

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



СЗ45е2  
Г-121

Э/4-7  
P9 - 9139

И.Габанец, Х.Гурач, В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов,  
В.И.Мионов, В.П.Рашевский, А.П.Сергеев,  
С.Г.Стеценко, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный

4281/2-75

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЗАХВАТА  
БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ  
ИНЖЕКТИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

**1975**

Р9 - 9139

И.Габанец, Х.Гурач, В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов,  
В.И.Миронов, В.П.Рашевский, А.П.Сергеев,  
С.Г.Стеценко, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЗАХВАТА  
БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ  
ИНЖЕКТИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

В работе<sup>/1/</sup> обсуждался вопрос о различных системах инжекции электронов в адгезатор, основанных на изменении равновесной орбиты. Одним из вариантов таких систем является инжекционная система, в которой быстро изменяющееся в момент инжекции магнитное поле создается двумя парами витков, токи в которых текут в разных направлениях. Среднее поле в такой системе значительно меньше поля на орбите, поэтому в процессе инжекции энергия электронов практически не меняется. Частицы, инжектированные в разные моменты времени на спаде импульса быстрого поля, будут иметь практически одну и ту же равновесную орбиту, но отличные друг от друга амплитуды бетатронных колебаний. Подобная система может оказаться эффективной при инжекции в адгезатор одного оборота электронов из линейного ускорителя. Для выяснения работоспособности такой системы были проведены эксперименты на модели коллективного ускорителя ОИЯИ, результаты которых изложены в настоящей работе.

### 1. Поведение пучка на первом обороте в быстром магнитном поле

Система витков (с  $R_1 = 47$  Ом,  $R_2 = 34$  см и  $Z_{1,2} = \pm 7$  см) внутри камеры адгезатора создает необходимую конфигурацию быстрого магнитного поля (рис. 1). Общий вид витков представлен на рис. 2. В соответствии с<sup>/1/</sup> магнитное поле инжекционной системы было направлено противоположно направлению постоянного магнитного поля. Генератор системы питания создавал спа-

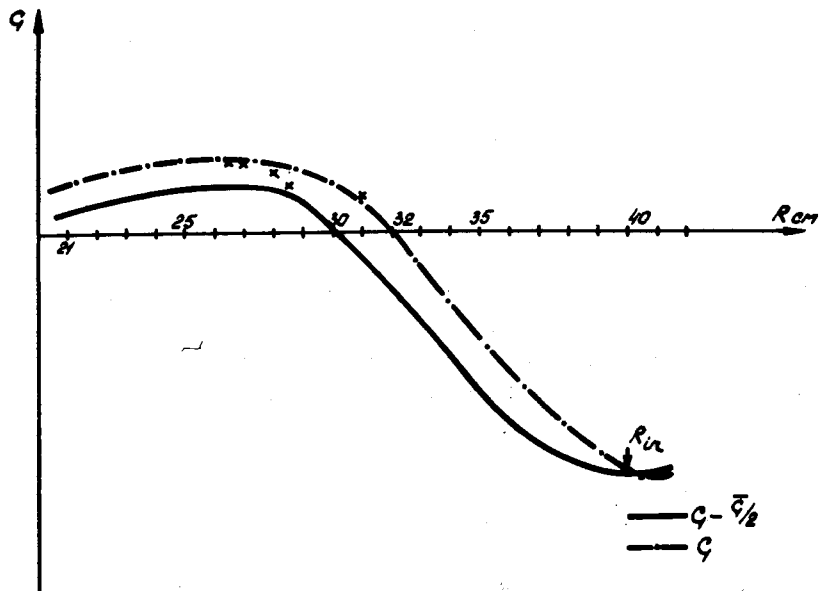


Рис. 1. Конфигурация быстрого магнитного поля.  $R_{in}$  — радиус инжекции.

дающий до нуля импульс тока, причем скорость спада должна была обеспечивать необходимую промашку электрона на первом обороте.

