры ожидается в месте входа пучка электронов в мишень из-за отсутствия тепловода с торца. На стальной оболочке перед ураном была приварена термопара. На рисунках 11 и 12 приведены графики температур мишени в зависимости от тока и мощности реактора для различных умножений подкритической системы.

Учитывая, что для урана допустима температура 500°C , легко показать по формуле (4) и графику 11, а также из графика 12, что

$$(I \cdot t)_{\text{макс}} \approx 100 - 120 \text{ ма мксек.}$$

§ 3. Система возбуждения резонатора

Резонатор возбуждался на волне 10 см стандартным магнетроном импульсной мощностью несколько мегаватт. Импульсы модулятора магнетрона следовали с частотой повторения 50 гц и длительностью от 1,5 до 3 мксек. Запуск происходил синхронно с вращением основного диска ИБРа в момент минимальной подкритичности реактора.

В параграфе об электрической прочности резонатора будет показано, что из-за развития резонансного разряда существует барьерный уровень мощности в резонаторе, который следует проходить без чрезмерного повышения давления в вакуумированном отрезке волновода. Последнее осуществить без плавной регулировки подачи мощности СВЧ на резонатор почти невозможно. Поэтому особенное внимание было уделено разработке такой схемы тракта СВЧ, чтобы передача мощности от магнетрона на резонатор допускала плавную ее регулировку практически от нуля.

Основным элементом тракта /4/ являются два последовательно включенных циркулятора, один из которых имеет ферритовый мост с постоянным магнитным полем, рассчитанным на хорошую развязку магнетрона и нагрузки, а второй снабжен электромагнитом. Поле электромагнита плавно регулируется с пульта управления. В этих условиях последний циркулятор является делителем мощности между каналом, направленным к резонатору, и так называемой "балластной" водяной нагрузкой этого циркулятора. Перед началом ускорения магнетрона работает на полную мощность, но вся она направлена в балластную нагрузку, а ответвление ее на резонатор оператором производится в той мере, в какой это необходимо для постепенного возбуждения резонатора (см. выше).

В такой схеме КСВН нагрузки магнетрона никогда не превосходил 1,2 и непрерывная многосуточная работа генератора и тракта была надежной и устойчивой. Вся отраженная от резонатора мощность поглощается водяной нагрузкой, установленной на 4-м полюсе развязывающего циркулятора. Оказалось, что осциллограмма огибающей импульса отраженной мощности содержит всю необходимую для контроля ускорения информацию /4/, причем оператор по характеру осциллограммы достаточно уверенно может определить, есть ли какие-либо недостатки в работе ускорителя и если есть, то какие именно.

На рис. 13 изображены типичные для разных случаев виды импульса отраженной мощности. Случай 13а соответствует полному отражению мощности от резонатора. Отражение имеет место как при расстроенном резонаторе, так и при развитии в нем резонансного разряда. 13б (сплошная линия) - резонатор настроен, но не нагружен; 13в (пунктир) - промежуточные осциллограммы при начале настройки резонатора; 13г - от настроенного резонатора при слишком большой подаваемой мощности отражение ее наступает из-за резонансного

разряда преимущественно к концу импульса; 13г (пунктир) – возникновение тока с накаливаемого катода при одновременно начинающемся ускорении электронов улучшает согласование резонатора с трактом. Оптимальная нагрузка соответствует КСВН = 1 (сплошная кривая); 13д и е – нагруженный резонатор настроен не точно на частоту генератора; 13ж – нагрузка настроенного резонатора превосходит оптимальную; 13з – в нагруженном настроенном резонаторе катод приблизился к корпусу резонатора, и между ним и корпусом идет разряд; 11 и – при нормальном ускорении происходит искрение в дроссельном соединении волноводов на границе "вакуум-элегаз". Узкие крайние выбросы во всех случаях, кроме а), вызваны несоответствием частоты генератора собственной частоте резонатора на переднем и заднем фронтах импульса.

В систему управления распределением мощности СВЧ введена блокировка дверей в зале микротрона, схема которой дана на рис. 14, гарантирующая полную радиационную безопасность обслуживающего персонала.

Логическая схема блокировки следующая:

а) Если дверь зала микротрона открыта, а схема управления распределением мощности СВЧ не включена, то включить генератор СВЧ невозможно.

б) Если при открытой двери зала микротрона требуется включить СВЧ генератор, необходимо включить электропитание на схему управления распределением мощности и тумблер управления мощностью поставить в положение, при котором вся мощность СВЧ идет в балластную нагрузку, причем ответвление мощности на резонатор невозможно.

в) Плавная подача мощности СВЧ в резонатор микротрона возможна лишь при закрытой двери зала микротрона. Над входом в зал микротрона имеется световая сигнализация о разрешении или запрещении входа в зал.

В начальный период наладочных работ на микротроне тракт СВЧ откачивался и составлял единый вакуумный объем с камерой ускорителя. Вакуумированный тракт СВЧ имел два существенных недостатка: во-первых, после каждого вскрытия вакуумного объема требовался большой промежуток времени, чтобы в системе снова получить рабочий вакуум; во-вторых, требовалась длительная тренировка волноводов и циркуляторов с целью удаления остаточного газа, выделяющегося за счет нагревания при подаче СВЧ мощности. В дальнейшем эти недостатки были устранены тем, что волноводный тракт стал наполняться

смесью азота с воздухом (на 1 объем воздуха - 2,5 объема азота), и только часть волновода, примыкающая к резонатору, вакуумирована и используется для откачки последнего. Эта часть волновода отделена от остального тракта кварцевым окном.

§ 4. Резонатор

Длительная эксплуатация микротрона показала, что необходимость в разборке ускорителя возникает, как правило, в связи с нарушениями в режиме работы резонатора. Техническая проблема обеспечения его надежной работы оказалась наиболее трудной. Нам удалось показать, что даже при откачке камеры ускорителя и резонатора паромасляными и диффузионными насосами (при давлении остаточного газа $\sim 10^{-6}$ мм рт.ст.) можно добиться непрерывной надежной работы резонатора в течение недели. Однако фактически разборки микротрона происходили значительно чаще.

Основные типы нарушений режима работы резонатора следующие.

Наиболее часто происходит прекращение поступления достаточной для ускорения СВЧ мощности в резонатор, что мы условно называем термином "потеря электрической прочности". Иногда возникает ухудшение оптических свойств резонатора, сопровождающееся резким снижением выведенного из микротрона тока электронов. Это явление мы назвали "эффектом кривого ружья", так как его причиной является искривление силовых линий ускоряющего электрического поля в резонаторе из-за наклона диска мембранной крышки резонатора по отношению к средней магнитной плоскости ускорителя. Внутренние поверхности крышек резонатора оказываются не параллельными, и возникающая при этом не скомпенсированная составляющая электрического поля вдоль вектора напряженности магнитного поля микротрона приводит к существенным потерям ускоряемых электронов. Третий тип нарушений - различные неисправности катода и его нагревателя.

