

## КАНАЛ ИНЖЕКЦИИ ИОНОВ $H^-$ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН

*В.А. Гайдаш, Ю.Н. Готовцев, О.В. Грехов, В.В. Кузнецов, В.Н. Михайлов,  
А.Н. Мирзоян, В.Л. Серов, А.В. Фещенко  
ИЯИ РАН, Москва, Россия*

Завершены разработка и сооружение канала инжекции ионов  $H^-$  на квадрупольных линзах и поворотных магнитах. Успешно проведен физический пуск канала. При импульсном токе пучка 7 мА на входе канала, на его выходе зарегистрирован ток пучка 4 мА.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проектом сооружения линейного ускорителя ИЯИ РАН предусматривалась работа линейного ускорителя с пучками ионов  $H^+$  и  $H^-$ . В 1983 году состоялся физический пуск инжектора и канала инжекции протонов (ионов  $H^+$ ) с энергией частиц из инжектора 750 кэВ [1]. В 1999 году была проведена модернизация канала, основной задачей которой было понизить энергию частиц из инжектора до 400 кэВ для повышения стабильности работы

инжектора и получения возможности увеличить длительность импульса пучка с 80 до 200 мкс. Для доускорения частиц до требуемой энергии инжекции в ускоритель на выходе канала инжекции протонов был установлен специально разработанный для этой цели бустерный резонатор RFQ-400 [2]. В результате проведенной работы надежность инжектора существенно улучшилась, а средний ток ускоренного пучка протонов при регулярной работе увеличился с 40...50 мкА до 100...110 мкА. Максимальная же интенсивность достигает 150 мкА.

