

СЗУ5Л1

Г-121

3094/2-76

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



9/III-76

P9 - 9729

И.Габанец, В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов, А.К.Каминский,
В.И.Миронов, В.П.Рашевский, А.П.Сергеев,
С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный

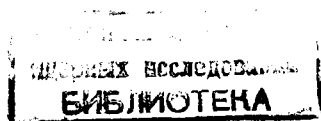
ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ
СО СРЕДНИМ ПОЛЕМ

1976

P9 - 9729

И.Габанец, В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов, А.К.Каминский,
В.И.Мионов, В.П.Рашевский, А.П.Сергеев,
С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ
СО СРЕДНИМ ПОЛЕМ**



В адгезаторе модели коллективного ускорителя используются системы инъекции, связанные с изменением равновесной орбиты. Исходя из самых общих положений, можно ввести классификацию подобных систем в зависимости от характера пространственного и временного распределения магнитного поля, изменяющего равновесную орбиту /1/. Была исследована система инъекции, в которой ток в витках, создающих магнитные поля, нарастает во времени /2/. В противоположном случае /ток уменьшается в процессе инъекции и выключается/ были проанализированы предельные варианты: 1/ поле на орбите инъекции значительно больше среднего и 2/ среднее поле значительно больше орбитального*.

Результаты экспериментального исследования первого варианта приведены в работе /3/. В настоящей работе излагаются результаты исследования системы инъекции, использующей в основном для изменения равновесной орбиты среднее поле.

1. Проверка основных предположений с предварительной системой

Магнитное поле при инъекции представляет собой суперпозицию двух полей

$$H_{\Sigma} = H_{\Pi} + I(t) \cdot G(r), \quad /1/$$

*В том и в другом случае речь идет о переменном во времени поле. Подробнее об этом см. в /1/.

где H_{Π} - постоянное поле, $I(t) \cdot G(r)$ - переменное, или, в нашей терминологии, быстрое поле, которое определяется током $I(t)$ и геометрической функцией $G(r)$. Для получения многооборотной инжекции необходимо сохранить постоянными начальные условия для частиц, инжектированных в разные моменты времени. Кроме того, нужно, чтобы после отработки системы инжекции орбиты первой и последней захваченных частиц лежали достаточно близко друг от друга. Этого можно достичь, если на радиусе инжекции $G(r_{in}) = 0$ и существует точка \bar{r} , в которой $G(\bar{r}) = \bar{G}(\bar{r})/2$.

Для проверки этих двух основных положений было сформировано магнитное поле одной парой витков с $R = 37$ см и $Z = 12$ см, которое имело $G/r = 39$ см/ = 0, а $\bar{r} = 35$ см. Импульс тока представлен на рис. 1/1/. Выбор $r_{in} = 39$ см сделан для облегчения промашки на первом обороте вследствие недостаточной величины \dot{I} . На рис. 2 приведены результаты проверки прохождения пучком первого оборота в условиях, когда H_{Π} определяет равновесный радиус равным 39 см при энергии инжекции, амплитуда быстрого поля произвольна, а $\dot{I} = 0$ /инжекция на плато/. Из рисунка видно, что равновесная орбита остается постоянной при изменении амплитуды быстрого поля. Длина волны бетатронных колебаний меняется в соответствии с изменением суммарного показателя

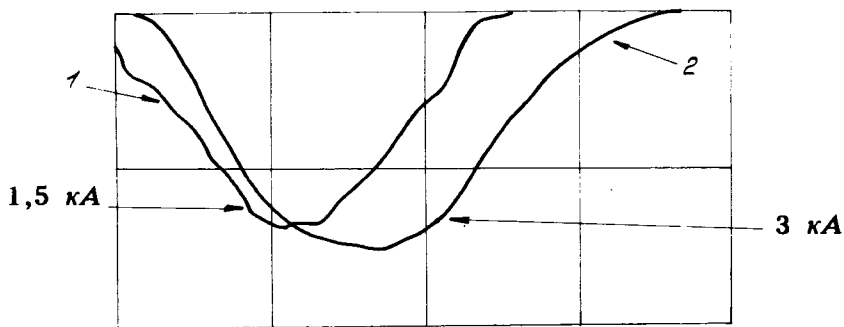


Рис. 1. Импульс тока в витках быстрого поля. 1 - первая система, 2 - многооборотная система.

