

## ИЗМЕРЕНИЯ ЭМИТТАНСА ПУЧКА НА КАНАЛЕ ИНЖЕКЦИИ ИОНОВ Н<sup>+</sup> ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН

*С.Е. Брагин, О.М. Володкевич, В.А. Гайдаш, Ю.В. Киселев, В.С. Кленов,*

*А.Н. Мирзоян, А.В. Фещенко*

*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия*

*E-mail: bragin@inr.ru*

Предполагаемое использование пучка ионов Н<sup>+</sup> для целей протонной терапии накладывает жесткие требования на стабильность и эмиттанс пучка на входе в линейный ускоритель. В качестве источника ионов Н<sup>+</sup> для ЛУ ИЯИ РАН используется поверхностно-плазменный источник с пеннинговской геометрией разрядной камеры. В наиболее стабильном режиме источника ионов интенсивность пучка Н<sup>+</sup> на выходе инжектора составляет около 10 мА, что вполне удовлетворяет требованиям протонной терапии. Энергия инжекции в канал транспортировки при этом равна 400 кэВ. Поскольку предыдущие измерения эмиттанса пучка ионов Н<sup>+</sup> проводились для режимов с максимальной интенсивностью пучка 50...80 мА и энергией пучка не более 20 кэВ, представляет интерес измерение эмиттанса в режиме с наибольшей стабильностью параметров и энергией инжекции 400 кэВ. На канале инжекции ионов Н<sup>+</sup> проведены измерения эмиттанса. Обсуждаются результаты проведенных измерений.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В качестве источника ионов Н<sup>+</sup> для ЛУ ИЯИ РАН используется поверхностно-плазменный источник с пеннинговской геометрией разрядной камеры [1, 2]. Из газоразрядной камеры отрицательные ионы извлекаются через эмиссионную щель размером 0,6×15 мм, ориентированную большим размером поперек магнитного поля источника. Вытягивающее ионы напряжение с типичной амплитудой около 15 кВ прикладывается между корпусом источника и вытягивающими электродами. После прохождения вытягивающего промежутка длиной 2 мм ленточный пучок ионов входит в 90° секторный поворотный магнит с радиусом равновесной орбиты 7 см и показателем спада поля  $n \sim 1$ . Основные задачи поворотного магнита: преобразование сильно расходящегося вдоль магнитного поля ленточного пучка в слабо расходящийся квазисимметричный пучок, а также сепарация ионов Н<sup>+</sup> от потока сопутствующих электронов. В наиболее стабильном режиме источника ионов, что существенно для целей протонной терапии, интенсивность пучка на входе в канал транспортировки составляет около 10 мА.

Физический пуск инжектора и канала инжекции был проведен в декабре 2006 года при энергии ионов на выходе инжектора 400 кэВ и частоте повторения импульсов пучка 10 Гц [3]. Для перехода на частоту повторения импульсов пучка 50 Гц на инжекторе за прошедший после физического пуска период был разработан и реализован проект дифференциальной откачки. На канале инжекции в этот же период были завершены испытания системы записи пучка и формирования его временной структуры, создание системы автоматизированного измерения параметров пучка и обработки полученных результатов. По завершении этих работ проведена предварительная настройка канала инжекции на максимум токопрохождения до входа в малоапертурный бустерный резонатор (RFQ) при частоте повторения импульсов пучка на выходе инжектора 50 Гц и токе 10 мА.

Проведены измерения эмиттанса вдоль канала для оценки качества пучка, анализа причин потерь частиц, а также разработки алгоритма последующей настройки канала для снижения этих потерь и обеспечения согласования пучка с RFQ.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА НА КАНАЛЕ ИНЖЕКЦИИ

На Рис.1 представлено расположение датчиков тока пучка и измерителей эмиттанса на канале инжекции. По завершении предварительной настройки канала инжекции ток пучка на выходе инжектора равен 10 мА (ИДТ 1-1), на втором участке канала (между поворотными магнитами) – снижается с 6 (ИДТ 2-1) до 4 мА (ИДТ 2-2 и ИДТ 2-3), на входе в RFQ составляет также 4 мА (ИДТ 3-1). В предположении, что потери интенсивности на участке канала инжекции между ИДТ 1-1 и 2-1, а также между ИДТ 2-1 и 2-2 обусловлены заметным смещением центра тяжести пучка на выходе инжектора, была проведена регулировка положения пучка одним из двух корректирующих магнитов, расположенных на выходе инжектора, однако, оперативно добиться повышения интенсивности пучка не удалось.

