

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ЭМИТТАНСА В ПРОЦЕССЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА

Б.И. Иванов, Н.Г. Шулика

ННЦ ХФТИ, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, Украина

Методом компьютерного моделирования исследуется влияние условий продольной группировки протонного пучка в линейном резонансном ускорителе на рост поперечного эмиттанта при ускорении от 0.1 до 3 МэВ протонного пучка с током до 0.3 А. Рабочая частота ускорителя 350 МГц. Для поперечной фокусировки протонов используется электронный пучок с током 85 А и энергией 100 кэВ во внешнем магнитном поле. Определены условия формирования и ускорения протонного пучка с током 100 мА, при которых поперечный эмиттанс на выходе ускорителя составляет 0.40 мм-мрад при начальном эмиттансе 0.32 мм-мрад. Коэффициент захвата протонов в ускорение достигает 99%.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всех сооружаемых мощных линейных ускорителях ионов применяется начальная часть ускорителя на основе пространственно-однородной квадрупольной фокусировки [1]. Ее особенности достаточно хорошо изучены, и весь предыдущий опыт работы с ускорителями на этой основе использован при разработке и сооружении в Лос-Аламосе ускорителя LEDA [2], работающего на частоте 350 МГц в непрерывном режиме с током протонного пучка 100 мА. Следует, однако, отметить, что сооружение RFQ ускорителей требует высокой технической оснащенности, большого опыта и значительных затрат [1]. В связи с этим нам представляется целесообразным рассмотреть линейный протонный ускоритель с фокусировкой электронным пучком с параметрами, сопоставимыми с [2].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В основном структура канала с частотой 350 МГц подобна таковой с частотой 152.5 МГц (см. [3]). Канал состоит из двух секций. В первой секции содержится 128 периодов ускорения, во второй 92. Длина первой секции 1.025 м, энергия на выходе 423 кэВ, длина второй секции 2.014 м, энергия на выходе 3.0 МэВ. Средний темп ускорения в первой секции составляет 0.31 МэВ/м, во второй 1.28 МэВ/м. ВЧ напряжение на зазорах изменяется ступенями от 4.8 кВ на входе до 52.8 кВ на выходе.

Влияние условий продольной фокусировки на изменение поперечного эмиттанта при формировании и ускорении протонного пучка исследовалось методом компьютерного моделирования. Подробно эта методика описана в [3]. Приведенные ниже результаты относятся к случаю, когда для поперечной фокусировки применяется пучок электронов, удерживаемый поперечным магнитным полем; при этом ток пучка электронов составлял 85 А, энергия 100 кэВ, диаметр 2.5 мм. Режим группировки протонного пучка в значительной мере зависит от его интенсивности, что можно проследить по рис.1 и

рис.2, где показаны фазовые портреты пучка в 12-м периоде ускорения для тока 100 и 300 мА.

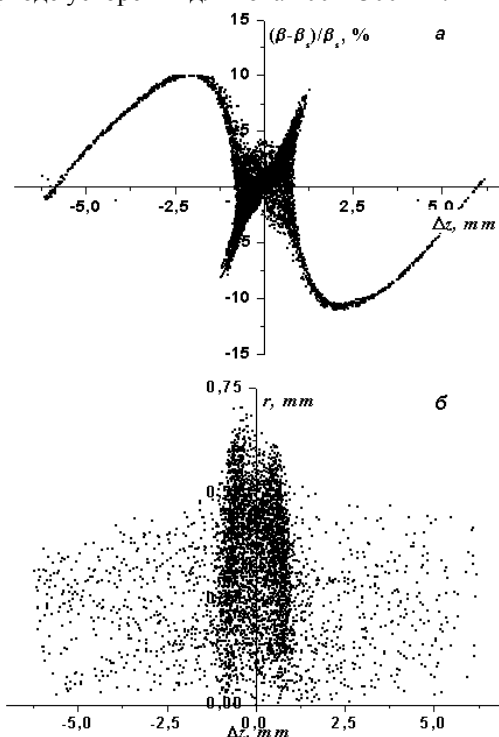


Рис. 1. Характеристики пучка в двенадцатом периоде ускорителя для тока 100 мА при рабочей частоте 350 МГц и энергетическом разбросе $\pm 0,5\%$: фазовый портрет пучка на продольной плоскости (а); распределение плотности частиц на плоскости rz (б)

В этом периоде находится 1-й продольный фокус в случае, когда интенсивность пучка незначительна, т.е. продольные кулоновские силы значительно меньше сил ВЧ поля. На рис.1,а и рис.1,б приведены фазовый портрет пучка и его проекция на плоскость (rz) при токе 100 мА, а на рис.2,а и рис.2,б – эти же характеристики для тока 300 мА.