В экспериментах были применены два генератора: искусственная линия (первый генератор) и генератор Маркса (второй генератор). Импульсы тока, формируемые этими генераторами, отличались примерно вдвое по скорости спада (приблизительно  $3 \cdot 10^8$  Э/с и  $5 \cdot 10^8$  Э/с на радиусе инжекции). Временную форму импульса поля получали численным интегрированием сигнала с индукционной катушки (характерная форма которого приведена на рис. 3). Азимутальные искажения суммарного поля не превышали 1%.

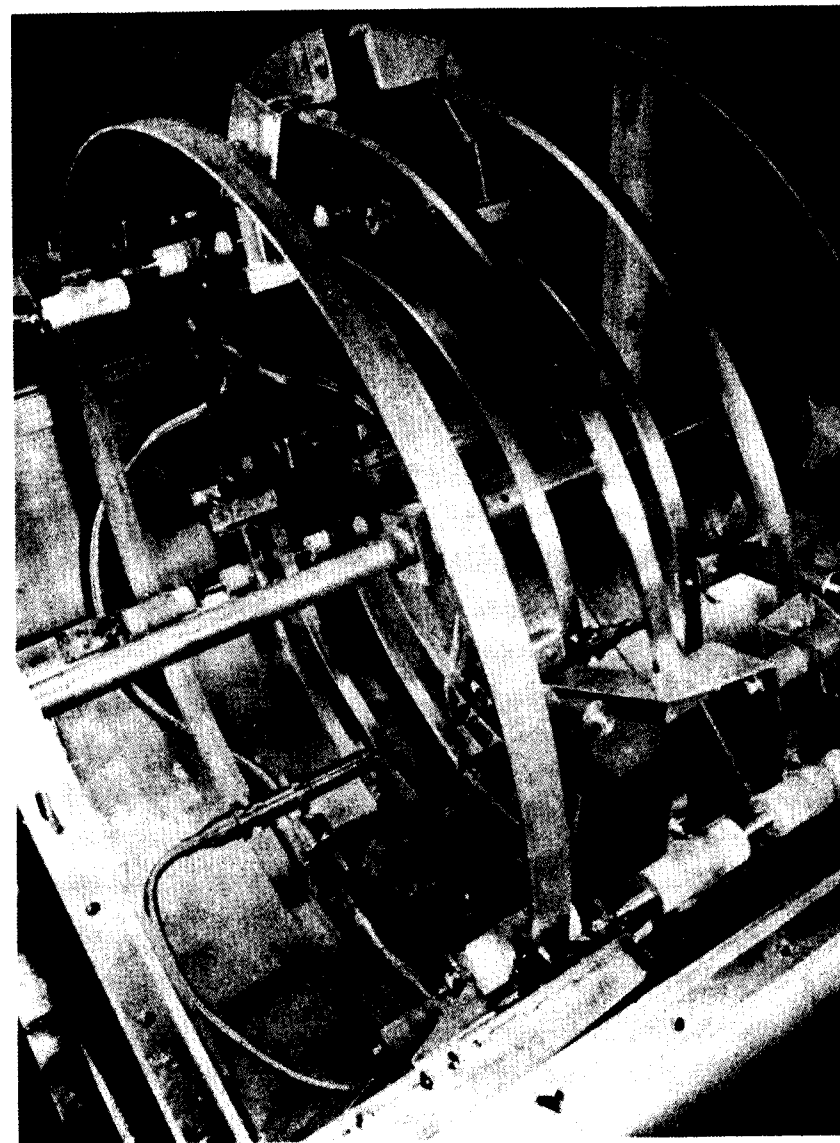
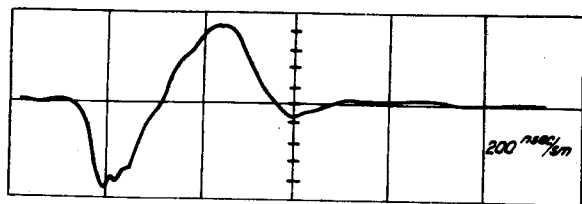


Рис. 2. Общий вид витков.



