

гию), и характеризуются рядом существенных экономических особенностей, не имеющих или почти не имеющих аналогов в других отраслях промышленности. Такие вопросы, как установление научно обоснованных норм платы за основные производственные фонды и оборотные средства АЭС и предприятий топливного цикла, научно обоснованное установление цен в области атомной энергетики, соответствующих затратам общественно необходимого труда, научная разработка экономических нормативов, методических положений и т. д., требуют на основе специальных исследований в области экономики атомной энергетики решений в ближайшие годы.

В связи с этим весьма важное значение приобретает уровень экономических знаний для специалистов в области атомной энергетики. Необходимо, чтобы каждый из них отчетливо понимал смысл и значение для социалистической экономики таких важных экономических категорий, как стоимость, себестоимость, цена, прибыль, кредит и т. д.

Коммунистическая партия и Советское правительство всячески поддерживают развитие научно-исследовательских и экспериментальных работ во многих областях науки и техники, в том числе и в области атомной энерге-

тики в нашей стране. Наши ученые, инженеры и специалисты получают все необходимое от государства для успешного решения больших задач, стоящих перед ними. Вот почему высокий уровень научно-технических разработок и новых исканий в Советском Союзе в области атомной энергетики привлекает внимание зарубежных научных центров, занимающихся атомной энергетикой.

Широкий обмен научно-технической информацией позволяет ученым и специалистам избегать многих ошибок, ненужных и параллельных работ и быстрее находить правильные пути для решения всех научно-технических вопросов, возникающих перед ними.

Нам есть что показать иностранным ученым и специалистам и в первую очередь ученым социалистических стран, есть чем поделиться. Однако мы хорошо понимаем, что еще очень много надо сделать в этой новой отрасли народного хозяйства для получения экономичной, полностью конкурентоспособной энергетики, использующей чудесную силу атомного ядра.

Ученые и специалисты-атомники готовы с честью выполнить решения XXIII съезда КПСС и положить в сокровищницу человеческих знаний новые достижения советской атомной энергетики.

## Запуск синхротрона Б-3М — инжектора для позитрон-электронного накопителя \*

Г. И. БУДКЕР, А. В. КИСЕЛЕВ, Н. Г. КОНЫКОВ, А. А. НАУМОВ,  
В. И. НИФОНТОВ, Г. Н. ОСТРЕЙКО, В. С. ПАНАСЮК, В. В. ПЕТРОВ,  
Л. И. ЮДИН, Г. И. ЯСНОВ

УДК 621.384.612.12

Приводится описание методики настройки синхротрона с внешней однооборотной инжекцией и однооборотным выпуском электронов со специальной конструкцией электромагнита.

В работах [1—3] сообщалось, что инжектором для накопителя встречных позитрон-электронных пучков ВЭПН-2 является импульсный синхротрон Б-3М. Синхротрон имеет кольцевой электромагнит ( $R = 1$  м) С-образного сечения с четырьмя прямолинейными промежутками по 40 см каждый, который работает в импульсном режиме (рис. 1). Магнитное поле в рабочей области формируется наклоном полюсов и соответствующим профилем прямой и обратной шин, обеспечивающими показатель спада магнитного поля  $n = 0,6$ . На рис. 2

показаны кривые различных значений показателя спада магнитного поля без коррекции. Характерной особенностью конструкции синхротрона является то, что электромагнит и вакуумная камера представляют собой единое целое. Токонесущие шины играют роль вертикальных стенок вакуумной камеры. Крышки сделаны из оргстекла. Рабочий вакуум в камере  $2 - 3 \cdot 10^{-6}$  торр.

Рабочая апертура камеры составляет 90 мм по радиусу и 85 мм по высоте. Электромагнит возбуждается системой питания, обеспечивающей получение однополярных импульсов тока синусоидальной формы длительностью  $1,5 \cdot 10^{-3}$  сек и вспомогательным генератором, создающим квазипостоянное поле при инжекции. Форма магнитного поля показана на рис. 3. Плавное нарастание скорости

инжекции к режиму ускорения осуществляется с помощью насыщающихся дросселей, включенных последовательно с электромагнитом.

Инжектором для синхротрона Б-3М служит высокоточный импульсный линейный ускоритель ИЛУ [4]. На первом этапе работ исполь-

зовался инжектор, обеспечивающий энергию электронов  $1-1,5$  Мэв при длительности импульса  $\tau \approx 7$  нсек и энергетическом разбросе  $\pm 0,5\%$ . В синхротроне принята однооборотная инжекция. Электроны впускаются в тот момент, когда равновесная орбита находится в середине