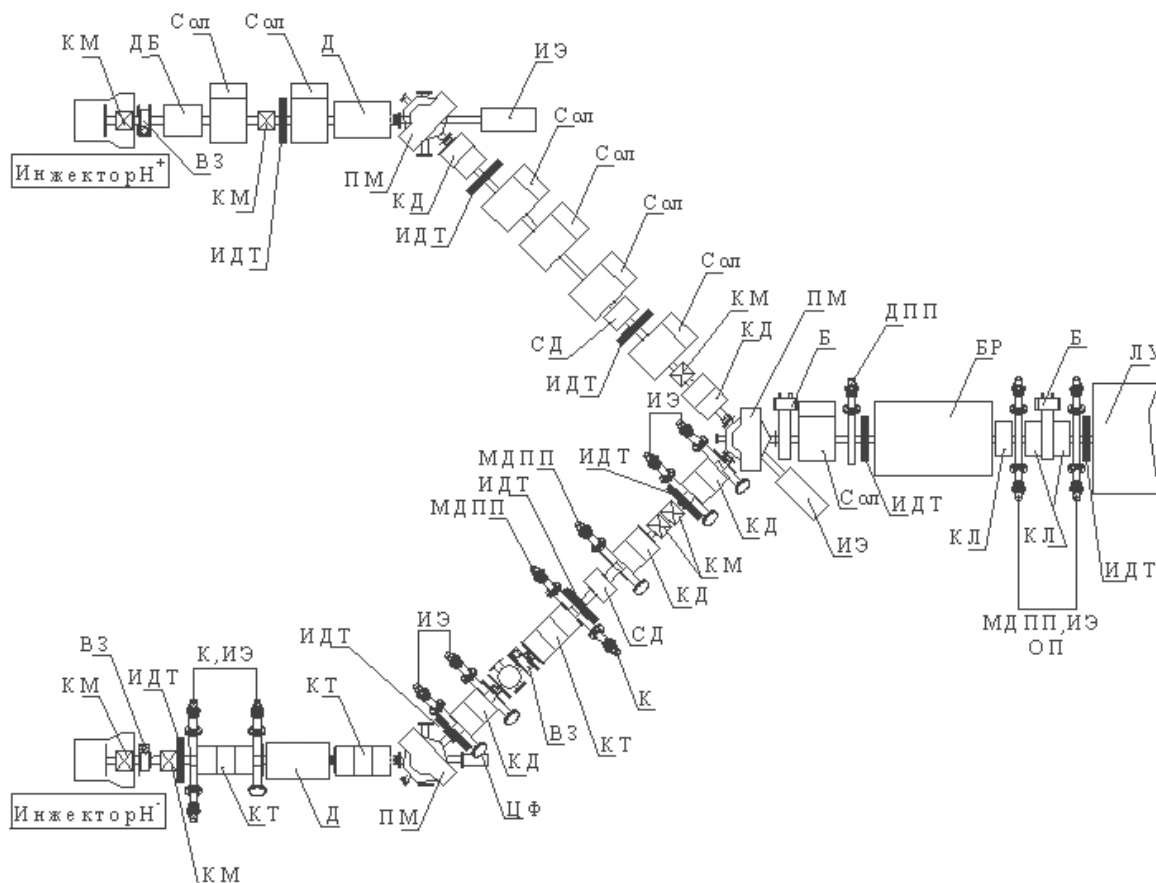


Рис. 1. Каналы инжекции протонов (ионов  $H^+$ ) и  $H^-$ .

*КЛ - квадрупольная линза; КД - квадрупольный дублет; КТ - квадрупольный триплет; Сол - соленоид; ПМ - поворотный магнит; КМ - корректирующий магнит; ДБ - диагностический бокс, ИДТ - индукционный датчик тока; ЦФ - цилиндр Фарадея; СД - стеночный датчик; ИЭ - измеритель эмиттанса; ДПП - двухпроводный профилометр; МДПП - многопроводный профилометр; ОП - ограничитель пучка; К - коллиматор; Б - банчер; Д - дефлектор; БР - бустерный резонатор RFQ; ВЗ - вакуумный затвор; ЛУ - линейный ускоритель*

Примерно с середины 80-х годов начались работы по разработке и изготовлению оборудования инжектора и канала инжекции ионов Н<sup>+</sup>. Однако, из-за сложностей с финансированием эта деятельность в конце 80-х годов была приостановлена. В начале 2000-х годов работы по инжектору [3] и каналу инжекции ионов Н<sup>+</sup> были возобновлены. В 2005 году изготовление оборудования канала инжекции было практически завершено. В 2005 и 2006 годах были проведены работы по установке и испытаниям оборудования. В декабре 2006 года был проведен физический пуск инжектора и канала инжекции ионов Н<sup>+</sup> с ускорением частиц до энергии 49 МэВ.

## 2. ОБОРУДОВАНИЕ

Схема 2-х каналов инжекции представлена на Рис.1. Канал инжекции ионов Н<sup>+</sup> в отличие от канала инжекции протонов, в котором фокусировка пучка осуществляется соленоидами, состоит из квадрупольных дублетов и триплетов с независимым питанием каждой линзы. Каналы с квадрупольными линзами обеспечивают большую жесткость фокусировки и гибкость настройки оптики канала по сравнению с соленоидальными каналами, хотя при этом настройка оптики становится более трудоемкой процедурой при ее реализации из-за увеличения числа степеней свободы.

Питание электромагнитных элементов канала обеспечивают 24 источника стабилизированного питания на 5 А и 100 В. На канале инжекции протонов от инжектора до входа в ускоритель питание соленоидов и линз КЛ на входе в ускоритель обеспечивают 10 источников на 800 А и 30 В. Поэтому, если для канала инжекции ионов Н<sup>+</sup> от выхода инжектора до входа в общий для двух каналов участок суммарная потребляемая мощность не превышает 6 кВт, то для аналогичного участка канала инжекции протонов эта величина составляет примерно 75 кВт, то есть на порядок больше. На общем же для двух каналов участке суммарная потребляемая мощность составляет примерно 45 кВт.

Максимальный градиент магнитного поля в квадрупольных линзах равен 700 Гс/см при токе в обмотке 1.65 А. Номинальное отклоняющее поле в поворотном магните при радиусе поворота частиц 50 см равно 1825 Гс при токе в обмотке 3.19 А. Максимальное отклоняющее поле в корректирующем магните равно 220 Гс при токе в обмотке 0.8 А. Диаметр апертуры канала составляет 50...60 мм.

Разработан пакет программных приложений автоматизированного управления источниками питания электромагнитных элементов канала инжекции, обеспечивающий оперативную настройку оптики канала.

Система прореживания и формирования временной структуры, в состав которой входят быстрый дефлектор на бегущей волне, высоковольтный источник формирования напряжения на 8 кВ, высоковольтные транзисторные ключи для формирования импульсов напряжения на дефлекторе и ячейка управления режимами, обеспечивает регулирование частоты следования макроимпульсов от 1 Гц до

100 Гц, а также формирование из этих импульсов различных микроимпульсов пучка длительностью от 0.3 до 70 мкс с фронтами порядка 100 нс. Система изготовлена, в настоящее время проводятся ее испытания.