$V_{\text{эл}} = 27 \text{ кВ/к};$

Рис. 3. Сигнал с индукционной катушки.

Отличительной особенностью рассматриваемой экспериментальной системы (по сравнению с применяемыми нами ранее) является необходимость инъекции в переменное магнитное поле.

Начнем с рассмотрения принятой нами методики прохождения первого оборота в постоянном магнитном поле при помощи цилиндра Фарадея, перемещающегося по радиусу и азимуту в медианной плоскости. Поскольку инъекция происходит в мягкофокусирующее магнитное поле ( $n = 0,36$  на  $R = 40$  см), то можно с хорошей точностью определить азимуты, соответствующие четверти и половине длины волны бетатронных колебаний. Установив цилиндры на азимуте, соответствующем половине длины волны бетатронных колебаний, добиваемся максимального сигнала высадки электронов путем изменения величины постоянного поля. Подобранный таким образом для инжектируемого пучка заданной длительности величина постоянного поля будет соответствовать радиусу равновесной орбиты, равному полусумме радиусов инъекции и установки цилиндра Фарадея.

На азимуте, соответствующем четверти длины колебаний, проверяем отклонение пучка от равновесной орбиты; если такое отклонение есть, то оно говорит о наличии угла влета пучка в камеру адгезатора.

Подстройкой системы корректоров линейного ускорителя этот угол при необходимости компенсируется. Выполнение данной методики с контролем на допол-

нительных азимутах обеспечивало прохождение пучком первого оборота без бетатронных колебаний, если цилиндр Фарадея устанавливали на радиусе инъекции.

В экспериментах с данной системой захвата инъекция проводится в суммарное магнитное поле, в котором отрицательное быстрое поле компенсируется увеличением постоянного. Приведенную методику прохождения первого оборота можно использовать, если подобную компенсацию осуществлять на плато импульса тока.

Прохождение первого оборота указанным способом проводилось в основном при инъекции в быстрое магнитное поле при работе с первым генератором (искусственная линия). Результаты показаны на рис. 4а для первого генератора (инъекция на плато импульса) и на рис. 4б - для второго (инъекция на спаде импульса). Как видно из рис. 4а, поведение пучка на первом обороте в этом режиме позволяет точно судить о величине быстрого поля. В то же время на рис. 4б можно заметить характерное расширение пучка по радиусу, что связано с различными начальными условиями для частиц, инжектируемых в разные моменты времени. В экспериментах использовался пучок длительностью 20 нс (о формировании такого пучка см. <sup>2/</sup>). За это время магнитное поле заметно меняется. Инъекция пучка на 30 нс позднее времени компенсации подтверждает эти выводы.

Приведенные данные показывают возможность установки первого оборота без существенных бетатронных колебаний при указанной скорости нарастания поля и длительности пучка порядка времени одного оборота. Данные измерений быстрого магнитного поля с помощью электронного пучка в сочетании с результатами индукционных измерений дали возможность согласования экспериментальных и расчетных данных.

Интересные эффекты можно наблюдать, если инжектировать частицы при такой комбинации постоянного и быстрого полей, при которой коэффициент спада поля  $n$  позволяет долгое существование пучка за счет бетатронных колебаний. Поскольку  $n$  меняется достаточно быстро, пучки длительностью 20 нс можно условно разделить на два оборота, для которых сущест-