После реализации предварительной процедуры настройки канала инжекции были проведены измерения эмиттанса пучка. В канале инжекции установлены 3 измерителя эмиттанса типа щель – многопроволочный коллектор, расположенные в начале первого участка канала инжекции, а также в начале и в конце второго участка канала. Для того, чтобы обеспечить дрейф пучка между щелью и коллектором при измерениях эмиттанса, задаются нулевые значения градиентов полей в соответствующих квадрупольных линзах. Из-за тепловой нагрузки измерения эмиттанса можно проводить только в режиме частоты следования импульсов пучка 1 Гц.

На данном этапе работы проводить измерения эмиттанса на ИЭ 1-1 в таком режиме не представляется возможным по следующим причинам. Пара-

метры пучка, формируемые в поверхностно-плазменных источниках с пеннинговской геометрией разрядной камеры при частотах следования импульсов пучка соответственно 1 и 50 Гц не эквивалентны и существенно различаются. А обеспечение режима, в котором источник работает с частотой следования импульсов пучка 50 Гц, а высоковольтные импульсы (для ускорения пучка до энергии инжекции 400 кэВ) формируются с частотой 1 Гц, находится в стадии реализации.

Для измерителей же эмиттанса, расположенных на втором участке канала, эта проблема не является актуальной, так как Дефлектор позволяет прореживать частоту следования импульсов пучка до 1 Гц. Эти измерения важны для анализа причин потерь частиц на канале, сравнения полученных результатов, а также для разработки алгоритма последующей настройки канала как для снижения потерь частиц в канале, так и для обеспечения согласования пучка с RFQ.

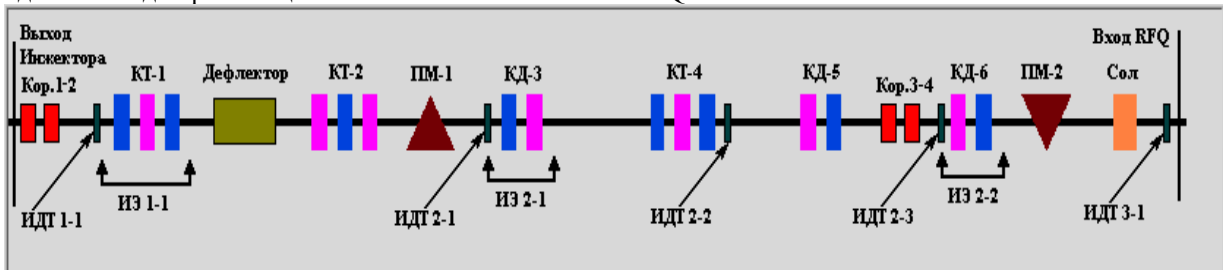


Рис.1. Схема расположения датчиков тока пучка и измерителей эмиттанса на канале инжекции: КД – квадрупольные дублеты; КТ – квадрупольные триплеты; ПМ – поворотные магниты; Кор – корректирующие магниты; Сол – соленоид; ИДТ – индукционные датчики; ИЭ – измерители эмиттанса

