

На дом не выдается

2/34

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ

Т Р У Д Ы
V Межвузовской конференции,
Томск, 17—21 марта 1964 г.



АТОМИЗДАТ
Москва 1966

Г 1966
11096

В сборнике помещены доклады, представленные на V Межвузовскую конференцию по электронным ускорителям, которая состоялась в г. Томске 17—21 марта 1964 г.

Доклады представляют интерес для специалистов, работающих в области разработки и изготовления электронных ускорителей, а также для инженеров и научных работников, работающих с ускорителями.

I. ЛИНЕЙНЫЕ И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ

ЗАМ СССР
Институт Науки - ТОХИ
Библиотека

СВЕРЕНО
2/200

43124-66

С
19...

СВЕРЕМО
1983 г.

ОПЫТЫ ПО ОДНОБОРОТНОМУ ЗАХВАТУ В СИНХРОТРОН Б-3М

В. Г. ДАВИДОВСКИЙ, Н. Г. КОНЬКОВ, А. А. НАУМОВ,
В. С. ПАНАСЮК, В. В. ПЕТРОВ, Г. И. ЯСНОВ

Институт ядерной физики СО АН СССР

В Институте ядерной физики СО Академии наук СССР сооружается установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2 на энергию частиц 2×700 Мэв, что соответствует относительной энергии сталкивающихся частиц в 2000 Гэв. Для инжекции электронов в ВЭПП-2 сооружен высоко-точный синхротрон Б-3М, рассчитанный на ускорение электронов до энергии 350 Мэв. Кроме того, на ускорителе Б-3М могут проводиться работы по изучению фотоядерных реакций.

61 Сведения об ускорителе Б-3М сообщались на Международной конференции по ускорителям в Дубне в августе 1963 г. [1]. Поэтому в данном докладе будут кратко сообщены лишь основные данные об установке.

Общая схема ускорителя Б-3М с инжектором и каналом представлена на рис. 1. Инжектором электронов в Б-3М служит высоко-точный импульсный линейный ускоритель (ИЛУ), представляющий собой четвертьволновый спиральный резонатор с добротностью порядка 1000 и резонансной частотой 6,4 МГц, питаемый генератором с мощностью в импульсе 8 Мвт [2]. ИЛУ с действующим в настоящее время резонатором ускоряет электроны до кинетической энергии 1 Мэв и может давать сгусток электронов с током до 40 а в импульсе. Для выделения моно-энергетических электронов применяется электростатический монохроматор [3]. Энергетическому разбросу $\pm 0,5\%$ соответствует длительность сгустка электронов ~ 7 нсек. Сгусток электронов такой длительности заполняет примерно четверть периметра ускорительной дорожки Б-3М.

Установка Б-3М представляет собой синхротрон рейстрек-ового типа с 4 магнитными квадрантами и радиусом равновесной орбиты $r_s = 103$ см. Сечения магнита и камеры Б-3М представлены на рис. 2. Магнитное поле на ускорительной дорожке формируется токопроводящими шинами с соответствующим профи-

лем 1, 2 и железным магнитопроводом 3, которые обеспечивают показатель спада магнитного поля $n \approx 0,6$ почти во всем сечении вакуумной камеры. При такой конструкции магнит ускорителя имеет малые поля рассеяния.

Для однооборотного захвата пучка электронов применен электростатический инфлектор с длительностью импульса ~ 28 нсек и длительностью фронта и среза 3—6 нсек. Длительность оборота электронов с кинетической энергией 1 Мэв состав-