Прежде чем перейти к анализу причин перечисленных нарушений упомянем еще, что вакуумная откачка производилась тремя паромасляными насосами производительностью по 500 л/сек каждый, снабженными полупроводниковыми ловушками (минимальная температура жалюзи - 40°C) и жидкоазотной ловушкой

внутри камеры микротрона. Один из насосов отрезком волновода (сечение 72x34 мм, длина около 1 м) был подключен к резонатору, в котором окно связи, через которое происходила откачка резонатора этим насосом, имело размеры 21x12 мм. Через пролетные окна (16 x 8 мм, 13 x 5 мм и 7x5 мм) резонатор сообщался с камерой ускорителя, к которой были присоединены два других насоса. Водяное охлаждение корпуса резонатора осуществлялось сначала магистралью, в которой вода последовательно проходила балластную нагрузку, нагрузку для поглощения отраженной СВЧ мощности от резонатора^{14/} и резонатор. Большое удобство этой схемы, позволявшей измерять относительное распределение СВЧ мощности в нагрузках и резонаторе, таило в себе, как мы выяснили впоследствии, и существенный недостаток. Оказалось, что температура резонатора радикально влияет на электрическую прочность в нем, причем повышение температуры подаваемой на резонатор воды на 1-2° (например, с 15°С, при которой ускоритель работает надежно до 16-17°С) часто приводило к потере электрической прочности. В связи с этим в последний период работы корпус резонатора мы охлаждали по независимой водяной магистрали, что обеспечило снижение температуры резонатора. Держатель катода и нити его нагревателя охлаждались также отдельной магистралью.

Электрическая прочность резонатора

Ввод в действие ускорителя после его очередной сборки и откачки начинается с тренировки резонатора, в который постепенно вводят небольшую СВЧ мощность. При фиксированном значении мощности, составляющем ~1% от номинальной, всегда наблюдается резко выраженная временная потеря электрической прочности резонатора. Она сопровождается внезапным повышением давления в отрезке волновода, через который идет откачка резонатора, а осциллограмма импульса отраженной от резонатора мощности в это же время начинает свидетельствовать о том, что СВЧ мощность отражается от резонатора полностью. Тот факт, что поступление в резонатор мощности прекращается при фиксированном ее уровне, показывает, что причиной потери электрической прочности является резонансный сверхвысокочастотный разряд в резонаторе.

Чем скорее оператор сумеет перейти через это барьерное значение мощности, но так, чтобы не было чрезмерного (в несколько раз) повышения давления в волноводе по сравнению с обычным (без мощности СВЧ) его уровнем, тем спокойнее будет дальнейшая работа ускорителя. После перехода барьера оставшийся диапазон вводимой в резонатор мощности проходит очень быстро (в течение 10-20 мин).

Разогрев катода начинается в тот момент, когда амплитуда напряженности электрического поля в резонаторе близка к рабочему ее значению (это определяется по мощности, снимаемой охлаждающей резонатор водой).

После того, как дозиметрические приборы фиксируют по резкому возрастанию рентгеновского излучения в зале микротрона начало ускорения, дальнейшая настройка ускорителя производится по показаниям этих приборов и пробников. С помощью осциллограммы импульса отраженной мощности хорошо видно, что даже нормальная работа ускорителя изредка сопровождается кратковременным прекращением поступления мощности в резонатор (полным или на части импульса) с последующим восстановлением процесса ускорения. После нескольких суток работы резонатора электрическая прочность его полости снижается, моменты полного отражения энергии СВЧ колебаний резонатором резко учащаются, и вскоре процесс ускорения нарушается настолько, что мощность реактора оказывается сильно модулированной во времени. Становится необходимой замена резонатора.

Осмотры резонаторов после многочисленных замен убедительно подтвердили тот факт, что основным процессом в полости резонатора, вызывающим потерю ее электрической прочности, следует считать резонансный СВЧ разряд. Мы ни разу не наблюдали следов так называемых пробоев внутри резонатора, но всегда ярко выступали на внутренних поверхностях почернения и другие изменения поверхности, которые всегда оказывались для заданной силовой линии магнитного поля одинаковыми по обе стороны от средней магнитной плоскости.

Интенсивность резонансного разряда зависит в конечном счете от коэффициента вторичной эмиссии электронов со стенок и от плотности и состава остаточного газа в полости резонатора. Кроме того, интенсивность резонансного разряда оказалась ниже в случае острых (незакругленных) кромок пролетных отверстий, по-видимому, потому, что когда кромки закруглены, получается большая площадь стенок, на которой не равна нулю аксиальная (параллельная вектору

напряженности магнитного поля в микротроне) составляющая электрического СВЧ поля. Ибо только эта составляющая ответственна за развитие резонансного разряда, который всегда идет вдоль магнитных силовых линий. Однако при выборе материала для резонаторов приходится заботиться не только о подавлении вторичной эмиссии, но и о достаточной проводимости стенок. Было найдено, что хром и нержавеющая сталь, которыми мы окантовывали те кромки пролетных окон, где наиболее интенсивно развивается резонансный разряд, существенно повышают электрическую прочность. Но покрытие из таких материалов значительной доли поверхности полости резонатора исключало возможность его возбуждения до нужных амплитуд напряженности ускоряющего поля. Ввиду технологических трудностей изготовления резонаторов с хромовой и особенно окантовкой из нержавеющей стали от этой меры мы отказались. Все резонаторы изготовлены из бескислородной меди. Перед сборкой каждый резонатор был подвергнут электрополировке и отжигу в вакууме в течение 3-х часов при температуре 500°C . Сборка резонатора должна обеспечивать надежный контакт всех стыков деталей, образующих его полость, и исключить возможность загрязнения полости. Во время сборки следует обеспечить параллельность внутренних плоскостей мембранной и катодной крышек, а также правильно выставить эмиттирующий торец катода и нить катода. Небрежная сборка стыков приводит к чрезмерному развитию резонансного разряда в полости в самом начале работы, и ускорение в этом случае оказывается невозможным. Мы упоминали уже, что и идеально обработанный и собранный резонатор после многих часов нормальной работы постепенно утрачивает электрическую прочность. На рис. 15 видно, как с течением времени приходится постепенно снижать величину выведенного из ускорителя тока, чтобы сохранить нормальную работу установки. Этот процесс старения резонатора находится в прямой связи с постепенным загрязнением стенок резонатора, происходящим по нескольким причинам. Первая из них состоит в том, что в полости возбужденного резонатора всегда происходят разрядные явления, сопровождающиеся вколачиванием в стенки резонатора частиц остаточного газа. Очевидно, что состав и плотность остаточного газа определяют скорость старения. Вторая причина состоит в случайных напылениях на стенки полости частиц LaB_6 . Такие случаи имеют место, если допускается лавинообразный разгон катода, когда ток накаливающих катод электронов при

чрезмерном его нагреве начинает неуправляемо возрастать, и катод испаряется. Напыление LaB_6 , по-видимому, происходит и при обычной работе, но гораздо менее интенсивно. Результатом обоих этих процессов является бросающееся в глаза потемнение внутренней поверхности резонатора, особенно развитое в области максимальных напряженностей электрического поля. После механического удаления этого налета, электрополировки и отжига резонатора в вакууме нормальная электрическая прочность его полностью восстанавливается. Важным условием сохранения электрической прочности является своевременное снижение подаваемой на резонатор СВЧ мощности в случае развития в нем продолжительного резонансного разряда, при котором особенно быстро происходит загрязнение стенок резонатора. Такие случаи сопровождаются повышением давления в волноводе и резонаторе, и обычно следует выждать несколько секунд после снижения мощности, чтобы вакуум восстановился. Наличие в схеме тракта электромагнита циркулятора-делителя, поле которого регулируется, и описанный выше характер рабочей осциллограммы (рис. 13г - сплошная кривая) импульса отраженной мощности позволили разработать простое автоматическое устройство, манипулирующее мощностью в эти критические моменты вместо оператора. Автомат не работает, если ускорение идет нормально, но когда импульс отраженной мощности несколько раз подряд приобретает вид, показанный на рис. 13а или 13в, то ток возбуждения электромагнита циркулятора-делителя автоматически прерывается, и тем самым мощность в резонаторе снижается почти наполовину на регулируемое время 1-5 секунд. После этого прежний режим восстанавливается.