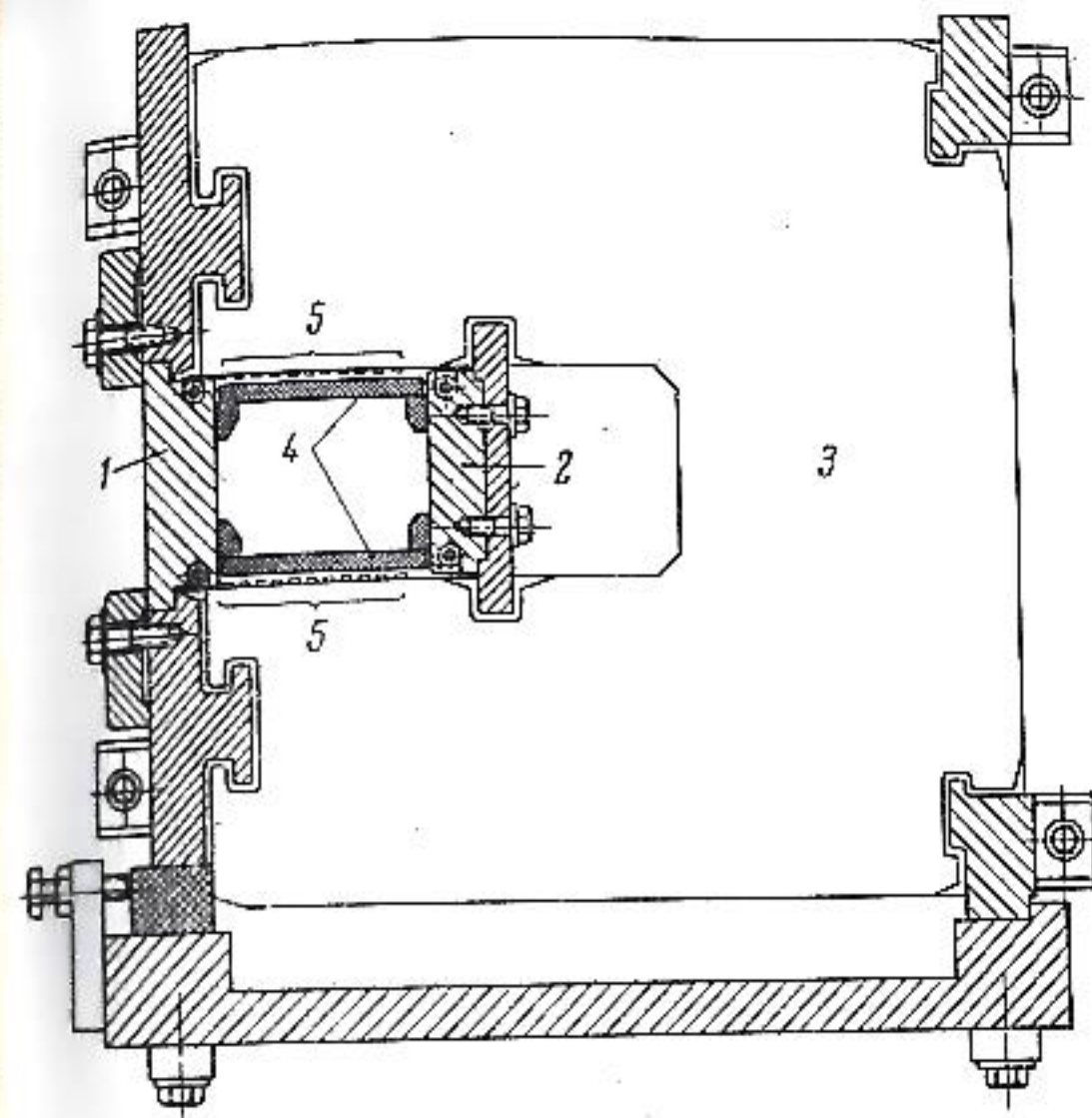
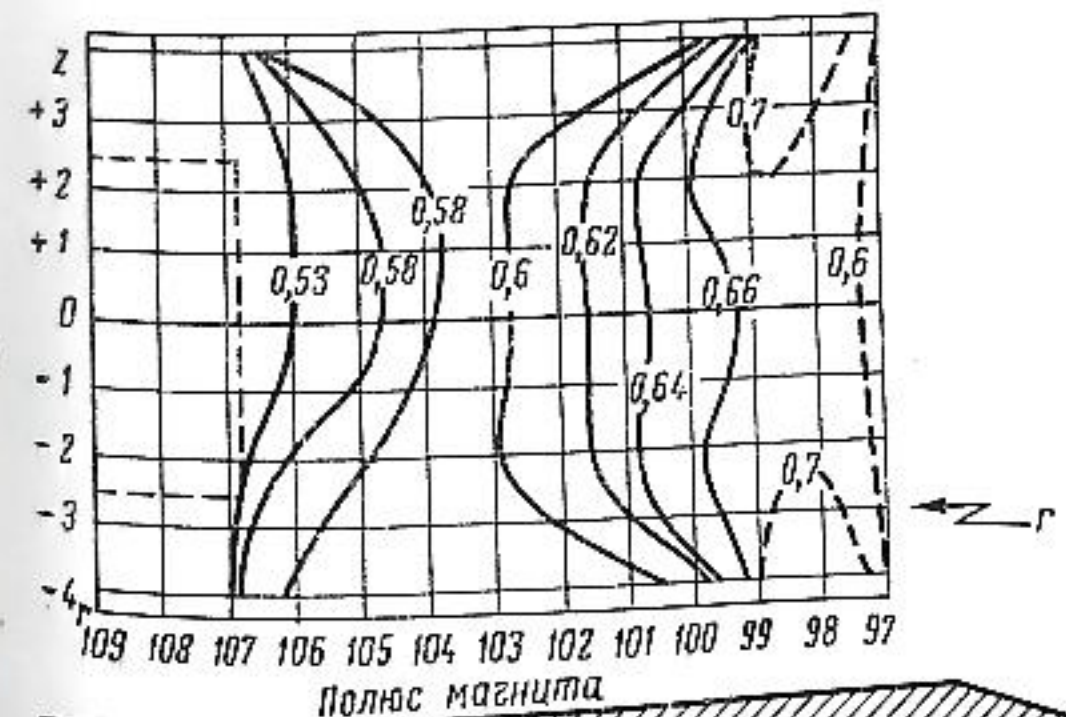


Рис. 1. Разрез электромагнита:

1 — наружная шина; 2 — внутренняя шина; 3 — магнитопровод; 4 — крышки из оргстекла; 5 — корректирующие катушки.



Контур входного канала

Рис. 2. Распределение показателя спада магнитного поля в камере.