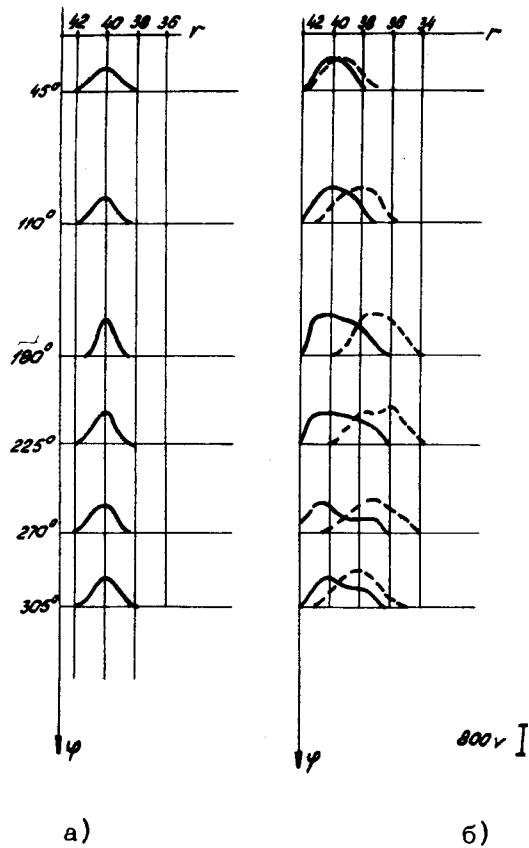


Рис. 4. Распределение пучка в радиальном направлении на разных азимутах. а) Инжекция на плато импульсов поля; б) инжекция на спаде, - - - инжекция спустя 30 нс после времени компенсации.

вуют различные эффективные показатели спада  $n$  при инжекции. На рис. 5 приведены осциллограммы с цилиндра Фарадея, установленного на  $\phi = 0^\circ$  так, что он перекрывает пространство от нижней кромки инфлектора до  $R = 34$  см. Пучок, прошедший один оборот в камере, попадает на этот цилиндр. Сигналы с цилинд-

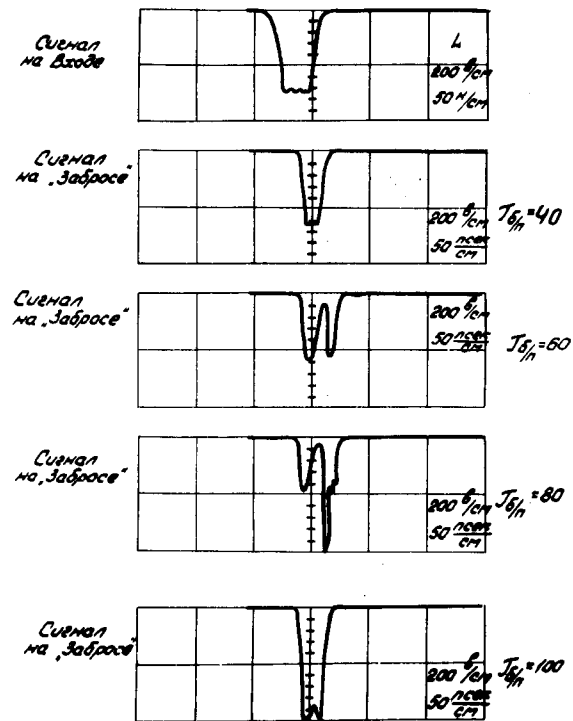


Рис. 5. Осциллограммы по накоплению амплитуды электронного пучка на цилиндре (в положении "заброс").

ра получены для различных времен инжекции. Расчеты показывают, что для времени инжекции 60 нс суммарное  $n = 0,64$  и  $R$  пучка = 36 см, что дает возможность существовать пучку около четырех оборотов. Соседние точки (сдвинутые на 8 нс от этого времени в разные стороны) дают соответственно  $n = 0,60$  и  $n = 0,70$  при той же примерно равновесной орбите. Мы видим, что при времени инжекции 40 нс на этот цилиндр (на "заброс") попадают только частицы второй половины по длительности инжектируемого пучка. Потом ( $\tau = 60$  нс)

весь пучок смещается по времени, поскольку первая половина также попадает на "забросный" цилиндр, а вторая существует достаточно долго. В следующее время инъекции первая половина пучка существует дольше (4 оборота), чем вторая (2-3 оборота), и они складываются на цилиндре. В это время амплитуда на "забросе" превосходит амплитуду пучка на входе.