спада магнитного поля (n_{Σ}) вплоть до расплывания пучка в радиальном направлении, когда n_{Σ} приближается к единице.

При инжекции пучка на фронт импульса быстрого поля мы наблюдаем захваченные частицы по высадке на азимутальный цилиндр Фарадея так же, как и в работе /3/. Однако в этом эксперименте точки инжекции выбирались так, чтобы амплитуды быстрого поля было достаточно для отвода захваченного пучка до радиуса $\bar{r} = 35$ см, при этом мы следили за появлением частиц ниже этого радиуса, превышая выбранное значение амплитуды. Нам не удалось обнаружить частицы ниже радиуса 35 см /с учетом собственного размера пучка/ ни при каких режимах, что говорит о возможности использования бетатронной орбиты.

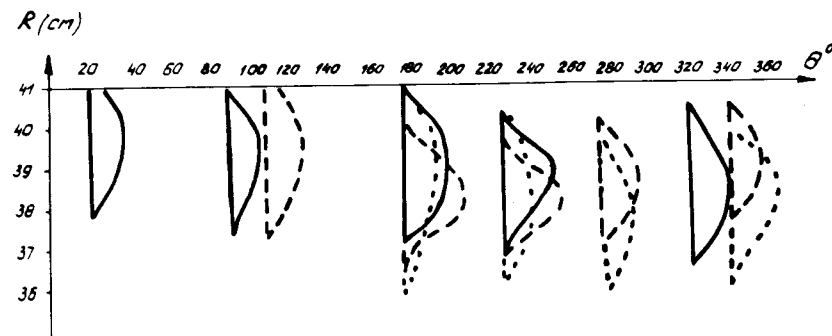


Рис. 2. Поведение пучка на первом обороте при $r_s = 39$ см и $G/r = 39$ см/ = 0.

Были проведены исследования динамики поведения пучка на разных радиусах и азимутах при фиксированном моменте инжекции пучка на спаде импульса тока быстрого поля. Вследствие сохранения положения начальной

равновесной орбиты в течение инъекции /а значит, и начальной амплитуды бетатронных колебаний/ и разделения по окончании инъекции равновесных орбит для частиц, инжектируемых в разные моменты времени, в процессе захвата существуют выделенные азимуты на соответствующих радиусах, на которые частицы приходят с разной задержкой по времени относительно момента инъекции. Для выбранной нами системы инъекции характерным было появление частиц пучка практически сразу же после инъекции на азимуте около 110° и появление их смещенными по времени на азимуте 270° в радиусах 34-45 см. Приход частиц на эти радиусы и азимуты с задержкой по времени относительно момента инъекции связан с изменением среднего поля и соответствует захваченным частицам. Отметим, что при инъекции частиц на плато импульса тока указанных сигналов не наблюдалось. Экспериментальное исследование поведения пучка во времени дает возможность утверждать, что динамика поведения пучка в пределах пяти оборотов совпадает с расчетной.

2. Выбор многооборотной системы инъекции

Из-за близости \bar{r} к нижней кромке инфлектора /38,5 см/ первоначальная система не была оптимальной. При выборе новой системы мы исходили из требований постоянства коэффициента захвата в течение 40-50 нс при инъекции. Сделаем небольшое отступление. Определим коэффициент захвата как отношение количества захваченных частиц к полному числу инжектируемых. При таком определении коэффициент захвата будет функцией времени инъекции. Эта зависимость связана с изменением \bar{r} , которое уменьшается со временем инъекции из-за уменьшения $\bar{r} \cdot (G - \bar{G}/2)$, возрастания N_Σ и возможного уменьшения n_Σ . Близкая к идеальной система ($\bar{r} = \text{const}$, отсутствие когерентных бетатронных колебаний) должна обладать следующими свойствами: $G(r_{in})=0$ и $G'(r_{in})=0$. Такая система принципиально возможна при использовании двух пар витков. Однако в ней есть осо-