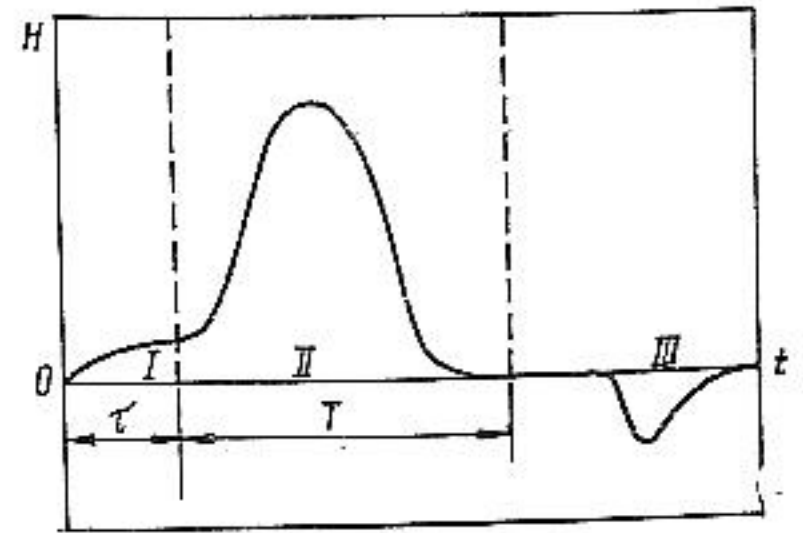


Рис. 3. Магнитное поле в синхротроне Б-3М:

I — поле инжекции ( $\tau = 750$  мксек); II — основное поле ( $T = 1,5$  мсек); III — импульс размагничивания. Масштаб полей не выдержан.

рабочей области камеры. Однооборотный захват осуществляется с помощью электростатического инфлектора, расположенного в прямолинейном промежутке на расстоянии четверти длины волны радиальных бетатронных колебаний от места впуска [5]. Длительность импульса напряжения на инфлекторе 25 нсек. К концу первого оборота напряжение с инфлектора снимается за время, равное  $\sim 3$  нсек (рис. 4).

При проверке системы однооборотной инжекции был получен коэффициент захвата, близкий к единице, для пучка с энергетическим разбросом на входе в ускоритель  $\Delta E/E = \pm 5 \cdot 10^{-3}$  и фазовым объемом  $10^{-2}$  рад·см в режиме малых токов, когда действием объемного заряда можно пренебречь.

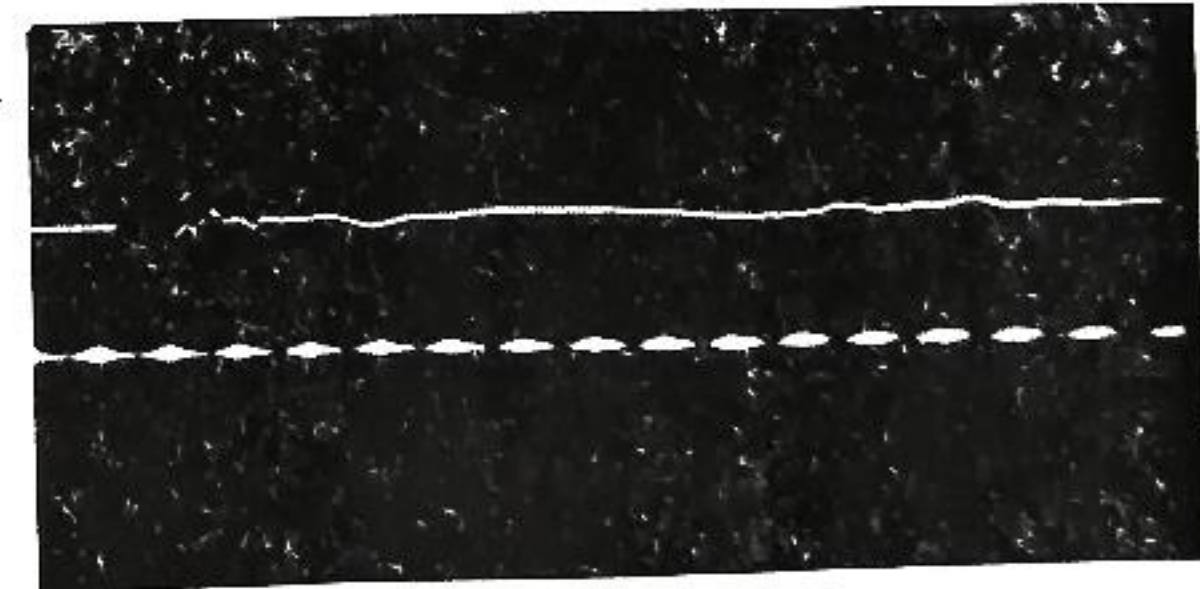


Рис. 4. Импульс напряжения на инфлекторе. Метки времени соответствуют 50 нсек.



Ускорение в синхротроне происходит по третьей гармонике частоты обращения частиц. Частота ускоряющего напряжения в начале цикла ускорения изменяется от 108,4 до 113,7 Мгц в соответствии с ростом энергии (рис. 5). В конце ускорения пучок смещается к наружной стенке камеры, что достигается понижением частоты до 109,5 Мгц. После этого пучок выпускается. Необходимая равномерность ускоряющего напряжения обеспечивается резонатором, имеющим добротность  $Q = 12$ .

Чтобы повысить коэффициент синхротронного захвата и устранить потери в процессе ускорения, вводится модуляция амплитуды ускоряющего напряжения в начале цикла ускорения (рис. 6).