## 2. Эксперименты по захвату

Регистрация захваченных частиц проводилась по сигналу с ФЭУ, возникающему под действием тормозного  $\gamma$ -излучения при быстром сбросе электронов на внешнюю мишень (подробнее см./1/).

Эффективность захвата определяется комбинацией следующих величин: амплитуды постоянного поля, времени инъекции на спаде быстрого поля и определяемых этим временем и напряжением на витках быстрого поля амплитуды и величины  $dI/dt$ , где  $I$  - ток в витках системы инъекции. Эксперименты по определению области эффективного захвата частиц в зависимости от указанных параметров проводились следующим образом.

Электронный пучок инжектировался в разных точках временного фронта быстрого поля с фиксированной максимальной амплитудой. Измерения проводились при различных значениях постоянного поля. В результате были получены зависимости, представленные на рис. 6 и 7 для первого и второго генераторов соответственно. Для удобства рассмотрения на этих графиках приведены интегральные кривые спада полей. Амплитуды сигналов с ФЭУ, пропорциональные числу захваченных частиц, приведены в относительных единицах.

Качественное рассмотрение этих зависимостей показывает, что при некоторых режимах работы мы имеем два резко выраженных максимума по захвату. Первый из них приходится на область малых  $dI/dt$ , а второй находится на максимуме скорости спада поля. Характерно и то, что вторые максимумы сдвигаются в сторону меньших значений быстрого поля при уменьшении по-

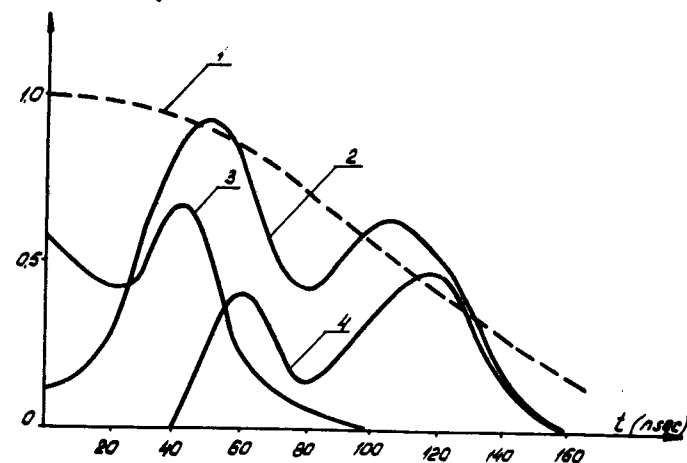


Рис. 6. Экспериментальные зависимости по определению области захвата для первого генератора. 1 - интегральная кривая спада быстрого поля (23 Э); 2 -  $N_{\text{пост.}}/N_{\text{рав.}} = 1,15$ ; 3 -  $N_{\text{пост.}}/N_{\text{рав.}} = 1,20$ ; 4 -  $N_{\text{пост.}}/N_{\text{рав.}} = 1,13$ .

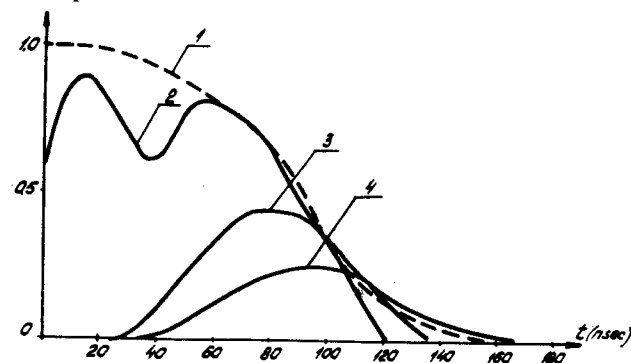


Рис. 7. Экспериментальные зависимости по определению области захвата для второго генератора. 1 - интегральная кривая спада поля (26 Э); 2 -  $N_{\text{пост.}}/N_{\text{рав.}} = 1,17$ ; 3 -  $N_{\text{пост.}}/N_{\text{рав.}} = 1,13$ ; 4 -  $N_{\text{пост.}}/N_{\text{рав.}} = 1,11$ .