Как следует из приведенных результатов, уже при токе протонного пучка 100 мА продольный фокус является сильно размытым, при этом продольное сжатие сопровождается поперечным расширением

ем пучка. При токе 300 мА продольный фокус практически отсутствует; при этом поперечные размеры для обоих случаев различаются незначительно. Центральную часть рис.1,а можно трактовать как результат отражения друг от друга двух налетающих потоков из-за расталкивающего действия кулоновских сил. Для тока 300 мА (см. рис.2,а) в центральной части сгустка не видно ни встречного движения, ни отражения частиц, то есть наблюдается равновесие между группирующими силами внешнего ВЧ поля и кулоновскими силами расталкивания.

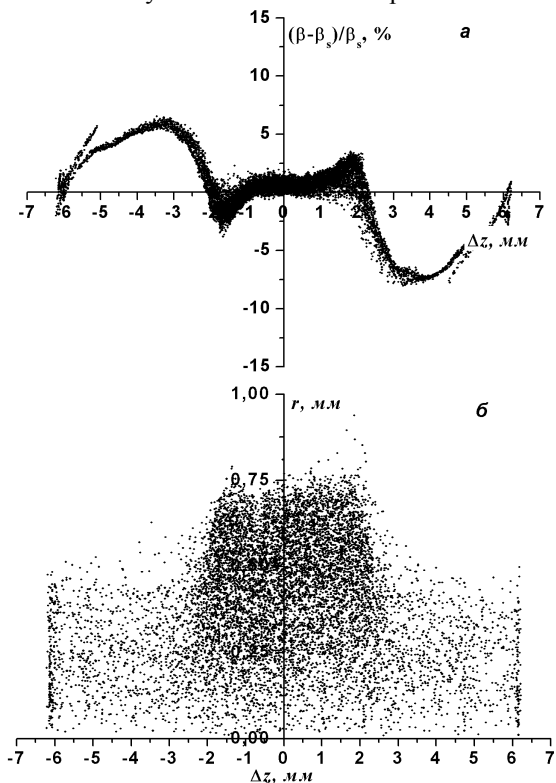


Рис. 2. Характеристики пучка в двенадцатом периоде ускорителя для тока 300 мА при рабочей частоте 350 МГц и энергетическом разбросе $\pm 0,5\%$: фазовый портрет пучка на продольной плоскости (а); распределение плотности частиц на плоскости rz (б)

На рис.3 показаны изменения среднеквадратичного поперечного эмиттанта (RMSr), среднеквадратичного продольного эмиттанта (RMSz) и внутренней потенциальной энергии ускоряемого сгустка W_p вдоль длины первой секции для тока 100 мА. Ниже, на рис.4 и 5, показаны те же характеристики для токов 200 и 300 мА. Величина внутренней потенциальной энергии определялась суммированием (по всем модельным частицам) произведения заряда частицы на величину кулоновского потенциала в точке ее нахождения. Эта величина определяет степень полного сжатия сгустка: чем меньше объем, занимаемый сгустком, тем выше значение потенциальной энергии. По оси абсцисс на этих рисунках отложен номер периода ускорения, а по оси ординат – соответ-

ствующее значение RMSr, RMSz и W_p в конце данного периода.

Из рис.3 видно, что после 10-го периода при токе пучка 100 мА на кривой зависимости потенциальной энергии W_p от номера периода ускорения четко просматривается модуляция в виде биений разных частот.

