

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУППИРОВКИ И УСКОРЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ С ФОКУСИРОВКОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Б.И. Иванов, Н.Г. Шулика

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

Методом компьютерного моделирования исследуется ускорение протонов с током 0.1...0.6 А, энергией до 3 МэВ. Рабочая частота ускорителя 152.5 МГц. Параметры фокусирующего электронного пучка меняются в пределах: ток 40...100 А, энергия 100 кэВ, напряженность фокусирующего магнитного поля 2...3 кЭ. Коэффициент захвата протонов в ускорение достигает 99%.

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является разработка физических основ для создания опытного образца сильноточного линейного ускорителя протонов на относительно низкие энергии (10...30 МэВ), работающего в непрерывном (или квазинепрерывном) режиме, который может служить начальной частью полномасштабного линейного резонансного ускорителя со средним током до 30 мА и выходной энергией до 1 ГэВ. Пучки протонов с такой энергией и интенсивностью предполагается использовать (см., например, [1,2]) для создания мощных источников нейтронов для управления подкритическим ядерным реактором, в котором принципиально исключен неконтролируемый рост скорости цепной реакции, приводящей к авариям типа чернобыльской. Кроме того, при увеличении среднего тока ускоренного пучка протонов до 200...300 мА с помощью таких ускорителей возможно «сжигание» (трансмутация) долгоживущих радиоактивных изотопов, образующихся в ядерном топливном цикле действующих энергетических реакторов как на тепловых, так и на быстрых нейтронах.

В настоящее время практически во всех сооружаемых и разрабатываемых мощных линейных ускорителях ионов применяется начальная часть ускорителя (НЧУ) на основе пространственно-однородной квадрупольной фокусировки (ПОКФ), предложенной И.М. Капчинским и В.А. Тепляковым [3].

В процессе формирования, группировки и предварительного ускорения в НЧУ ионного пучка значительно повышается коэффициент захвата пучка в режим ускорения и увеличивается кулоновский предел интенсивности ускоренного тока. Особенности ПОКФ уже достаточно хорошо изучены, и весь предыдущий опыт работы с ускорителями на этой основе сконцентрирован и реализован при разработке, сооружении и запуске в Лос-Аламосе демонстрационного ускорителя LEDA [4], рассчитанного на непрерывный режим работы с интенсивностью протонного пучка равной 100 мА. И хотя в отдельных экспериментах на ускорительных установках на основе ПОКФ получены более интенсивные протонные пучки (свыше 200 мА), учитывая знакопеременный характер сил, обеспечивающих поперечную устойчивость движения частиц в этих каналах, вряд ли стоит ожидать существенного увеличения интен-

сивности протонных пучков в устойчиво работающих ускорителях этого типа по сравнению с интенсивностью пучка в демонстрационном ускорителе LEDA.

Поэтому с целью увеличения предела интенсивности ускоряемых пучков разработчики ускорителей ведут поиск других направлений реализации НЧУ с фокусировкой знакопостоянными поперечными силами, в частности, с помощью продольного магнитного поля, создаваемого сверхпроводящими соленоидами [5,6]. Разработан проект ускорителя на энергию 1 ГэВ и средний ток до 250 мА, в котором применяется НЧУ с поперечной фокусировкой сверхслабым продольным магнитным полем.

Добиться снижения фокусирующего продольного поля можно, применяя для фокусировки ионов электронный пучок, удерживаемый на оси канала продольным магнитным полем. При этом для удержания мощного электронного пучка с пространственным зарядом, достаточным для фокусировки протонов, необходимы магнитные поля в 20...30 раз меньше, чем для фокусировки протонов. Такая система фокусировки вполне может быть реализована без применения сверхпроводящих соленоидов. Теоретически возможность фокусировки протонов электронным пучком рассмотрена в работе [7], а некоторые экспериментальные результаты приведены в работе [8]. Однако к настоящему времени систематические исследования этого метода в применении к линейным резонансным ускорителям протонов были представлены слабо.

