

Динамика пучка заряженных частиц в линейном ускорителе высокой мощности

И.А. Воробьёв

ГНЦ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

Проведены расчёты динамики пучка в одном из вариантов проектируемого ЛУ протонов [1]. На данном этапе расчётов в качестве параметров начальной (НЧУ) и промежуточной (ПЧУ) частей взяты таблицы параметров готовых структур ПОКФ-2 [2] и Альвареца [3]. Части ЛУ состыкованы вплотную без применения согласующих каналов. Расчёт динамики пучка в структурной схеме в целом при отсутствии согласования на переходах между частями позволяет выявить начальные условия формирования ореола пучка, исследовать его эволюцию при различных токах в условиях, способствующих его наибольшему развитию.

Основные параметры ЛУ: ПОКФ-2 до энергии 3 МэВ на рабочей частоте 150 МГц, ПЧУ из 5 секций Альвареца до 100 МэВ на частоте 300 МГц и основная часть (ОЧУ) из 3000 однозачорных резонаторов до энергии $\approx 1,5$ ГэВ на частоте 600 МГц, средний темп ускорения на длине резонатора 20 см – 2,5 МэВ/м. Средний радиус апертуры канала в НЧУ – 1 см, в секциях Альвареца – 1 см, в ОЧУ – 5 см. Энергия инъекции – 81 кэВ. В начале ОЧУ на первых 300 ускоряющих резонаторах применён участок продольного согласования с синхронной фазой, изменяющейся от -90° до постоянного значения -35° по гармоническому закону [4]. Период фокусировки в ПЧУ – ФОДО длиной $2\beta\lambda$, в ОЧУ – ФОДО длиной $8\beta\lambda$.

В основу численного моделирования положены следующие параметры пучка: средний ток 30; 75 и 150 мА, нормализованный эмиттанс 0,2 см·мрад на уровне 2σ , продольное распределение частиц на входе равномерное с разбросом по энергиям $\pm 1\%$, инжектируемый пучок с микроканоническим распределением согласован с каналом в поперечной плоскости по среднеквадратическим значениям, число крупных частиц в одном сгустке 1000, число сгустков 3.

Численное моделирование проводилось по программе PROTON [5] с применением для счёта кулоновского поля крупных частиц только 1-го уровня по переборной схеме и рециркуляции частиц. Радиальная компонента поля в ускоряющих зазорах вычислялась по формуле:

$$E_r(z, r) = 2E_r^0 \frac{z}{l} I_0 \left(\frac{r}{r_0} \right),$$

где E_r^0 – максимальное значение радиальной компоненты на радиусе апертуры r_0 ; l – длина резонатора, координата z отсчитывается от середины зазора. Данная формула и продольное распределение типа квадратной волны с амплитудой E_z^0 при $E_r^0/E_z^0 = 0,4$ хорошо аппроксимируют распределения полей, вычисленных по программе OPERA [6] для геометрически подобного резонатора. Фокусирующие поля линейны.

В статистику включены все частицы с отклонением продольной координаты z на $\pm \beta\lambda/2$ от синхронной частицы центрального сгустка. При проведении статистической обработки с использованием семиинвариантов [7], [8] применена стандартизация распределений с различными среднеквадратическими значениями σ к соответствующей приведенной координате.

Снижение эмиттанса на выходе ПОКФ при его уменьшении на входе (рис. 1а) возможно при надлежащем режиме формирования сгустков. В ПОКФ-2 с мягким режимом формирования по сравнению с ПОКФ-1 [9] появилась возможность снизить величину выходного эмиттанса за счёт повышения фазовой плотности тока источника, что подтверждает сделанный в работе [10] вывод о необходимости изменения режима формирования сгустков. Быстрый рост ореола пучка в ПОКФ-2 наблюдается в конце участка группировки. Выбросы на графиках эмиттансов в ЛУ (рис. 1б, в, г) определяются неускоренными частицами. В данной серии расчётов величины максимальных относительных отклонений частиц составляют в ОЧУ около $5,5\sigma$ в поперечных плоскостях и слабо зависят от тока пучка, а потерь частиц в ОЧУ нет при токе 30 мА. Поэтому данная величина тока выбрана для проведения группового анализа динамики частиц.

Время релаксации пространственного заряда в зависимости от тока инжекции определяется по зависимостям семиинвариантов χ_6 (рис. 2, 3). В отсутствии кулоновского взаимодействия (рис. 2а, 3а) значение χ_6 практически постоянно, что свидетельствует о стабильности распределения, обеспечение которой на входе в ОЧУ при токах ниже 150 мА требует в ПЧУ достаточного времени ускорения. При увеличении тока инжекции уменьшается время релаксации с тенденцией к распределению Гаусса в поперечных плоскостях.

