

Многооборотная инжекция в протонный синхротрон на энергию 76 Гэв

АДО Ю. М., ЗАЙЦЕВ В. И., ОВЧИННИКОВ М. Ф.

Первые предложения по многооборотной инжекции в протонный синхротрон ИФВЭ на энергию 76 Гэв были сделаны в работе [1]*. При дальнейшем изучении этого вопроса была принята несколько иная методика [2], практическое осуществление которой не потребовало значительных изменений проектных систем ввода пучка.

Применение многооборотной инжекции позволяет более полно использовать фазовый объем кольцевого ускорителя и накапливать большее число частиц без увеличения импульсного тока инжектора. По данным работы [3], 90% частиц инжектируемого пучка занимает радиальное фазовое пространство $\pi \cdot 2 \text{ см} \cdot \text{Мрад}$. Согласно измерениям, проведенным на ускорителе при существующих искажениях орбиты и номинальном ускоряющем напряжении, амплитуды бетатронных колебаний частиц с максимальным отклонением импульса от равновесного значения ограничены по радиусу фазовым пространством $\pi \cdot (4 \pm 0,5) \text{ см} \cdot \text{Мрад}$. Таким

* Рассматривался первоначальный вариант ускорителя на энергию 60 Гэв.

образом, при двух- и трехоборотной инжекции в радиальном направлении число усвоенных частиц может быть существенно увеличено.

Ниже дано краткое описание методики и приведены полученные на ускорителе экспериментальные результаты.

Устройства ввода пучка в кольцевой ускоритель

Для ввода пучка в ускоритель используется система отклоняющих конденсаторов [4, 5]. Расположение оборудования показано на рис. 1. В камере кольцевого ускорителя находятся пять конденсаторов, предназначенных для отклонения пучка в радиальном направлении. На конденсаторе E_1 , размещенном вне апертуры камеры, напряжение поддерживается постоянным. Параметры конденсатора подобраны (выбраны) такими, чтобы угол инжекции мог изменяться на величину до 31,5 Мрад. Напряжения на конденсаторах E_2 — E_5 , охватывающих рабочую область камеры, снимается за время, значительно меньшее времени оборота пучка. Угол отклонения пучка частиц в конденсаторах

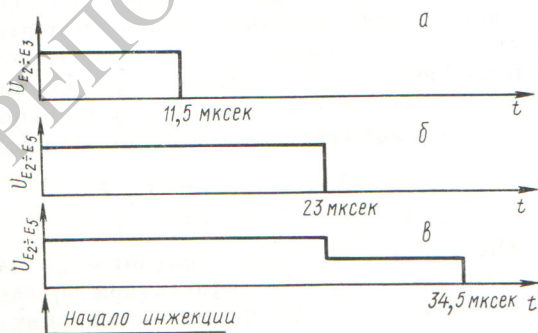
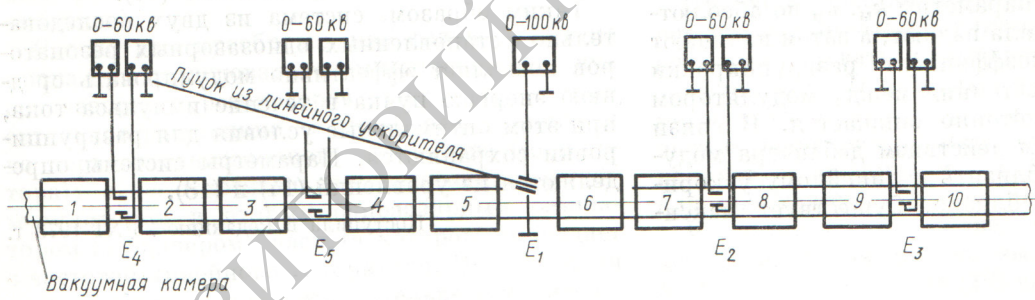


Рис. 1. Расположение устройств ввода пучка частиц и временные диаграммы напряжений на отклоняющих конденсаторах: 1—10 — блоки кольцевого электромагнита; E_1 — E_5 — отклоняющие конденсаторы; U_E — напряжение на отклоняющих конденсаторах; а — однооборотная инжекция; б — двухоборотная; в — трехоборотная.

может достигать 4,5 мрад. Каждая пластина конденсаторов имеет отдельный источник питания. Это позволяет снимать напряжение с каждой пластины через определенный промежуток времени, что равнозначно ступенчатому изменению отклоняющего электрического поля.