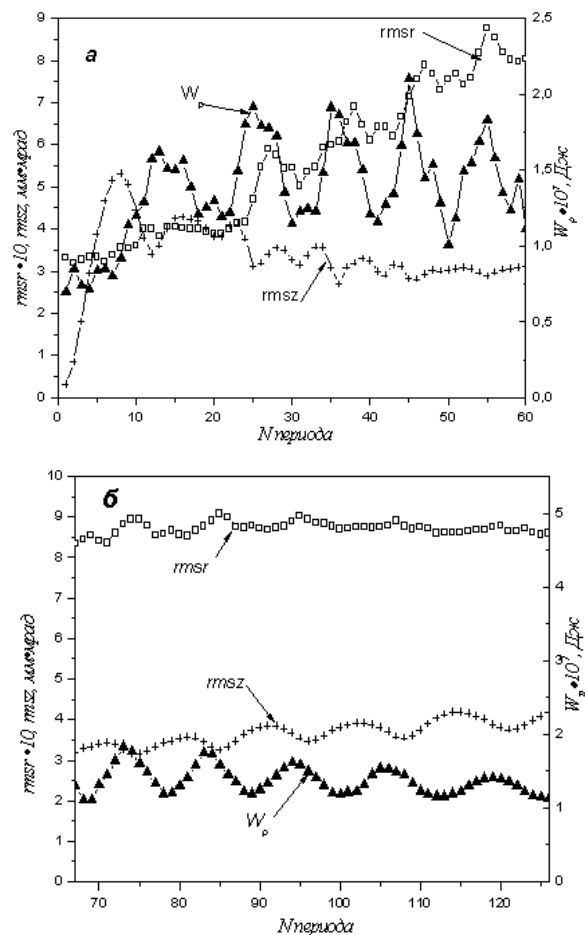


Рис. 3. Изменения поперечного эмиттанта RMSr, продольного эмиттанта RMSz и внутренней потенциальной энергии W_p вдоль длины для тока 100 мА: в начале первой секции (а); в конце первой секции (б). Здесь и на рис. 4-7,9,10 обозначено:

- ++++ – RMSz (1 ед.=1.0 мм·мрад),
- RMSr (1 ед.=0.1 мм·мрад),
- ▲▲▲▲ – W_p (1 ед.= 10^{-7} Дж)

Детальный анализ этих результатов показал, что в начале процесса группирования модуляция осуществляется частотой продольных (фазовых) колебаний и частотой поперечных колебаний частиц в самосогласованном поле, при этом частота поперечных колебаний в 3-4 раза выше.

Поведение кривой потенциальной энергии определяется структурой канала группировки и ускорения. Относительно небольшое ВЧ напряжение (4.8 кВ) на первых десяти зазорах ускорителя слабо влияет на изменение потенциальной энергии сгустка на этом участке канала. После 10-го периода ВЧ напряжение на зазорах увеличивалось в 2.6 раза с

целью увеличения темпа ускорения пучка и обеспечения режима более быстрого затухания амплитуды продольных колебаний. На кривой потенциальной энергии между 10-м и 20-м периодами укладывается один период продольных колебаний. После 20-го периода ВЧ напряжение увеличено еще на 54%. Между 20-м и 40-м периодами ускорения укладываются два периода продольных колебаний. Несмотря на рост амплитуды высокочастотного поля, частота продольных колебаний на этом участке остается примерно постоянной из-за реакции кулоновских сил. В 40-м периоде амплитуда ВЧ напряжения увеличивается еще на 25%. После 40-го периода вырастает амплитуда колебаний более высоких частот, связанная с поперечными колебаниями. Однако эти колебания очень быстро затухают, и после 70-го периода остается модуляция только одной частотой.

На участке до 10-го периода поперечный эмиттанс растет очень медленно. Далее, вместе с ростом амплитуды продольных и поперечных колебаний, скорость роста поперечного эмиттанса увеличивается. При этом рост поперечного эмиттанса значительно снижается на тех участках ускорителя, где на кривой потенциальной энергии отсутствует одна из частот поперечных либо продольных колебаний.

На рис. 4 и рис. 6 показаны изменения RMSr, RMSz и W_p для тока 200 мА.

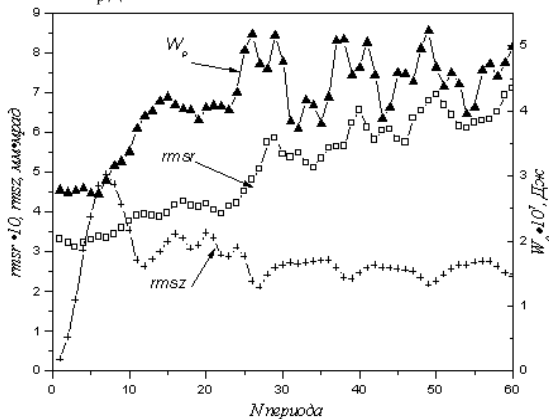


Рис. 4. Изменения поперечного эмиттанса RMSr, продольного эмиттанса RMSz и внутренней потенциальной энергии W_p вдоль длины для тока 200 мА