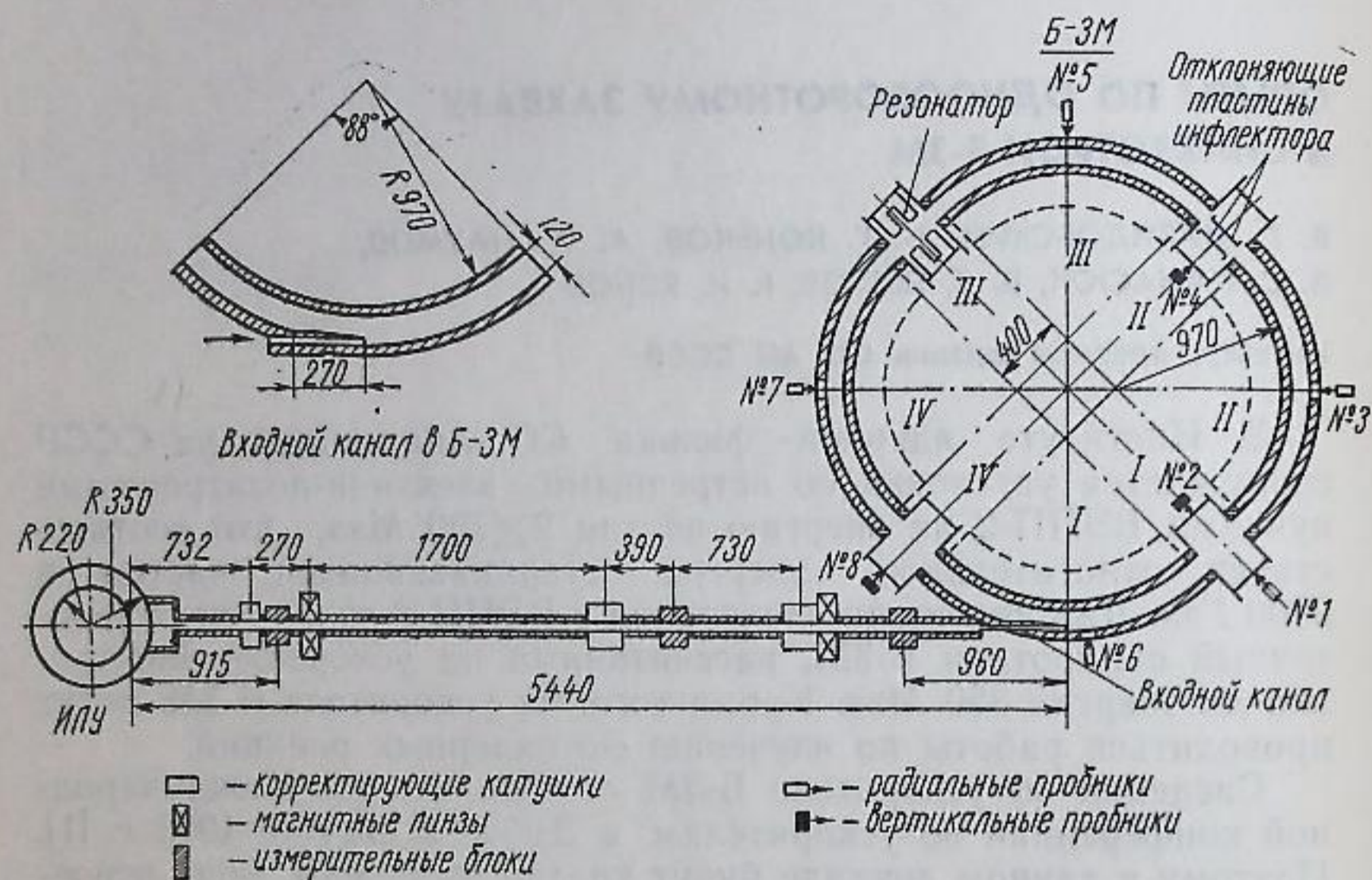


Рис. 1.

ляет ~ 28 нсек. В системе питания инфлектора возникают вторичные импульсы напряжения («хвосты») с максимальной величиной до 15% от амплитуды основного импульса, которые наблюдаются в течение 0,6—0,7 мксек после основного импульса инфлектора. Основной и вторичные импульсы инфлектора приведены на рис. 3. Инфлектор разработан Л. И. Юдиным, С. С. Соболевым и др. [4].

Для управления аппаратурой синхротрона создана система синхронизации, обеспечивающая включение пушки инжектора и отклоняющих пластин инфлектора в нужный момент времени с наносекундной точностью [5].

Расчеты. Сначала рассчитывались траектории электронов на первых оборотах в вертикальной и радиальной плоскостях при отсутствии напряжения на инфлекторе для идеальных магнитных полей с учетом прямолинейных промежутков, а также оценивались возможные искажения медианной поверхности и равновесных орбит с учетом отклонения магнитного поля от идеаль-

ного. Расчет, проведенный по результатам измерений магнитных полей, показал, что отклонение траектории электронов в радиальном направлении из-за смещения равновесной орбиты по сравнению со случаем идеального поля составляет $\sim \pm 1$ см, а отклонение в вертикальной плоскости из-за искажений медианной поверхности порядка ± 1 см.