Методика многооборотной инжекции

Методика осуществления двухоборотной инжекции представлена на рис. 2. Центр пучка инжектируется в точку A_1 на фазовой плоскости с координатами $r_{и1}$, $r'_{и1}$. В отличие от однооборотной инжекции начальные условия ввода пучка не компенсируются полностью действием полей конденсаторов E_2 , E_3 (r_k , r'_k), поэтому пучок на первом обороте совершает когерентные колебания около равновесной орбиты (точка O). Амплитуда и начальная фаза колебаний соответствует точке A на азимуте инжекции. В зависимости от Q_r пучок при выключенных конденсаторах через оборот попадает в одну из указанных на рис. 2 точек выбранной фазовой траектории. Действие полей конденсаторов E_4 , E_5 (r_b , r'_b) приводит к смещению центра пучка в точку B_1 , и его координаты определяются соотношением

$$\begin{pmatrix} r_1 - r_b \\ r'_1 - r'_b \end{pmatrix} = M(Q_r) \begin{pmatrix} r_{и1} - r_k \\ r'_{и1} - r'_k \end{pmatrix},$$

где $M(Q_r)$ — матрица оборота. Напряжения на конденсаторах выбираются такими, чтобы при заданной амплитуде когерентных колебаний центры эмиттансов, соответствующие двум оборотам пучка, располагались на фазовой траектории симметрично. На этом же рисунке показано заполнение фазовой плоскости пучком для $Q_r = 9,8$; расчет проведен с учетом реальной формы эмиттанса. Достаточно

широкий диапазон изменения углов отклонения в конденсаторах ввода дает возможность инжектировать пучок в течение двух оборотов одинаково эффективно для различных частот бетатронных колебаний. После завершения второго оборота напряжение на пластинах быстро снимается, обеспечивая захват накопленного пучка в магнитное поле ускорителя. Если напряжения на импульсных конденсаторах поддерживать постоянными в течение трех оборотов, то можно осуществить также трехоборотную инжекцию. Однако при этом вклад каждого из оборотов в накопленную интенсивность будет зависеть от Q_r . Если изменять напряжения на конденсаторах ввода скачкообразно после двух оборотов, то фазовая плоскость будет заполняться более равномерно и эмиттансы пучков расположатся на фазовой траектории через $2\pi/3$. При таком способе инжекции амплитуды когерентных колебаний одинаковы для всех оборотов. Это исключает зависимость эффективности ввода пучка от Q_r и позволяет получать максимальное число накопленных частиц в достаточно большом диапазоне изменений частот бетатронных колебаний частиц.

