

Исследование поперечных характеристик пучка на входе в протонный синхротрон ИФВЭ

Д. А. ДЕМИХОВСКИЙ, Э. А. МЯЭ, Е. Ф. ТРОЯНОВ

УДК 621.384.634

Условия ускорения пучков высокой интенсивности в протонных линейных ускорителях из-за влияния пространственного заряда пучка и загрузки частицами высокочастотных резонаторов могут существенно отличаться от условий ускорения малых токов. Так, при исследованиях инжектора протонного синхротрона Института физики высоких энергий было обнаружено [1], что при ускорении протонных токов ~ 100 ма происходит значительное расширение интегрального импульсного спектра пучка на выходе линейного ускорителя по сравнению с мгновенным и интегральным спектрами при малых уровнях тока пучка.

Наряду с продольными характеристиками пучка существенный интерес представляют распределение частиц в поперечном фазовом пространстве (эмиттанс) и изменение этого распределения при больших токах ускоренных частиц. Точное знание эмиттанса необходимо для согласования инжектируемого пучка с аксептансом протонного синхротрона и для выяснения причин потерь частиц при вводе в камеру ускорителя.

Ниже сообщается о результатах измерений эмиттанса, выполненных в конце 1968 — начале 1969 г.

Аппаратура и условия измерений. Измерения проводились с помощью специально разработанной аппаратуры [2], в основу которой положен несколько измененный метод двух щелей.

На расстоянии 10 м от выхода линейного ускорителя ЛУ (рис. 1) расположена щелевая диафрагма Д, которая может перемещаться по всей апертуре ионопровода и вырезать из пучка узкую ленту, расходящуюся из-за наличия у частиц поперечных скоростей. Пройдя расстояние 40 м, частицы попадают на коллектор К, состоящий из 20 медных пластин, рас-

положенных параллельно щели. Измерение сигналов с пластин дает информацию об угловом распределении частиц при заданном положении щели. Перемещая с соответствующим шагом диафрагму и измеряя при этом угловое распределение, можно получить распределение частиц в фазовом пространстве. Аппаратура позволяет наблюдать на экране осциллографа форму эмиттанса при заданном уровне фазовой плотности. Для получения более полной информации в описываемых экспериментах проводились прямые измерения фазовой плотности пучка.

Силы квадрупольных линз L_1, L_2, L_3 при измерениях подбирались экспериментально таким образом, чтобы при отсутствии потерь частиц на стенках ионопроводов в работе участка возможно было большее число пластин коллектора. Поскольку для расчета режима работы фокусирующего канала, согласующего эмиттанс инжектируемого пучка с аксептансом синхротрона, необходимо знать эмиттанс пучка непосредственно на выходе линейного ускорителя, полученные в эксперименте фазовые картины пересчитывались к выходу инжектора.

Измерялось распределение частиц в фазовом пространстве для начала импульса пучка (длительность 15 мксек), его середины и конца (ток 10—90 ма). Точность измерения величины эмиттанса во всех случаях составляла около 10%.

Результаты измерений. Мгновенные фазовые картины пучка, соответствующие 100% тока, в начале, середине и конце импульса при токе линейного ускорителя 90 ма приведены на рис. 2. Форма эмиттанса в различных сеансах измерений в основном повторяется, за исключением «отростков» (см. рис. 2, б), которые могут появляться как в r -, так и в z -направлениях. Величина их может быть довольно значительной, однако доля тока в них не превышает 5%.

Из рис. 2 видно, что в течение импульса инжекции фазовая картина вращается и пучок когерентно смещается по углу (координата центра тяжести пучка в пределах точности измерений остается постоянной). Для вертикального направления угловое смещение практически не зависит от тока и составляет $\sim 1,3$ мрад, для горизонтального направления