Были проверены два варианта захвата в синхротронный режим: включение ВЧ-напряжения до впуска электронов и через 10—20 мксек после впуска. В первом случае в камере ускоряются один или два сгустка, так как

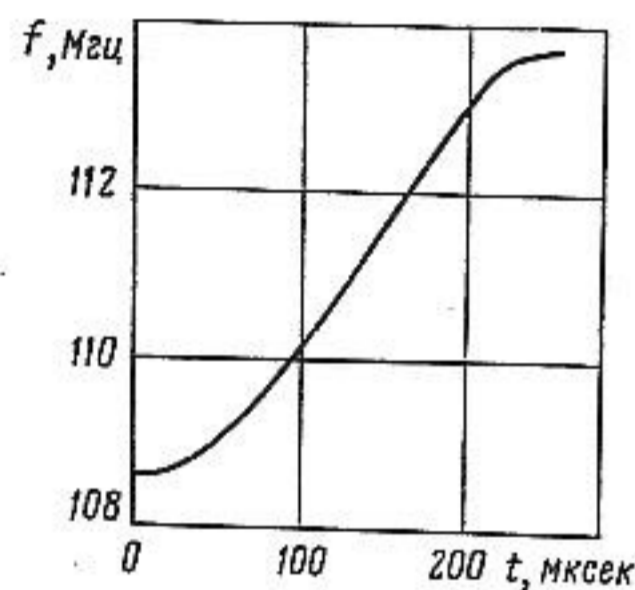


Рис. 5. Изменение частоты в начале ускорения.

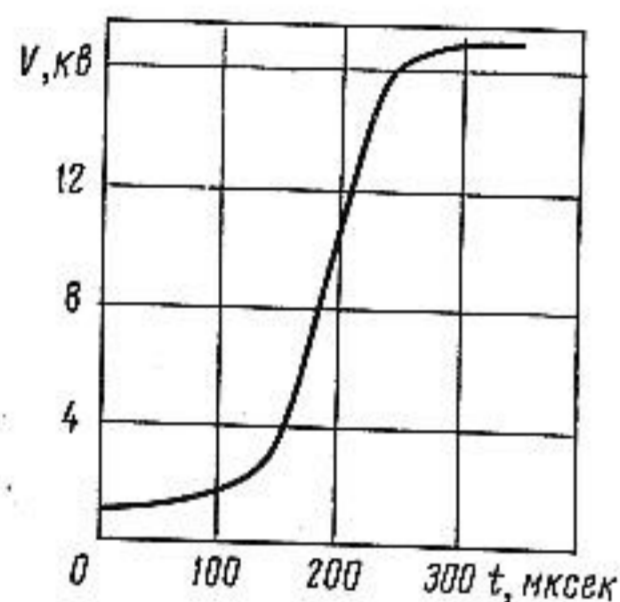


Рис. 6. Изменение амплитуды ускоряющего напряжения в начале ускорения.

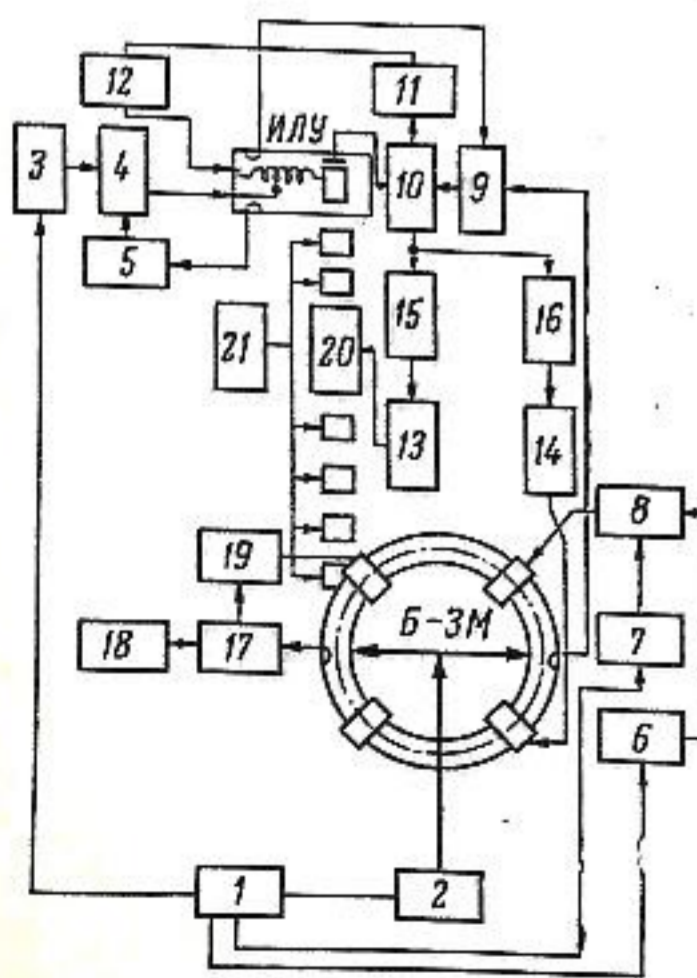


Рис. 7. Блок-схема аппаратуры синхротрона Б-3М:

- 1 — блок пусковых импульсов;
- 2 — система возбуждения электромагнита;
- 3 — модулятор ВЧ-генератора;
- 4 — ВЧ-генератор ИЛУ;
- 5 — фазовращатель;
- 6 — система частотной модуляции ВЧ-генератора;
- 7 — система амплитудной модуляции ВЧ-усилителя;
- 8 — ВЧ-усилитель;
- 9 — счетно-решающее устройство;
- 10 — блок фиксации фазы;
- 11 — линия задержки;
- 12 — генератор импульсов электронной пушки;
- 13 — генератор импульсов электронного затвора;
- 14 — генератор импульсов инфлектора;
- 15, 16 — линия задержки;
- 17 — блок сравнения напряжений;
- 18 — опорное напряжение;
- 19 — генератор импульсов дефлектора;
- 20 — электронный затвор;
- 21 — блок питания электронов канала.

впускаемый пучок вследствие малой длительности не может заполнить три сепаратрисы. Во втором случае пучок предварительно разгруппируется и при включении ВЧ-напряжения образуются три сгустка. В обоих режимах ускорения получены примерно одинаковые средние токи ускоренных электронов. Однако при втором режиме ускорения ток выпущенного пучка более стабилен, что является существенным при настройке накопителя.

По окончании цикла ускорения производится однооборотный выпуск электронов с помощью дефлектора, представляющего собой короткозамкнутую длинную линию, на которую подается импульсное напряжение от генератора высоковольтных наносекундных импульсов.

