

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЧКА В ПРОТОННОМ ИНЖЕКТОРЕ ЛУ ИЯИ РАН

А.С. Белов, В.Н. Зубец, Е.С. Никулин, О.Т. Фролов, В.П. Якушев
ИЯИ РАН, Москва, Россия
E-mail: nikulin@inr.ru

Приводятся результаты численного моделирования и измерений параметров пучка протонов инжектора линейного ускорителя ИЯИ РАН. Исследовалось влияние нестабильности тока пучка и потенциала промежуточного электрода инжектора на характеристики ускоряемого в ЛУ пучка. Установлены емкостный делитель напряжения ускорительной трубки и генератор тока разряда дуоплазматрона со стабилизацией 0,5 %. При токе ионов в импульсе 85 мА нормализованный эмиттанс для 63 % тока равен 0,05л см·мрад.

ВВЕДЕНИЕ

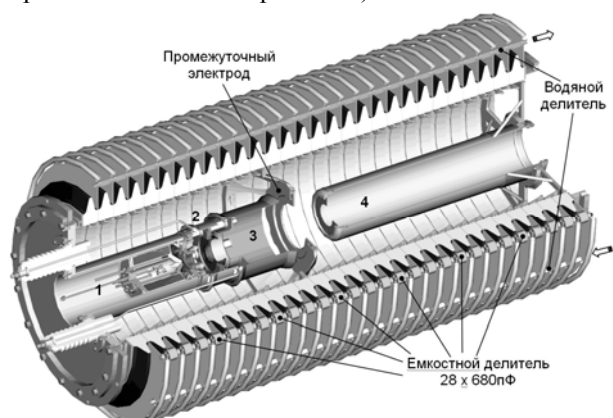
Протонный инжектор линейного ускорителя ИЯИ РАН штатно эксплуатируется с конца 80-х годов и параллельно ведется работа по его усовершенствованию.

В начале 2011 г. конструкция инжектора претерпела очередные модификации, существенно повысившие качественные характеристики пучка.

Измерения подтвердили обоснованность решений, принятых по результатам численного моделирования прохождения пучка от начала области формирования до входа в канал транспортировки (КТ) линейного ускорителя (ЛУ).

НОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В конце 2010 г. на ускорительной трубке (УТ) инжектора установлен компенсированный делитель напряжения: параллельно существующему резистивному водяному делителю дополнительно введена цепочка конденсаторов по 680 пФ×20 кВ на каждый ускоряющий зазор (Рис.1). Позднее добавлена ещё одна цепочка для первых 7-ми ускоряющих зазоров по 150 пФ×20 кВ в начальной части УТ, от высоковольтного до промежуточного электрода. (На рисунке эта цепь не показана, так как находится с противоположной стороны УТ).



*Рис.1. Ускорительная трубка инжектора:
1 – ионный источник; 2 – вытягивающий электрод;
3 – фокусирующий электрод;
4 – заземлённый электрод*

В феврале 2011 г. тиристорный модулятор тока разряда в системе питания ионного источника заменён на транзисторный со стабильностью тока разряда вдоль импульса не хуже 0,5 %. В результате, ста-

бильность вершины импульса тока пучка существенно повысилась.

Оба этих изменения позволили значительно уменьшить поворот фазового портрета (ФП) пучка и устранить искажения формы импульса тока в течение импульса ускоряющего напряжения.

Стабильность угловой ориентации фазового портрета является одним из основных условий минимизации потерь пучка в ЛУ.

Ранее типичный импульс в своей начальной стадии имел асимптотический выход на максимальное значение тока. Сейчас же пучок приобрёл форму, близкую к трапецеидальной, с плоской вершиной (Рис.2).

В проведенной серии измерений не ставилась задача получения максимальных значений тока протонов, однако, настройки параметров инжектора варьировались в широких пределах, вследствие чего амплитуда тока пучка порой вдвое превосходила номинально требуемый уровень и иногда превышала 130 мА. Форма импульса оставалась неизменной во всём диапазоне значений тока.