В предлагаемой работе приведены результаты исследований с помощью компьютерного моделирования основных особенностей каналов формирования, группировки и ускорения сильноточного протонного пучка от энергии 100 кэВ до энергии 3.0 МэВ с фокусировкой объемным зарядом электронного пучка.

Предварительные результаты по данной тематике изложены в [9,10]. В настоящей работе содержится подробная информация о методике компьютерного моделирования и приводится физическая интерпретация полученных результатов.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАНАЛА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 152,5 МГц

Канал группировки и предварительного ускорения НЧУ представляет собой последовательность цилиндрических электродов (трубок дрейфа), разделенных промежутками, на которые подается высокочастотное напряжение частотой 152,5 МГц. Амплитуда напряжения между электродами изменяется ступенями от 12,8 кВ в начале канала до 76,8 кВ в его конце. Расстояние между трубками дрейфа изменяется так же ступенями от 3 до 10 мм в соответствии с изменением амплитуды высокочастотного напряжения. Такой канал может быть реализован на базе *H*-резонаторов с трубками дрейфа, расположенными группами на гребенчатых подвесках. Каждая группа объединяет трубки дрейфа с одинаковыми значениями амплитуды высокочастотного напряжения. Общее количество периодов ускорения равно 128, длина канала составляет 4,75 м. Распределение напряжения между трубками дрейфа предусматривает реализацию канала в виде двух секций. В первой секции располагаются 44 периода ускорения, во второй 84. Энергия протонов на входе составляет 0,1 МэВ, на выходе 3 МэВ.

3. МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для поперечной фокусировки протонного пучка с помощью объемного заряда электронов в процессе моделирования энергия электронов равнялась 100 кэВ, а ток электронного пучка изменялся от 15 А до 100 А. Радиус электронного пучка изменялся в пределах от 1 до 2 мм. Для удержания электронного пучка током 100 А и радиусом ~2 мм необходимо продольное магнитное поле с индукцией ~0,25 Тл. В процессе движения электронного пучка через резонатор его энергия изменяется в диапазоне (100±38) кэВ. Возникающая модуляция плотности электронов приводит к появлению продольного электрического поля, синфазного с высокочастотным электрическим полем резонатора. Оценки показывают, что при токе электронного пучка, равном 100 А, амплитуда продольного электрического поля, вызванного модуляцией скорости электронов, составляет ~5% от амплитуды ускоряющего высокочастотного поля резонатора. В этих условиях влияние продольного поля объемного заряда электронов на динамику протонов не учитывалось. В реальном случае амплитуда высокочастотного электрического поля резонатора может быть выбрана так, чтобы самосогласованное электрическое поле равнялось расчетному резонансному значению. В процессе моделирования динамики протонов электронный пучок рассматривался в виде длинного цилиндра с равномерной плотностью, в котором существует только поперечное поле объемного заряда. Математическое моделирование движения протонного пучка в канале выполнялось с учетом объемного заряда ускоряемых протонов. Для определения поля объемного заряда использовался метод «крупных» частиц с кулоновской сеткой 64×32×32. Количество крупных частиц в процессе моделирования изменялось от 10000 до 25000.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведенные ниже результаты относятся к случаю, когда протонный пучок стартует внутри электронного. Процесс инжекции протонного пучка в электронный исследовался отдельно.

С помощью генератора случайных чисел формировались координаты и скорости протонного пучка на входе в ускоритель. Полный радиус пучка составлял 0,5 мм, а максимальный наклон траектории частиц к оси канала – ±60 мрад. Входной энергетический спектр изменялся в пределах 0,5% и 5%. Среднеквадратичный эмиттанс по координатам x' и y' составлял ~0,35 мм·мрад, а полный поперечный эмиттанс равнялся ~0,5 мм·мрад. При энергетическом разбросе пучка на входе в ускоритель, равном ±5%, продольный среднеквадратичный эмиттанс равен ~0,7 мм·мрад (1 мм·мрад составляет 172 кэВ·град). Невозмущенная высокочастотным полем плотность электронов в пучке составляла ~4·10¹¹ см⁻³ при токе ~100 А. В процессе моделирования выбирались условия, при которых не более 1% протонов выходили за поперечные пределы электронного пучка. Для поддержания этих требований с учетом расширения протонного пучка в процессе движения в канале ускорителя при изменении начального тока инжекции от 100 до 600 мА, ток электронов необходимо менять в пределах от 43 до 75 А.