§ 5. Катод

С целью избежать некоторых неблагоприятных особенностей катодов с прямым нагревом (потеря эмиссии штабика из LaB_6 , загрязненный приемом из дисилицида молибдена, необходимость пайки в вакууме и др.) был разработан катод из LaB_6 с подогревом электронным пучком. Длительная экспериментальная его разработка на специальном стенде показала, что соблюдение некоторых несложных требований сообщает такому катоду надежность, намного большую, чем в случае паянного в вакууме катода с прямым нагревом.

Схема устройства блока катода показана на рис. 18. Цилиндр из LaB_6 вставлен без пайки и заштифтован в танталовой державке, укрепленной на катодной крышке резонатора. От последней он изолирован, но ток с катода уходит на землю вне камеры ускорителя через измерительное сопротивление 75 ом. Мощность нагрева катода до необходимой температуры в большой степени зависит от толщины танталовых усиков державки, отводящих тепло от цилиндра. В связи с этим диаметр сечения обоих усиков был взят равным 0,8 мм. В этих условиях и при длине каждого усика 15 мм достаточна мощность нагрева катода 15–20 вт. Бомбардирующие цилиндр электроны эмитируются вольфрамовой нитью, на которую подается отрицательное напряжение 400–600 в и переменный нагревающий ток до 7а. Спираль нити находится на обших с цилиндром силовых линиях магнитного поля, вследствие чего электроны могут двигаться только в направлении катода, так как противоположное направление закрыто электродом, на котором укреплена нить, находящимся под тем же отрицательным потенциалом. Экспериментально было найдено, что в цепь подачи на нить ускоряющего электроны напряжения необходимо ввести сопротивление 200–1000 ом, что сообщает работе схемы хорошую стабильность.

§ 8. Процесс ускорения

Изящества конфигурации траекторий ускоряемых в микротроне электронов проявляется в ряде многочисленных следствий, которые делают особенно простой проблему наблюдения орбит. Проще всего их исследовать с помощью коллектора, перемещаемого вдоль общего диаметра орбит $\frac{1}{5}$. Здесь расстояние между соседними круговыми орбитами постоянно и равно $\frac{\lambda}{\pi}$. Если радиальный размер коллектора меньше $\frac{\lambda}{\pi}$, то перемещение коллектора сопровождается не только периодическим изменением тока ускоренных электронов на коллектор, но и резкой периодичностью мощности потока γ -лучей в зале микротрона. Как раз с помощью последнего явления впервые на нашем микротроне был обнаружен факт ускорения электронов до 15 орбиты в феврале 1964 года.

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.

Теоретически процесс ускорения электронов во II -м режиме-исследован в работах /5/, /6-7/ и /8/. В /8/ рассчитано распределение тока по орбитам с учетом только фазовых потерь в предположении, что частота и амплитуда ускоряющего поля постоянны, магнитное поле внутри камеры ускорителя однородно, а плоскость симметрии резонатора совпадает со средней плоскостью магнитного поля. В действительности эти требования не выполняются. Имеют место уходы частоты и амплитуды ускоряющего поля как в пределах импульса, так и от импульса к импульсу, а также возмущения в распределении магнитного поля. Возмущение процесса ускорения происходит также и СВЧ полем, возбуждаемым через резонатор внутри всей камеры микротрона. Все это приводит как к потерям тока из-за возбуждения аксиальных и радиальных колебаний в пучке, так и к дрейфу орбит. Кроме того, даже если все расчетные предположения выполнены, в /8/ показано, что магнитное СВЧ поле резонатора вызывает дрейф орбит, перпендикулярный их общему диаметру, который в наших условиях к концу ускорения (к 30-й орбите) может достигнуть 2-2,5 см.

Пролетные окна в первом исследованном нами резонаторе были сделаны без учета возможности заметного дрейфа. Вследствие этого каждый раз ускорение заканчивалось на 15-й орбите. После того как радиальный размер пролетных окон был увеличен на 4 мм, потери пучка из-за его радиального движения в резонаторе прекратились, и мы смогли достигнуть 27-й орбиты. Однако потери из-за аксиального движения препятствовали дальнейшему ускорению. Для устранения последних было введено упомянутое выше регулирование положения средней магнитной плоскости на периферии рабочей области, и внутри камеры была установлена система токовых витков, каждый из которых влияет на аксиальное смещение пучка на определенных орбитах. Ускорение до 30 Мэв (30-я орбита) было получено сразу по введению в действие этих элементов. Заметный рост тока на 30-й орбите произошел в результате использования конфигурации пролетных окон в резонаторе, предложенной В.Н. Мелехиным. Характерной особенностью ее является существенное превышение аксиального размера выходного окна по сравнению с входным.

На рис. 17 даны распределения тока по орбитам до введения регулировки положения средней магнитной плоскости и токовых витков (кривая 1), после применения регулировки средней плоскости, но без витков (кривая 2) и оптимальная/

кривая 3, полученная с использованием обоих регулирующих факторов. Кривые были сняты, начиная с 13-й орбиты, и величина тока на ней принята за единицу. Эффективность действия введенных регулировок оптики ускорительного тракта особенно ярко проявлялась при использовании выведенного пучка на мишени реактора. Достаточно сказать, что выход из строя системы питания одного из витков приводил к снижению мощности реактора вдвое. Результаты экспериментального исследования распределения тока по орбитам, начиная с 5-й, на которой величина тока принята за единицу, приведены на рис. 18. Там же для сравнения дан один из вариантов расчетного распределения ^{18/} для того же резонатора с квадратным сечением полости. При сравнении с теорией следует помнить, что нельзя быть уверенным в том, что параметры ускорения в каждом реальном случае в точности соответствовали фиксированному набору параметров, фигурировавшему в расчете, по причине трудностей их измерения. Сравнение показывает, что до 25-й орбиты имеется удовлетворительное согласие теории и эксперимента, что свидетельствует о малости неоправданных потерь пучка в этой области. Однако, начиная с 25-й орбиты, в нашем ускорителе еще происходило ярко выраженное убывание тока в пучке вопреки теории. Это возмущение процесса ускорения на периферийных орбитах, вероятно, происходит по причине упомянутого выше возмущения в распределении магнитного поля, внесенного обычной вакуумной камерой, выполненной из нержавеющей стали. Шиммированием большая часть возмущения скомпенсирована, однако, полную компенсацию обеспечить не удалось (см. рис. 1,2).

На рис. 19а, б и в приведены данные о распределении тока электронов на каждой орбите между условно "правой" и "левой" ламелями коллектора, перемещаемого вдоль общего диаметра орбит. Бросается в глаза резкая асимметрия пучка относительно средней геометрической плоскости в случаях отсутствия токовых витков и регулировки средней магнитной плоскости. Совместное применение указанных средств (рис. 19а) не приводит к полной компенсации асимметрии пучка, но тем не менее заметно ее улучшает и тем самым приводит к улучшению его проходимости по тракту в несколько раз.