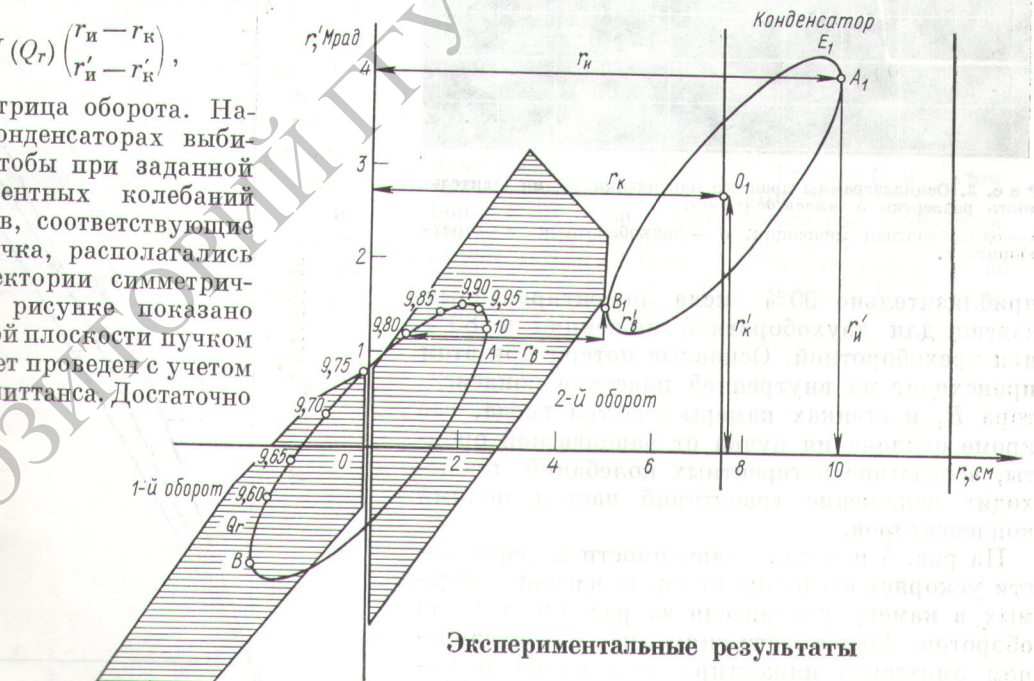
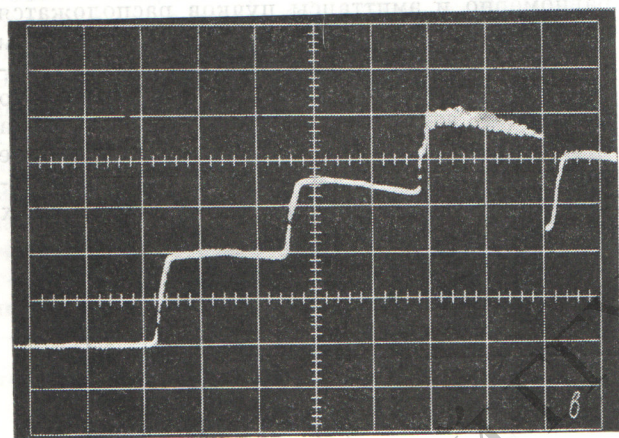
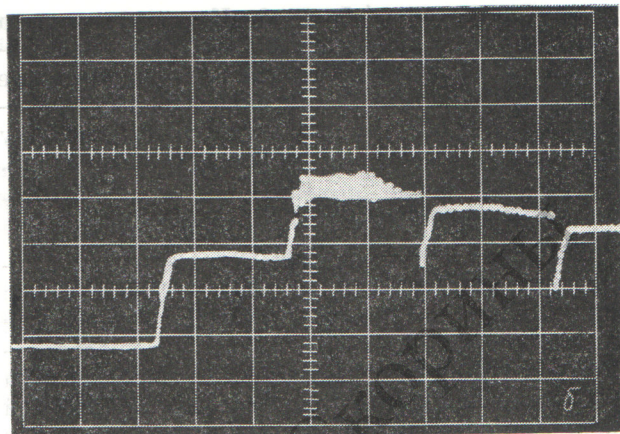
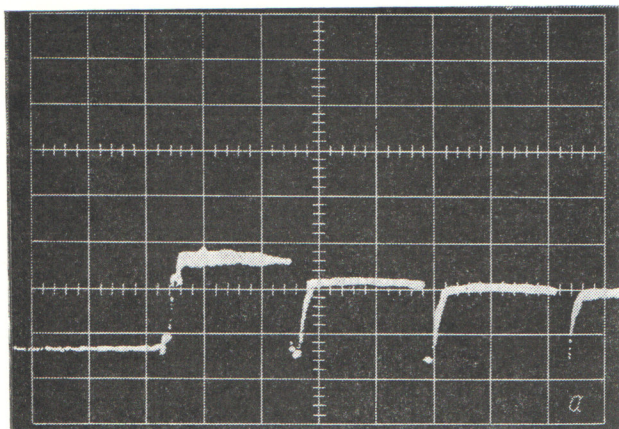


Рис. 2. Схема двухоборотной инжекции для $Q_r = 9,8$ (заштрихованная часть — заполнение фазовой плоскости частицами).

Экспериментальные результаты

Процесс накопления частиц при различных режимах инжекции показан на рис. 3, где приведены осциллограммы сигналов пучка с датчика, расположенного в камере кольцевого ускорителя. Число накопленных частиц составляет

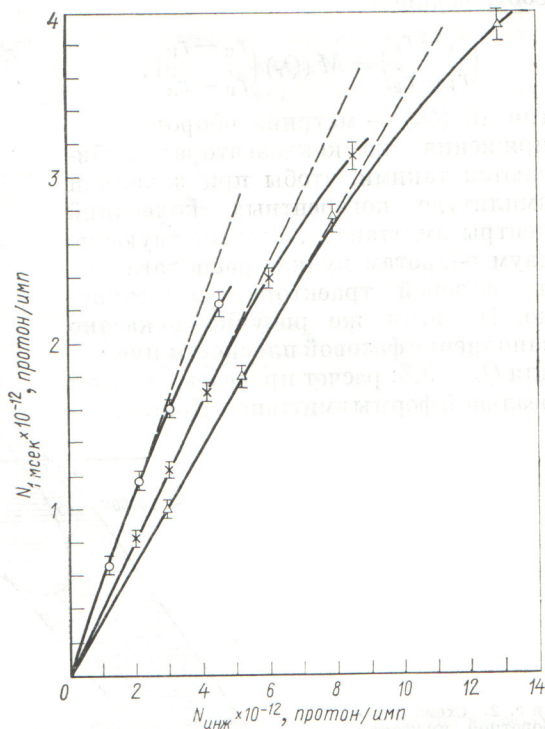


Р и с. 3. Осциллограммы процесса накопления частиц (длительность развертки 5 мксек/деление): а — однооборотная инжекция; б — двухоборотная; в — трехоборотная.

приблизительно 90% числа инжектированных частиц для двухоборотной инжекции и 80% для трехоборотной. Основные потери при этом происходят на внутренней пластине конденсатора E_1 и стенках камеры участка ввода, где кроме отклонения пучка от равновесной орбиты, вследствие когерентных колебаний, происходит искажение траекторий частиц полями конденсаторов.