Измерения параметров пучка на канале обеспечивают 4 индукционных датчика тока, 1 цилиндр Фарадея на выходе прямого участка канала, а также сканеры-мониторы пучка: 3 измерителя эмиттанса типа щель-многопроволочный коллектор, 2 многопроволочных профилометра. Многопроволочные профилометры перекрывают практически всю апертуру канала инжекции. На канале установлены также 2 привода с водоохлаждаемыми сменными ограничителями размеров пучка. На Рис.2 представлена начальная часть канала инжекции, включая квадрупольные линзы, быстрый дефлектор, первый поворотный магнит и сканеры-мониторы пучка.

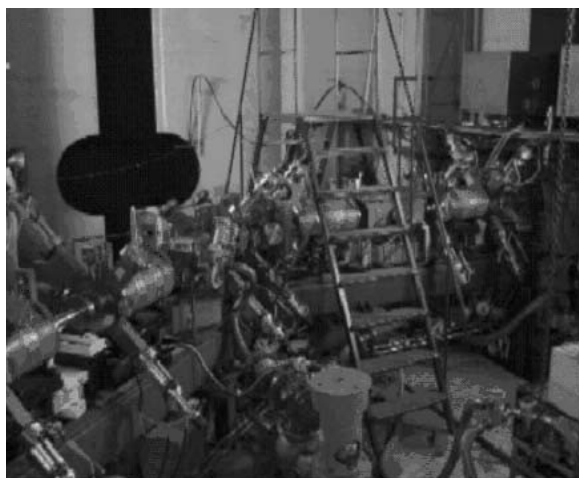


Рис.2. Общий вид начальной части канала инжекции ионов Н<sup>+</sup>

Юстировка квадрупольных линз и поворотного магнита выполнена с погрешностью не хуже  $\pm 100$  мкм. Геодезическая калибровка перемещаемых через апертуру канала сканеров-мониторов и ограничителей пучка проведена также с погрешностью не хуже  $\pm 100$  мкм. Остальное оборудование канала установлено с погрешностью не хуже 0.5 мм.

Измерения параметров пучка на общем для двух каналов участке обеспечивают 2 магнитоиндукционных датчика, 2-х проволочный профилометр, 2 многопроволочных профилометра и 1 измеритель эмиттанса типа щель-многопроволочный коллектор. На входе в ускоритель также установлены 2 привода с водоохлаждаемыми ограничителями размеров пучка.

Электроника для управления мониторами и измерения параметров пучка для обоих каналов инжекции изготовлена. В настоящее время разрабатывается пакет программных приложений для автоматизированного измерения параметров пучка.

## 3. ДИНАМИКА ПУЧКА

На Рис.3 приведены расчетные огибающие пучка ионов Н<sup>+</sup> от выхода инжектора до входа в малоапертурный бустерный резонатор RFQ-400, в котором расстояние между электродами равно 16 мм. На

Рис.4 приведены расчетные огибающие пучка ионов  $H^-$  от выхода RFQ-400 до входа в линейный ускоритель. Расчеты проводились по программам FLAT [4] и TRACE 3-D [5].

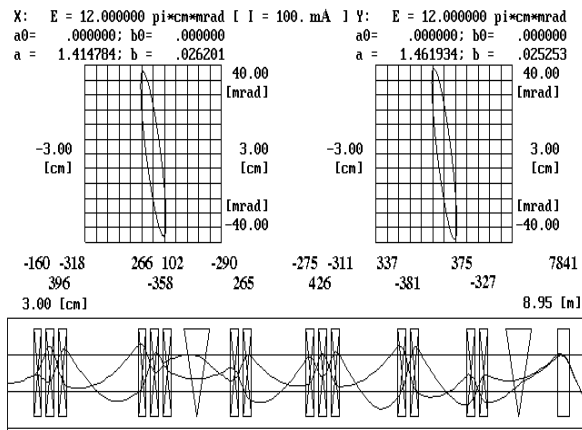


Рис.3. Огибающие пучка от инжектора до входа в RFQ.  $W=400 \text{ кэВ}$ ,  $I=100 \text{ mA}$ ,  $\epsilon=12 \text{ п} \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$