Практически подбор оптимального распределения магнитного поля микротрона с помощью дополнительных обмоток и витков с током осуществляется после каждой замены резонатора или магнетрона. В качестве критерия, позволявшего

судить об оптимальности коррекции, может быть использована величина тока на пробнике, размещенном вне ускорителя. Процесс коррекции заключается в подборе направления и величины токов в корректирующих элементах методом последовательных приближений. Следует заметить, что наиболее острая зависимость выведенного из микротрона тока наблюдается при изменении тока через секции обмотки магнита, включенные встречно. Поэтому дистанционное устройство, позволяющее изменять этот ток, должно обеспечивать точность установки последнего порядка 1%. Необходимая плавность регулировки тока через корректирующие витки обеспечивается автотрансформаторами типа РИО-250-2, включенными в первичную цепь питания выпрямителей. В случае, если частота повторения импульсов микротрона отличается от частоты питающей сети или отсутствует синхронизация запускающего устройства с сетью, на выходе выпрямителей, питающих корректирующие устройства, должны быть предусмотрены фильтры для сглаживания пульсаций. Величина последних не должна превышать 2-3%. В противном случае наблюдается амплитудная модуляция импульсов выведенного тока с разностной частотой. Глубина этой модуляции зависит от соотношения токов в корректирующих устройствах и при неблагоприятных условиях может достигать 100%. Опыт эксплуатации микротрона показал, что при нестабильности напряжения питающей сети порядка нескольких процентов необходимость в регулировке токов через корректирующие витки не возникает. К стабильности источника, питающего секции обмотки, включенные встречно, требования должны быть более высокими. Однако, если обеспечена стабильность тока через эти обмотки порядка 1%, необходимость в регулировках не возникает даже при непрерывной работе ускорителя в течение нескольких суток.

§ 7. Вывод пучка

Как и следовало ожидать, ввиду близости распределения магнитного поля к однородному во всей рабочей области микротрона сдвиги фаз радиальных колебаний электронов в процессе ускорения незначительны. В самом деле, как известно, на каждой орбите сдвиг фазы ψ' радиального колебания равен

$$\psi'_1 = n_1 \pi \quad \text{радиан,} \quad (5)$$

Легко видеть, что этот же самый интеграл (7) при том же самом значении константы остается справедливым и после выхода электрона из резонатора и дальнейшем движении в однородном магнитном поле. Левая часть (7) имеет геометрический смысл расстояния вдоль оси o_y (перпендикулярной к общему диаметру орбит) от центра кривизны траектории электрона до оси o_x . Мы видим из (7), что если бы СВЧ магнитного поля не было, то центры кривизны всех траекторий электронов всегда лежали бы на общем диаметре орбит.

Однако расчет, описанный в [8], показал, что из-за наличия магнитного СВЧ поля в нашем случае центры кривизны орбит электронов в процессе ускорения постепенно удаляются от общего диаметра орбит, причем в зависимости от начальной фазы выхода электрона из катода на 30-й орбите разброс расстояний центров от общего диаметра во 2-м режиме ускорения может достигать 15 мм (см. рис. 20), а величина максимального удаления — 25 мм. Так что само понятие "общий диаметр орбит" в микротроне следует считать условным. Возможно, что добавочные радиальные и аксиальные возмущения траекторий электронов происходят также и по причине возбуждаемого в камере резонатором поля СВЧ, однако, есть основания думать, что они невелики.

После того, как описанный нами магнитный канал был установлен своим входным концом так, что его ось оказалась вблизи оси пучка, мы увидели светящееся пятно от выведенных электронов на покрытой люминофором скошенной площадке цилиндра Фарадея, установленного под микротроном. Несложными регулировками без нарушения вакуума коэффициент вывода был доведен до 100%, причем еще оставалась возможность менять угол выхода пучка из микротрона в пределах $\pm 1^\circ$ без снижения эффективности вывода. Параметры выведенного пучка оказались близкими к расчетным. Полный радиальный размер пучка 15–20 мм (в 1 м от входного конца магнитного канала), а аксиальный его размер — 6 мм. Учитывая, что на входе в канал поперечное сечение пучка 4×5 мм, можно оценить, что выведенный пучок имеет радиальную расходимость ~ 15 мм/м и аксиальную ~ 2 мм/м.

В заключение авторы приносят благодарность всем сотрудникам Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, принимавшим участие в конструировании, изготовлении, наладке и эксплуатации микротрона, а также коллективу Физической лаборатории ИФП АН СССР за помощь в работе.

Л и т е р а т у р а

1. В.Д. Ананьев, П.С. Аягулов, С.П. Капица, И.М. Матора, В.Н. Мелехин, Л.А. Меркулов, Р.В. Харьюзов, АЭ 20, 106 (1966). ✓
2. Л.М. Зыкин, С.П. Капица, В.Н. Мелехин, А.Г. Неделяев. Микротрон с большим током. Труды Международной конференции по ускорителям. Дубна, 1963, 1049.
3. I.L. Russel, Jr, K.L. Grosbie, C.A. Stevens. Доклад R-2836 на совещании МАГАТЭ в июле 1966. Дубна "Accelerator pulsed fast assembly"
4. И.М. Матора, Р.В. Харьюзов. "Волноводный тракт микротрона ЛНФ ОИЯИ на 30 Мэв". Б1-2737, Дубна 1966. ✓
5. С.П. Капица, В.Н. Мелехин, И.Г. Крутикова, Г.Д. Прудковский. ЖЭТФ, 41, 376 (1961). ✓
6. В.Н. Мелехин. ЖЭТФ, 42, 622 (1962). ✓
7. В.П. Быков. ЖТФ, 33, 337 (1963). ✓
8. И.М. Матора, Л.А. Меркулов, И.И. Шалонцев, Препринт ОИЯИ Р-2706, (1967 Дубна) Дубна 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1967 г.

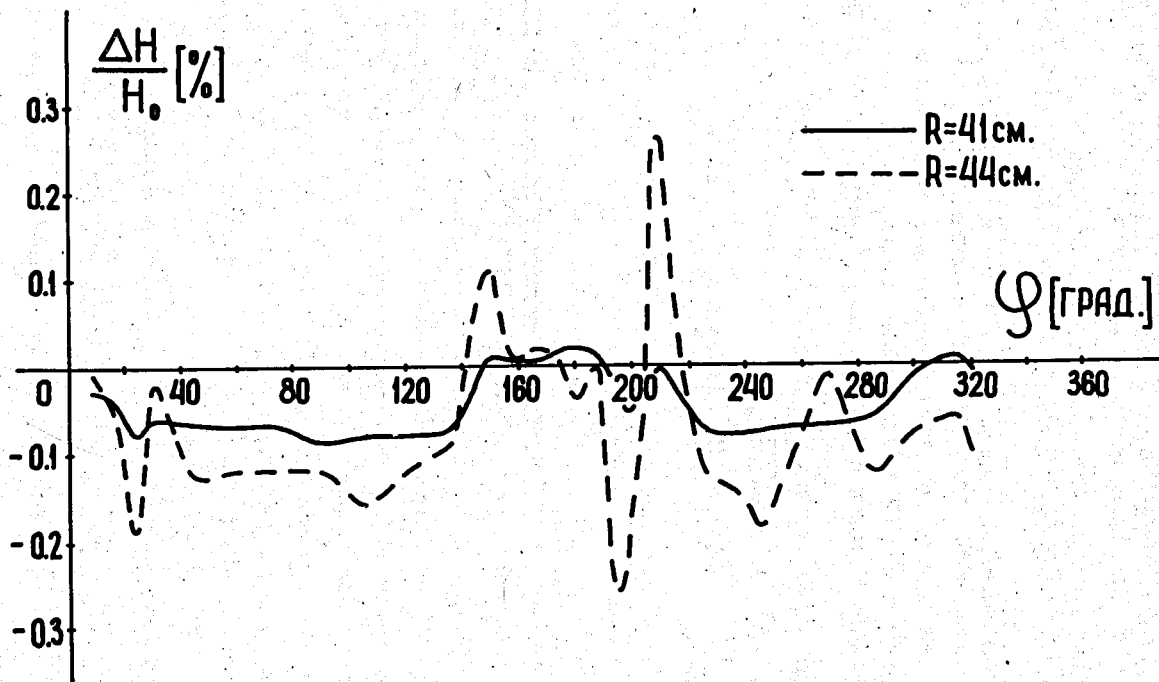


Рис. 1.