При проведении группового анализа методом сечений Пуанкаре сечения проведены в ПОКФ-2 в сечениях с точной квадрупольной симметрией, а в ПЧУ и ОЧУ – в серединах квадрупольей, в началах и концах полулинз. Для ПОКФ сечения построены в момент прохождения синхронной частицей секущих. Для ПЧУ и ОЧУ в сечениях представлены соответствующие координаты при прохождении секущих каждой частицей.

Выделенная из радиального сечения Пуанкаре ореольная часть на последних 70 линзах (483 зазорах) ОЧУ показана на рис. 4а. По этой части определены номера ореольной группы частиц, сечения Пуанкаре, для которых на этом участке показаны на рис. 4б в радиальном и рис. 5б в продольном фазовых пространствах. На рис. 5а видна групповая концентрация частиц в продольном фазовом пространстве при их выходе в ореольную часть (рис. 4а). При инжекции ореольные частицы распределены преимущественно в области больших радиусов (рис. 4в) без выраженных особенностей в продольной фазовой области сгустка (рис. 5в). На выходе ПОКФ эти частицы занимают преимущественно периферическую часть (рис. 7а) продольного фазового портрета сгустка, а к выходу из ПЧУ эти частицы накапливают значительные нелинейные искажения (рис. 7б). С ростом ореола (рис. 6) ореольные частицы перераспределяются к центру сепаратрисы на выходе ОЧУ (рис. 7в). В сечениях Пуанкаре для ПОКФ, ПЧУ и ОЧУ в радиальном фазовом пространстве они покрывают такую же площадь, а в продольном фазовом пространстве – меньшую по сравнению с целым сгустком.

Фурье и траекторный анализ при токе 75 мА для выборочной частицы ореола (рис. 8) и огибающей выявляют необходимые условия связи колебаний и резонансов.

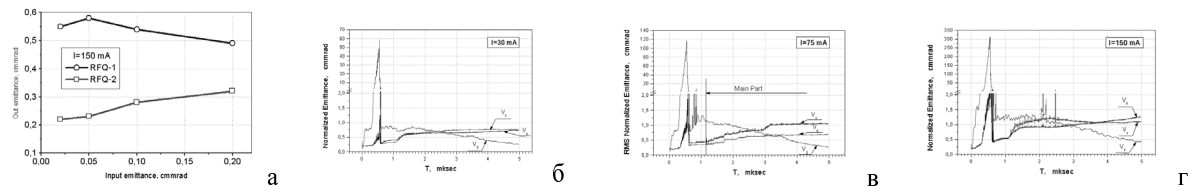


Рис. 1. Зависимости нормализованных среднеквадратических эмиттансов: выходного от входного в структурах с ПОКФ-1 и ПОКФ-2 при токе инжекции 150 мА, при токах 30 (б), 75 (в) и 150 (г) мА.

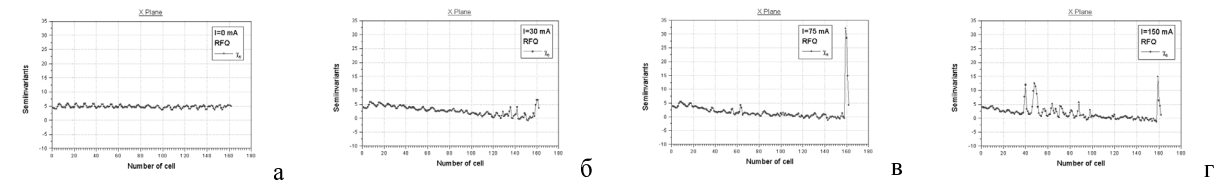


Рис. 2. Зависимость семиинварианта χ_6 в ПОКФ-2 при токах пучка 0 (а), 30 (б), 75 (в) и 150 (г) мА.

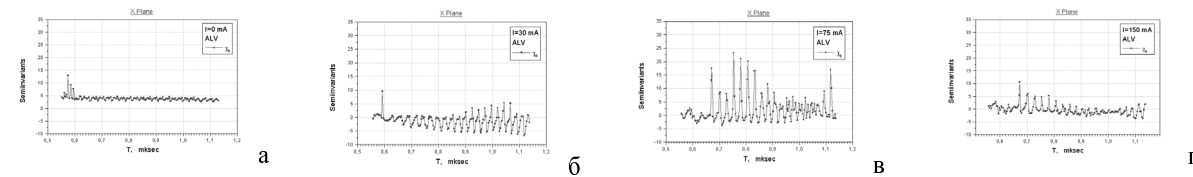


Рис. 3. Зависимость семиинварианта χ_6 в ПЧУ при токе пучка 0 (а), 30 (б), 75 (в) и 150 (г) мА.