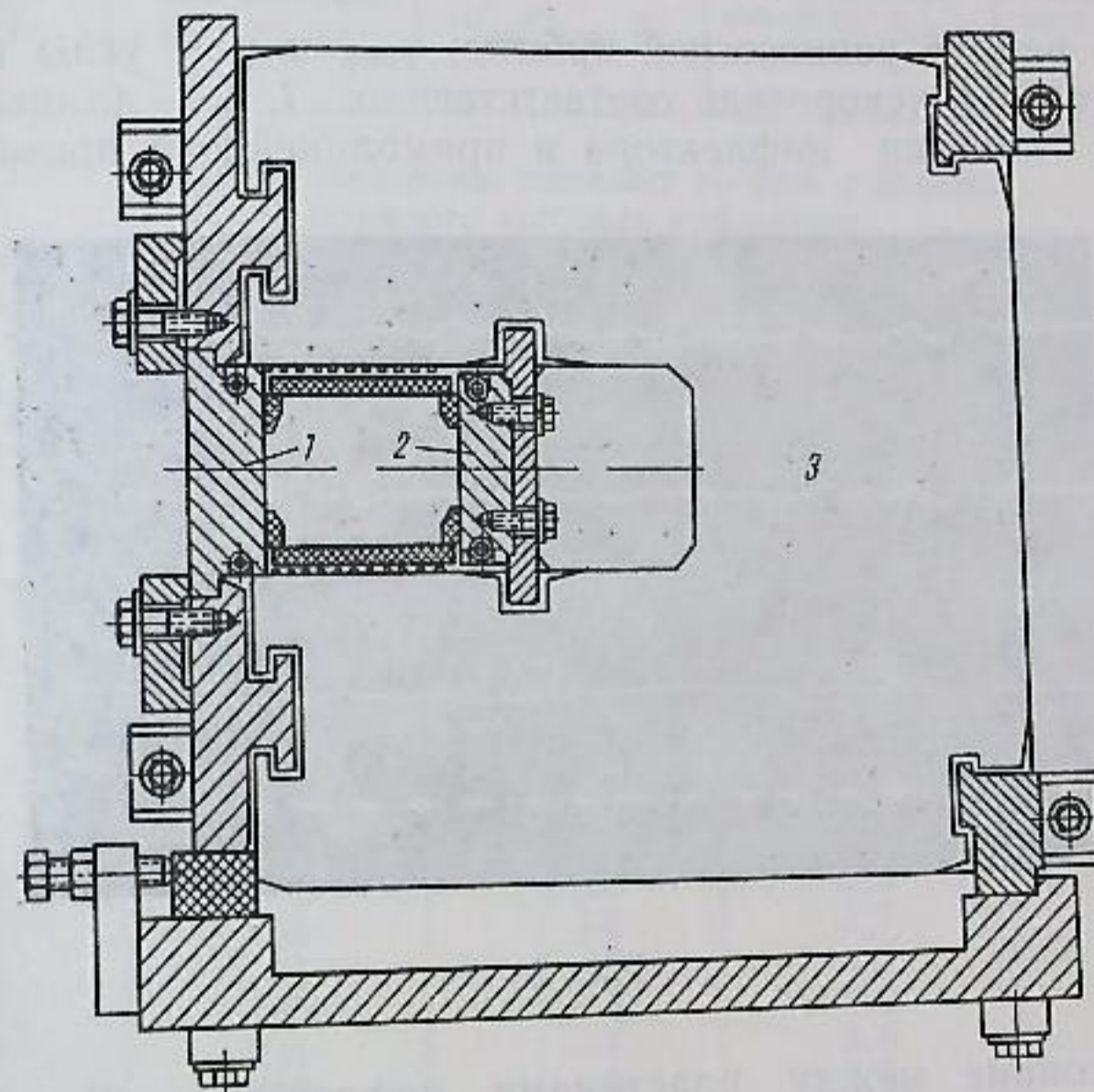


Рис. 2.

Показано, что для реального магнитного поля Б-3М нет опасных резонансов раскачки бетатронных колебаний. Могут иметь место слабые резонансы:

а) резонанс связи между вертикальными и радиальными бетатронными колебаниями при $n=0,59$ ($\nu_r - 2\nu_z = 1$);

б) резонансы радиальных бетатронных колебаний при $n=0,64$ ($\nu_r = \frac{2}{3}$) и $n=0,55$ ($\nu_r = \frac{3}{4}$). Однако область с указанными показателями спада магнитного поля n сравнительно невелика.

Для получения максимального захвата рассчитано оптимальное напряжение на отклоняющих пластинах инфлектора для различных условий входа пучка в ускоритель с учетом энергетического разброса.

Амплитуда радиальных бетатронных колебаний после действия импульса инфлектора ρ как функция напряжения на откло-

няющих пластинах $\dot{U}_{инф}$ и начальных условий выражается следующим соотношением:

$$\rho^2 = \left[\frac{r_s}{\sqrt{1-n}} \left(\gamma_{инф} + \frac{l}{d} \frac{1}{\beta^2} \frac{|eU_{инф}|}{E} \right) \right]^2 + \left[\rho_{инф} + \frac{L}{2} \left(2\gamma_{инф} + \frac{l}{d} \frac{1}{\beta^2} \frac{eU_{инф}}{E} \right) \right]^2,$$

где r_s — радиус равновесной орбиты; $\gamma_{инф}$ и γ_0 — углы входа в инфлектор и в ускоритель соответственно; l, L — длины отклоняющих пластин инфлектора и прямолинейного промежутка;