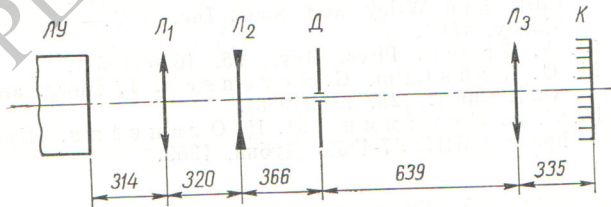
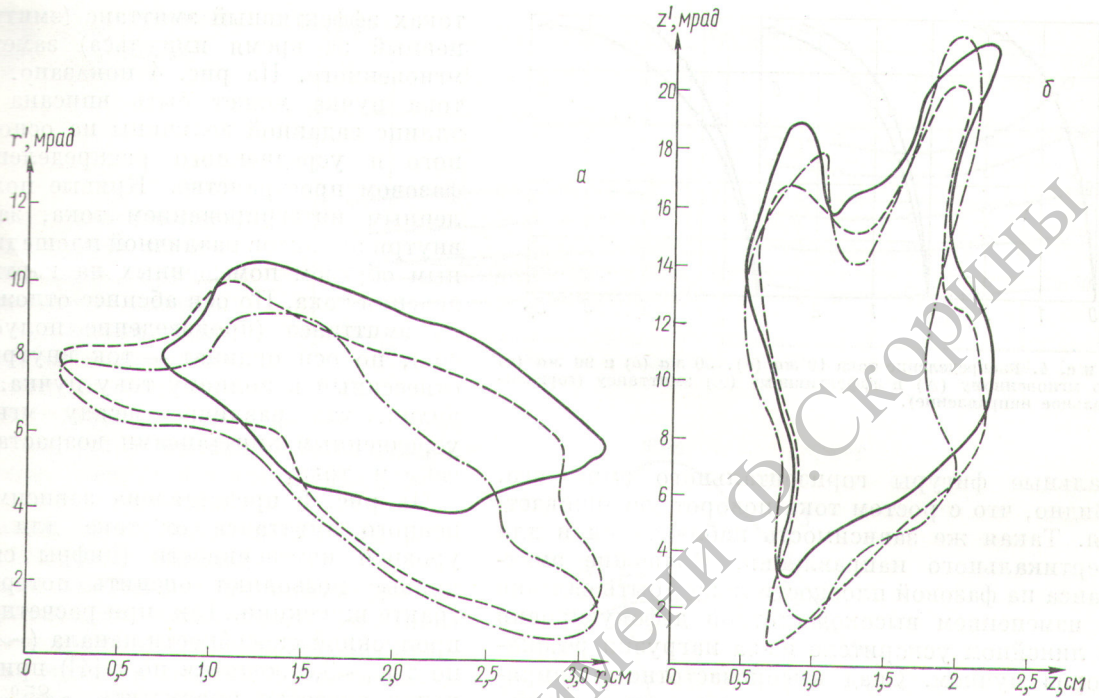
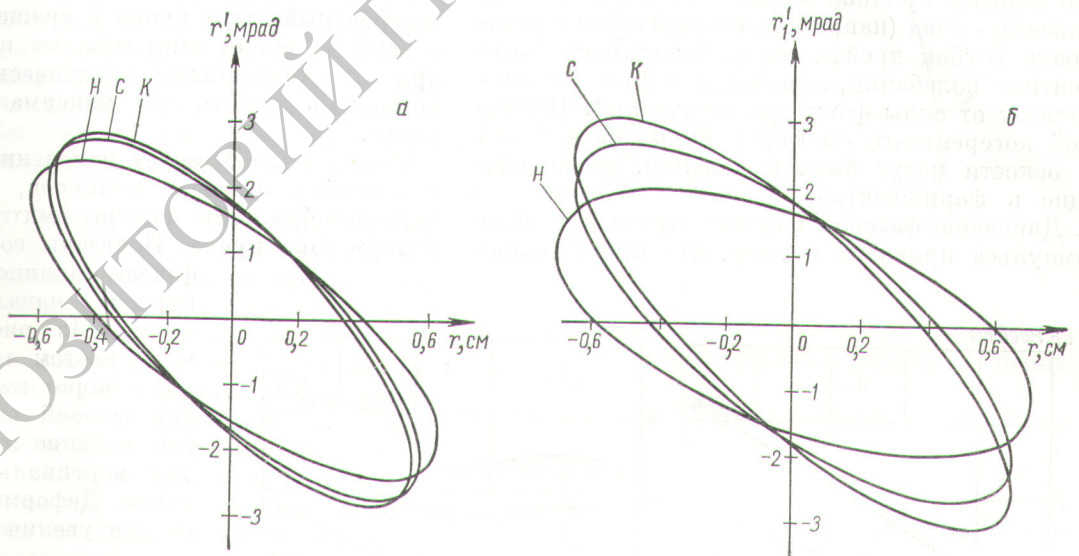


Рис. 1. Расположение оборудования при проведении измерений.



Р и с. 2. Полный эмиттанс при токе пучка 90 мА в горизонтальном (а) и вертикальном (б) направлениях: — начало импульса; - - - - середина импульса (7 мксек); - · - · - конец импульса (15 мксек).