бенности, связанные с n -траекторией. В момент инъекции и после окончания работы инжекционной системы n_Σ будет определяться только постоянным полем. Между этими моментами времени существует подъем n -траектории. Величина его должна быть ограничена / $n_\Sigma < 1$, резонансы, изменение малого сечения/. Это приводит к необходимости создавать "гладкие" распределения $G(r)$, удаляя виток от медианной плоскости, что, в свою очередь, ведет к увеличению необходимой амплитуды тока. Найденные варианты таких систем, приемлемые по коэффициенту захвата и n -траектории, оказались сложными в техническом исполнении. Они требовали создания тока 10 кА, со спадом 100 нс на индуктивности 3-4 мкГн. Поэтому мы пошли по пути создания промежуточной системы, в которой присутствует поле на орбите, но основную роль в изменении равновесного радиуса играет среднее поле.

Нужная геометрия витков определялась следующим образом. Из закона сохранения

$$r^2 (N_\Sigma - \bar{N}_\Sigma / 2) = C, \quad /2/$$

определялась $I(t) = f(r)$. Здесь C - известная из начальных условий константа. Условие максимума \dot{r} можно заменить максимумом dr/dI /при постоянной \dot{I} /, или минимумом dI/dr . Существование минимума dI/dr может быть только в случае $d^2I/dr^2 = 0$, т.е. точка перегиба функции $f(r)$ есть оптимальная точка для данного отношения величин постоянного и переменного полей в момент инъекции. Анализ функций $f(r)$ для различных геометрий витков сводится к поискам точек перегиба и условий, когда эта точка приходится на радиус инъекции. Окрестность точки перегиба, протяженность области, где dI/dr меняется незначительно, дают в пересчете на время длительность инъекции, в течение которого коэффициент захвата примерно постоянен. Далее все параметры системы становятся заданными: амплитуды полей и геометрия определяют n_Σ . Зная n_Σ , находим \dot{I} для обеспечения необходимого \bar{r} . Амплитуды $I(t_{in})$ и \dot{I} должны обеспечить необходимое время

захвата, приемлемое \bar{r} , и возможность технического исполнения. Мы остановились при выборе на системе с одной парой витков $R = 32$ см и $Z = 12$ см/, которая теоретически обеспечивала захват более 40 нс при амплитуде тока 3 кА с длительностью фронта 100 нс. /Забегаая вперед, сообщим, что в реальном исполнении для обеспечения выполнения оптимальных условий на радиусе инжекции нам потребовалась несколько большая амплитуда тока из-за взаимодействия витков быстрого поля с остальными системами компрессора/. Геометрическое распределение поля для этой системы представлено на рис. 3, а форма импульса тока - на рис. 1/2/.

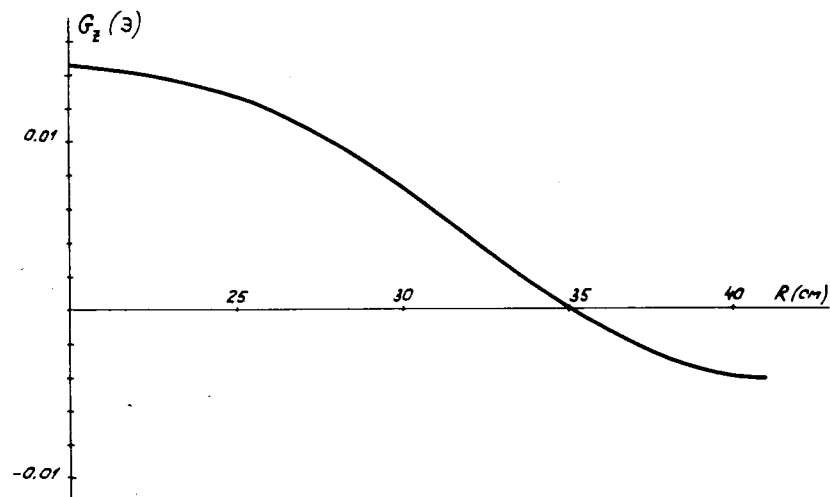


Рис. 3. Распределение быстрого поля $G(r)$

3. Экспериментальные результаты

В выбранной системе орбиты захваченных частиц лежат выше радиуса \bar{r} . Мы называем среднюю орбиту захваченного пучка после выключения системы инжекции орбитой перехвата, поскольку с нее начинается сжатие

в 1-й ступени компрессии. Исследование пучка на орбите перехвата производилось с помощью индукционной катушки, параметры и свойства которой рассмотрены в работе^{14/}. Здесь, как и в предыдущих системах, амплитуды постоянного и быстрого полей определяют начальную равновесную орбиту и совместно с $\dot{I}(t_{in})$ - эффективность захвата и параметры пучка.