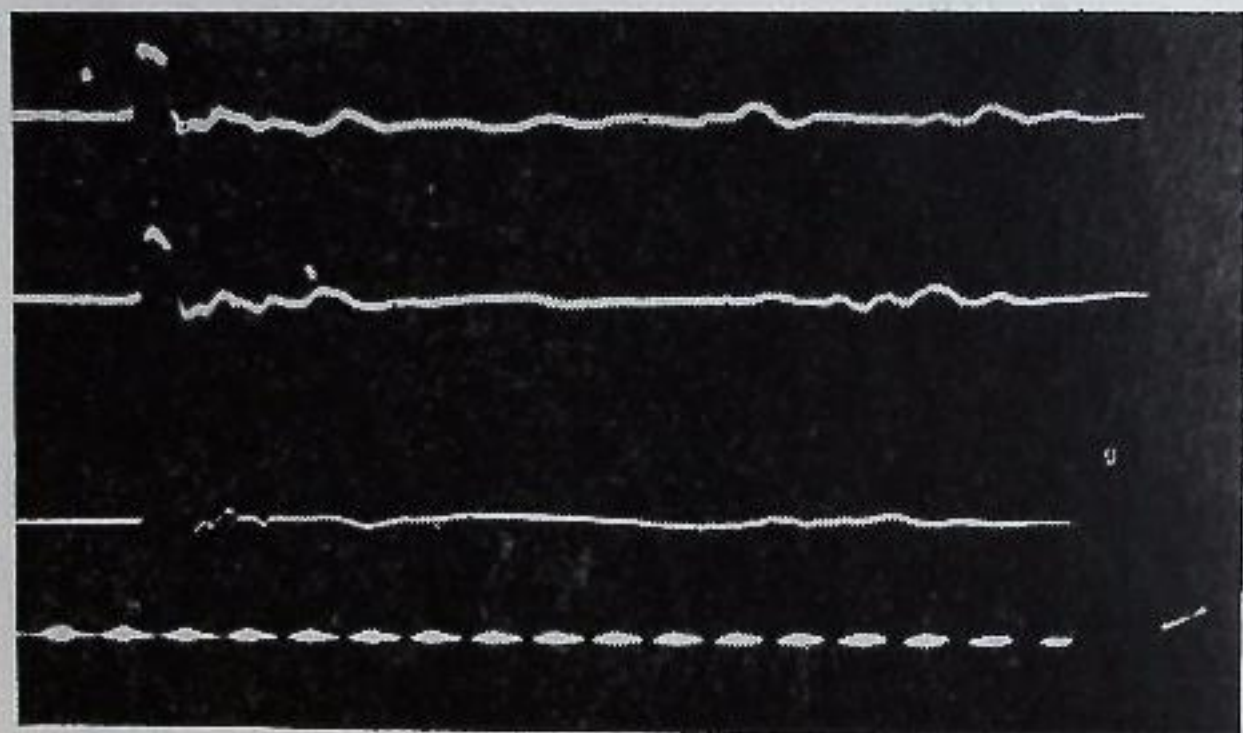


Рис. 3.

d — расстояние между пластинами инфлектора; E — полная энергия электронов, эв; $\rho_{инф}, \rho_0$ — отклонение положения электрона от равновесной орбиты на входе в прямолинейный промежуток и в ускоритель соответственно;

$$\gamma_{инф} = -0,55 \cdot 10^{-2} \rho_0 - 0,1 \gamma_0;$$

$$\rho_{инф} = 1,7 \cdot 10^{-2} \rho_0 + 1,8 \cdot 10^2 \gamma_0.$$

Расчеты показывают, что для идеальной формы импульса напряжения на инфлекторе и для пучка электронов на входе в Б-ЗМ с соответствующим фазовым объемом могут быть получены электроны с малыми амплитудами радиальных бетатронных колебаний.

Однако вторичные импульсы напряжения инфлектора (см. рис. 3) приводят к тому, что амплитуда радиальных бетатронных колебаний изменяется в зависимости от величины и фазы этих импульсов. В табл. 1 приведены результаты расчета изменения максимальных и минимальных амплитуд радиальных бетатронных колебаний, возникающих при воздействии вторич-

ных импульсов напряжений инфлекторной системы на пучок электронов. Расчет носит качественный характер, так как не известно точное значение ν_r — отношение частоты радиальных бетатронных колебаний к частоте обращения.

Действие вторичных импульсов («хвостов») напряжения инфлектора на радиальные бетатронные колебания

Таблица 1

Номер оборота	Время от основного импульса до «хвоста», нсек	$U_{вт}/U_{осн}, \%$	Максимальная амплитуда $\rho_{макс}, см$	Минимальная амплитуда $\rho_{мин}, см$
---------------	---	----------------------	--	--

Сгусток электронов совпадает по фазе с началом основного импульса инфлектора

0	0	+100	3,3	0
1	28	4	3,3	0
2	56	+8	3,8	0
3	84	-11	3,3	0,3
6	168	-7	3,0	0,2
7	196	-13	3,3	0,9
8	224	-5	3,7	0,9
19	530	-7	3,2	0,8
20	560	-7	3,5	0,2
21	590	-15	3,7	0,4

Сгусток электронов совпадает по фазе с концом основного импульса инфлектора

0	0	+100	3,3	0
2	56	+4	3,7	0
3	84	-7	3,5	0
7	196	-8	3,4	0,5
8	224	-7	3,8	0,4
19	530	-9	3,8	0,3
21	590	-8	3,2	0,1

Примечание. $\frac{U_{вт}}{U_{осн}}$ — отношение амплитуд напряжения вторичного импульса инфлектора для данного оборота к основному импульсу; $\rho_{макс}, \rho_{мин}$ — максимальные и минимальные амплитуды бетатронных колебаний после действия инфлектора.

Из этой таблицы видно, что амплитуды радиальных колебаний вначале могут увеличиваться, а затем уменьшаться.

Из приведенных расчетов захвата пучка электронов следует, что значительная часть пучка с фазовым объемом $+1,5 \cdot 10^{-2} рад \cdot см$ и энергетическим разбросом $\frac{\Delta W}{W} = \pm 0,5\%$

будет захвачена. На установке Б-ЗМ эти условия выполнимы.

Приведенные выше данные дали возможность начать эксперименты по захвату пучка с уверенностью в получении положительных результатов. Целью экспериментов на первом этапе была проверка расчетов и уточнение параметров элементов установки, определяющих захват и движение пучка.