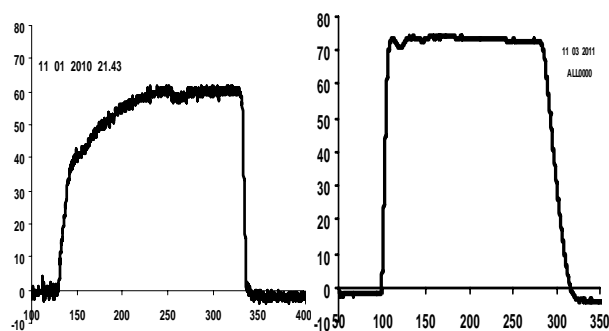


Рис.2. Форма импульса тока пучка инжектора (2010 и 2011 гг)

Датчик тока расположен в КТ на расстоянии 0,9 м за коллектором измерителя эмиттанса, служащего основным инструментом определения качества пучка. Измеритель [1] установлен на расстоянии 1,7 м от начала области дрейфа пучка, непосредственно перед входом в КТ.

Измерения проводятся методом 2-х щелей, роль второй щели выполняет набор коллекторных пластин с шагом 1 мм. Обработка массивов данных позволяет получать ФП пучка в различных видах, а также геометрические характеристики: профиль, его ширину, положение центра тяжести, эмиттанс, фазовую плотность, яркость пучка для различных долей тока (Рис.3).

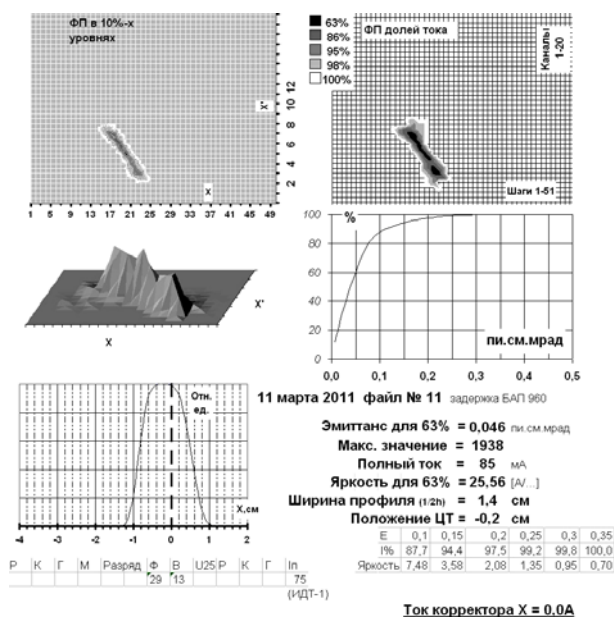


Рис.3. Окно вывода результатов измерения эмиттанса

В Табл.1 приведен набор значений эмиттанса различных долей тока для одного из специальных (исследовательских) режимов работы инжектора при амплитудном значении тока пучка 65 мА и длительности импульса тока 25 мкс во второй четверти импульса ускоряющего напряжения длительностью 200 мкс.

Таблица 1
Эмиттанс долей тока. 18.05.2011. Режим №5

I	63%	86%	95%	98%
E	0,0397	0,0840	0,1217	0,1450

Табл.2 отражает динамику изменения эмиттанса (для 63% тока) за всю историю работы инжектора в номинальных (слева) и специальных режимах. Для полного тока эти величины, как правило, в 5-6 раз выше. Соответствующая фазовая плотность пучка в номинальных режимах приведена во второй колонке.

Таблица 2
Динамику изменения эмиттанса для 63 % тока

	$E_{63\%}$ [пм.см.мрад]	$j_{63\%}$ [А/см.мрад]
1990-е г.	0,2...0,1	0,6
2000-е г.	0,1...0,076	0,4
2011 г.	0,05...0,031	1,16

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Качеству протонного пучка уделяется неизменное внимание, так как даже небольшие флуктуации его параметров лишь возрастают при прохождении через ЛУ и приводят к увеличению потерь пучка.

Однако, большой уровень шума тока протонов, превышавший порой 30 %, не только сам служил источником нежелательных флуктуаций, но и маскировал собой особенности формы импульса, не представляя возможности проведения достоверного анализа искажений (Рис.4).

Проведенные ранее эксперименты с различной геометрией системы формирования: конический экспандер и вытягивающий электрод; цилиндриче-

ский экспандер с квазипирсовой геометрией и плоским электродом вытягивания [2]; экспандер с профилем, близким к соплу Лавала, квазипирсовой геометрией вытягивания и плоским вытягивающим электродом, позволяли получать ток протонов с пониженным уровнем шума.