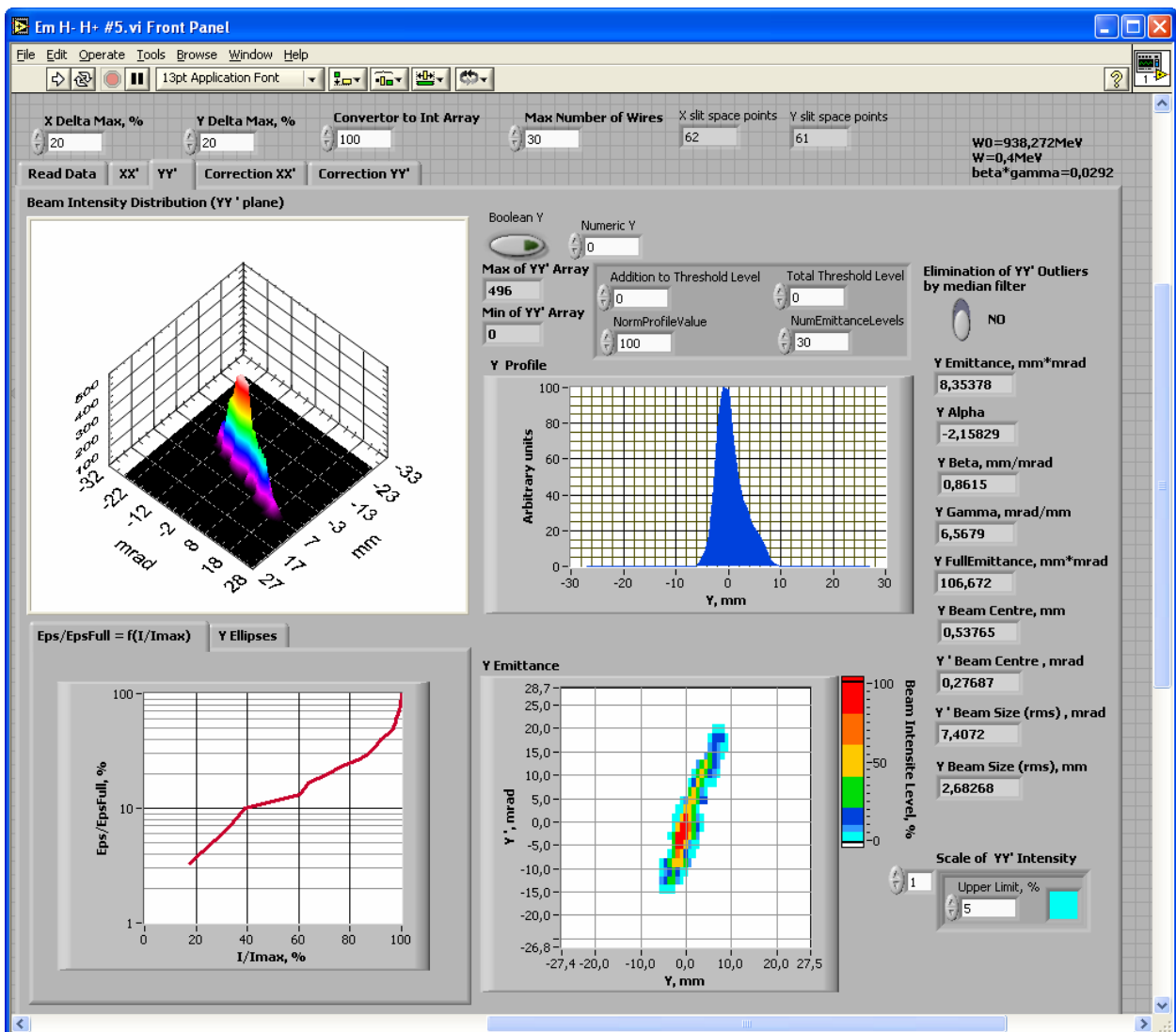


Рис.2. Характерные результаты измерения эмиттанса

### 3. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

На Рис.2 представлены характерные результаты измерения эмиттанса. Поперечный эмиттанс пучка определяется в двух плоскостях –  $XX'$  и  $YY'$ . Исходными данными для обработки эмиттанса являются двумерные распределения интенсивности пучка по координате и углу.

Для каждой плоскости  $XX'$  и  $YY'$ :

- Строится диаграмма интенсивности пучка по уровням, определяемым выбранными значениями. В пошаговом режиме определяется уровень отсечки (**Total Threshold level**), позволяющий обнулить фоновую интенсивность вне пучка.