Малая длительность цикла ускорения и принятая система инжекции обусловили весьма жесткие требования к импульсной и высокочастотной электронной аппаратуре синхротрона. В частности, при инжекции пучок управляется с помощью генераторов высоковольтных (до 50 кВ) наносекундных импульсов, синхронизованных с запускающим импульсом с точностью до 1 нсек [6].

Из-за трудностей, связанных со стабилизацией импульсных устройств питания электромагнита и ускоряющего напряжения ускорителя ИЛУ, оказалось необходимым использовать в цикле инжекции специальное счетно-решающее устройство. Оно открывает электронную пушку ускорителя в тот момент, когда напряженность магнитного поля на орбите пучка и ускоряющее напряжение ИЛУ достигают такой величины, при которой равновесная орбита вводимых частиц находится посредине ускоряющей камеры.

Блок-схема аппаратуры синхротрона изображена на рис. 7.

Для измерения положения и структуры впущенного в камеру сгустка и распределения захваченного пучка в камере применялись пробники в виде свинцовых или медных пластин различных размеров и форм, а также в виде тонких нитей. Они использовались в качестве индикаторов тока, подвижных диафрагм и мишеней при регистрации тормозного излучения.

Тормозное излучение регистрировалось сцинтилляционным счетчиком с по-

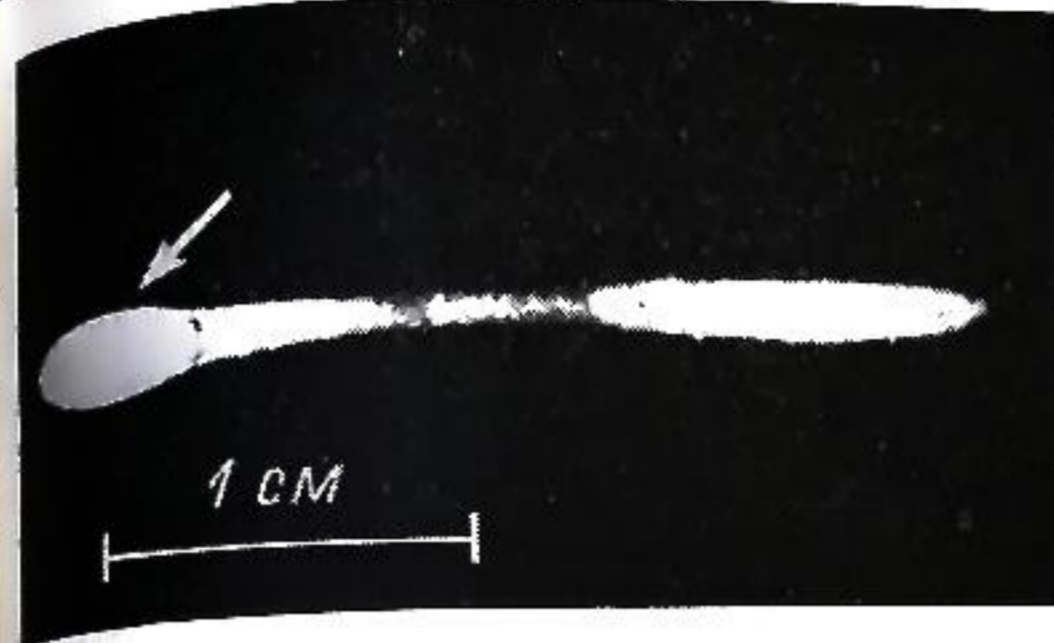


Рис. 8. Видимое излучение электронов перед выпуском. Видно ядро, соответствующее движению электронов по орбите постоянного радиуса перед выпуском.

стоянной времени  $10^{-7}$  сек. Структура пучка в квазибетатронном режиме изучалась по форме тока и  $\gamma$ -импульсов при сбросе электронов посредством расширения и стягивания орбиты.