Р и с. 3. Вращение фазового эллипса (горизонтальное направление) в течение импульса инжекции: а — ток пучка 50 мА; б — ток пучка 90 мА; н, с, к — соответственно начало, середина и конец импульса.

угловое смещение растет с током от $\sim 0,6$ мрад при $I_{\text{ду}} = 10$ мА до $\sim 1,6$ мрад при $I_{\text{ду}} = 90$ мА.

Вращение эмиттанса в течение импульса иллюстрирует рис. 3, на котором изображены фазовые эллипсы, вписанные в эксперимен-

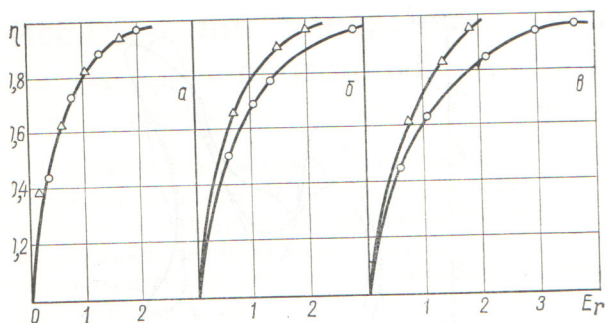


Рис. 4. Распределение тока 10 ма (а), 50 ма (б) и 90 ма (в) по мгновенному (Δ) и эффективному (\circ) эмиттансу (горизонтальное направление).

тальные фигуры горизонтального эмиттанса. Видно, что с ростом тока поворот увеличивается. Такая же зависимость наблюдается и для вертикального направления. Вращение эмиттанса на фазовой плоскости может быть связано с изменением высокочастотной дефокусировки в линейном ускорителе из-за нагрузки резонаторов пучком. Спад высокочастотного напряжения за время импульса приводит к уменьшению дефокусирующего действия ускоряющих зазоров [3] и вследствие этого к вращению фазовой картины пучка по часовой стрелке. По этой же причине может смещаться и центр тяжести пучка (например, из-за ошибок в установке трубок дрейфа пучок испытывает когерентные колебания, амплитуда и фаза которых зависят от силы фокусировки канала). Причиной когерентного смещения пучка на фазовой плоскости могут быть и явления, происходящие в форинжекторе.

Движение фазовой картины пучка в течение импульса приводит к тому, что при больших

токах эффективный эмиттанс (эмиттанс, усредненный за время импульса) заметно больше мгновенного. На рис. 4 показано, какая доля тока пучка может быть вписана в фазовый эллипс заданной величины на основе мгновенного и усредненного распределений тока в фазовом пространстве. Кривые получены численным интегрированием тока, заключенного внутри эллипсов различной площади, оптимальным образом помещенных на картину распределения тока. По оси абсцисс отложена величина эмиттанса (произведение полуосей эллипсов), по оси ординат — ток внутри эллипсов, отнесенный к полному току пучка. Из кривых видно, что различие между мгновенным и усредненным эмиттансами возрастает с увеличением тока.

На рис. 5 представлена зависимость усредненного эмиттанса от тока для нескольких уровней интенсивности (цифры справа). Эти кривые позволяют оценить потери частиц в тракте инъекции. Так, при расчетной величине пропускной способности канала ($\sim 3,1$ мрад·см по z и $\sim 3,8$ мрад·см по r [4]) при токе 90 ма канал способен пропустить $\sim 85\%$ тока по z и $\sim 95\%$ тока по r , т. е. полные потери могут составлять $\sim 20\%$.

Такие же кривые для мгновенного эмиттанса (рис. 6) показывают, что если скомпенсировать когерентный сдвиг пучка и вращение фазового объема за время импульса, то потери частиц при инъекции можно практически полностью устранить вплоть до максимальных токов пучка.

Рис. 7 иллюстрирует изменение ориентации мгновенных фазовых эллипсов, вписанных в экспериментальные фигуры эмиттанса, с изменением тока пучка. Показаны горизонтальные фазовые эллипсы, соответствующие началу импульса пучка. Из рисунка видно, что с ростом тока происходит поворот эмиттанса против часовой стрелки. Такое же явление имеет место и для вертикального направления. Деформация эмиттанса при увеличении тока пуч-