Так как при движении пучка в канале ускорителя одной из характеристик, определяющей возможность потерь частиц, является значение поперечного эмиттанса; при моделировании значительное внимание уделялось определению изменения (роста) эмиттанса в процессе группировки и ускорения при различной интенсивности протонного пучка. Среднеквадратичный эмиттанс для плоскости x' (аналогично для y') определялся по формуле:

$$\varepsilon_x = 4\sqrt{\langle x \rangle^2 \langle x' \rangle^2 - \langle xx' \rangle^2}. \quad (1)$$

Для продольной плоскости – по формуле:

$$\varepsilon_z = 4\sqrt{\langle (z - z_s) \rangle^2 \langle (\beta - \beta_s) \rangle^2 - \langle (z - z_s)(\beta - \beta_s) \rangle^2}. \quad (2)$$

Здесь x – координата частицы вдоль оси ординат; x' – угол наклона траектории к оси z ; z – текущая координата частицы вдоль оси канала; z_s – координата синхронной частицы; β и β_s – относительные скорости текущей и синхронной частиц, соответственно.

Изменение эмиттанса пучка на выходе канала в зависимости от тока инжекции при начальном энергетическом разбросе ±0,5% показано на рис. 1.

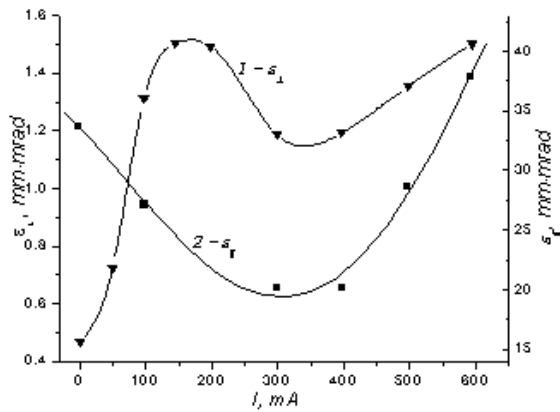


Рис. 1. Изменение эмиттанса пучка на выходе канала в зависимости от тока инжекции при начальном энергетическом разбросе $\pm 0,5\%$

Кривая 1 соответствует эмиттансу на плоскости $x-x'$, кривая 2 относится к продольному эмиттансу $z\beta_z$.

Несколько неожиданным является тот факт, что обе эти кривые имеют минимум в диапазоне токов 300...400 мА. Такая зависимость поперечного и продольного эмиттанса от тока в значительной мере объясняется тем, что при токах до 200 мА при группировке пучка в нем образуются локальные уплотнения и разрежения плотности частиц. Иными словами, процесс группировки частиц при относительно небольшом начальном энергетическом разбросе в пучке сопровождается значительными нарушениями однородности распределения фазовой плотности частиц. Это следует из результатов, приведенных на рис. 2-4.