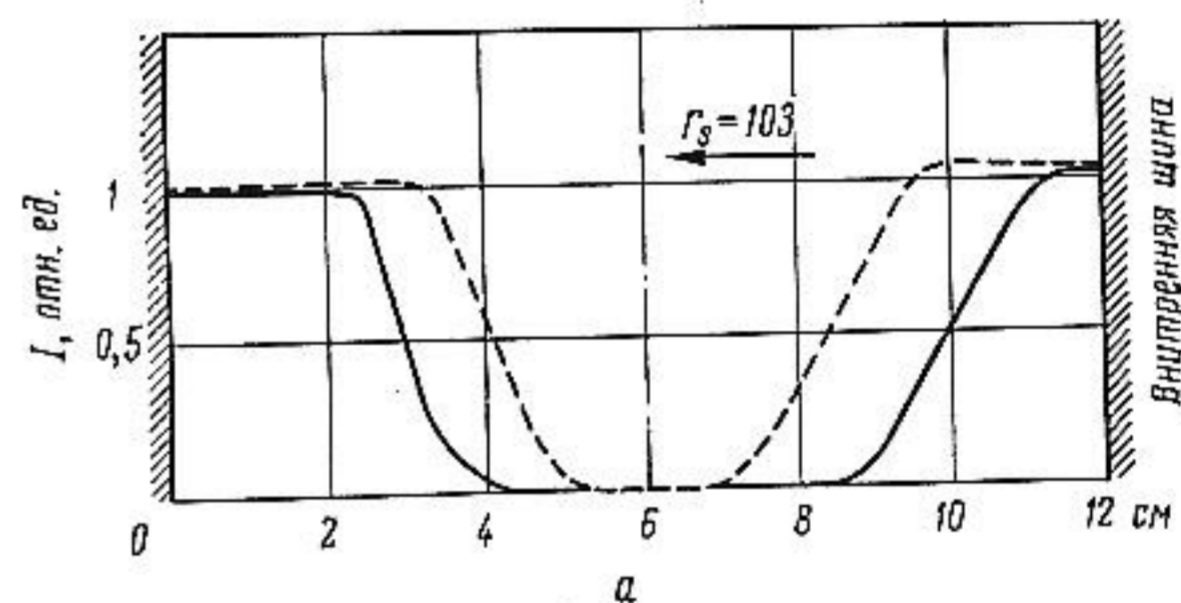
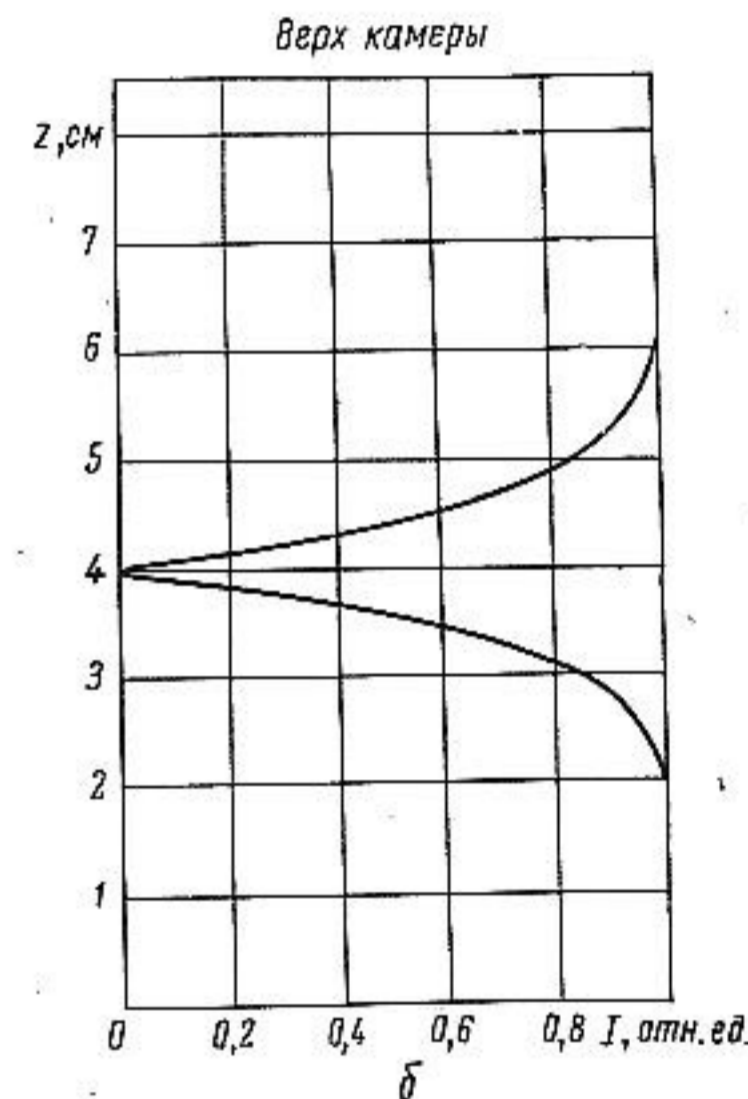


Рис. 9. Распределение тока по камере в квазибетатронном режиме:

- a — распределение по радиусу, измеренное пластиной (—) и нитью (---) ( $r_s$  — радиус синхротронной орбиты);
- b — распределение по высоте (измерения при помощи пластины и нити дали совпадающие результаты).



В синхротронном режиме радиальные размеры пучка и положение орбиты определялись с помощью изменения частоты ускоряющего напряжения по заданному закону. Размеры пучка электронов в конце ускорения при энергии выше 50 Мэв определялись также по видимому излучению пучка (рис. 8).

Как показали оценки, отраженные импульсы инфлектора (см. рис. 4), затухающие в течение 20 оборотов, могут привести к увеличению и последующему уменьшению радиальной амплитуды бетатронных колебаний. Одновременное применение пробников-пластин и пробников-нитей позволило исследовать динамику формирования поперечной структуры пучка после захвата. Как видно из рис. 9, амплитуда ради-

альных бетатронных колебаний в процессе установления уменьшается.

Величина тока измерялась поясом Роговского с чувствительностью 0,7 в/а. Пояс градуировался по току в измерительном витке с точностью  $\pm 5\%$ . Для наблюдения за быстрыми изменениями тока в процессе ускорения применялся пикап-электрод. Можно было наблюдать сигналы, пропорциональные первой и третьей гармоникам циркулирующего тока.

Синхротрон Б-3М обеспечивает настройку накопителя ВЭПП-2 в режиме:  $E = 100 \div 130$  Мэв,  $I \approx 100$  ма ( $1,6 \cdot 10^{10}$  электронов в импульсе), частота повторения один раз в секунду (определяется временем затухания колебаний электронов в накопителе); попе-