Методика измерений. Основным индикатором величины захваченного тока служит пояс Роговского с чувствительностью $\sim 0,7$ мв/ма, помещенный в одном из прямолинейных промежутков. Структура пучка и его положение в камере на первых оборотах и структура захваченного тока исследовались с помощью пробников, расставленных в различных местах по азимуту камеры. В зависимости от задачи эксперимента выбиралась соответствующая форма пробника: в виде пластин или нити. Каждый пробник может перемещаться либо по вертикали, либо по горизонтали и управляется дистанционно. Кроме того, структура пучка на различных азимутах изучалась по форме гамма-излучения от сброса пучка на тот или иной пробник. Для регистрации гамма-излучения применялись сцинтилляционные счетчики СЧ-4 с кристаллами стибьбена. Постоянная времени счетчика составляла 0,1 мксек.

Сброс пучка осуществлялся наложением регулируемого по величине синусоидального магнитного поля на основное магнитное поле. При этом момент включения сброса пучка относительно момента инжекции можно регулировать от 1 до 100 мксек. Сброс пучка можно осуществлять на наружную и внутреннюю мишени. Методика измерений разрабатывалась таким образом, чтобы основные данные по изменению интенсивности пучка электронов определялись двумя независимыми методами.

Так, например, наружная граница пучка определялась:

1) по моменту начала уменьшения захваченного тока, измеренного поясом Роговского при введении пробника или нити от наружной шины;

2) по моменту начала гамма-импульса при сбросе на наружную шину.

Оба метода дали совпадающие результаты.

Результаты экспериментов. С помощью пучка электронов проводилось окончательное исследование магнитных полей. Эти исследования показали, что орбита немного искажена и имеет небольшое отклонение медианной поверхности от средней плоскости камеры.

Шунтирование одного квадранта специальной индуктивностью позволяет получить движение электронов в радиальной плоскости по траекториям, близким к расчетным. В связи с тем что искажения медианной поверхности, вызывающие отклонение пучка дополнительно на ± 1 см, составляют небольшую величину от высоты рабочей камеры (8,5 см), корректировка медианной поверхности пока не производилась.

Определялось положение пучка на азимуте отклоняющих пластин инфлектора в зависимости от начального фазового объема. Показано, что соответствующим подбором углов входа пучка в ускоритель можно обеспечить оптимальные для захвата условия входа в инфлектор.

Зависимость величины захваченного тока от начальных условий на входе в ускоритель представлена в табл. 2. Видно, что оптимальные условия захвата осуществляются в соответствии с расчетом при небольшом наклоне пучка на входе в сторону внешней шины.

Зависимость величины захваченного тока от начального фазового объема

Таблица 2

Фазовый объем пучка на входе в ускоритель ($\Delta r=1$ см)		Захваченный ток по поясу Роговского, ма
ϵ , рад	γ , рад	
$+2 \cdot 10^{-2}$	$\pm 6 \cdot 10^{-3}$	1—2
$-5 \cdot 10^{-3}$	$\pm 1 \cdot 10^{-2}$	7—8
$-3 \cdot 10^{-3}$	$\pm 6 \cdot 10^{-3}$	10

Примечание. ϵ — угол между осью пучка и касательной к орбите в точке входа в ускоритель (положительный угол направлен к равновесной орбите); γ — угловой растроп пучка на входе в ускоритель.

Далее производилось определение структуры захваченного пучка. На рис. 4 приведена структура захваченного пучка в радиальном направлении, полученная с помощью пробников — пластин и нити; величина захваченного тока при этом определялась по поясу Роговского. (На рис. 4: а — пучок с большой «дырой» и «щелью», б — пучок с меньшей «дырой» и «щелью».)

Отличие структур пучка, измеренных по нити и пробнику, объясняется тем, что при введении пробника в пучок частицы с амплитудой бетатронных колебаний, большей, чем расстояние от края пробника до оси пучка, за несколько оборотов попадают на пробник, в то время как вероятность попадания на тонкую нить очень мала и электроны могут попасть на нить за несколько сот оборотов. Как отмечалось выше, под действием хвостов инфлектора в течение 20—30 оборотов пучок может расширяться, а затем сжаться. Пробник регистрирует максимальные амплитуды бетатронных колебаний, а с помощью нити регистрируются амплитуды колебаний установившегося пучка. Указанный эффект подтверж-