стоянного. Анализ  $R$ -и  $n$ -траекторий в области захвата (по известным калибровочным значениям полей) показывает, что первые максимумы (при величинах постоянного поля больше 192 Э на  $R = 40$  см) существуют при таких режимах работы, когда начальная равновесная орбита близка к предельной ( $G=1/2G^{1/2}$ ), а начальные  $n \sim (0,8-0,9)$  позволяют существовать пучку за счет бетатронных колебаний около 40 нс. За это время начальная равновесная орбита смещается мало, но  $n$  резко уменьшается и захват определяется затуханием начальной амплитуды бетатронных колебаний. Область захвата, лежащая в районе максимальных  $dI/dt$ , связана с изменением поля на орбите. Эксперименты, проведенные в этих областях, показали разницу в начальных орбитах в области максимального захвата для генераторов: для первого - (33,3-34) см; для второго - (36,5-37) см. Этот результат и наличие локальных максимумов можно объяснить различной скоростью нарастания полей. Для выяснения механизма захвата на рис. 8. приведены значения равновесных радиусов и показателей спада для различных значений быстрого поля и заданной амплитуды постоянного (187,6 Э). Штрихованными контурами показаны области захвата для двух генераторов. Характерным является то, что эти области перекрываются и максимум эффективности захвата для второго генератора приходится на минимум первого. В диапазоне (16-17) Э  $R = 36,7$  см,  $n = 0,7$ , что обеспечивает "время жизни" пучка за счет бетатронных колебаний не более двух оборотов. При таких условиях скорости спада поля при работе с первым генератором не хватает, чтобы отвести пучок от инфлектора; скорость же спада второго позволяет осуществить захват. Точки, лежащие в районе 10 и 19,5 Э, имеют  $n$ , позволяющие пучку существовать в течение трех оборотов. Этого времени достаточно, чтобы отвести пучок от инфлектора при работе как с первым, так и вторым генератором. Представленная качественная картина показывает, что большая скорость нарастания поля позволяет отвести пучок за меньшее время с более высоких начальных орбит.

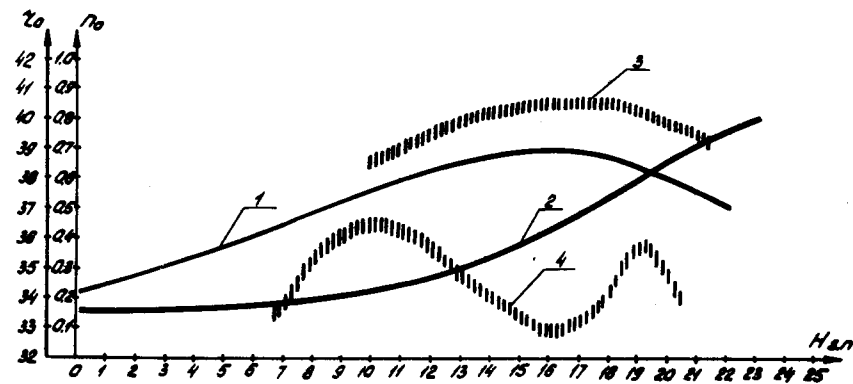


Рис. 8. Значения равновесных радиусов и показателей спада для различных значений быстрого поля и амплитуды постоянного 187,6 Э. 1 - значения  $n$ ; 2 - значения  $R$ ; 3 - область захвата для второго генератора; 4 - область захвата для первого генератора.