- Для большей наглядности представления результатов в дополнение к диаграмме интенсивности пучка строится 3-мерная поверхность распределения интенсивности (**Beam Intensity Distribution**) с ее проекциями.

- Вычисляются первые и вторые моменты распределения интенсивности по координате и углу, определяются линейные и угловые смещения центра тяжести пучка по обеим координатам, величина среднеквадратического эмиттанса пучка, его параметры.

- Для каждой точки распределения по координате суммируются соответствующие величины распределения интенсивности по углу, что позволяет получить профиль пучка и его среднеквадратический размер.

- Строится зависимость величины эмиттанса пучка от доли тока для полученного распределения частиц на фазовой плоскости.

### 4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТОВ ОГИБАЮЩЕЙ ПУЧКА НА КАНАЛЕ ИНЖЕКЦИИ

На Рис.3 и 4 представлены фазовые портреты пучка, а также среднеквадратические ( $\epsilon_{\text{скр}}$ ) и учетверенные среднеквадратические ( $4\epsilon_{\text{скр}}$ ) эмиттансы пучка, полученные при обработке результатов измерения на ИЭ 2-1 и 2-2. Видно, что если на ИЭ 2-1 и 2-2 в плоскости  $YY'$  смещение центра тяжести пучка от оси небольшое и составляет соответственно 0,5...3,0 мм и 0,5...2,5 мрад, то в плоскости  $XX'$  это отклонение весьма значительное – 7...10 мм и 4...11 мрад, что приводит к заметным потерям интенсивности пучка вдоль канала инжекции. Следовательно, необходима реализация процедуры коррекции положения пучка.

На канале транспортировки расположены две пары корректоров (кор.1-2 и кор.3-4), каждый из которых может изменять положение пучка в обеих плоскостях ( $XX'$  и  $YY'$ ). Возможность проведения измерений эмиттанса на ИЭ 1-1 позволит реализовать алгоритм коррекции центра тяжести пучка [4] на выходе инжектора корректорами кор.1-2. Корректоры кор.3-4, расположенные на втором участке канала инжекции, позволяют провести, при необходимости, по результатам измерения эмиттанса на ИЭ 2-2 аналогичную коррекцию центра тяжести

пучка уже достаточно близко к выходу канала. Выполнять процедуру коррекции положения пучка необходимо последовательно – вначале на выходе инжектора, а затем на втором участке канала.

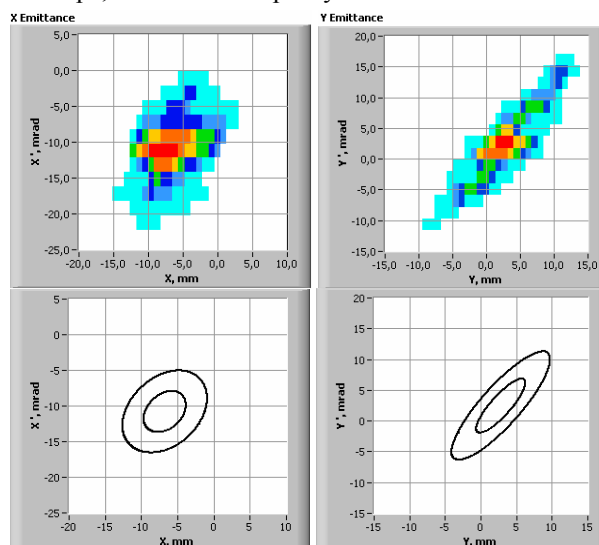


Рис.3. Фазовые портреты пучка, фазовые эллипсы  $\epsilon_{\text{скр}}$ ,  $4\epsilon_{\text{скр}}$ , по результатам измерения эмиттанса на ИЭ 2-1