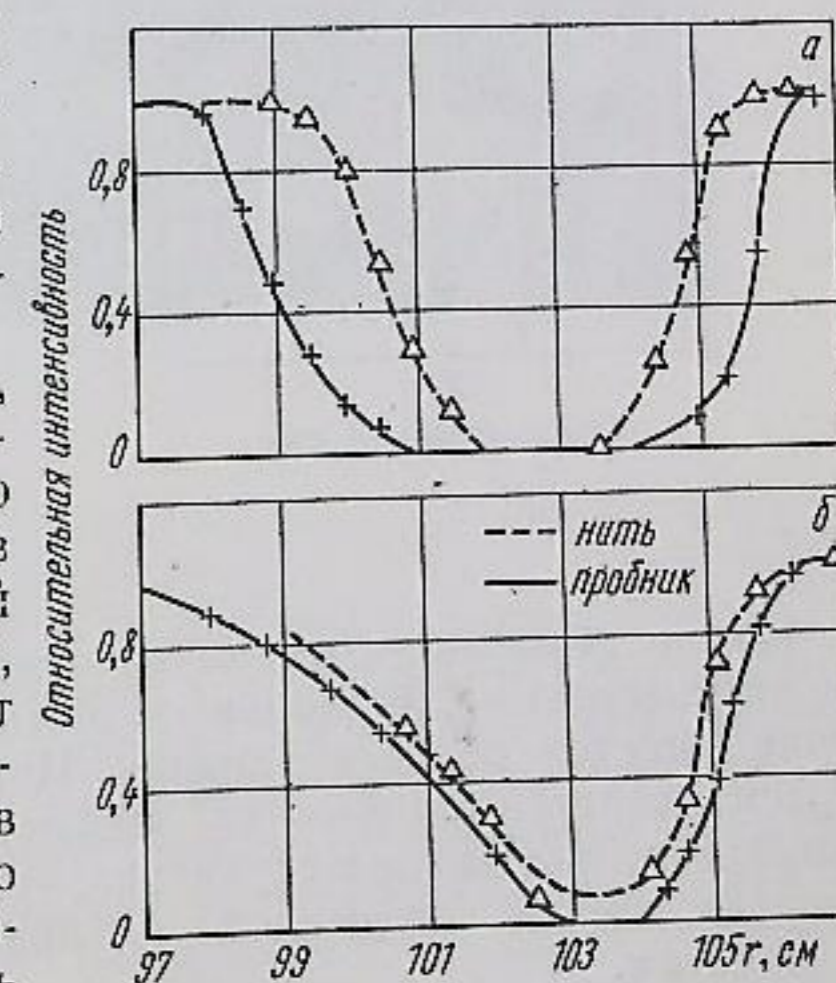


Рис. 4.

дается посредством измерения времени от начала включения магнитного поля «сброса» до момента появления гамма-импульсов. Возмущающее действие хвостов инфлектора обнаруживается также по всплескам гамма-излучения, возникающего в моменты времени, соответствующие появлению паразитных импульсов напряжения на инфлекторе.

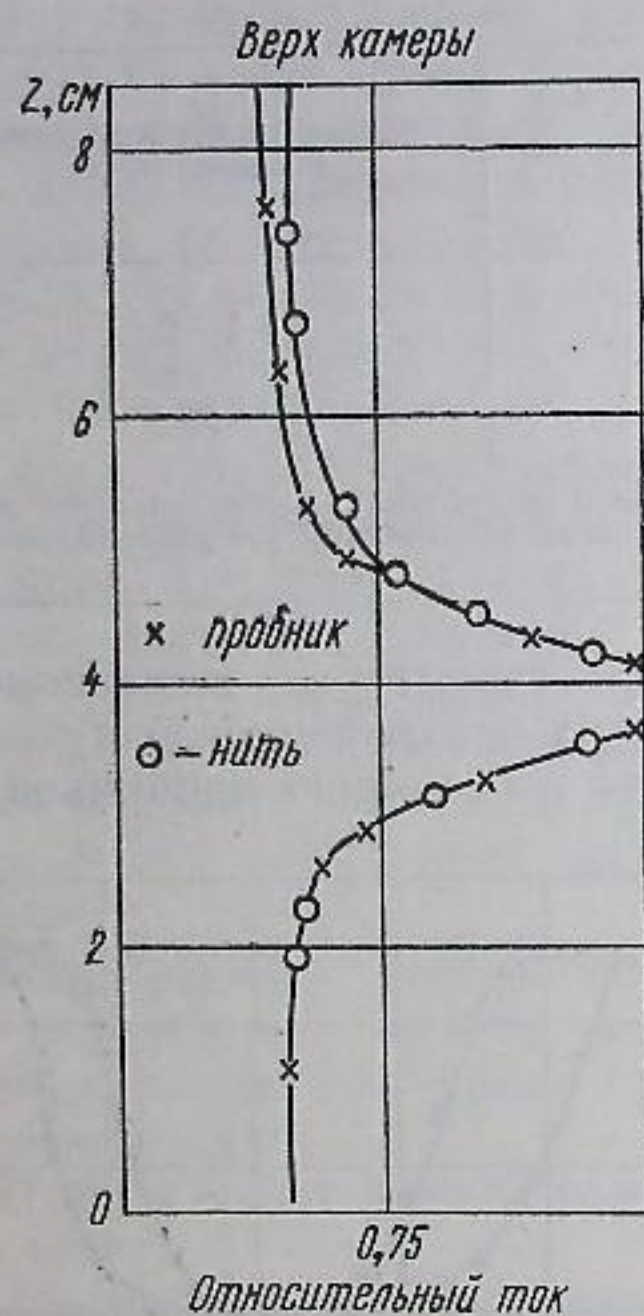


Рис. 5.