Но первые две системы не смогли обеспечить бесшумовой режим во всём диапазоне требуемых настроек инжектора. Третья, со среднеквадратичным уровнем шума менее 1 %, обладала необходимой устойчивостью во всех режимах, однако, в течение нескольких месяцев после её установки произошло постепенное существенное уменьшение амплитуды тока и возрастание шума.

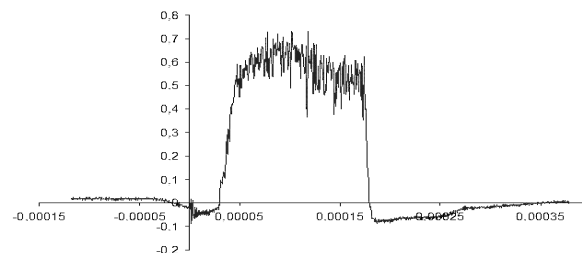


Рис.4. Осциллограмма «шумящего» тока на выходе инжектора

Позднее, стабилизировав плазменную границу на выходе ионного источника [3], шум удалось резко снизить. Его уровень стал ниже уровня аппаратных шумов измерительного тракта. На приведенных выше осциллограммах (см. Рис.2) просматриваются лишь шумы 8-битного АЦП-преобразования.

В данной системе формирования пучка (Рис.5) изолированный от анода и находящийся под плавающим потенциалом экспандер имеет меньшую длину (35 мм) по сравнению с предыдущими безсеточными экспандерами.

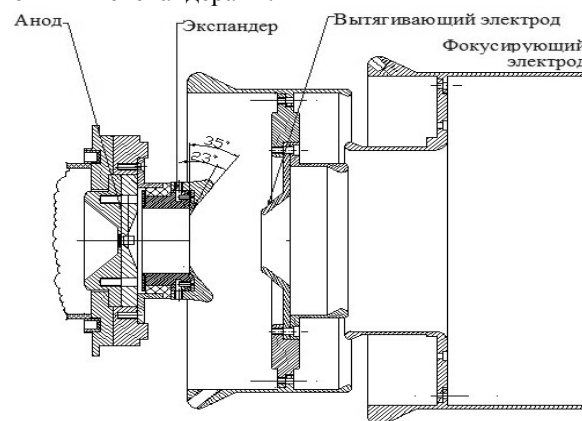


Рис.5. Система формирования ионного пучка из дуоплазматрона

На выходе экспандера установлена плоская сетка из вольфрамовых проволочек диаметром 0,1 мм с шагом 3 мм. Диаметр эмиссионной поверхности, ограниченной сеткой, равен 30 мм. Квазипирсовский электрод экспандера от диаметра 30 мм до диаметра 40 мм имеет угол 23° по отношению к плоскости, перпендикулярной оси системы. Это позволяет получить плоскую границу плазмы подбором вытягивающего напряжения для заданной величины ионного тока и свести к минимуму абберации,

связанные с фокусировкой ионов в ячейках эмиссионной сетки экспандера.

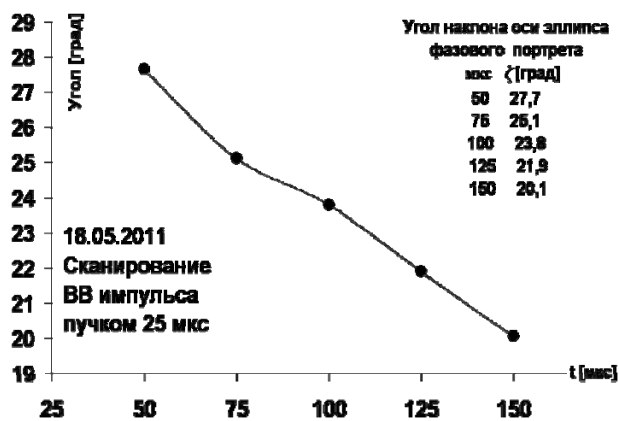


Рис.6. Поворот ФП в течение импульса

Проведены исследования изменения параметров фазового портрета в течение импульса ускоряющего напряжения длительностью 200 мкс. Модулятором дуги протонного источника формировался пучок