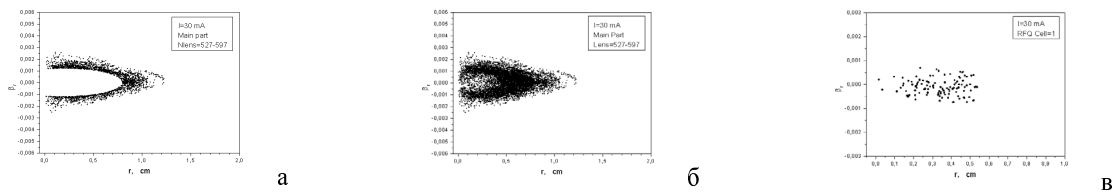


Рис. 4. Ореольная часть сечения Пуанкаре (а), сечение Пуанкаре (б) в конце ОЧУ и фазовый портрет на входе в ПОКФ (в) для ореольной группы частиц в радиальном фазовом пространстве.

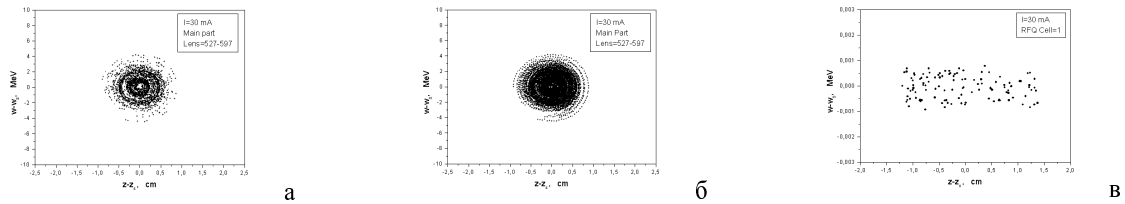


Рис. 5. Ореольная часть сечения Пуанкаре (а), сечение Пуанкаре (б) в конце ОЧУ и фазовый портрет на входе в ПОКФ (в) для ореольной группы частиц в продольном фазовом пространстве.

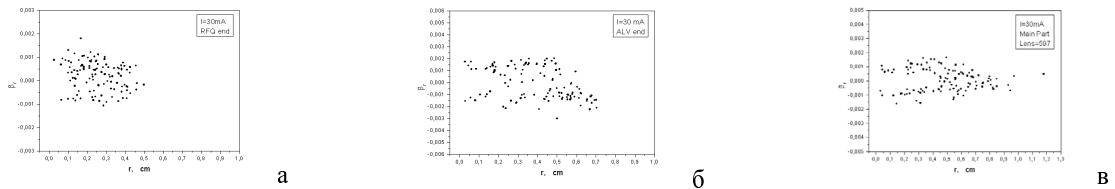


Рис. 6. Фазовые портреты на выходе ПОКФ (а), ПЧУ (б) и ОЧУ (в) для ореольной группы частиц в радиальном фазовом пространстве.

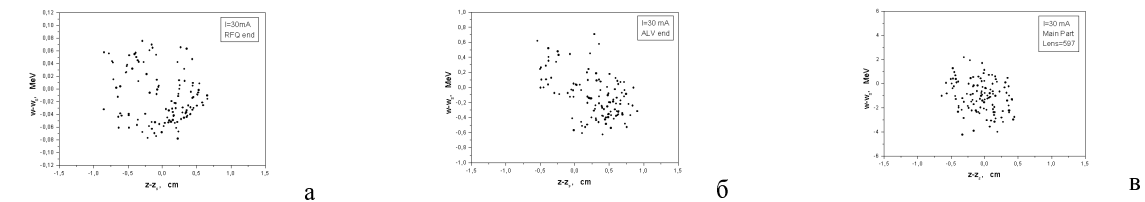


Рис. 7. Фазовые портреты на выходе ПОКФ (а), ПЧУ (б) и ОЧУ (в) для ореольной группы частиц в продольном фазовом пространстве.