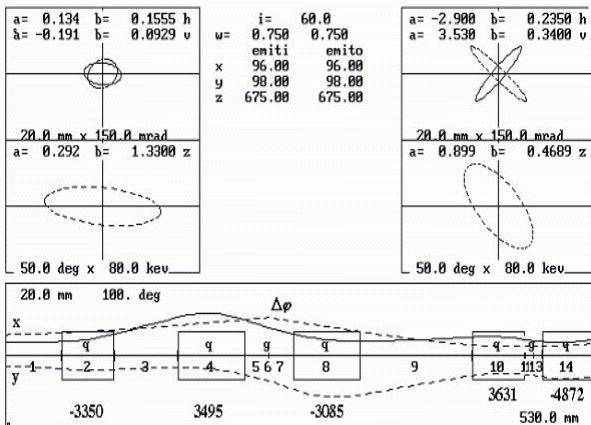


Рис.4. Огибающие пучка от выхода RFQ до входа в линейный ускоритель.  $W=750 \text{ кэВ}$ ,  $I=60 \text{ mA}$ ,  $\epsilon=10 \text{ п} \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$

На выходе RFQ-400 установлены 3 квадрупольные малогабаритные линзы, а также банчер (резонатор-группирователь) для обеспечения согласования пучка с ускоряюще-фокусирующей системой в продольной и поперечных плоскостях. Максимальный градиент магнитного поля у линз равен соответственно  $4500 \text{ Гс/см}$  и  $3800 \text{ Гс/см}$ . Диаметр апертуры канала на этом участке составляет  $18 \dots 28 \text{ мм}$ . Достаточно жесткая фокусировка обусловлена необходимостью проведения согласования пучка в поперечной плоскости на очень коротком участке, длина которого составляет  $48 \text{ см}$ .

На входе в RFQ-400 установлен еще один банчер пучка, обеспечивающий увеличение захвата частиц в режим ускорения. Опыт настройки канала инжекции протонов с пучком показал, что коэффициент захвата частиц в режим ускорения при этом увеличивается с  $50\%$  до  $60 \dots 65\%$ .

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Физический пуск канала инжекции был проведен в декабре 2006 года при энергии ионов на выходе инжектора  $400 \text{ кэВ}$ , частоте повторения импульсов пучка  $10 \text{ Гц}$  и длительности каждого импульса  $180 \text{ мкс}$ .

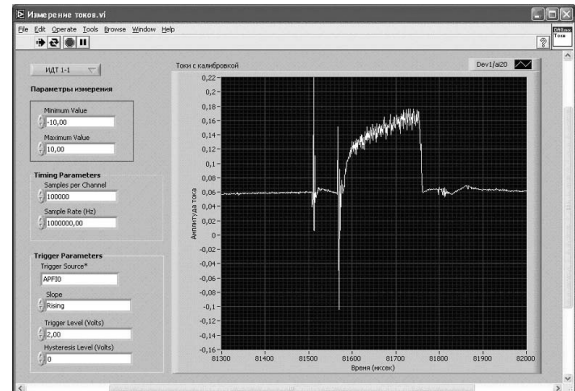


Рис.5. Импульс тока пучка  $10 \text{ mA}$  с индукционного датчика на входе в канал инжекции при токе ионов  $H^-$  из источника  $7 \text{ mA}$

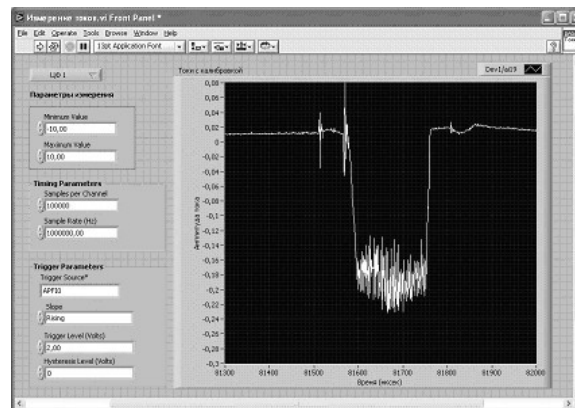


Рис.6. Импульс тока пучка  $5 \text{ mA}$  с цилиндра Фарадея на выходе прямого участка канала инжекции