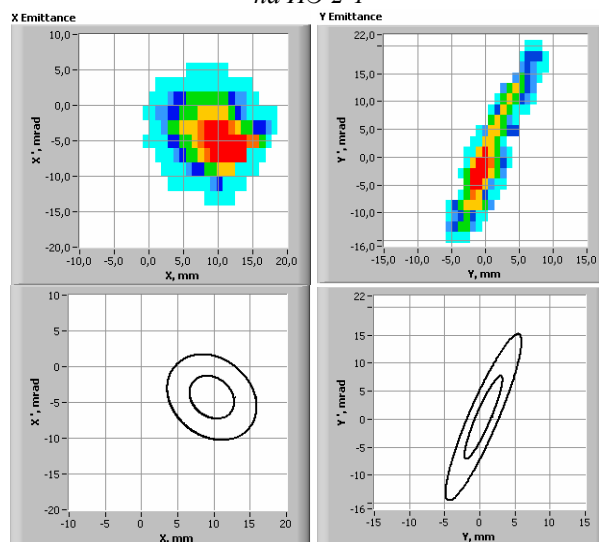


Рис.4. Фазовые портреты пучка, фазовые эллипсы  $\epsilon_{\text{скр}}$ ,  $4\epsilon_{\text{скр}}$ , по результатам измерения эмиттанса на ИЭ 2-2

Таблица 1

Среднеквадратические значения эмиттанса на ИЭ 2-1 и 2-2

Измеритель	$\epsilon_{\text{скр}}$ , $\mu\text{см}\cdot\text{мрад}$	
	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$
ИЭ 2-1	0,79	0,81
ИЭ 2-2	0,88	0,84

На Рис.5 представлен расчет огибающей пучка до ИЭ 2-2 по результатам измерения эмиттанса на ИЭ 2-1 для тех градиентов поля, которые были получены в линзах в результате настройки канала инжекции. Расчеты проводились для эмиттанса  $\epsilon_{x,y} = 4\epsilon_{\text{скр}}$ , в котором содержится примерно 90 % частиц. Численные значения  $\epsilon_{\text{скр}}$  представлены в Табл.1. Сравнение параметров пучка на ИЭ 2-2, полученных расчетом огибающей от ИЭ 2-1 и измерениями на ИЭ 2-2, представлено в Табл.2. Результаты

различаются особенно значительно в плоскости ХХ'. Это различие обусловлено как погрешностями измерения магнитных характеристик фокусирующих элементов канала, так и погрешностями метода измерения эммитанса и модели расчета.

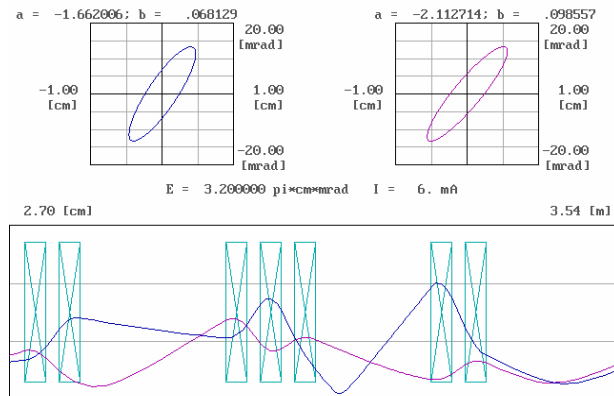


Рис.5. Огибающая пучка от ИЭ 2-1 до ИЭ 2-2 по результатам измерения на ИЭ 2-1,  $\epsilon_{x,y}=3,2 \pi\text{-см}\cdot\text{мрад}$

Таблица 2

Расчетные и измеренные параметры пучка на ИЭ 2-2,  $\epsilon_{x,y}=3,2 \pi\text{-см}\cdot\text{мрад}$

Наименование режима	Параметры пучка на ИЭ 2-2			
	$\alpha_x$	$\beta_x$	$\alpha_y$	$\beta_y$
Расчет от ИЭ 2-1 до ИЭ 2-2	-1,66	0,068	-2,11	0,099
Измерение на ИЭ 2-2	0,19	0,114	-2,13	0,085