На рис. 4 показан сигнал с индукционной катушки, который дает импульс захваченного тока. Он имеет плато, значительно превосходящее по времени период бета-тронных колебаний, и значительное уменьшение амплитуды

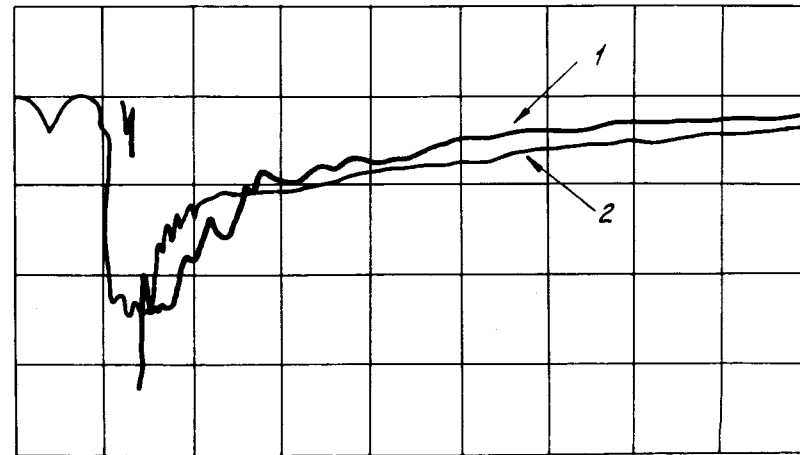


Рис. 4. Импульс захваченных частиц, полученный индукционной катушкой: 1 - интегр. = 5 мкс / 500 нс/см и 50 мВ/см/, 2 - интегр. = 20 мкс / 5 мкс/см и 10 мВ/см/.

при $t \geq 1$ мкс. Сигнал с катушки, измеренный при $t \sim 100$ нс, мы будем обозначать A_1 /пересчитанный в ток - I_1 /, а сигнал при $t \sim 1$ мкс - через A_2 /или I_2 /. Рис. 5 показывает зависимость I_1 от величины входного тока и длительности инжекции. На рис. 6 приведены те же зависимости для I_2 .

Необходимым условием является наличие области устойчивой работы инжекционной системы при

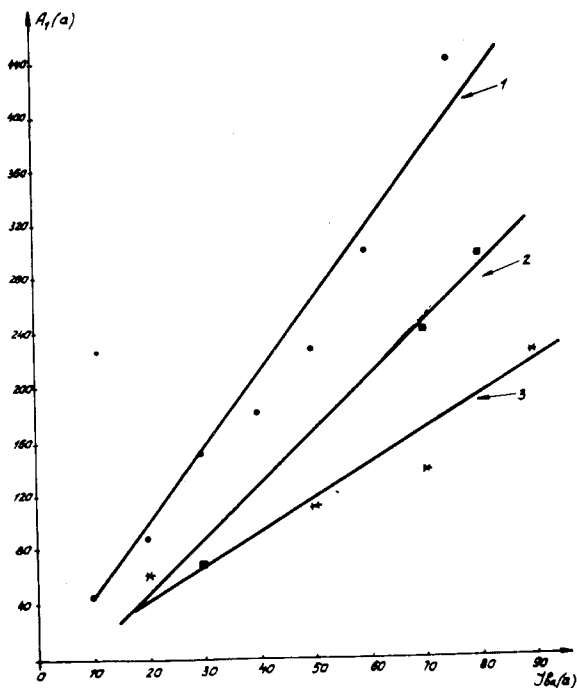


Рис. 5. Захваченный ток /100 нс после инжекции/ как функция входного тока и длительности инжекции. 1 - длительность инжекции - 50 нс; 2 - длительность инжекции - 30 нс; 3 - длительность инжекции - 20 нс;