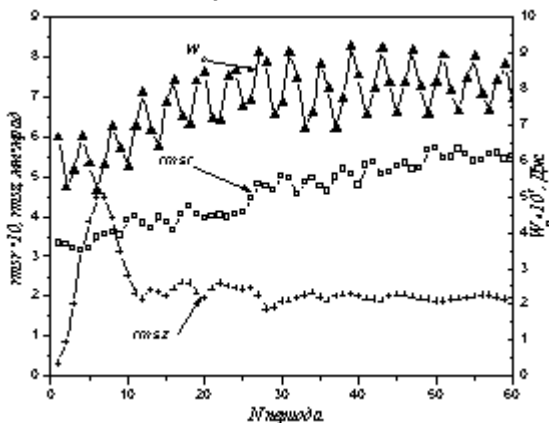


Рис. 5. Изменения поперечного эмиттанса RMSr, продольного эмиттанса RMSz и внутренней потенциальной энергии W_p вдоль длины для тока 300 мА

На участке до 20-го периода, где отсутствуют биения двух частот, рост поперечного эмиттанса небольшой. После 20-го периода его рост увеличивается и продолжается примерно до 70-го периода ускорения (см. рис. 6). После 70-го периода до конца первой секции на кривой W_p заметна модуляция только низкой частоты. На этом участке на кривой RMSr заметна небольшая модуляция этой же частоты, однако, рост эмиттанса отсутствует.

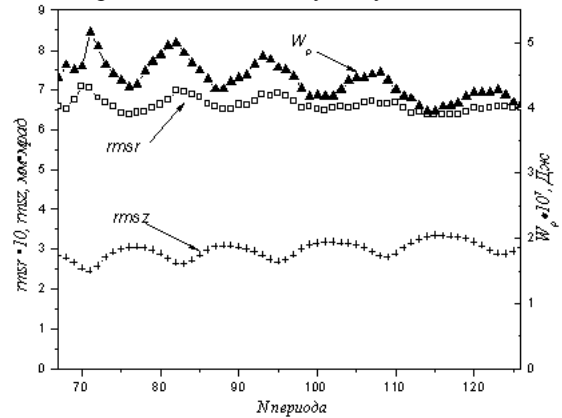


Рис. 6. Изменения поперечного эмиттанса RMSr, продольного эмиттанса RMSz и внутренней потенциальной энергии W_p в конце первой секции для тока 200 мА

На рис. 5 приведены изменения RMSr, RMSz и W_p вдоль канала для тока 300 мА в начальном участке ускорителя. При этом на кривой W_p отсутствует модуляция низкой частоты, так как при такой интенсивности пучка амплитуда ВЧ поля недостаточна для значительного продольного сжатия ступков. С этим согласуется тот факт, что для тока 300 мА поперечный эмиттанс растет значительно медленнее, чем при токах 100 и 200 мА.

Продольный эмиттанс для всех трех значений тока очень резко растет на протяжении первых шести периодов ускорения. Это связано с нелинейностью продольного (синусоидального) ВЧ поля. Затем величина продольного эмиттанса снижается и наблюдаются колебания его величины, которые хорошо коррелируют с поведением внутренней потенциальной энергии, при этом локальные максимумы на кривой продольного эмиттанса соответствуют минимумам потенциальной энергии.

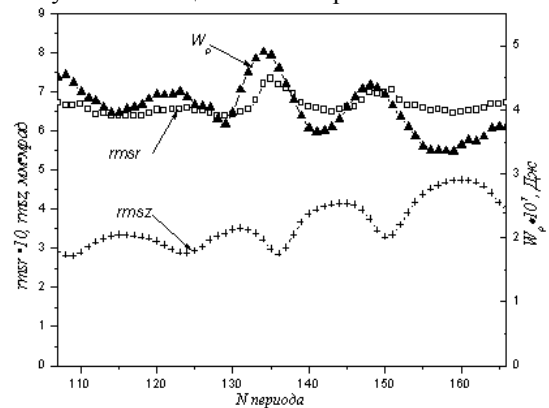


Рис. 7. Изменения поперечного эмиттанса $RMSr$, продольного эмиттанса $RMSz$ и внутренней потенциальной энергии W_p на переходе между секциями для тока 200 мА