В областях эффективного захвата были проведены электрические измерения по определению числа захваченных частиц (коэффициента захвата) и размеров электронного кольца. Индикация проводилась по сигналу высадки электронов на графитовый "флажок". Аналогично работе  $/2/$  параметры захваченного пучка определялись методом "подрезания" кольца с меньших радиусов. По измерению заряда на емкости и сигнала от  $\gamma$ -излучения, зависящего от высадки электрона на "флажок", были сняты калибровочные кривые. В серии экспериментов с данной системой захвата удалось получить амплитудно-временные осциллограммы захваченного пучка, приведенные на рис. 9 и 10, для обоих генераторов. Измерения проводились при одинаковых режимах постоянного поля и величинах быстрых полей, соответствующих максимуму сигналов с ФЭУ (см. рис. 5 и 6). Характерно, что для первого генератора наблюдаются большие бетатронные колебания (на  $R \sim 34$  см) и сдвиги по времени



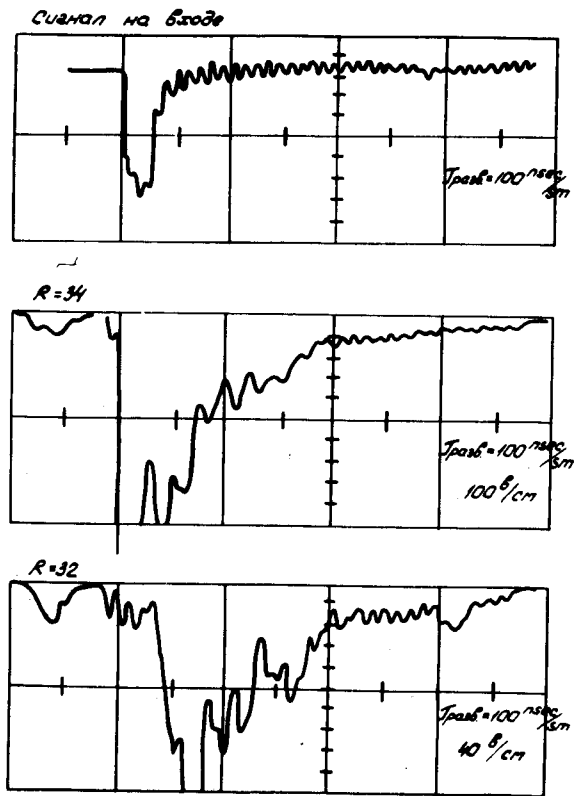


Рис. 9. Осциллограммы захваченного пучка для системы первого генератора.

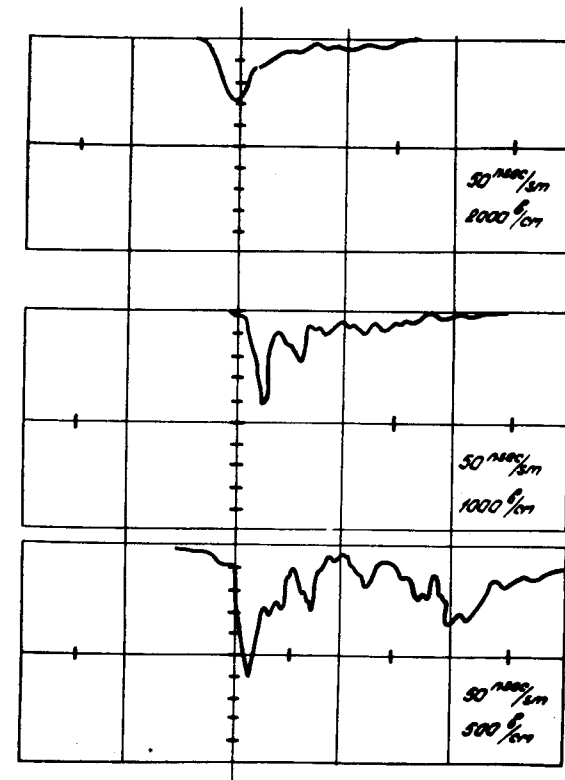


Рис. 10. Осциллограммы захваченного пучка для системы второго генератора.