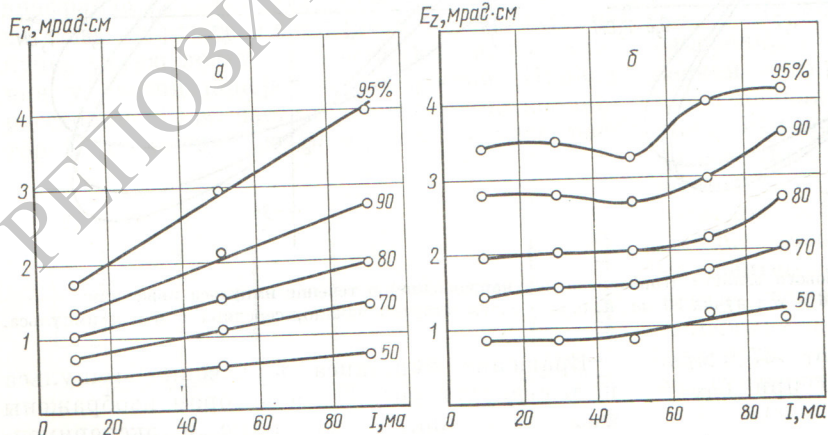


Рис. 5. Зависимость эффективного эмиттанса от тока пучка: а — горизонтальное направление; б — вертикальное направление.

Рис. 6. Зависимость мгновенного эмиттанса от тока пучка:

а — горизонтальное направление;
б — вертикальное направление.

на может быть качественно объяснена действием пространственного заряда, приводящего к снижению частоты поперечных колебаний. Для интегрального эмиттанса наблюдается такой же эффект, однако в этом случае он менее выражен из-за обсуждавшегося ранее вращения фазовой фигуры в течение импульса в противоположную сторону.

На основании проведенных измерений можно сделать следующие выводы:

1. В течение импульса тока инжектора изменяется ориентация мгновенного эмиттанса пучка на фазовой плоскости и происходит угловое смещение пучка в целом. С увеличением тока пучка эти когерентные эффекты усиливаются.

2. Когерентные изменения эмиттанса в течение импульса приводят к увеличению эффективного эмиттанса по сравнению с мгновенным, в результате чего происходят дополнительные потери частиц при инжекции в синхротрон больших токов. Наиболее существенно это обстоятельство будет сказываться при осуществлении многооборотной инжекции, когда длительность импульса частиц значительно возрастает.

3. Величина мгновенного эмиттанса слабо зависит от тока пучка; при компенсации когерентных изменений эмиттанса в камеру ускорителя можно инжектировать более 90% всех частиц.

4. Изменение ориентации эмиттанса на фазовой плоскости при изменении тока пучка приводит к тому, что для каждого тока существует свой оптимальный режим магнитной оптики тракта ввода пучка в синхротрон.

5. Компенсация спада ускоряющего напряжения в течение импульса позволит улучшить не только продольные, но и поперечные характеристики пучка.

Авторы выражают искреннюю благодарность группе обслуживания линейного ускорителя, обеспечившей проведение экспериментов, Б. П. Ломову, принимавшему участие в измерениях, С. Л. Трояновой и В. П. Сидоровой за

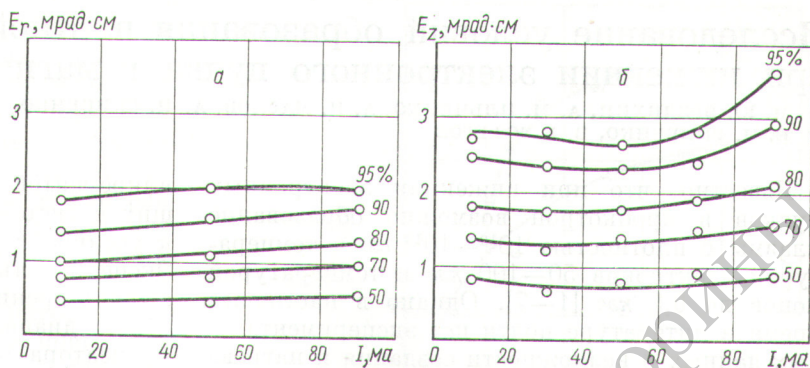


Рис. 7. Изменение ориентации мгновенных фазовых эллипсов (начало импульса) с ростом тока пучка (горизонтальное направление).

помощь в обработке и оформлении результатов, Ю. М. Адо за поддержку работы и ценные замечания.

Поступила в Редакцию 27/X 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Ильевский и др. Препринт ИФВЭ, ИНЖ 68-63, 1968 г.
2. D. Demichousky, E. Trojanov. Device for measurement of proton beam emittance. Proc. of symposium on beam intensity measurement. Daresbury, 1968, p. 244-251.
3. И. М. Капчинский. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М., Атомиздат, 1966.
4. Э. А. Мязя, Е. Ф. Троянов. Препринт ИФВЭ, СКУ 68-74, 1968 г.