варьировании параметров. На рис. 7 показан сигнал A_2 как функция постоянного поля при выбранном t_{in} на фронте быстрого поля и при изменении t_{in} с необходимой коррекцией постоянного поля. Кривые имеют один экстремум /можно сравнить с s^3 / и достаточно большую область H_{II} и t_{in} , в которой сигнал близок к максимальному. Там же приведен радиус перехвата, определяемый азимутальным цилиндром Фарадея. При измерении радиуса захваченный пучок высаживается на цилиндр, а сигнал $A_2 = 0$. В этих экспериментах, как и раньше, мы наблюдали расширение пучка в аксиальном направлении. Оно исследовалось с помощью двух цилиндров, располо-

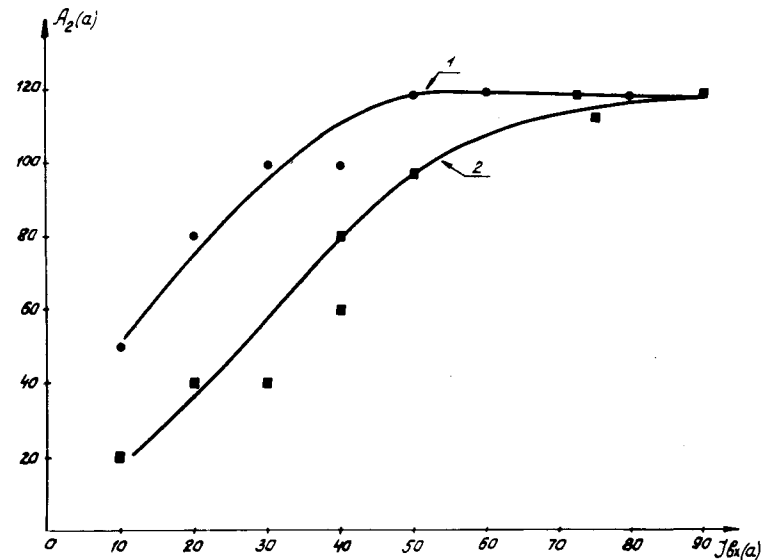


Рис. 6. Захваченный ток /1 мкс после инжекции/ как функция входного тока и длительности инжекции. 1 - время инжекции - 50 нс; 2 - время инжекции - 20 нс.

женных по разные стороны медианной плоскости. Цилиндры могут перемещаться по R и Z. В данных экспериментах снималась зависимость сигнала A_2 от координат цилиндров и восстанавливалась огибающая пучка, которая приведена на рис. 8. Зафиксированное Z-расширение превышает увеличение аксиального размера из-за уменьшения n_{Σ} и, по-видимому, связано с нелинейными эффектами радиальных и аксиальных колебаний. Как видно из рисунка, аксиальные размеры пучка увеличиваются при увеличении его начального радиального размера. Не исключено также влияние резонансов связи. Эффективность захвата проверялась также сжатием на I степени компрессии с орбиты перехвата. Измерялся электрический сигнал высадки пучка на цилиндр Фарадея при сжатии. Схема измерений приводится на рис. 9, характерные сигналы - на рис. 10. Зависимость времени высадки от радиуса совпадает с расчетной. Количест-