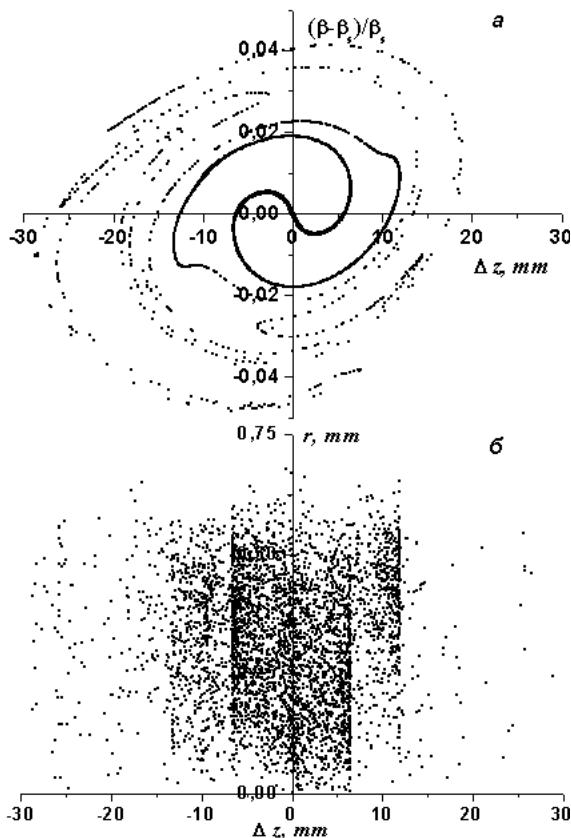


Рис. 2. Характеристики пучка на выходе ускорителя для слабого тока: фазовый портрет пучка на

продольной плоскости (а); распределение плотности частиц на плоскости rz (б)

На рис.2,а показан фазовый портрет пучка на продольной плоскости $z\beta_z$ на выходе ускорителя для слабого тока, когда влиянием кулоновских сил расталкивания можно пренебречь. Изменение плотности частиц в сгустке протонов в этом случае видно из рис.2,б. Здесь каждая точка изображает координаты частицы на плоскости rz , где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $z = z_t - z_s$, z_t – продольная координата текущей частицы, z_s – координата синхронной частицы. На рис.2,б отчетливо видны вертикальные линии повышенной плотности, которые по положению хорошо коррелируют с точками поворота линий на фазовом портрете (см. рис.2,а). На рис.3 и 4 показаны аналогичные результаты для токов 200 и 300 мА. При токе 200 мА (рис.3,а и 3,б) еще заметны локальные уплотнения и разрежения, границы которых сильно размыты. При токе 300 мА (рис.4,а и 4,б) ускоряемый сгусток протонов имеет плотное ядро, окруженное ореолом. В ореольной части уплотнения не заметны.

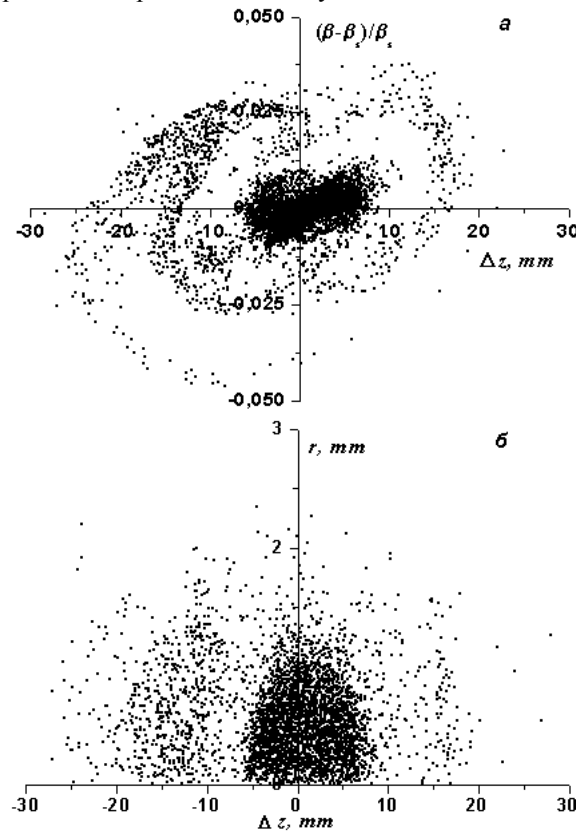


Рис. 3. Характеристики пучка на выходе ускорителя для тока 200 мА: фазовый портрет пучка на продольной плоскости (а); распределение плотности частиц на плоскости rz (б)

Наличие уплотнений и разрежений плотности частиц в ускоряемом сгустке подтверждается и структурой кулоновских сил расталкивания. На рис.5 показано изменение продольной напряженности поля объемного заряда протонного пучка в 28-м периоде ускорителя на оси канала при значениях тока 100 мА, 300 мА и 500 мА. Здесь по оси абсцисс отло-

жен номер кулоновской ячейки k_z вдоль оси сгустка ($k_z=33$ соответствует середине сгустка), а по оси ординат – напряженность продольного кулоновского поля в kV/cm .