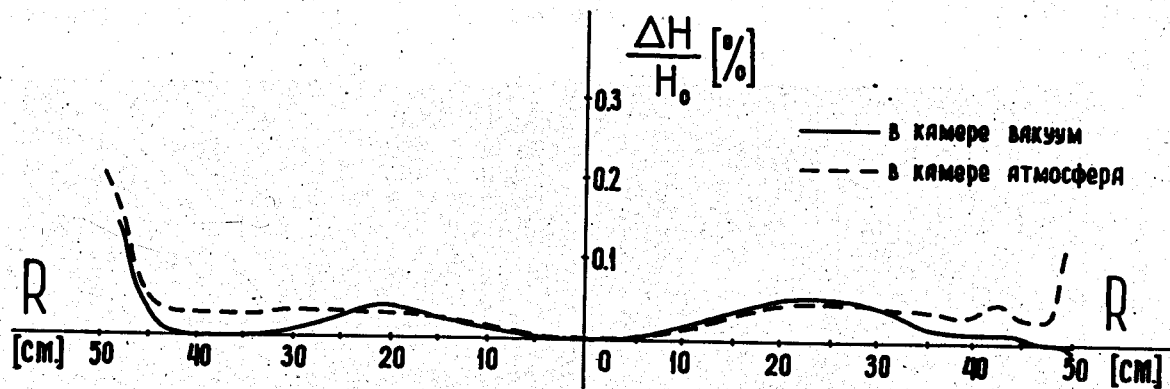


Рис. 2.

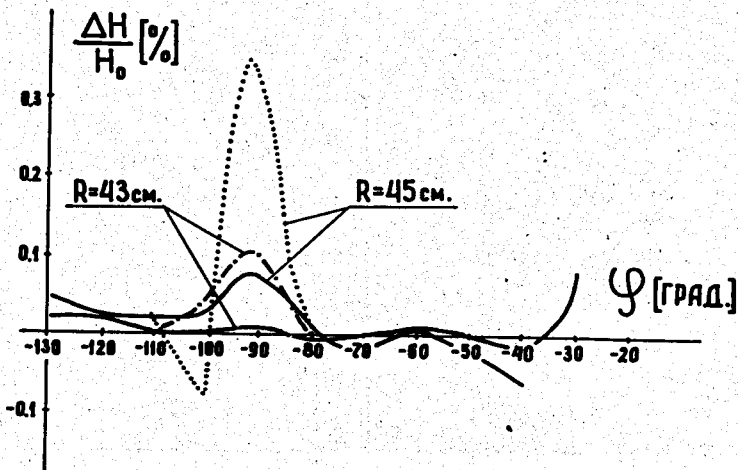


Рис. 3.

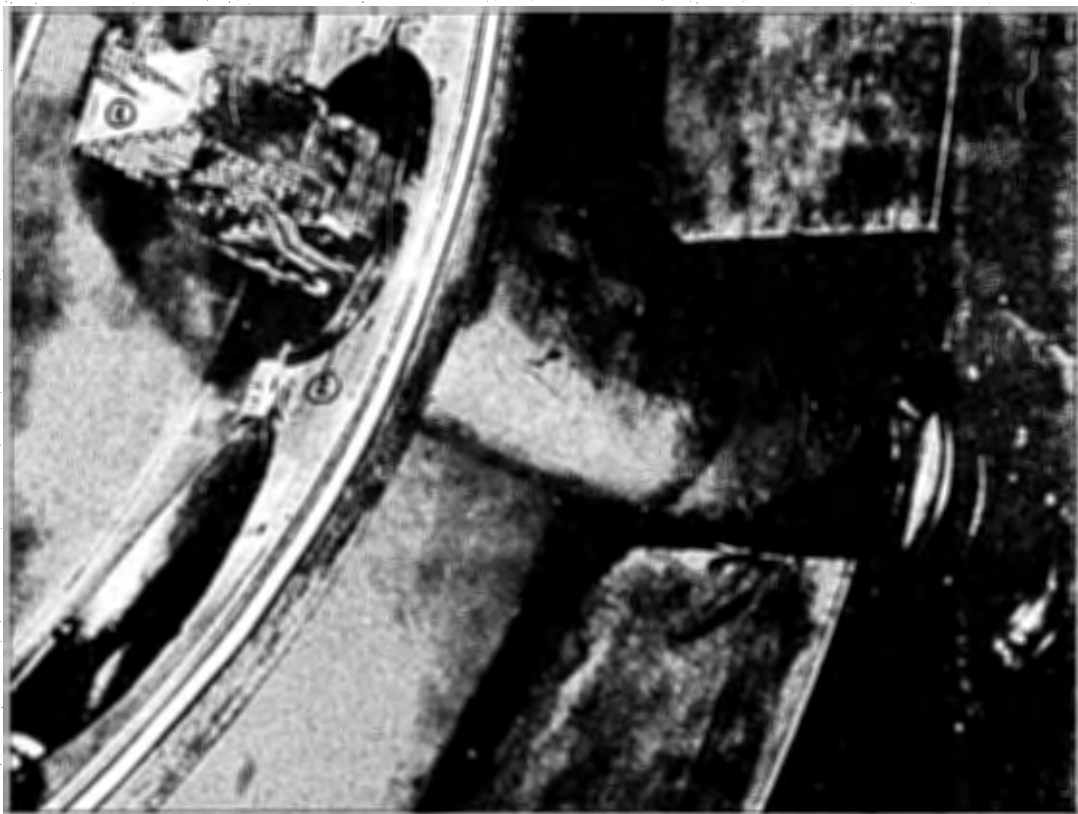


Рис. 4.