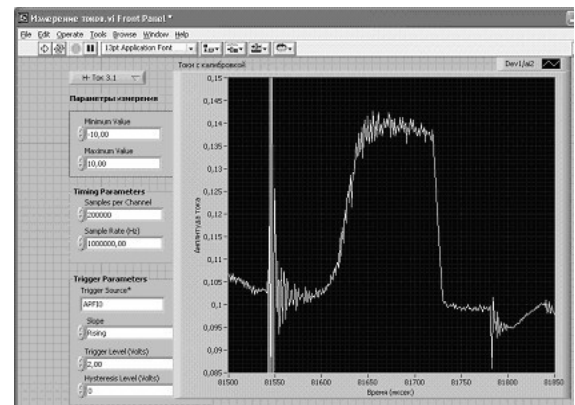


Рис.7. Импульс тока пучка  $4 \text{ mA}$  с индукционного датчика на входе в линейный ускоритель

При токе ионов  $H^- 7 \text{ mA}$  непосредственно из источника, индукционным датчиком, установленным на входе в канал, был зарегистрирован импульсный ток  $10 \text{ mA}$ . Завышение результатов измерения обусловлено наличием сопутствующего тока электронов. На выходе прямого участка после подстройки фокусирующих полей квадрупольных линз цилиндром Фарадея был зарегистрирован ток пучка  $5 \text{ mA}$ . На участке после 1-го поворотного магнита до входа

в RFQ соответствующей подстройкой удалось сохранить ток пучка около 5 мА. На входе в линейный ускоритель был зарегистрирован импульсный ток пучка 4 мА. Снижение интенсивности на этом участке обусловлено, в основном, потерями частиц в малоапертурном RFQ. При проведении работ были включены также в режим ускорения частиц первые два резонатора с трубками дрейфа. Нейтронные датчики, расположенные вдоль линейного ускорителя, зарегистрировали ускоренный до энергии 49 МэВ ток ионов  $H^-$ .

Характерные осциллограммы импульсов тока пучка вдоль канала инжекции представлены на Рис.5,6 и 7.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы разработано, изготовлено, смонтировано и испытано оборудование канала инжекции ионов  $H^-$  линейного ускорителя ИЯИ РАН. В режиме физического пуска проведена настройка оптики канала, обеспечившая импульсный ток пучка 4 мА на входе в линейный ускоритель. Зарегистрирован пучок, ускоренный до энергии 49 МэВ. В настоящее время завершаются работы по испытанию системы запыриания пучка и

формирования его временной структуры, созданию системы автоматизированного измерения параметров пучка.

### ЛИТЕРАТУРА

1. S.K. Esin, et al. Commissioning of proton injection channel of INR AS USSR meson factory linac // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations*. 1985, №2(23), p.6-8.
2. А.В. Васюченко и др. *Изготовление, радиотехническая настройка и ввод в эксплуатацию бустерного резонатора RFQ-400*: Препринт ИЯИ РАН 1019/99, Москва, 1999.
3. A.S. Belov, et al.  $H^-$  injector for Moscow Meson Factory Linac // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations (46)*. 2006, №2, p.52-54.
4. Г.В. Романов. *FLAT-программа для расчета оптики каналов сильноточных пучков*: Препринт ИЯИ АН СССР П-0110, Москва, 1979.
5. K.R. Crandal, D.P. Rusthoi. *TRACE 3-D Documentation*: Preprint LA-UR-97-886, Los Alamos, New Mexico, 1997.

### $H^-$ INJECTION BEAM CHANNEL FOR INR LINAC

*V.A. Gaidash, Y.N. Gotovtsev, O.V. Grekhov, V.V. Kouznetsov, V.N. Mikhailov, A.N. Mirzoyan, V.L. Serov, A.V. Feschenko*

Development, fabrication and assembling of  $H^-$  injection beam channel on quadrupole lenses and bending magnets are completed. Commissioning of the channel is successfully realized. With the beam pulse 7 mA on the entrance 4 mA on the exit of channel is reached.

### КАНАЛ ІНЖЕКЦІЇ ІОНІВ $H^-$ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІЯД РАН

*В.А. Гайдаш, Ю.Н. Готовцев, О.В. Грехов, В.В. Кузнецов, В.Н. Михайлов, А.Н. Мірзоян, В.Л. Серов, А.В. Фещенко*

Завершено розробку і спорудження каналу інжекції іонів  $H^-$  на квадрупольних лінзах і поворотних магнітах. Успішно проведений фізичний пуск каналу. При імпульсному струмі пучка 7 мА на вході каналу, на його виході отримано струм пучку 4 мА.