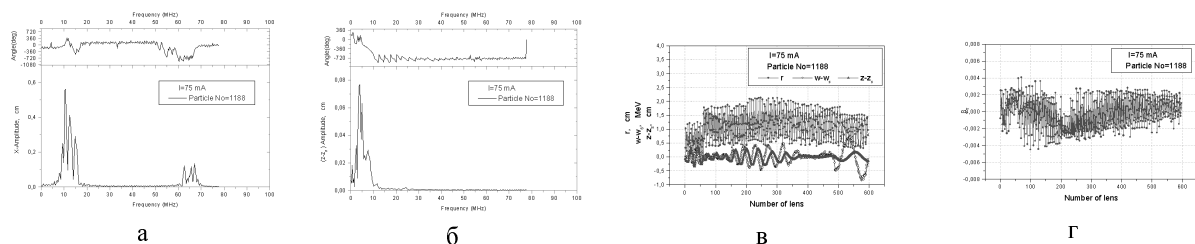


Рис. 8. Фурье анализ колебаний поперечной X (а) и продольной Z (б) траекторий; зависимости радиуса, проекций траекторий в продольном фазовом пространстве (в) и радиальной скорости (г) от номера фокусирующей линзы в ОЧУ для одной из частиц ореола при токе инжекции 75 мА.

Из полученных результатов следует. Выявлена связь продольного и поперечного движений, роль которой может значительно возрасти в сверхпроводящем ЛУ с высоким темпом ускорения. Ореольная группа частиц на выходе ПОКФ распределена на периферии продольного фазового портрета сгустка, в дальнейшем рост ореола сопровождается перераспределением ореольной группы к центральной части сепаратрисы. В

данной серии расчётов потери частиц в ОЧУ при удвоении рабочей частоты в составляющих частях ЛУ не выявляются при токе инжекции 30 мА. Сквозной расчёт динамики пучка в ЛУ высокой мощности позволяет выявить существенные характерные особенности эволюции отдельных групп частиц и пучка в целом в каждой из его составляющих частей.

Литература

- [1] A.A. Kolomiets, V.A. Andreev, I.V. Chuvilo, A.A. Drozdovsky, A.M. Kozodaev, R.P. Kuibida, N.V.Lazarev, V.I.Pershin, V.K.Plotnikov, A.M.Raskopin, T.E.Tretiakova, I.A.Vorobyov, S.G.Yaramishev. Some New Approaches to Design of High Intensity Proton LINAC for Transmutation. – Proc. of LINAC96 Conf., pp. 420-422.
- [2] Р.М.Венгров, И.А.Воробьёв, И.М.Капчинский, А.М.Козодаев, А.А.Коломиец, С.Г.Ярамышев. Линейный протонный ускоритель с пространственно-однородной фокусировкой на энергию 3 МэВ. – М., Препринт ИТЭФ, № 34-93, М., 1993.
- [3] А.И. Балабин, И.М. Капчинский, А.М. Козодаев, А.А. Коломиец, И.М. Липкин, С.Б. Угаров. Основные физические параметры протонного линейного ускорителя “Истра-56” (Часть-I). Препринт ИТЭФ №157-89, М., 1989.
- [4] И.А.Воробьёв Поперечное согласование пучка при непосредственной стыковке канала с ПОКФ со статическим пространственно-периодическим каналом. Препринт ИТЭФ, №4, 1993, – М., 1993.
- [5] И.А. Воробьёв, Е.С.Гальперн, А.А.Коломиец, В.Н.Ляховицкиц, О.С.Сергеева. Численное моделирование динамики пучка в ускорителе ИТЭФ с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. М., Препринт ИТЭФ, № 52, М., 1986.
- [6] Программный комплекс OPERA. VF-05-96-D4. Kidlington, Oxford OX5 1JE, England.
- [7] И.А. Воробьёв. Методика определения сверхмалых потерь частиц по результатам анализа эволюции пространственного заряда в численном моделировании динамики пучка в линейном ускорителе. Препринт ИТЭФ № 40-95 ,1995; ВАНТ, серия: Ядерно-физические исследования, вып. 2, 3 (29,30), Харьков, 1997.
- [8] И.А. Воробьёв. Определение параметров релаксации пространственного заряда с применением функций статистических семиинвариантов. – Труды XV Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1998.
- [9] Импульсный протонный прототип сильноточного линейного ускорителя (основные физические параметры). Отчёт о НИР гос. рег. №У87638, М., 1983г.
- [10] И.А. Воробьёв, А.А. Коломиец, Н.В. Шахрай. Рост эмиттанса в ускорителе с пространственно однородной квадрупольной фокусировкой ИТЭФ. – Труды 11-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1989, том 1, с. 506-508.