При токе 300 мА продольная напряженность кулоновского поля вблизи середины сгустка обращается в нуль, в передней части ($k_z>33$) напряженность положительна, в задней ($k_z<33$) – отрицательна. Это означает, что кулоновские силы расталкивают сгусток в целом, препятствуя его группировке силами высокочастотного поля. На краях сгустка в 28-м периоде еще наблюдаются небольшие локальные уплотнения, которые на структуре кулоновского поля проявляются в виде максимума ($k_z\sim 50$) и минимума ($k_z\sim 13$). Аналогичная структура кулоновских сил наблюдается при токах до 600 мА . При этом обращает

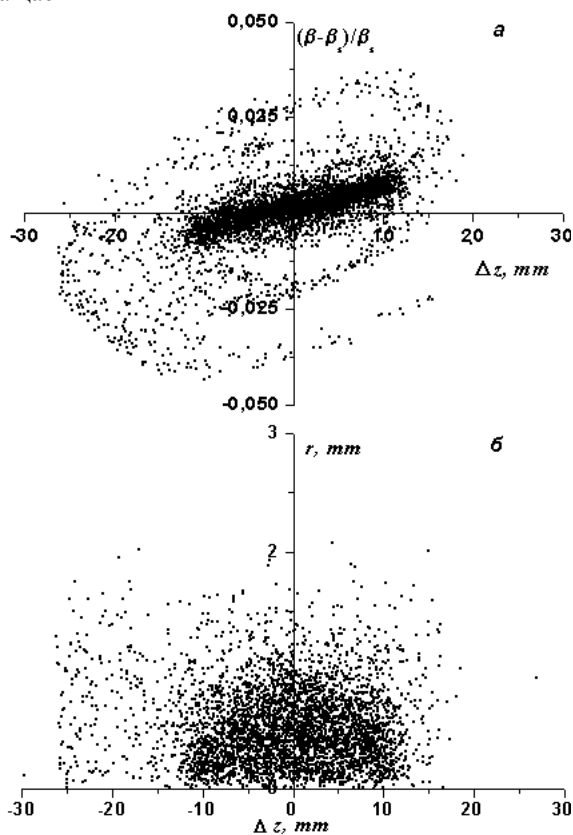


Рис. 4. Характеристики пучка на выходе ускорителя для тока 300 мА ; фазовый портрет пучка на продольной плоскости (а); распределение плотности частиц на плоскости rz (б)

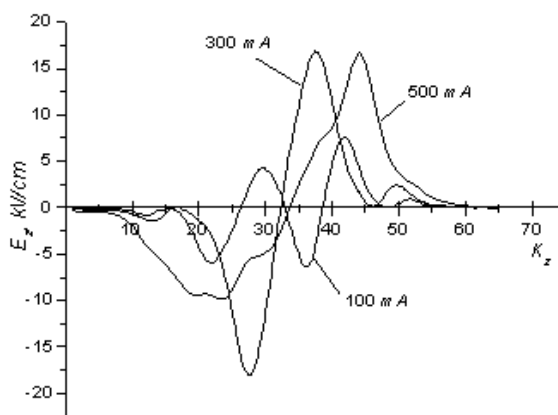


Рис. 5. Изменение продольной напряженности кулоновского поля в 28-м периоде ускорителя на оси канала при различных значениях тока

на себя внимание некоторое отклонение от симметрии по отношению к центру в распределении напряженности кулоновского поля для тока 500 мА . При токах 500 мА и более локальные максимум и минимум на краях сгустка отсутствуют. При этом в 28-м периоде максимальные значения напряженности кулоновского поля для токов 300 мА и 500 мА практически одинаковы, что свидетельствует о наступившем равновесии кулоновских сил с силами высокочастотного поля для этих значений токов. При токе 100 мА на кривой распределения напряженности продольного поля наблюдается несколько максимумов и минимумов. В области $26\leq k_z\leq 36$ напряженность поля объемного заряда меняет знак. Формально в этом участке сгустка кулоновские силы объемного заряда осуществляют продольную фокусировку протонного пучка. Фактически это означает, что плотность протонов по краям сгустка выше плотности в его центре.