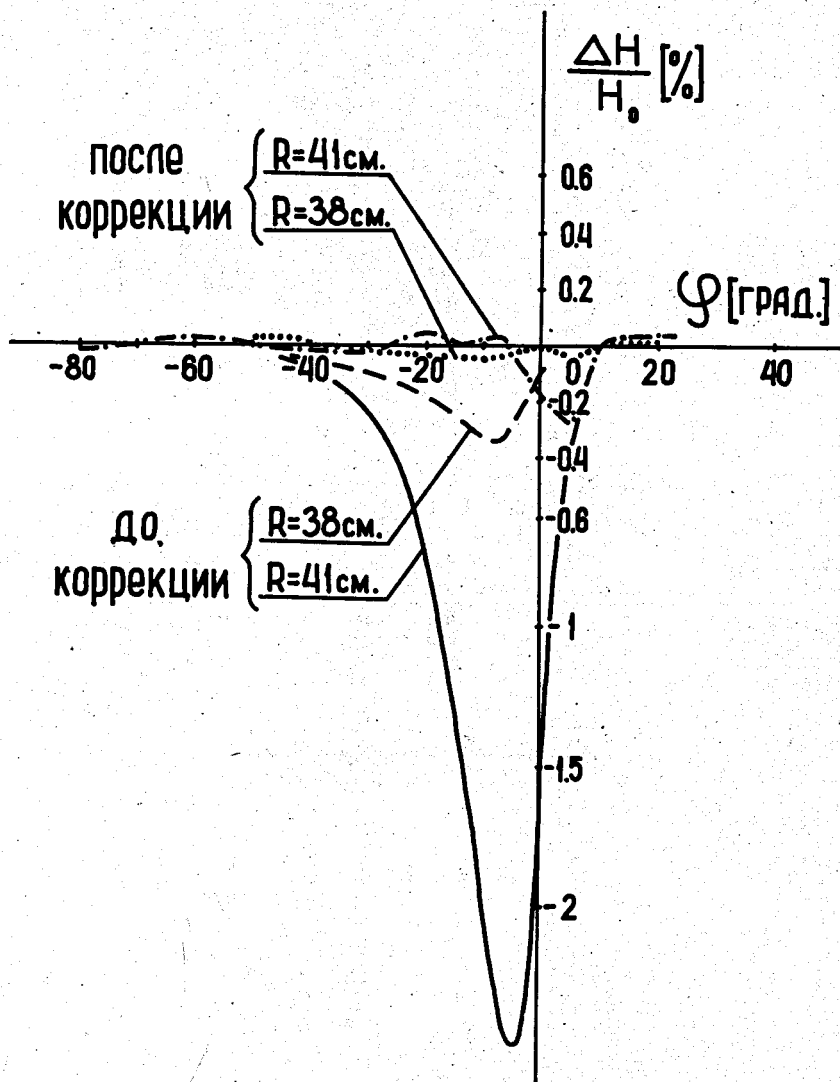


Рис. 5.

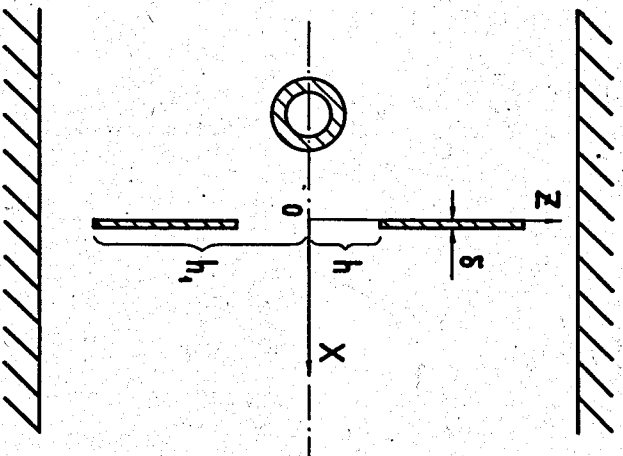


Рис. 6.

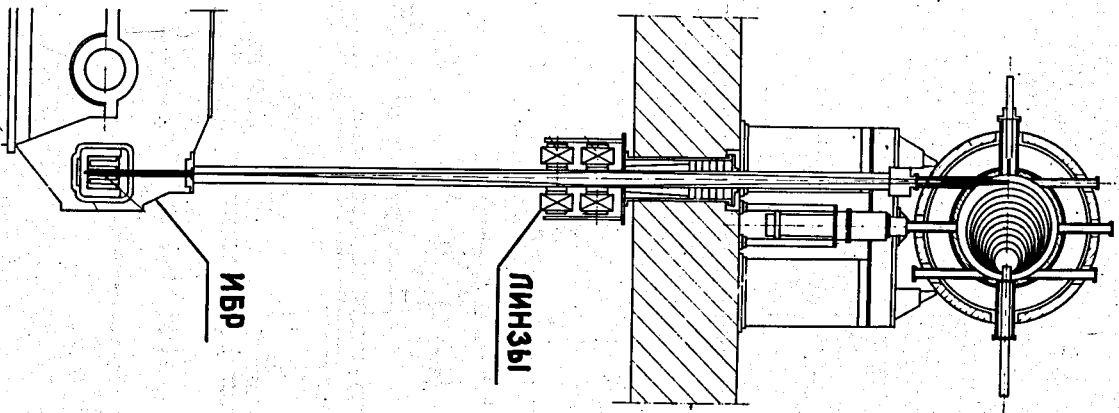


Рис. 7.

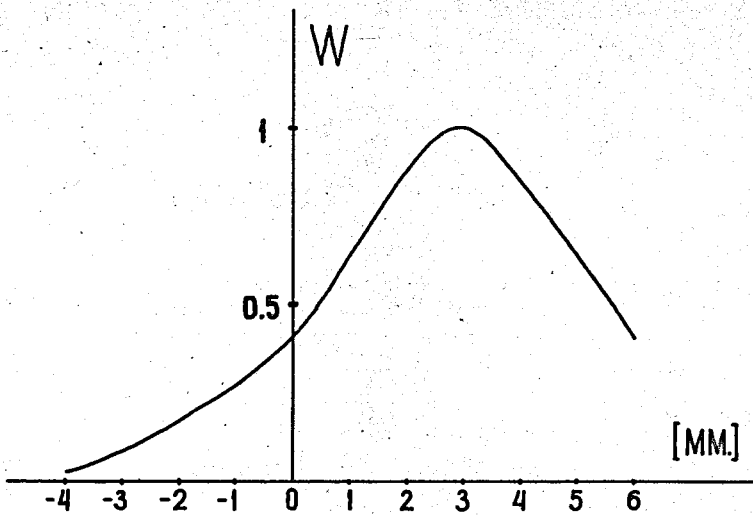


Рис. 8.

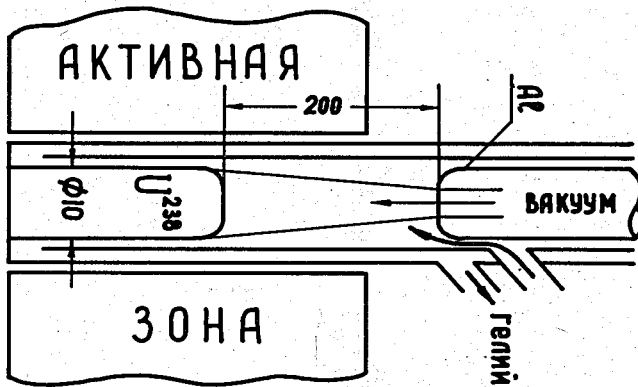


Рис. 8.

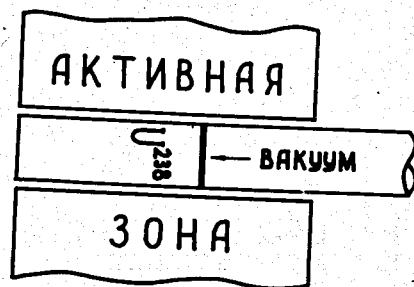


Рис. 10.

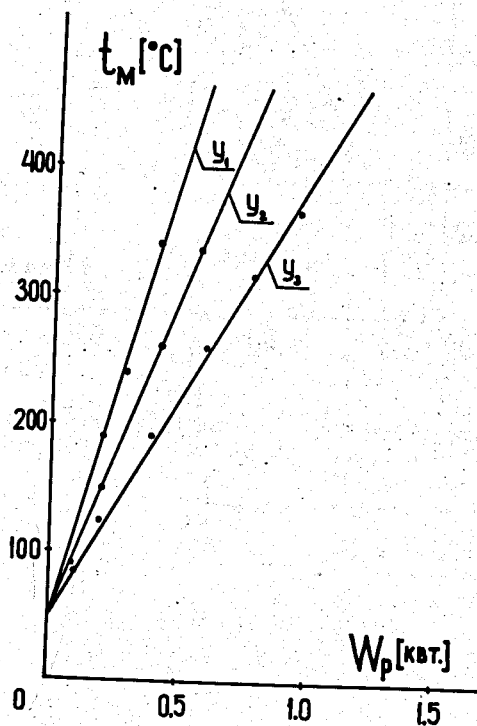


Рис. 11. Температура мишени в зависимости от средней мощности ИБРа ($y_1 = 100$, $y_2 = 150$; $y_3 = 200$; $E_0 = 30$ Мэв).