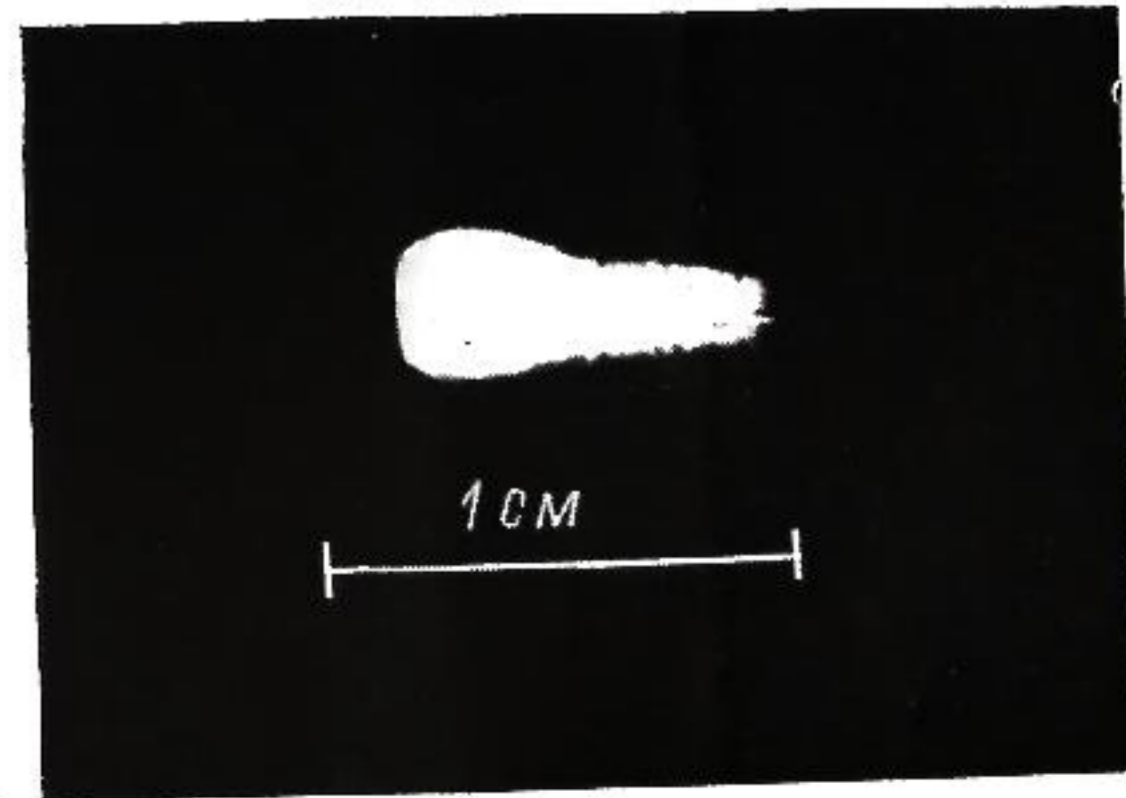


Рис. 10. Выпущенный пучок.



речный размер выпущенного пучка  $\Delta z = 3$  мм,  $\Delta r = 7$  мм при угловой расходимости  $\Delta\alpha = \pm 1,5 \cdot 10^{-3}$  (рис. 10). Эффективность пучка порядка 0,9.

В последнее время временный инжектор заменен основным [4] с энергией инжекции 2,5—3 Мэв и длительностью импульса инжекции 15 нсек. Это позволило начать программу по повышению тока ускоренных частиц и довести его уже при первых опытах до величины более  $10^{11}$  частиц в импульсе.

Поступила в Редакцию 22/XI 1965 г.

### Фазовая неустойчивость интенсивного электронного пучка в накопителе

В. Л. АУСЛЕНДЕР, М. М. КАРЛИНЕР, А. А. НАУМОВ, С. Г. ПОПОВ, А. Н. СКРИНСКИЙ, И. А. ШЕХТМАН

УДК 621.384.4

Рассмотрены радиально-фазовые автоколебания в накопительных кольцах при больших токах пучка. Получены условия устойчивости в случае произвольной частотной характеристики ускоряющей системы. Учено также взаимодействие пучка с ускоряющей системой и другими элементами вакуумной камеры на гармониках частоты обращения сгустка. Приведены некоторые результаты экспериментального исследования самовозбуждения фазовых колебаний в накопителе Института ядерной физики Сибирского отделения АН СССР.

В 1959 г. при разработке программы создания накопителей заряженных частиц для экспериментов на встречных пучках Г. И. Будкер и А. А. Наумов высказали предположение, что благодаря взаимодействию пучка с резонатором или другими элементами вакуумной камеры при больших токах возможны явления фазовой неустойчивости.

В результате теоретических исследований некоторыми авторами [1—3] получены условия устойчивости, согласно которым достаточно настроить ускоряющий резонатор на частоту несколько ниже частоты генератора, чтобы предотвратить возможность возбуждения фазовых автоколебаний при сколь угодно больших токах пучка. Экспериментальное изучение процесса накопления больших электронных токов в накопителе установок встречных электрон-пучков [4] (ВЭП-1) и электрон-позитронных пучков [5] (ВЭПП-2) показало, что условия устойчивости, полученные в работах [1—3], недостаточно. Малая расстройка в нужную сторону не устраняла автоколеба-

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Будкер и др. В кн. «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963)». Атомиздат, 1964, стр. 1065.
2. Г. И. Будкер и др. Там же, стр. 274.
3. В. Л. Ауслендер и др. «Атомная энергия», 1502 (1965).
4. Ю. А. Грици и др. В кн. «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963)». Атомиздат, 1964, стр. 1080.
5. М. Гельфельд и др. «Приборы и техника эксперимента», № 2, 121 (1965).
6. А. А. Егоров и др. «Приборы и техника эксперимента», № 4, 115 (1965).

ний, а при больших токах автоколебания не устранялись и значительной расстройкой.

При более строгом анализе устойчивости необходимо учитывать следующие факторы: 1) отличие реальной частотной характеристики ускоряющей системы от идеализированной характеристики одиночного колебательного контура; 2) возможность резонансного возбуждения ускоряющей системы, а также других элементов камеры током пучка на гармониках частоты обращения частиц; 3) разброс собственных частот радиально-фазовых колебаний отдельных электронов.

Как известно, уравнение радиально-фазовых колебаний электронов в накопителе может быть записано в виде

$$\ddot{\varphi} + \frac{\omega_s}{2\pi} \dot{\varphi} + \Omega_0^2 \varphi = 0, \quad (1)$$

где  $\Omega_0^2 = \frac{U_m}{2\pi E_s} |\cos \varphi_s| q \omega_s^2 \alpha$ ;  $q$  — кратность радиочастоты;  $\omega_s$  — угловая частота обращения равновесной частицы;  $\alpha$  — коэффициент расширения орбит;  $E_s$  — равновесная энергия в электронвольтах;  $U_m$  — амплитуда напряжения на резонаторе;  $W$  — радиационные потери энергии за один оборот.