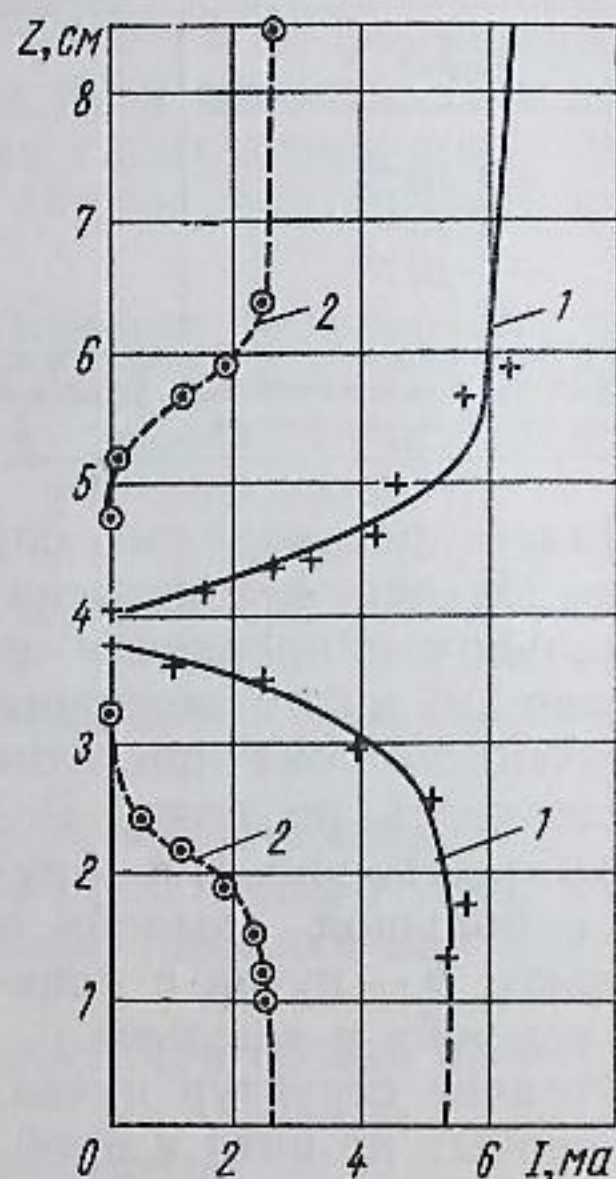


Рис. 6.

Из рис. 4 видно, что в захваченном пучке нет частиц с малыми амплитудами радиальных бетатронных колебаний, т. е. в пучке имеется полость — дыра. Наличие дыры в пучке объясняется действием хвостов инфлектора. При подборе фазы импульсов инфлектора структура пучка получалась значительно лучшей: пучок сжимался и размеры дыры уменьшались до $\pm 0,5$ см.

На рис. 5 приведена структура пучка в вертикальной плоскости, определенная с помощью пробников и нити. В этом случае не наблюдается разницы в показаниях нити и пробника; щель отсутствует. Этот опыт дополнительно подтверждает предположение о расклатке радиальных колебаний хвостами инфлектора.

Дыра в пучке по вертикали не образуется, если положение и наклон вводимого пучка по вертикали согласованы с искаженной

медианной поверхностью. Соответствующим выбором положения фазового объема пучка на входе в ускоритель можно образовать дыру в пучке по вертикали (рис. 6). (На рис. 6 кривая 1 относится к настроенному пучку, кривая 2 — к ненастроенному.) Коэффициент бетатронного захвата по предварительным данным для малых электронных токов лежит в пределах $0,7 \div 1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первый этап работы по настройке синхротрона Б-3М показал, что основные соображения, использованные при разработке установки, оказались правильными. Однооборотный захват пучка электронов осуществляется надежно и устойчиво.