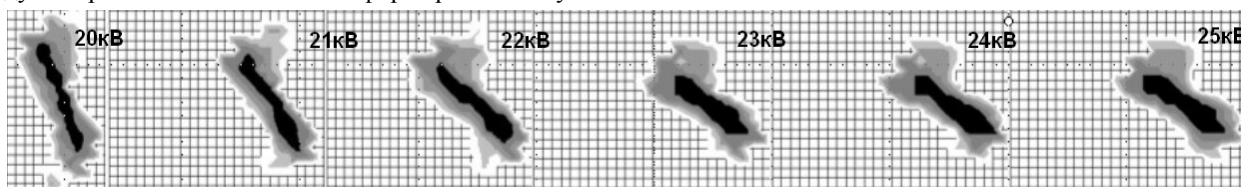


Рис.7. Фазовые портреты при различных потенциалах вытягивания

Аналогичное поведение наблюдается и на математической модели.

Если ранее такие соответствия находили с большими допущениями, то теперь доверие к моделированию существенно возросло.

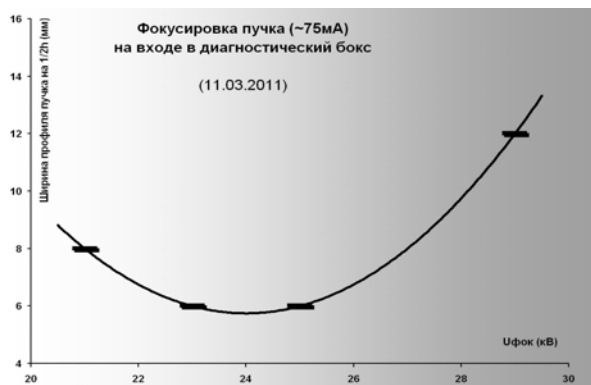


Рис.8. Зависимость ширины профиля пучка от фокусирующего потенциала на расстоянии 1,7 м от начала дрейфа пучка

Влияние потенциала фокусировки на геометрию пучка в эксперименте (Рис.8) также находится в соответствии с модельными расчётами.

Ширина профиля пучка в диапазоне $U_{\text{фок}}$ от 20 до 28 кВ – менее 1 см. При фокусирующем потенциале 24 кВ на входе в диагностический бокс (~0,5 м до входа в КТ) образуется кроссовер. Однако лучше сформировать его дальше по ходу пучка, чтобы получить на входе в КТ сходящийся пучок. Т.е., предпочтителен диапазон фокусирующих потенциалов от 25 кВ и выше.

длительностью 25 мкс, который подавался с фиксированными задержками относительно начала высоковольтного импульса (с шагом 25 мкс) в инжектор. Данные измерений обрабатывались по стандартной методике [4, 5]. Обнаружено, что в средней части импульса в течение 100 мкс происходит поворот фазового портрета на $\Delta\xi = 7,5^\circ$ (Рис.6), что существенно меньше, чем до установки ёмкостного делителя и стабилизированного генератора тока разряда.

Также исследовалось влияние режимов системы формирования на характеристики пучка.

Здесь представлены несколько фазовых портретов, полученных при потенциалах вытягивания от 20 до 25 кВ (Рис.7). Остальные параметры инжектора неизменны.

Заметно меняется характер поведения фазового портрета при изменении потенциала вытягивания. В диапазоне от 20 до 22 кВ реакция на изменения (поворот портрета) довольно резкая, однако, при дальнейшем росте потенциала поворот незначителен.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование проводилось с помощью программ Trak и SpaceCharge пакета TriComp, разработанных Field Precision LLC.

К примеру, моделирование показало, что изменение потенциала промежуточного электрода ускорительной трубки менее чем на 1 % уже приводит к существенному изменению свойств пучка на выходе инжектора (Рис.9).

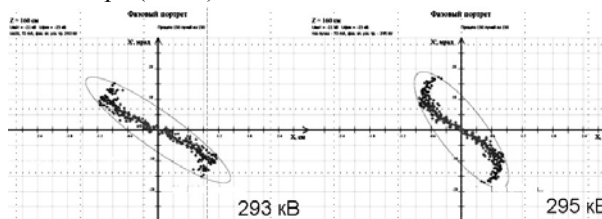


Рис.9. Влияние потенциала промежуточного электрода УТ

На модели хорошо также просматривается изменение поведения фазового портрета при различных значениях тока пучка (Рис.10).