Для когерентных потерь при условии  $\Omega_0 \ll \frac{1}{\tau_{уст}}$ , где  $\tau_{уст}$  — время установления процессов в ускоряющей системе, можно записать

$$\frac{dW_{кор}}{dE} = I_q q \frac{dR}{d\omega_r} \cdot \frac{d\omega}{dE} = -I_q q \frac{\omega_s \alpha}{E_s} \cdot \frac{dR}{d\omega_r} \quad (2)$$

Здесь  $R$  — активная составляющая сопротивления ускоряющей системы для пучка;  $\omega$  — частота обращения неравновесной частицы;  $\omega_r$  — частота генератора ( $\omega_r = q\omega_s$ );  $I_q$  —  $q$ -я гармоника тока пучка. Для некогерентных потерь

$$\frac{\omega_s}{2\pi} \cdot \frac{dW_{некор}}{dE} = \frac{2}{\tau_c} \quad (3)$$

Условие устойчивости состоит в том, что коэффициент при втором члене уравнения (1) должен быть положительным. Тогда

$$I_q \frac{\Omega_0^2 \tau_c}{2U_m |\cos \varphi_s|} \cdot \frac{dR}{d\omega_r} < 1, \quad (4)$$

где  $\tau_c$  — постоянная времени радиационного затухания колебаний. Отсюда следует, что при  $\frac{dR}{d\omega_r} < 0$  система устойчива при любых токах. В частности, для одиночного идеального резонансного контура это неравенство удовлетворяется, если его резонансная частота ниже частоты генератора.

В более общем случае условие устойчивости может быть получено с помощью следующих рассуждений. Рассмотрим устойчивость системы, состоящей из ускоряющего устройства и сгустка электронов. Если в спектре ускоряющего напряжения содержатся частоты, отстоящие от частоты генератора на  $\pm \Omega$ , то сгусток совершает колебания, описываемые уравнением

$$\ddot{\varphi} + \frac{2}{\tau_c} \dot{\varphi} + \Omega_0^2 \varphi = \frac{\Omega_0^2}{U_m |\cos \varphi_s|} U_{\delta m} \sin \Omega t, \quad (5)$$

где  $U_{\delta m}$  — амплитуда напряжения боковой частоты.

Вынужденные колебания фазы сгустка описываются следующим выражением:

$$\varphi(t) = \Phi_m \sin(\Omega t + \psi_\varphi), \quad (6)$$

где

$$\Phi_m = \frac{Q_c}{\sqrt{1 + Q_c^2 x_c^2}} \cdot \frac{U_{\delta m}}{U_m |\cos \varphi_s|}; \quad (7)$$

$$\psi_\varphi = -\frac{\pi}{2} - \text{arctg } Q_c x_c; \quad (8)$$

$$Q_c = \frac{\Omega_0 \tau_c}{2}; \quad x_c = \frac{\Omega}{\Omega_0} - \frac{\Omega_0}{\Omega} \approx 2 \frac{\Omega - \Omega_0}{\Omega_0}.$$

Ток  $i_q$ , соответствующий сгустку, является модулированным по фазе током

$$i_q = -I_q \cos[q\omega_s t - \varphi(t)]. \quad (9)$$

Такой ток содержит боковые составляющие, создающие на ускоряющей системе напряжение боковых частот.

Действующее на сгусток мгновенное напряжение боковых частот равно (при  $\Phi_m \ll 1$ )

$$U_{бок} = \frac{I_q \Phi_m}{2} \{ [(R^+ - R^-) \cos \psi_\varphi - (X^+ + X^-) \sin \psi_\varphi] \cos \Omega t - [(R^+ - R^-) \sin \psi_\varphi + (X^+ + X^-) \cos \psi_\varphi] \sin \Omega t \}, \quad (10)$$

где  $R^+$ ,  $R^-$  — активные составляющие импедансов ускоряющей системы для верхней и нижней боковых частот;  $X^+$ ,  $X^-$  — реактивные составляющие импедансов.

Условия устойчивости системы сгусток — резонатор могут быть найдены с помощью критерия Найквиста, который в данном случае сводится к следующим выражениям:

$$\left. \begin{aligned} (R^+ - R^-) \cos \psi_\varphi - (X^+ + X^-) \sin \psi_\varphi &= 0; \\ -\frac{I_q \Phi_m}{2} [(R^+ - R^-) \sin \psi_\varphi + \\ + (X^+ + X^-) \cos \psi_\varphi] &< U_{\delta m}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Из первого уравнения с учетом (8) находим

$$Q_c x_c = \frac{X^+ + X^-}{R^+ - R^-}. \quad (12)$$

Второе неравенство совместно с (7), (8) и (12) дает критерий устойчивости

$$\frac{I_q Q_c}{2U_m |\cos \varphi_s|} (R^+ - R^-) < 1. \quad (13)$$

Отметим, что уравнение (12) определяет частоту автоколебаний малой амплитуды, которые возникают, если не выполняется неравенство (13).

Для уточнения критерия устойчивости следует учесть также то, что электроны совершают случайные колебания под действием квантовых флуктуаций со статистическим распределением амплитуд. Задачу можно решать, предполагая, что система линейна, а действие флуктуаций проявляется в изменении собственной частоты колебаний. Условие устойчивости с учетом разброса собственных частот получается таким же, как и (13), но вместо  $Q_c$  в него входит величина  $Q'_c \leq Q_c$ . Величина  $Q'_c$  в отличие от  $Q_c$  зависит от свойств ускоряющей системы.

Взаимодействие сгустка с ускоряющей системой или другими элементами камеры может происходить не только на  $q$ -й гармонике, но и на других гармониках, если ускоряющая система имеет паразитные резонансы на частотах, близких к частотам гармоник. Условие устойчивости с учетом взаимодействия на гар-