На рис. 7 показаны изменения $RMSr$, $RMSz$ и W_p для тока 200 мА на участке от 106-го до 166-го периодов ускорения, охватывающем конец первой секции и начало второй. После 128-го периода амплитуды колебаний для всех трех величин значительно возрастают вследствие увеличения в два раза амплитуды ВЧ напряжения. Как видно из этого рисунка, колебания поперечного эмиттанса очень быстро затухают и его среднее значение практически не меняется до конца ускорителя. Амплитуда колебаний продольного эмиттанса затухает значительно медленнее, кроме того, наблюдается медленный рост его среднего значения. Значения поперечного и продольного эмиттансов в зависимости от тока инжекции на выходе первой и второй секций приведены в таблице. Начальное значение поперечного эмиттанса 0.32 мм·мрад. Здесь же приведено отношение тока ускоренного пучка к току инжекции (K).

№сек-ции	$I_{инж.}$ мА	$RMSr$ мм·мрад	$RMSz$ мм·мрад	K %
	0	0.41	7.3	99.6
1	0	0.43	7.9	99.6
2	0	0.43	7.9	99.6
1	50	0.74	5.3	99.4
2	50	0.76	5.3	99.4
1	100	0.86	4.2	94.6
2	100	0.88	5.1	94.6
1	200	0.65	3.0	92.1
2	200	0.65	5.6	92.1
1	300	0.6	3.1	99.4
2	300	0.64	4.4	99.4

Как видно из таблицы, рост поперечного эмиттанса во второй секции незначителен. Поперечный эмиттанс растет, в основном, на участках группировки пучка.

Приведенные результаты относятся к случаю ввода в ускоритель практически моноэнергетического пучка (с относительно небольшим энергетическим разбросом). Совершенно очевидным является тот факт, что по мере роста энергетического разброса пучка на входе в ускоритель нарушения однородности распределения плотности частиц в процессе группировки и ускорения будут уменьшаться. В этом случае можно ожидать снижения роста поперечного эмиттанса вдоль ускорителя. Однако возникает вопрос о том, как будет меняться коэффициент захвата пучка в режиме ускорения при увеличении энергетического разброса.

Для выяснения этих вопросов было проведено математическое моделирование процесса движения пучка через ускоритель для тока 100 мА с начальным энергетическим разбросом $\pm 15\%$. На рис. 8,а

показан фазовый портрет пучка в 12 периоде для тока 100 мА при разбросе по энергиям в диапазоне $\pm 15\%$, а на рис. 8,б – распределение частиц в плоскости rz . Из сопоставления с результатами, приведенными на рис. 1,а и 1,б видно, что в случае увеличения энергетического разброса нарушения однородности распределения плотности частиц значительно меньше. В этом случае фактически отсутствует продольный фокус.

На рис. 9 и рис. 10 показано изменение поперечного эмиттанса $RMSr$, продольного эмиттанса $RMSz$ и внутренней потенциальной энергии сгустка W_p вдоль ускорителя для первых шестидесяти периодов первой и второй секций.