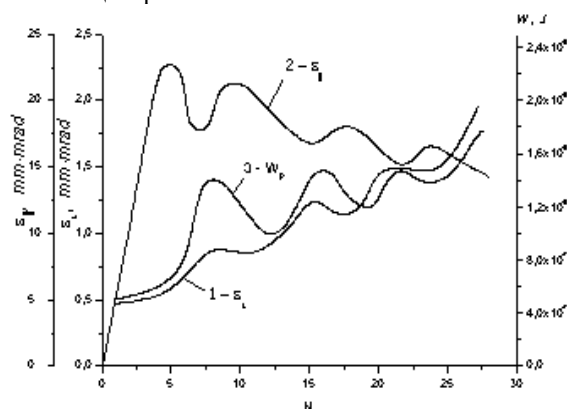


Рис. 6. Изменение полного поперечного эмиттанса (кривая 1) и продольного (кривая 2) эмиттанса вдоль длины канала до 28-го периода ускорения при токе в пучке, равном 200 мА

На рис.6 показано изменение полного поперечного эмиттанса (кривая 1) и продольного (кривая 2) эмиттанса вдоль длины канала до 28-го периода ускорения при токе в пучке, равном 200 мА . По оси абсцисс отложен номер периода, по оси ординат – значения эмиттансов. На этом же рисунке (кривая 3) показано изменение внутренней потенциальной

энергии в сгустке (в джоулях), связанной с кулоновскими силами расталкивания. Эта энергия определялась суммированием произведения $q_i \cdot V_i$, где q_i – заряд макрочастицы, V_i – потенциал кулоновского поля в точке, где эта частица находится. Эта величина отражает степень сжатия сгустка. Как следует из рис.6, в начале канала наблюдается очень сильный рост продольного эмиттанса, что связано с растущим разбросом частиц по скоростям при группировке пучка нелинейным (синусоидальным) высокочастотным полем. Несмотря на некоторый статистический разброс, наблюдается определенная корреляция в поведении эмиттансов и внутренней потенциальной энергии сжатого сгустка. Минимумы для продольного и максимумы для поперечного эмиттансов совпадают с максимумами потенциальной энергии. Иными словами, при продольном сжатии пучка его продольный эмиттанс уменьшается, а поперечный растет. Последовательность максимумов на кривой поперечного эмиттанса соответствует последовательности продольных фокусов. Несмотря на сильный рост поперечного эмиттанса и внутренней потенциальной энергии в диапазоне от первого до 28-го периода ускорения, к 30-му периоду этот рост значительно замедляется и к концу ускорителя поперечный эмиттанс даже снижается на 2,8% по отношению к значению в 28-м периоде, а продольный возрастает на 29% по отношению к соответствующему значению. Значение внутренней потенциальной энергии сгустка к концу ускорителя снижается в 2 раза, по отношению к значению в 28-м периоде. Это связано с ростом скорости частиц и связанным с этим снижением плотности.

Приведенные результаты показывают, что процесс формирования и группировки протонного пучка на начальном участке ускорителя сопровождается образованием локальных уплотнений и разрежений в сгустке, что приводит к сильному росту поперечного эмиттанса при токах до 150...200 мА. Сильное нарушение однородности распределения плотности частиц в процессе группировки можно проследить из рис.7,а,б. На рис.7,а показан фазовый портрет пучка с током 100 мА в 7-м периоде ускорения, где достигается первый продольный фокус, а на рис.7,б показано распределение плотности частиц в плоскости r_z . В этом месте пучок представляется в виде плотного диска, нанизанного на стержень со значительно меньшей плотностью.