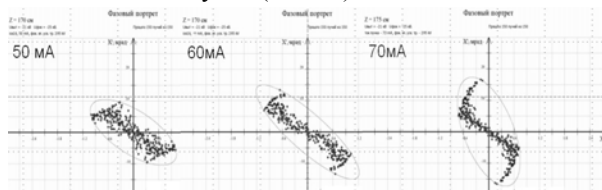


Рис.10. Влияние тока пучка на ФП

Соответствие модели с экспериментом особенно наглядно при рассмотрении различных aberrаций пучка. Один из исследованных типов показан на Рис.11.

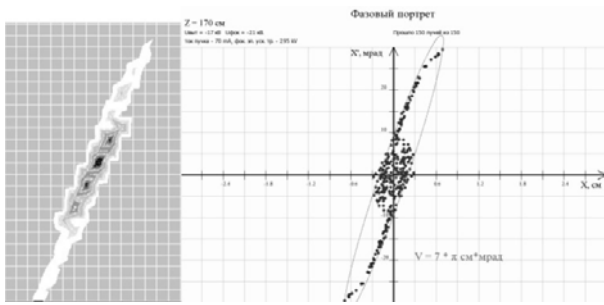


Рис.11. Один из исследованных типов aberrаций ФП при транспортировке сильноточного протонного пучка

Имеющиеся отличия в портретах вызваны, в первую очередь, недостаточной (для нынешних пучков) разрешающей способностью измерителя эмиттанса. Следствие: получаемый в результате измерений массив данных состоит из набора значений токов, приходящихся на ячейки фазовой плоскости размером 0,2 см×4 мрад.

Данное обстоятельство при малых значениях эмиттанса пучка позволяет наблюдать только довольно грубую картину фазового портрета. На пределе разрешающей способности измерителя эмиттанса весь ток пучка распределяется лишь на 40-50 элементарных ячеек, в то время как в численном моделировании обычно используем разбивку пучка на 150 лучей.

Численное моделирование позволяет определять характеристики пучка в любом сечении на стадиях формирования, ускорения или в дрейфе. На следующих примерах (Рис.12) демонстрируется влияние изменения потенциала фокусирующего электрода (при прочих фиксированных параметрах) на прохождение пучка инжектора от источника до входа в КТ.

При 21 кВ пучок недофокусирован и обрезается входной апертурой КТ.

При 25 кВ пучок полностью проходит в КТ, но при этом является расходящимся.

Лишь при 29 кВ получаем кроссовер перед входом в КТ, на расстоянии 2,65 м от протонного источника.

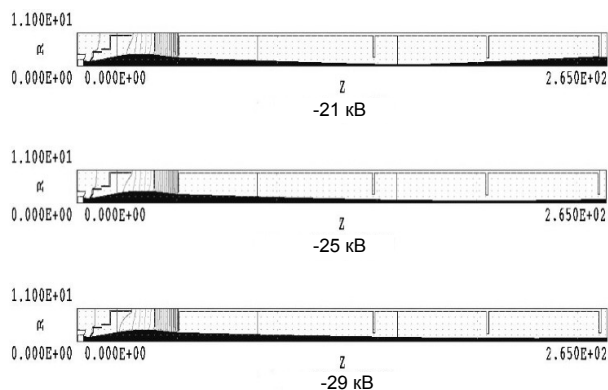


Рис.12. Влияние потенциала фокусирующего электрода на прохождение пучка от источника до входа в КТ

СОСТАВ ПУЧКА

Параллельно проведены измерения для уточнения массового состава пучка.

Пучок из инжектора, кроме протонной составляющей, включает в себя и ионы H_2^+ , и более тяжёлые ионы остаточных газов, предположительно H_2O^+ . Присутствие других составляющих в пучке непосредственно не обнаруживается.

В номинальном режиме настройки инжектора измерили характеристики пучка обычным методом и зафиксировали, в частности, значение полного тока пучка.

Затем на выходе инжектора включили первый магнит корректора, отклоняющего пучок по оси X, и фазовый портрет пучка разделился на три части (Рис.13). Идентичность фазовых портретов разных масс довольно убедительна.