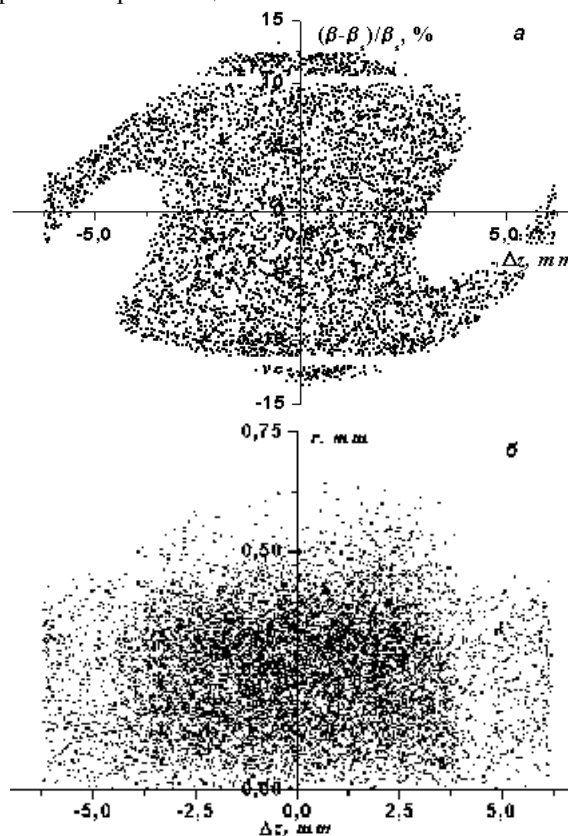


Рис. 8. Характеристики пучка в двенадцатом периоде ускорителя для тока 100 мА при рабочей частоте 350 МГц и энергетическом разбросе $\pm 15\%$: фазовый портрет пучка на продольной плоскости (а); распределение плотности частиц на плоскости rz (б)

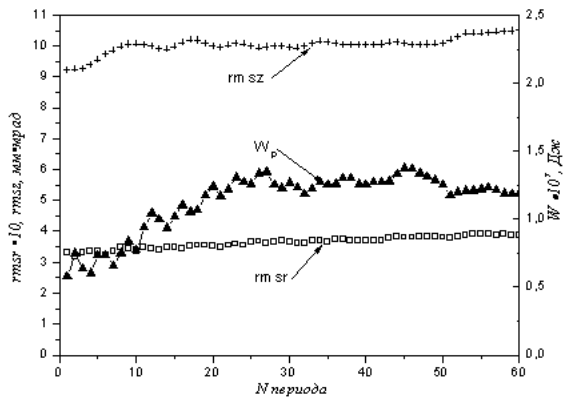


Рис. 9. Изменения поперечного эмиттанса $RMSr$, продольного эмиттанса $RMSz$ и внутренней потенциальной энергии W_p в начале первой секции при токе 100 мА и энергетическом разбросе $\pm 15\%$

Из рис. 9 видно, что в начале ускорителя на кривой внутренней потенциальной энергии W_p имеются высокочастотные колебания относительно небольшой амплитуды. На этом участке ускорителя наблюдается медленный рост как продольного, так и поперечного эмиттансов. За первые 60 периодов поперечный эмиттанс вырастает от значения 0,32 до значения 0,39 мм·мрад.

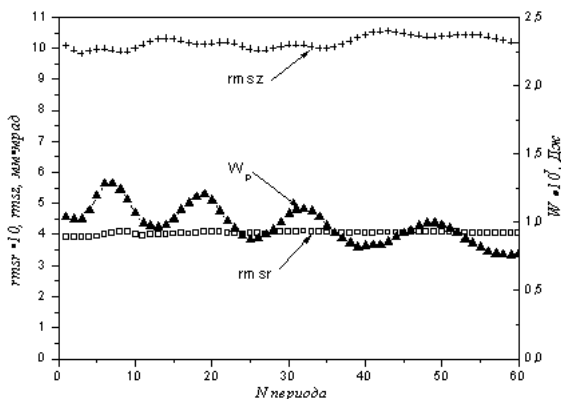


Рис. 10. Изменения поперечного эмиттанса $RMSr$, продольного эмиттанса $RMSz$ и внутренней потенциальной энергии W_p в начале второй секции при токе 100 мА и энергетическом разбросе $\pm 15\%$

Из-за большого энергетического разброса начальное значение продольного эмиттанса значительно больше, чем в случае моноэнергетического пучка. Но так же, как и для моноэнергетического пучка, имеется относительно небольшой рост продольного эмиттанса в первых шести периодах ускорителя. В дальнейшем изменения как продольного, так и поперечного эмиттансов невелики. Даже возникновение колебаний относительно большой амплитуды во второй секции, связанных с продольными колебаниями частиц при увеличении амплитуды высокочастотного напряжения, практически не влияют на поведение поперечного и продольного эмиттансов.

Увеличение энергетического разброса пучка на входе в ускоритель не снижает коэффициента захвата в режим ускорения, который для тока 100 мА ра-

вен 98,7% при энергетическом разбросе $\pm 15\%$. Влияние начального энергетического разброса частиц на выходные параметры пучка можно проследить на рис. 11,а, 11,б и рис.12,а, 12,б, где показаны фазовые портреты пучка (см. рис.11,а и 12,а), а также проекции пучка на плоскость rz (см. рис.11,б и 12,б) для начальных энергетических разбросов $\pm 0,5\%$ (см. рис.11) и $\pm 15\%$ (см. рис.12). При начальном энергетическом разбросе $\pm 0,5\%$ распределение плотности частиц на фазовом портрете пучка (см. рис.11,а) очень неоднородное. Для начального энергетического разброса $\pm 15\%$ распределение частиц по фазовому объему близко к однородному. Продольная протяженность сгустка на рис.12,а несколько больше, чем на рис.11,а, однако, разброс частиц по скоростям меньше. Для рис.12,а разброс частиц по скоростям находится в пределах $\pm 2,5\%$, а для рис.11,а – $\pm 4\%$.