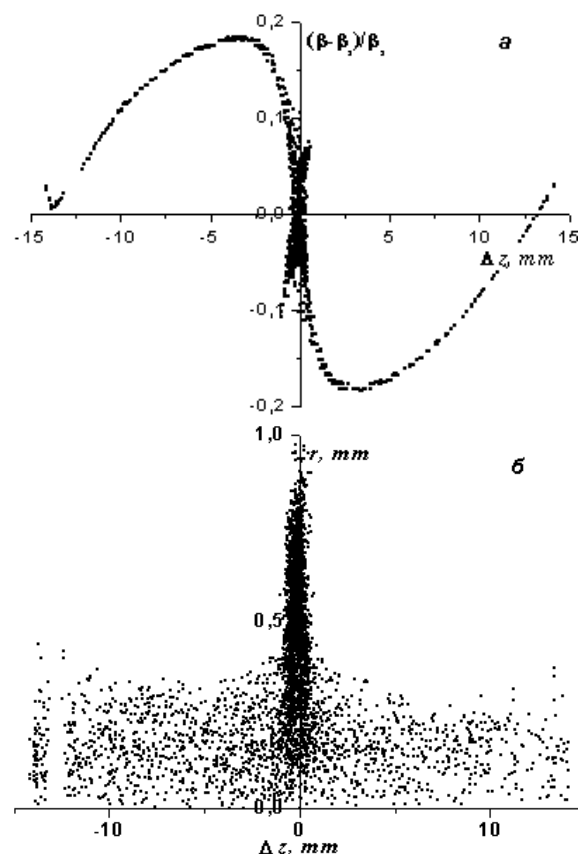


Рис. 7. Характеристики пучка в седьмом периоде ускорителя для тока 100 мА: фазовый портрет пучка на продольной плоскости (а); распределение плотности частиц на плоскости r_z (б)

Для сравнения на рис.8 показаны распределения напряженностей продольного (E_z) на оси и поперечного (E_r) кулоновского поля на радиусе 0,4 мм. Максимальная величина радиальной напряженности кулоновского поля на этом радиусе составляет 18,7 кВ/см, а значение поля объемного заряда электронного пучка равно 18 кВ/см, т.е. в продольном фокусе поле объемного заряда протонного пучка по абсолютному значению превосходит кулоновское поле пучка электронов. Однако на радиусе 0,5 мм напряженность поля объемного заряда электронов (36 кВ/см) по абсолютному значению превосходит напряженность поля объемного заряда протонов (30 кВ/см). Для точки с радиусом 0,72 мм напряженность поля объемного заряда электронного пучка (52 кВ/см) на 13 кВ/см по абсолютному значению выше напряженности поля объемного заряда протонного пучка.

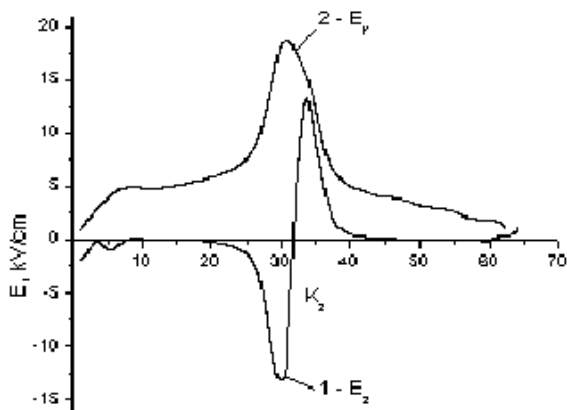


Рис. 8. Распределения напряженностей продольного (E_z) и поперечного (E_r) кулоновского поля вдоль сгустка

Рассматриваемый канал характеризуется высоким коэффициентом захвата пучка в режим ускорения. При токах протонного пучка до 400 мА включительно при начальном энергетическом разбросе $\pm 0,5\%$ коэффициент захвата составляет 99,5% и снижается до 98% при токе 600 мА. Увеличение начального энергетического разброса протонного пучка до 5% практически не влияет на коэффициент захвата, несколько снижая поперечный эмиттанс, что в некоторой степени объясняется относительным снижением плотности частиц в первом продольном фокусе из-за увеличения начального энергетического разброса.