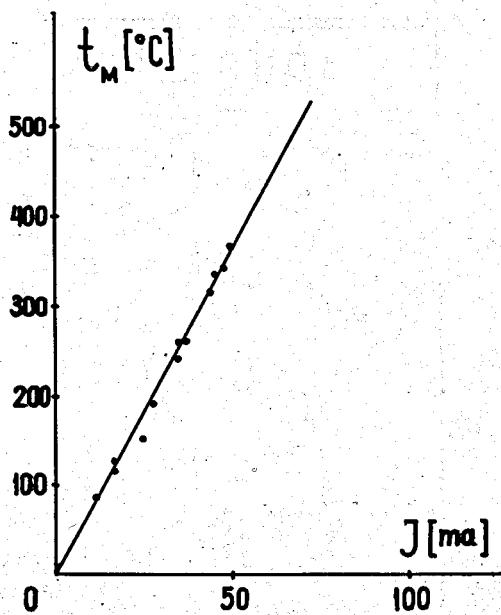


Рис. 12. Зависимость температуры мишени от импульсного тока электронов ($t = 1,8$ мксек, $n = 50$ л/сек; $E_0 = 30$ МэВ).

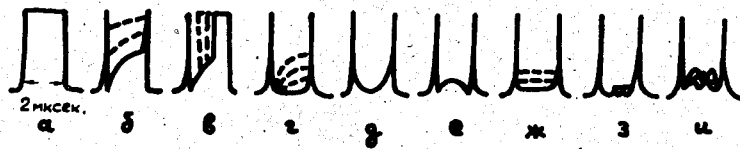


Рис. 13.

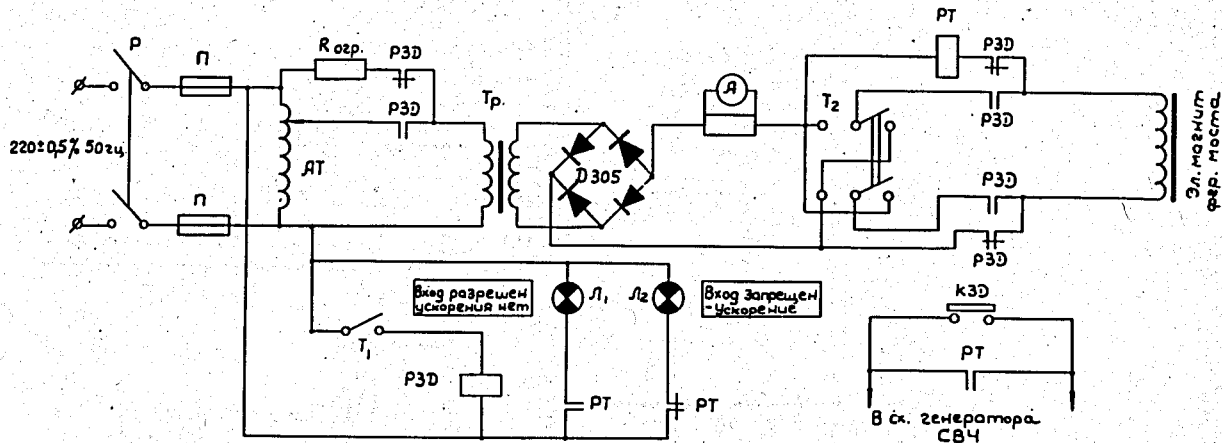


Рис. 14.

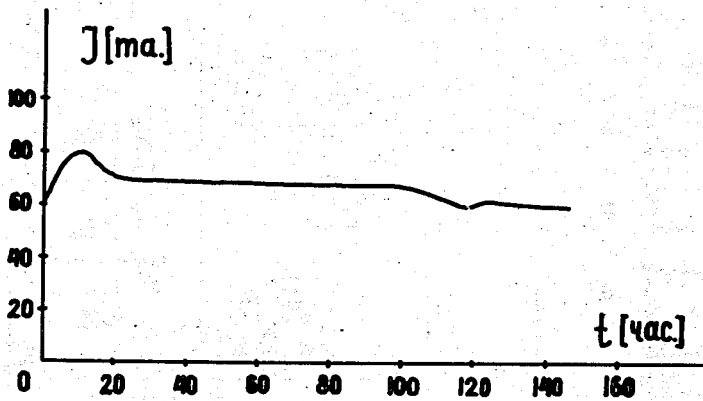


Рис. 15.

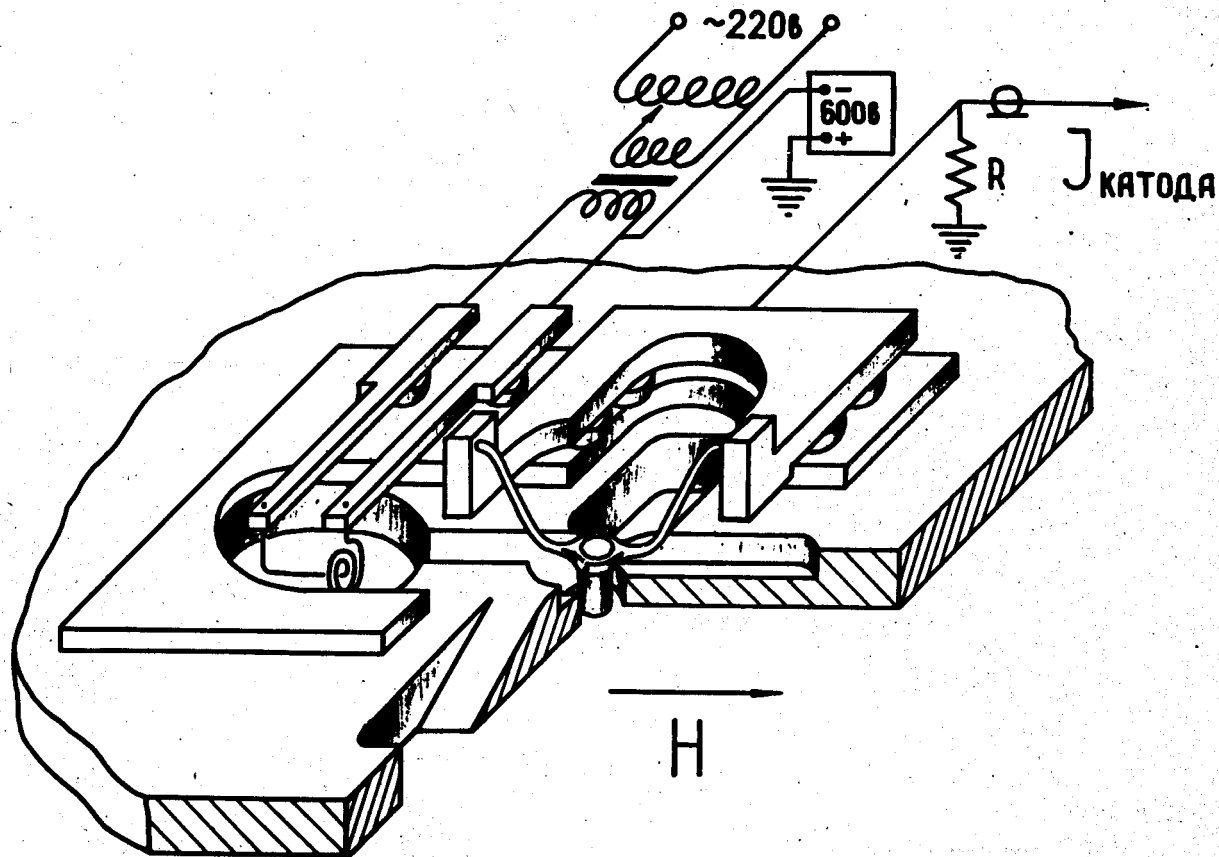


Рис. 16.