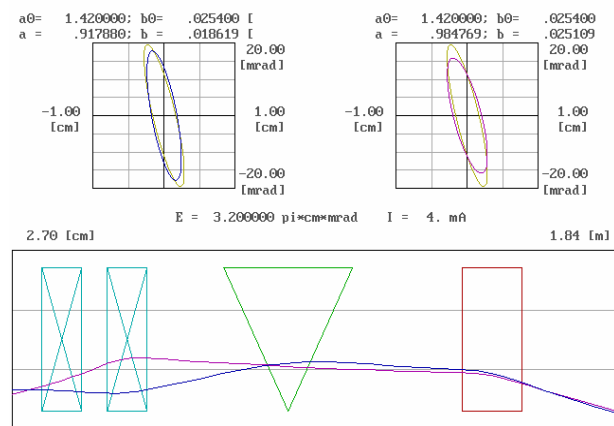


Рис.6. Огибающая пучка оптимизирующего расчета от ИЭ 2-2 до RFQ по результатам измерения на ИЭ 2-2,  $\epsilon_{x,y}=3,2 \pi\text{-см}\cdot\text{мрад}$

Таблица 3

Расчетные и согласованные параметры пучка на входе в RFQ,  $\epsilon_{x,y}=3,2 \pi\text{-см}\cdot\text{мрад}$

Наименование режима	Параметры пучка на входе в RFQ			
	$\alpha_x$	$\beta_x$	$\alpha_y$	$\beta_y$
Оптимизирующий расчет по измерениям на ИЭ 2-2	0,92	0,019	0,99	0,025
Согласованные параметры пучка на входе в RFQ	1,42	0,025	1,42	0,025

Оптимизирующий расчет огибающей пучка от ИЭ 2-2 до входа в RFQ по результатам измерения на ИЭ 2-1 представлен на Рис.6. Сравнение параметров пучка, полученных оптимизирующим расчетом, с ISSN 1562-6016. ВАИТ. 2012. №3(79)

согласованными параметрами пучка на входе в RFQ приведено в Табл.3. Результаты оптимизирующего расчета, хотя и достаточно близки к согласованным, но несколько отличаются от них. Неполное согласование обусловлено тем, что при 4-х необходимых для оптимизации независимых параметрах регулировки в нашем распоряжении имеются только 3 поля в двух квадрупольных линзах и в солениоде. Для достижения прецизионного согласования необходима коррекция значений полей фокусирующих элементов, расположенных непосредственно перед измерителем эммитанса ИЭ 2-2.

В результате проведенных исследований напрашиваются выводы общего характера. На длинных каналах инжекции необходимо иметь не один, а несколько измерителей эммитанса, причем, последний по ходу пучка измеритель должен быть расположен, по возможности, как можно ближе к выходу канала инжекции с тем, чтобы минимизировать отклонение параметров пучка от согласованных. В процессе настройки канала по результатам измерения параметров пучка на каждом по ходу пучка измерителе необходимо последовательно проводить расчет согласованного режима, изменение значений магнитных полей фокусирующих элементов канала в соответствии с этими расчетами. При необходимости проводится коррекция значений полей фокусирующих элементов, расположенных до соответствующего измерителя, для улучшения условий прохождения пучка по каналу и обеспечения согласованных с RFQ параметров пучка. Кроме того, значительное отклонение центра тяжести пучка на канале, которое приводит к заметным потерям частиц, требует реализации процедуры коррекции положения пучка. В первую очередь, такая коррекция необходима на входе в канал инжекции, и, при необходимости, на выходе канала. Очевидно, что настройка согласованного режима при малом уровне потерь частиц вдоль канала представляет собой достаточно длительную и трудоемкую процедуру.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На канале инжекции ионов Н<sup>-</sup> проведена настройка на максимум токопрохождения частиц по каналу до входа в малоапертурный бустерный резонатор RFQ. Проведены измерения эммитанса вдоль канала двумя измерителями, сравнение и анализ полученных результатов. Предложен алгоритм настройки канала для обеспечения согласования пучка с RFQ. Проведен предварительный анализ причин потерь частиц на канале, связанных, на наш взгляд, с существенным отклонением центра тяжести пучка от оси канала в плоскости ХХ'. Отмечена важность разработки и реализации на канале инжекции процедуры коррекции центра тяжести, которая позволила бы существенно снизить потери частиц.