Полученные результаты математического моделирования процесса движения протонного пучка через ускоритель показали, что при группировке интенсивных пучков образуются сгустки с сильно неоднородным распределением плотности частиц. Возникающая при этом неоднородность в распределении напряженности поля объемного заряда является одной из причин роста поперечного эмиттанса при формировании и ускорении интенсивных пучков.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в рамках упрощенной модели результаты математического моделирования процесса формирования, группировки и ускорения интенсивных протонных пучков в линейных ускорителях с фокусировкой объемным зарядом электронного пучка

ка показали перспективность этого метода для разработки сильноточных ускорителей протонов с токами 500...600 мА и более. Для дальнейшего развития этого направления необходима разработка модели, учитывающей более подробно влияние различных факторов (высокочастотного поля и поля объемного заряда ускоряемого пучка на характеристики пучка электронов и процесс удержания его на оси при движении через ускоритель). Кроме того, предполагается объединить в одной модели электронную пушку, ускорительные секции, область инжекции протонного пучка в ускоритель и рекуператор интенсивного электронного пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Rubbia. The energy amplifier concept // *Proc. of 1994 Int. Conf. on Accel.-Driven Transmutation Technology and Applications*, Las Vegas, p.35-39.
2. Н.А. Хижняк. Пути создания безопасной, экологически чистой ядерной энергетики в Украине: Препринт ХФТИ 94-8, Харьков, 1994, 22 с.
3. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков // *ПТЭ*, 1970, №2, с.19-21.
4. L.M.Young // *Proc. of the PAC-2001*, p.309-313.
5. Б.И. Бондарев, А.А. Кузьмин, Б.П. Мурин и др. // *Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. Дубна. 1979, т.1, с.260-263.
6. Г.И. Бацких, Б.П. Мурин, И.В. Чувило и др. // *Труды X совещания по ускорителям заряженных частиц*, 1999, т.1, Протвино, с.203-211.
7. А.И. Ахиезер, Г.Я. Любарский, Я.Б. Файнберг // *Теория и расчет линейных ускорителей*. М.: «Госатомиздат». 1962, с.131-146.
8. Н.И. Абраменко, Н.М. Гаврилов, Е.В. Громов и др. // *ВАИТ*. 1985, вып.2(23), с.48-50.
9. Б.И. Иванов, Н.Г. Шулика. Концепция начальной части линейного сильноточного протонного ускорителя с фокусировкой электронным пучком // *ВАИТ*. 2003, вып.4, с.81-84.
10. В.И. Ivanov, N.G. Shulika. Simulation of the initial part of a high-current proton accelerator with focusing by an electron beam // *ВАИТ*. 2004, v.2, p.27-29.

SIMULATION OF BUNCHING AND ACCELERATION OF HIGH CURRENT PROTON BEAM IN A LINEAR ACCELERATOR WITH FOCUSING BY ELECTRON BEAM

B.I. Ivanov, N.G. Shulika

In this work it is simulated acceleration of the proton beam with current of 0.1...0.6 A, energy up to 3 MeV. In this case the parameters of focusing electron beam are varied in the following limits: the current is 40...100 A, energy 100 kV, intensity of focusing magnetic field 2...3 kOe. The efficiency of proton capture to the acceleration process has been calculated up to 99%.

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГРУПУВАННЯ ТА ПРИСКОРЕННЯ СИЛЬНОСТРУМОВОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА В ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ З ФОКУСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ

Б.І. Іванов, М.Г. Шуліка

За допомогою комп'ютерного моделювання досліджується прискорення протонів із струмом 0.1...0.6 А, енергією до 3 МеВ. Робоча частота 152.5 МГц. При цьому параметри фокуруючого електронного пучка змінюються у межах: струм 40...100 А, енергія 100 кеВ, напруженість фокууючого магнітного поля 2...3 кЕ. Коефіцієнт захоплення протонів у прискорення досягає 99%.