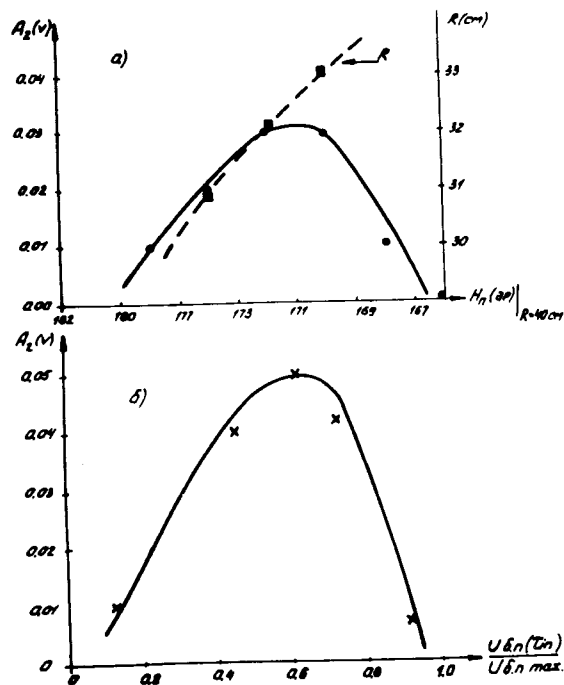


Рис. 7. а/ сигнал A_2 как функция H_{II} б/ сигнал A_2 как функция t_{in}

венные измерения емкостных и токовых сигналов также совпадают. /Сигналы на рис. 10 дают $1,4 \cdot 10^{12}$ и $1,3 \cdot 10^{12}$ соответственно/. Зависимость сигнала на предельных радиусах по сжатию в I ступени от входного тока и длительности инжекции показана на рис. 11. Мы варьировали запуск I ступени позже времени инжекции до 1 мс. Сигналы с $R \sim 15$ см не меняются вплоть до времени 500 мкс.

4. Выводы

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что подобная система инжекции работает как

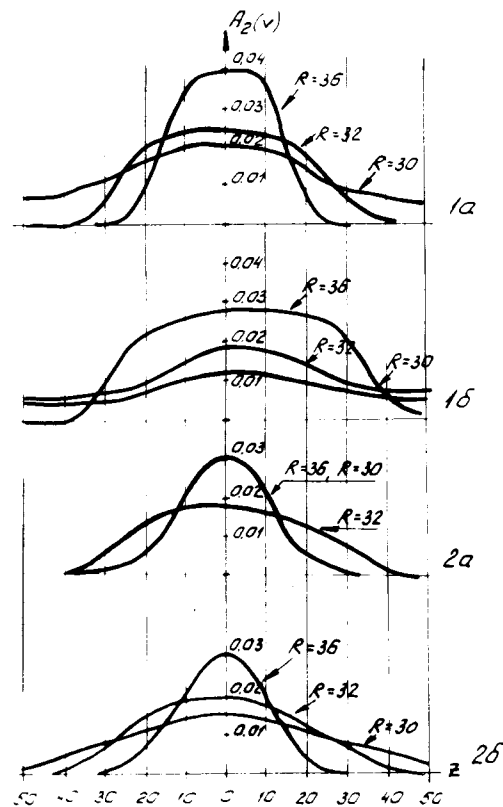


Рис. 8. Аксиальное расширение пучка как функция начального равновесного радиуса r_s при длительности инжекции 50 нс. /1а - $r_s = 39,5$ см, 1б - $r_s = 35,0$ см/ и при длительности инжекции 20 нс /2а - $r_s = 39,5$ см, 2б - $r_s = 36,0$ см/. R - радиус измерений.

многооборотная система, позволяющая производить накопление частиц в первые моменты времени, превышающие периоды бетатронных колебаний. Рассмотренная система инжекции обладает достаточной областью изменений параметров для устойчивой работы и имеет большие возможности по варьированию амплитуды входного тока и длительности инжекции. Требуется дополнительное исследование процесса существования пучка на орбите

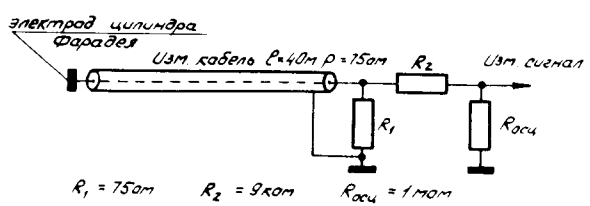
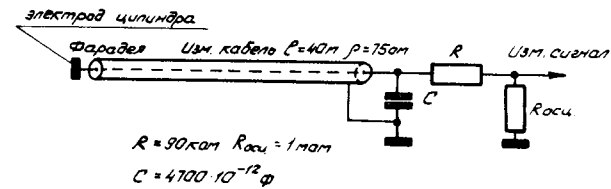


Рис. 9. Схема электрических измерений. 1 - емкостный сигнал, 2 - токовый сигнал.