В целом продольный эмиттанс для начального энергетического разброса $\pm 15\%$ на выходе ускорителя в 2 раза больше, чем при разбросе $\pm 0,5\%$, хотя начальные продольные эмиттансы отличаются в 30 раз. При большем энергетическом разбросе поперечные размеры пучка на выходе ускорителя несколько меньше, чем при разбросе $\pm 0,5\%$.

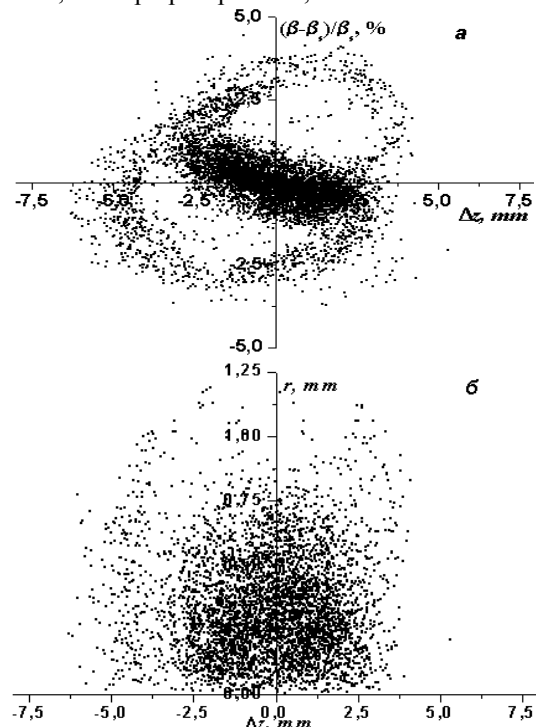


Рис. 11. Характеристики пучка на выходе ускорителя при токе 100 мА, рабочей частоте 350 МГц и энергетическом разбросе $\pm 0,5\%$: фазовый портрет пучка на продольной плоскости (а); распределение плотности частиц на плоскости rz (б)

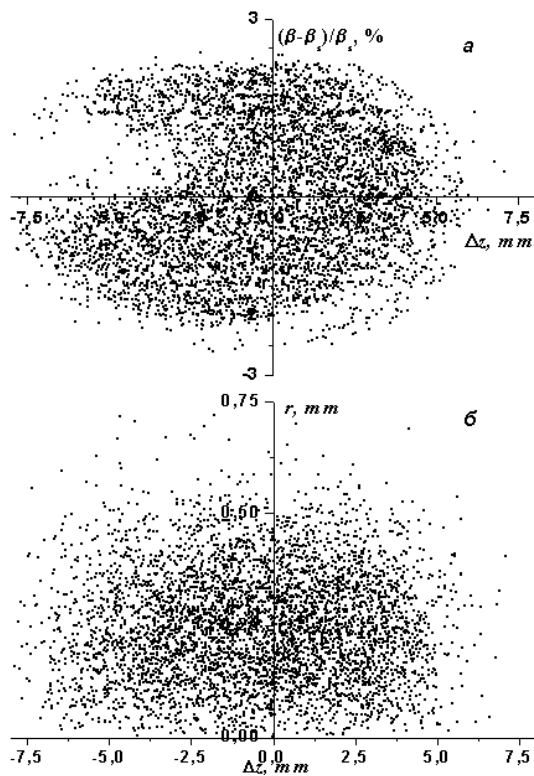


Рис. 12. Характеристики пучка на выходе ускорителя для тока 100 мА при рабочей частоте 350 МГц и энергетическом разбросе $\pm 15\%$: фазовый портрет пучка на продольной плоскости (а); распределение плотности частиц на плоскости rz (б)