На рис. 4 показаны зависимости интенсивности ускоряемого пучка от числа частиц, вводимых в камеру ускорителя за различное число оборотов. Зависимости снимались при неизменном эмиттансе инжектируемого пучка и импульсном разбросе частиц $\frac{\Delta P}{P} \leq \pm 3 \cdot 10^{-3}$. Интенсивность измерялась через 1 мсек после инжекции. Амплитуда когерентных колебаний в точке ввода составляла 2,5 см для двухоборот-

ной инжекции и 2 см для трехоборотной. Эти величины выбраны из условия заполнения аксептанта максимальным числом частиц. При малых токах инжекции число частиц, захваченных в режим ускорения, линейно зависит от числа инжектированных частиц. Коэффициент захвата $N_{1 \text{ мсек}}/N_{\text{и}}$ для однооборотной инжекции составляет 0,55, для двухоборотной 0,40 и для трехоборотной 0,35. В случае однооборот-



Р и с. 4. Зависимости числа частиц, захваченных в режим ускорения, от числа инжектированных частиц при различном числе оборотов инжекции:

—○— — один; —×— — два; —△— — три.

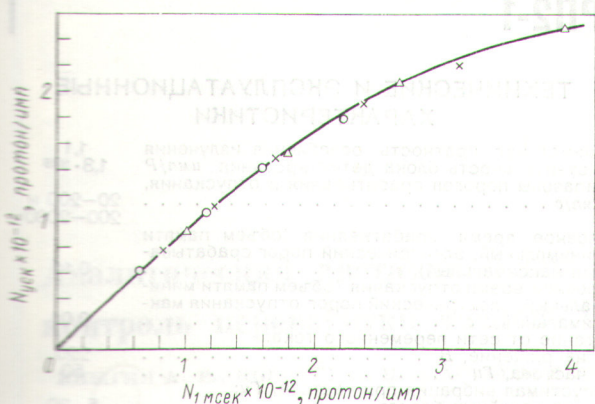


Рис. 5. Зависимость числа частиц, ускоренных до конечной энергии, от числа частиц, захваченных в режим ускорения: ○ — один оборот; × — два; △ — три.

ной инжекции число захваченных частиц совпадает с числом частиц, находящихся в устойчивых фазах ускоряющего напряжения. С увеличением числа оборотов инжекции происходят потери частиц с амплитудами бетатронных колебаний, выходящими за пределы акцептанса. Полученный при этом коэффициент захвата совпадает с расчетным значением [2] в пределах стабильности работы ускорителя. Увеличение плотности инжектируемого пучка приводит к дополнительным потерям, связанным, по-видимому, с действием собственного поля пучка частиц. Следует отметить, что при увеличении числа оборотов инжекции отклонение от линейности происходит при существенно больших значениях N_n . Это можно объяснить уменьшением влияния пространственного заряда пучка частиц на бетатронное движение при увеличе-

нии числа оборотов (уменьшается плотность частиц).

Из рис. 5 видно, что возрастание интенсивности пучка, ускоренного до конечной энергии, замедляется по мере увеличения числа инжектированных частиц. Измерения проводились при различном числе оборотов инжекции. Остальные параметры ускорителя поддерживались постоянными. Отклонения от полученной зависимости, обусловленные нестабильностью выбранного режима ускорителя, не превышают $\pm 3\%$. Потери за время ускорения достигают 30—40% при интенсивности $(2,3 \div 2,5) \cdot 10^{12}$ протон/имп. Полученные данные показывают также, что потери частиц во время ускорения практически не зависят от характера заполнения акцептанса при инжекции.

В настоящее время многооборотная инжекция введена в эксплуатацию.

Авторы благодарят А. А. Наумова за постоянное внимание к работе; Э. А. Мязэ и Е. Ф. Троянова — за полезные дискуссии; В. А. Бекетова, А. Д. Ермолаева и А. Г. Невского — за помощь в проведении измерений.

Поступила в Редакцию 24/XII 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koshkarev D. Intern. Conf. on High-Energy Accelerators and Instrum., CERN, 1959, p. 656.
2. Адо Ю. М., Зайцев В. И., Овчинников М. Ф. Препринт ИФВЭ 73-11. Серпухов, 1973.
3. Демиховский Д. А., Мязэ Э. А., Троянов Е. Ф. «Атомная энергия», 1970, т. 29, вып. 4, с. 272.
4. Бойко С. Н. и др. Электрофизическая аппаратура. Вып. 9. М., Атомиздат, 1971, с. 3.
5. Зайцев В. И. и др. В кн.: Тр. Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1. М., изд. ВИНТИ, 1970, с. 503.