захваченного пучка составляют  $\sim 50$  нс, тогда как при работе второго генератора практически отсутствуют колебания и сдвиг составляет  $\sim 100$  нс. Начальные орбиты захвата в первом случае  $R = 36,5$  см, а во втором  $R = 38$  см; радиальные полуразмеры будут  $3,5$  см и  $2$  см. Расчеты огибающей пучка и измерения по сигналам с ФЭУ, амплитуды которых зависят от положения радиального "флажка", подтверждают эти результаты. Следует отметить, что по сигналам  $Y$  -

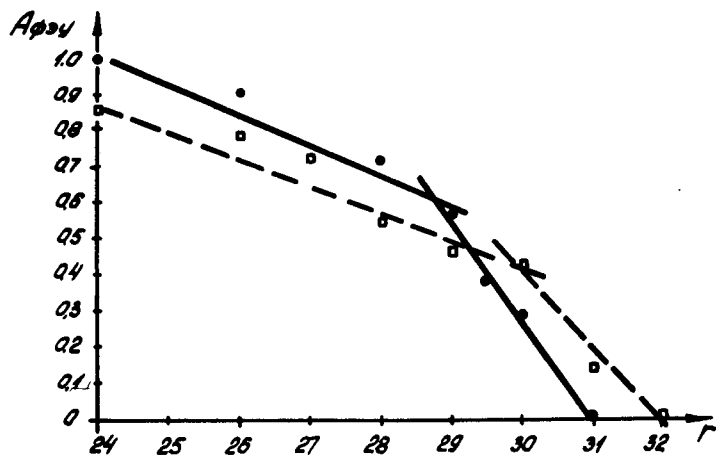


Рис. 11. Сигналы  $\gamma$ -излучения при разных режимах работы (к оценке структуры пучка).  $N_{\text{пост.}} = 1,15N_{\text{рав.}}$ ,  $\tau_{\text{ин}} = 60$  нс;  $N_{\text{пост.}} = 1,13N_{\text{рав.}}$ ,  $\tau_{\text{ин}} = 100$  нс.

излучения можно качественно оценить структуру пучка. При рассмотрении указанной зависимости на рис. 11 при разных режимах работы видно, что кривые имеют точки изменения кривизны. Этот характер поведения можно объяснить тем, что захваченный пучок имеет "шубу" из частиц с большими колебаниями и малой плотностью. При "подрезании" в этой области сигнал слабо зависит от радиуса. Наиболее плотная часть пучка соответствует участку сильного изменения сигнала. Измерения количества захваченных частиц показали, что при инжекции пучка 40 А с длительностью 20 нс был получен коэффициент захвата при работе с первым генератором 30%,  $N_e = (1,25-1,5) \times 10^{12}$ , а со вторым генератором - 70%,  $N_e = (2,5-3) \times 10^{12}$ , что согласуется с расчетом.

## Выводы

Система инжекции, в которой захват происходит только за счет изменения поля на орбите, может быть достаточно эффективной.

Захват может быть осуществлен в двух режимах.

При высокой скорости нарастания поля,  $\sim 10^9$  Э/с, можно работать с широким диапазоном  $n$  начальных, обеспечивающих мягкую фокусировку пучка. В данном варианте необходимо контролировать область 100%-ного захвата, поскольку изменения  $n$ , и  $G$ -фактора витков могут приводить к уменьшению промашки во времени.

При средних скоростях нарастания поля,  $\sim (1+5)10^8$  Э/с, начальные  $n$  следует выбирать таким образом, чтобы пучок существовал за счет бетатронных колебаний в течение времени, достаточного для его отвода от инфлектора при выбранной скорости изменения быстрого поля.

В рассмотренной системе инжекции размер пучка определяется амплитудой колебаний последней захваченной частицы, поэтому этот режим предпочтителен для инжекции плотных коротких сгустков.

Следует добавить, что поскольку поле формируется системой витков с токами противоположных направлений, то желательна геометрия витков с малой величиной суммарной индуктивности (приближение к системе "би-филяр"). Такой выбор облегчил бы выполнение технических требований к конструкции и электрофизическим параметрам генератора.

## Литература

1. И.Габанец, Х.Гурач, В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-8353, Дубна, 1974.
2. В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-8354, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 сентября 1975 года.