Полученные результаты показывают, что при инжекции моноэнергетичных пучков в ускоритель в процессе их продольной группировки в пучках происходит сильное нарушение однородности распределения плотности частиц, что вызывает возникновение релаксационных колебаний, приводящих к значительному росту поперечного эмиттанса. Увеличение начального энергетического разброса уменьшает амплитуды релаксационных колебаний плотности и снижает темп роста поперечного эмиттанса.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методами математического моделирования исследованы особенности формирования и ускорения протонных пучков в линейном резонансном ускорителе при рабочей частоте 350 МГц, ускорении

протонов от 100 кэВ до 3 МэВ. Поперечная устойчивость движения протонов достигается фокусировкой объемным зарядом электронного пучка (с энергией 100 кэВ, током 85 А), инжектируемого в ускоряющие секции и удерживаемого внешним продольным магнитным полем. Показана принципиальная возможность формирования и ускорения протонных пучков в такой системе с интенсивностью до 300...400 мА. Исследованные варианты канала ускорения отличаются высоким коэффициентом захвата пучка в режим ускорения (98%...99,5%).

2. Исследованы механизмы роста поперечного и продольного эмиттансов в процессе группировки и ускорения протонных пучков в диапазоне токов от 100 до 300 мА.

3. Показано, что при инжекции в такой канал моноэнергетичного пучка в процессе продольной фокусировки происходит сильное нарушение однородности распределения плотности частиц по объему протонных банчей. В результате этого нарушения, под влиянием кулоновских сил в ускоряемых банчах возникают релаксационные колебания плотности с широким спектром частот, приводящие к росту как поперечного, так и продольного эмиттансов.

4. Для значительного снижения роста поперечного эмиттанса, с целью минимизации потерь частиц в канале ускорения, необходимо согласование инжектируемого пучка с продольным акцептансом начальной части ускорителя, заключающееся в увеличении энергетического разброса пучка перед входом в ускоритель. Это увеличение снижает амплитуды релаксационных колебаний плотности и уменьшает темп роста поперечного эмиттанса. Однако, оно практически не влияет на коэффициент захвата в режим ускорения, который для тока 100 мА равен 98,7% при начальном энергетическом разбросе $\pm 15\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.В. Лазарев, А.М. Козодаев // *Атомная энергия*. 2000, т. 89, с.440-446.
2. L.M. Young // *Proc. of the PAC-2001*. p.309-313.
3. Б.И. Иванов, Н.Г. Шулика. Численное моделирование группировки и ускорения сильноточного протонного пучка в линейном ускорителе с фокусировкой электронным пучком // *Наст. журнал*, с.139-144.

INFLUENCE OF LONGITUDINAL FOCUSING UPON TRANSVERSE EMITTANCE CHANGING DURING OF HIGH-CURRENT PROTON BEAM ACCELERATION

B.I. Ivanov, N.G. Shulika

In this work it is simulated some influence of longitudinal proton beam bunching in resonance linear accelerator upon transverse emittance increasing in case of acceleration from 100 keV up to 3 MeV of proton beam with current up to 300 mA. The accelerator work frequency is 350 MGz. An electron beam with 85 A current and 100 keV energy is used for ion transverse focusing. At the accelerator entrance an emittance about 0.40 mm-mrad had been ob-

tained, in case of initial emittance 0.32 mm·mrad and proton current 100 mA. The efficiency of proton capture to the acceleration process has been calculated as up to 99%.

**ВПЛИВ ПОЗДОВЖНЬОГО ФОКУСУВАННЯ НА ЗМІНУ ПОПЕРЕЧНОГО ЕМІТАНСУ В ПРОЦЕСІ
ПРИСКОРЕННЯ СИЛЬНОСТРУМОВОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА**

Б.І. Іванов, М.Г. Шуліка

Методом комп'ютерного моделювання досліджується вплив умов поздовжнього групування протонного пучка в лінійному резонансному прискорювачі на ріст поперечного емітансу при прискоренні від 0.1 до 3 MeV протонного пучка зі струмом до 0.3 А. Робоча частота прискорювача 350 МГц. Для поперечного фокусування протонів використовується електронний пучок зі струмом 85 А й енергією 100 кеВ у зовнішньому магнітному полі. Визначено умови формування і прискорення протонного пучка зі струмом 100 мА, при яких поперечний емітанс на виході прискорювача складає 0.40 мм·мрад при початковому емітансі 0.32 мм·мрад. Коефіцієнт захоплення протонів у прискорення досягає 99%.