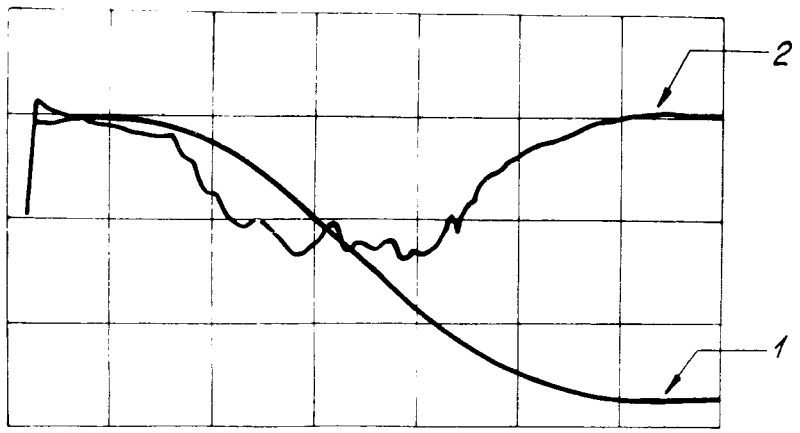


Рис. 10. Характерный сигнал высадки $/R = 19\text{ см}/$. 1 - емкостный сигнал; $/20\text{ мкс/см}$, $- 10\text{ В/см}/$, 2 - токовый сигнал; $/20\text{ мкс/см}$ и $0,2\text{ В/см}/$.

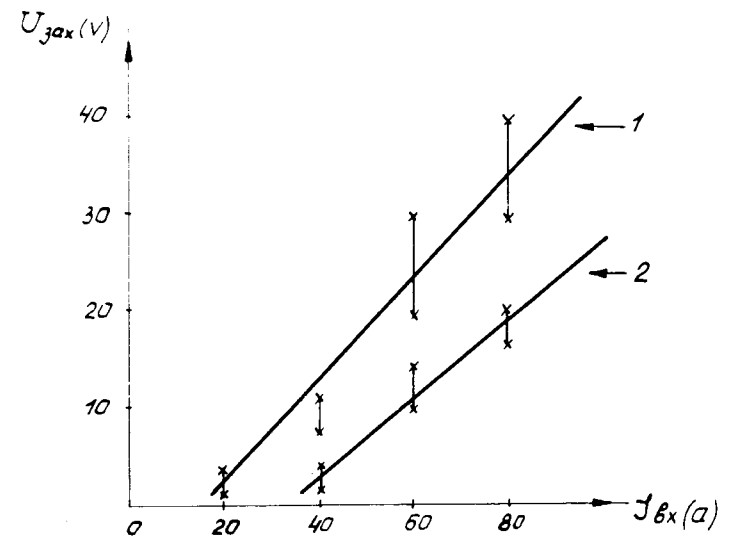


Рис. 11. Емкостный сигнал на $R = 15\text{ см}$ как функция инжектируемого тока. 1 - длительность инжекции - 50 нс , 2 - длительность инжекции - 20 нс , 20 В соответствуют 10^{12} частиц.

перехвата и сжатия его в поле I ступени, поскольку с одной стороны ток на орбите перехвата через 1 мкс практически не зависит от длительности инжекции, с другой - эксперименты по сжатию показывают преимущество более длинных инжектируемых пучков по сравнению с короткими. Кроме того, необходимо выяснить причину потерь интенсивности /примерно в 2 раза/ при перехвате и сжатии кольца в I ступени.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность В.П.Саранцеву за обсуждение результатов и коллективу отдела модели ускорителя ОНМУ за помощь в работе.

Литература

1. И.Габанец и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-8353, Дубна, 1974.

2. В.М.Жабицкий и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-8354, Дубна, 1974.
3. И.Габанец и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-9139, Дубна, 1975.
4. И.Габанец , Х.Гурач. Сообщение ОИЯИ, Р9-9141, Дубна, 1975.

*Рукопись поступила в издательский отдел
20 апреля 1976 года.*