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Г. Дудников. Поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов с пеннинговской

- геометрией // *Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*, Дубна, 1975, т.1, с.323.
2. Г.Е. Деревянкин, В.Г. Дудников, В.С. Кленов. Об ионно-оптических характеристиках пучков ионов  $H^-$ , генерируемых поверхностно-плазменными источниками // *ЖТФ*. 1978, т.48, в.2, с.404.
  3. В.А. Гайдаш, Ю.Н. Готовцев, О.В. Грехов, В.В. Кузнецов, В.Н. Михайлов, В.Л. Серов, А.В. Фещенко, А.Н. Мирзоян. Канал инжекции ионов  $H^-$  линейного ускорителя ИЯИ РАН // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (49). 2008, №3, с.119-122.
  4. S.E. Bragin, A.V. Feschenko, O.V. Grekhov, N.F. Lebedeva, V.N. Mikhailov, A.N. Mirzozjan, V.A. Moiseev, O.M. Volodkevich. Transverse Beam Matching and Correction Procedures in INR Linac // *Proceedings of LINAC 2006*. Knoxville, Tennessee, USA, p.435-437.

*Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.*

#### **$H^-$ BEAM EMITTANCE MEASUREMENTS IN TRANSPORTATION CHANNEL OF INR LINAC**

***S.E. Bragin, O.M. Volodkevich, V.A. Gaidash, Yu.V. Kiselev, V.S. Klenov, A.N. Mirzozjan, A.V. Feschenko***

Expected application of  $H^-$  beams for proton therapy leads to serious requirements on the beam stability and emittance at linac entrance. Surface-plasma source with Penning geometry discharge chamber is used at  $H^-$  injector of INR Linac. In the most stable operation mode of  $H^-$  injector source the beam intensity at injector exit is about 10 mA. This is quite satisfactory for proton therapy requirements.  $H^-$  beam is injected into the transportation channel with the energy of 400 keV. The previous measurements of  $H^-$  beam emittance were carried out for maximum 50...80 mA beam intensity and for up to 20 keV beam energy so it is important to measure the emittance for operation mode with the most stable beam parameters and 400 keV beam energy.  $H^-$  beam emittance was measured in beam transportation channel. The results of measurements are discussed.

#### **ВИМІРЮВАННЯ ЕМІТТАНСА ПУЧКА НА КАНАЛІ ІНЖЕКЦІЇ ІОНІВ $H^-$ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІЯД РАН**

***С.Є. Брагін, О.М. Володкевич, В.А. Гайдаш, Ю.В. Кисельов, В.С. Кльонов, А.Н. Мірзоян, А.В. Фещенко***

Передбачуване використання пучка іонів  $H^-$  для цілей протонної терапії накладає жорсткі вимоги на стабільність і еміттанс пучка на вході в лінійний прискорювач. Як джерело іонів  $H^-$  для ЛП ІЯД РАН використовується поверхнево-плазмове джерело з пеннінговською геометрією розрядної камери. У найбільш стабільному режимі джерела іонів інтенсивність пучка  $H^-$  на виході інжектора становить близько 10 мА, що цілком задовольняє вимогам протонної терапії. Енергія інжекції в канал транспортування при цьому дорівнює 400 кеВ. Оскільки попередні вимірювання еміттанса пучка іонів  $H^-$  проводилися для режимів з максимальною інтенсивністю пучка 50...80 мА і енергією пучка не більше 20 кеВ, представляє інтерес вимір еміттанса в режимі з найбільшою стабільністю параметрів і енергією інжекції 400 кеВ. На каналі інжекції іонів  $H^-$  проведені вимірювання еміттанса. Обговорюються результати проведених вимірювань.