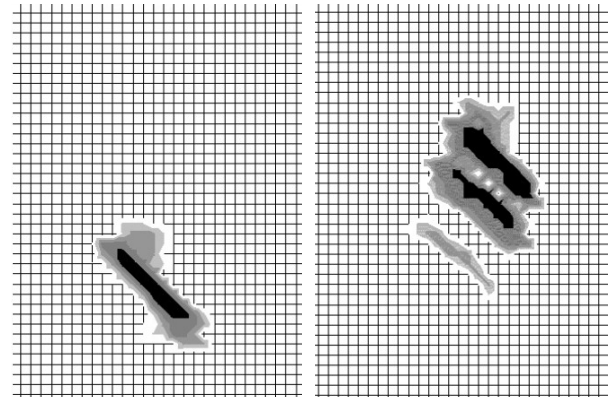


Рис.13. ФП пучка (без корректора) и портреты компонент пучка (магнит корректора включён)

Из исходного массива данных выделили области второй и более тяжёлых масс, произвели их стандартный программный обсчёт и сравнили полученные токи.

Получено следующее соотношение значений токов: протонная составляющая ~70%, H_2^+ ~27%, более тяжёлые ионы ~3%. С учётом присутствия в измеренных токах составляющей, вызванной вторичной электронной эмиссией, можно сделать следующую оценку:

- так как коэффициент вторичной эмиссии весьма существенно растёт с ростом массы иона, реальная массовая доля, соответствующая току тяжёлых частиц, незначительна – доли процента;
- мала и массовая доля H_2^+ – около 10 %;
- а доля протонной составляющей близка к 90 %.

ВЫВОДЫ

В результате установки ёмкостного делителя ускоряющей трубки и стабилизации тока разряда дуоплазматрона поворот фазового портрета пучка в течение импульса существенно уменьшился.

Форма тока пучка стала близка к трапецеидальной с плоской вершиной на всём протяжении импульса вплоть до токов 130 мА.

Установлено также:

- протонная компонента пучка близка к 90 %;
- более тяжёлые ионы имеют те же параметры фазового портрета и не оказывают влияния на эмиттанс протонного пучка.

Результаты измерений параметров пучка и численного моделирования достигли хорошего соответствия.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, контракт № 16.518.11.7037

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.Н. Другаков и др. *Автоматизированное измерение поперечного эмиттанса на выходе инжектора протонов ЛУ ММФ*. Москва: ИЯИ АН СССР, 1989, с.3-8.
2. V.I. Derbilov, et al. Average proton beam current increasing at the MMFL injector // *Problems of*

Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations" (42). 2004, №1, p.13-15.

3. A.S. Belov, et al. Study of the INR RAS Linac Pulsed Duoplasmatron // *Proc. of RUPAC-2010*, Protvino, Russia, p.289-291, <http://www.accelconf.web.cern.ch/accelconf/r10/papers/thchb01>
4. К. Штеффен. *Оптика пучков высоких энергий*. Москва: «Мир», 1969, с.180-187.
5. H.G. Hereward. CERN PS/Int. TH 59-5, Geneva, 1959.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

THE INR OF RAS PROTON LINAC INJECTOR BEAM STUDY

A.S. Belov, V.N. Zubec, E.S. Nikulin, O.T. Frolov, V.P. Yakushev

The results of the proton beam simulation and experimental study at the INR RAS Linac injector are presented. Influence of the injector beam current and the accelerating tube intermediate electrode potential transients on the linear accelerator beam parameters have been studied. The capacitive voltage divisor and the duoplasmatron discharge current generator with 0,5 % stabilization have been installed. At the ion pulse current 85 mA the normalized emittans is 0,05 π cm-mrad for 63 % current.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПУЧКА В ПРОТОННОМУ ІНЖЕКТОРІ ЛП ІЯД РАН

А.С. Бєлов, В.Н. Зубец, Є.С. Нікулін, О.Т. Фролов, В.П. Якушев

Наводяться результати чисельного моделювання і вимірювань параметрів пучка протонів інжектора лінійного прискорювача ІЯД РАН. Досліджувався вплив нестабільності струму пучка і потенціалу проміжного електрода інжектора на характеристики прискореного в ЛП пучка. Встановлено ємнісний дільник напруги прискорювальної трубки і генератор струму розряду дуоплазматрона зі стабілізацією 0,5 %. При струмі іонів в імпульсі 85 мА нормалізований емітанс для 63 % струму дорівнює 0,05 π см-мрад.