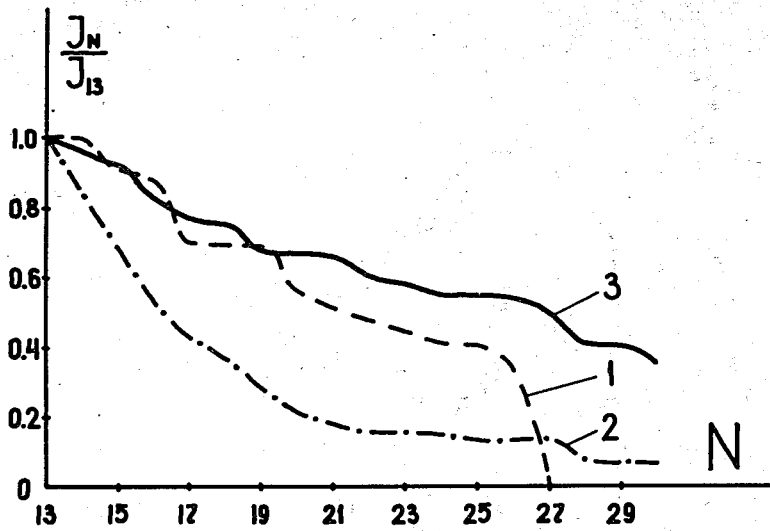


Рис. 17.

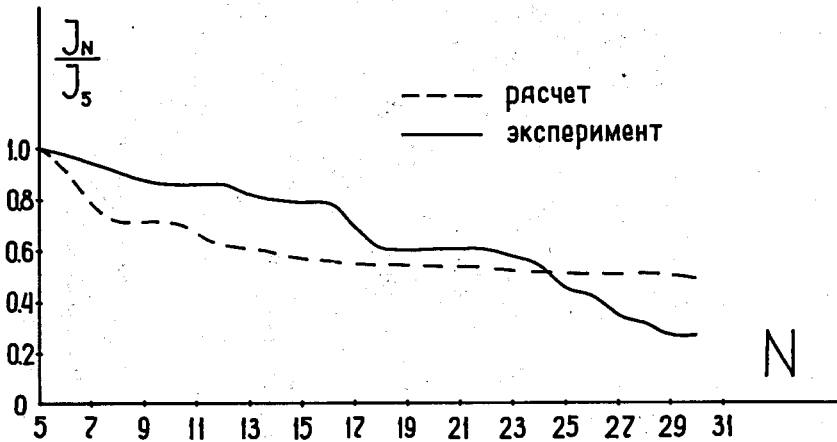


Рис. 18

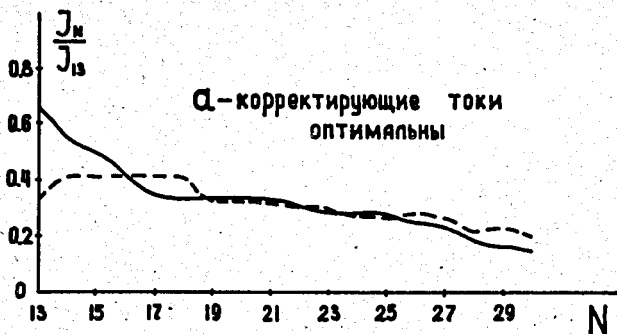


Рис. 19.

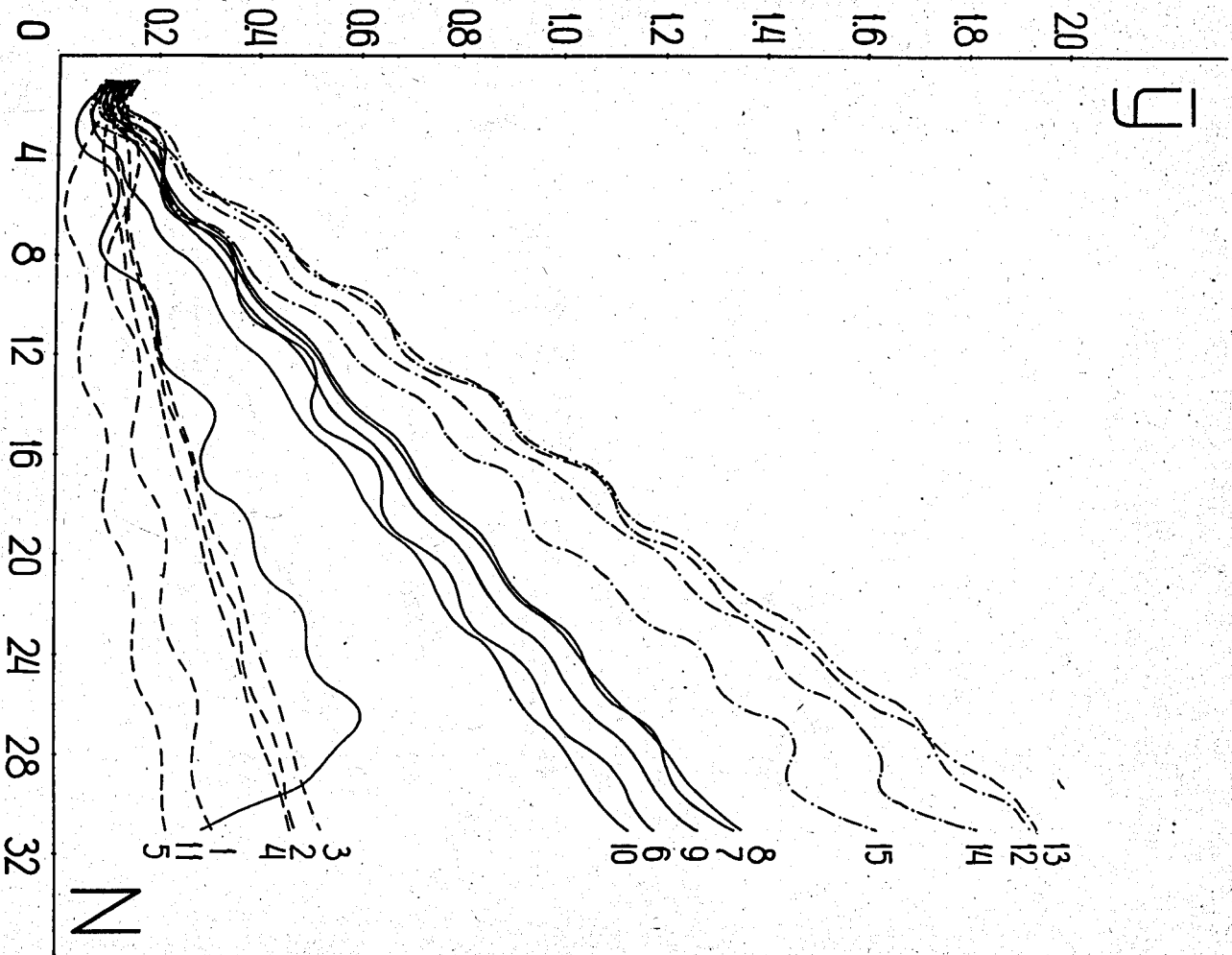


FIG. 20.