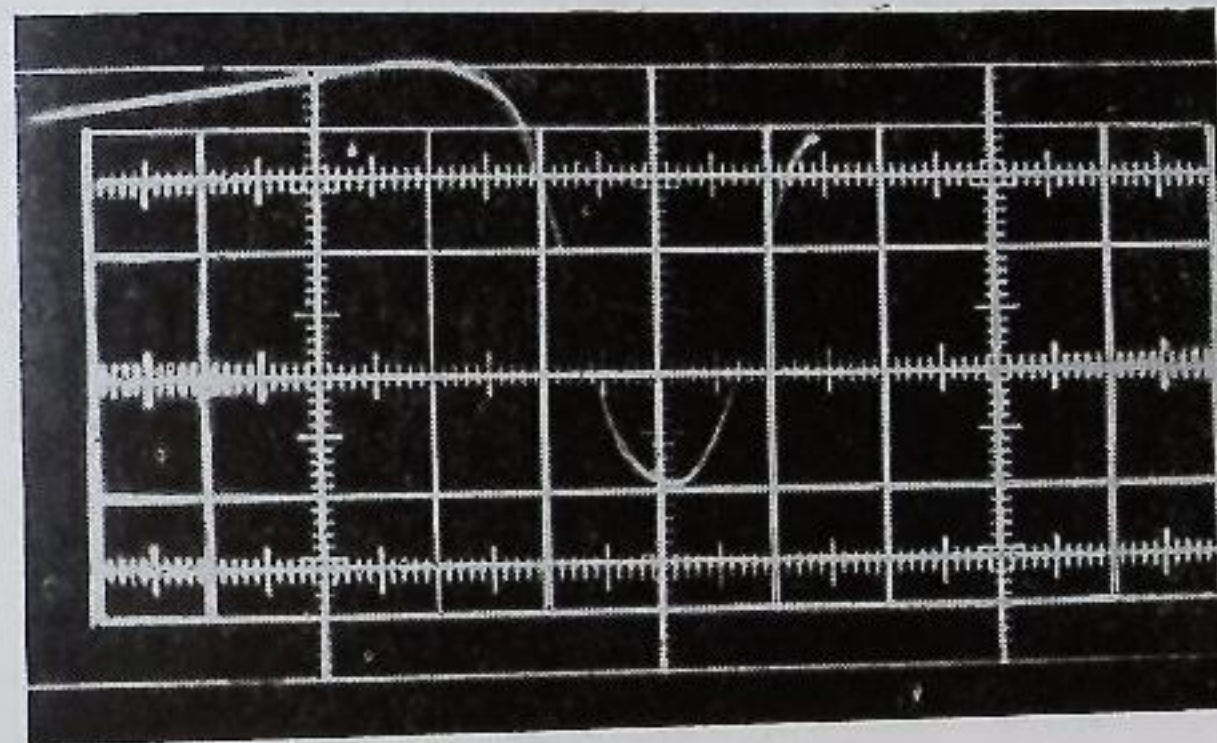


Рис. 7.

Кроме опытов с малыми токами были предварительно поставлены эксперименты с захватом больших токов. Получен захват пучка электронов со средним циркулирующим током до $0,7$ а, что соответствует 10^{11} электронам в импульсе. На рис. 7 приведена осциллограмма импульса с пояса Роговского, соответствующего захваченному току порядка 700 ма. Возможности установки не исчерпаны, и в дальнейшем будут проводиться улучшения.

Получены первые результаты по синхротронному захвату пучка. По предварительным данным осуществлен удовлетворительный синхротронный захват. В настоящее время установка Б-3М подготавливается для синхротронного ускорения с модуляцией высокой частоты ускоряющего поля ($106 \div 112$ Мгц) и нарастанием амплитуды напряжения на резонаторе по адиабатическому закону, обеспечивающему отсутствие увеличения амплитуды синхротронных колебаний. Одновременно подготавливается система однооборотного выпуска пучка ускоренных электронов из синхротрона. В этой системе введение пучка в

дефлектор осуществляется с помощью модуляции частоты ускоряющего поля.

Авторы выражают благодарность Г. М. Протопоповой и Л. Я. Грабировской, выполнившим работы по численному расчету захвата пучка электронов в квазибетатронный режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будкер Г. И. и др. «Работы по сильноточным ускорителям ИЯФ СО АН СССР. Сильноточные ускорители с однооборотным захватом инжектируемых электронов». Доклад на Международной конференции по ускорителям заряженных частиц. Дубна, август 1963.
2. Гриц Ю. А. и др. «Сильноточные высоковольтные электронные ускорители для однооборотной инжекции в синхротрон». Доклад на Международной конференции по ускорителям заряженных частиц. Дубна, август 1963.
3. Гельцель М. Ю. и др. «Электрический затвор пучка электронов». Доклад на V Межвузовской научной конференции по электронным ускорителям. Томск, март 1964. (см. настоящий том).
4. Гельцель М. Ю. и др. «Генератор наносекундных импульсов для инфлектора синхротрона». Доклад на V Межвузовской конференции по ускорителям заряженных частиц. Томск, март 1964 (см. настоящий том).
5. Егоров А. А. и др. «Прибор для точной синхронизации пусковых импульсов с фазой высокочастотного напряжения». Доклад на конференции по ядерной электронике. Москва, февраль 1964.

РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ В ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

А. А. ВОРОБЬЕВ, А. Н. ДИДЕНКО

Идея создания волноводного циклического ускорителя была высказана еще в 1958 г. [1]. Ее главное преимущество состоит в том, что она позволяет обеспечить большие приросты энергии за один оборот частицы и поэтому сильно сократить время ускорения. Кроме того, в волноводных циклических ускорителях на большие энергии относительно просто осуществляется компенсация потерь на излучение. Однако для реализации этой идеи потребовалось решить ряд вопросов. Прежде чем дать ответ на вопрос о перспективности таких ускорителей, нужно было выяснить следующее:

- 1) как изменится динамика частиц из-за наличия всех компонент высокочастотного поля;
- 2) каков наиболее вероятный диапазон рабочих частот;
- 3) какие из замедляющих систем могут быть использованы;
- 4) какова эффективность ускоряющих систем волноводных циклических ускорителей;
- 5) как может быть решена проблема экранирования волноводной ускоряющей системы в управляющем магнитном поле;
- 6) какие преимущества вообще имеют волноводные системы перед обычными резонаторами и в каких случаях их целесообразно использовать.

Над решением этих вопросов работала группа сотрудников Томского политехнического института под руководством А. А. Воробьева. Позднее работы по волноводным циклическим ускорителям с ссылкой на приоритет томских ученых проводились также в Институте вакуумной электроники в Чехословакии [2] и в Ассоциации университетов Среднего Запада в США [3]. В конце 1961 г. в Чехословакии был запущен волноводный ускоритель на энергию 1,5 Мэв.

В данном докладе приводятся некоторые основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных сотрудниками Томского политехнического института по