

ПУСК ИНЖЕКТОРА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН

*А.С. Белов, В.И. Дербилов, С.К. Есин, В.Н. Зубец, Ю.Ж. Калинин, В.С. Клёнов,
Л.П. Нечаева, Е.С. Никулин, В.Л. Серов, А.В. Турбабин, А.В. Фещенко, О.Т. Фролов,
В.П. Якушев*

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

E-mail: nikulin@inr.ru

В ИЯИ РАН на сильноточном линейном ускорителе создаётся инжектор ионов H^- с энергией 400 кэВ со средним током пучка до 400 мкА и частотой следования импульсов до 50 Гц. Пуск инжектора произведен в декабре 2006 г. Получен импульсный ток 7 мА при частоте и длительности импульсов 10 Гц и 180 мкс, соответственно.

В Институте ядерных исследований Российской академии наук для получения пучка отрицательных ионов водорода на сильноточном линейном ускорителе (ЛУ) в дополнение к работающему протонному инжектору был разработан инжектор ионов H^- . Он должен обеспечить ЛУ пучком ионов H^- со следующими параметрами: энергия ионов – 400 кэВ; частота следования импульсов тока пучка – до 50 Гц; длительность импульсов – до 200 мкс; средний ток пучка ионов – до 400 мкА. В выборе основных технических решений был широко использован опыт эксплуатации и усовершенствования протонного инжектора [1]. Необходимое согласование пучка из ионного источника (ИИ) со входом в канал транспортировки, как в «бесшумовом», так и в «шумовом» режимах работы ИИ, осуществляется одной электростатической линзой в начале ускорительной трубки (УТ) и электродами УТ. Автоматизированное управление системами инжектора выполнено на основе программного пакета LabVIEW с использованием стандартных модулей National Instruments Corp. [1,2]. Система питания ИИ, находящаяся под ускоряющим потенциалом 400 кВ, управляется на тех же принципах по волоконно-оптическому кабелю.

Элементы источника импульсного ускоряющего напряжения 400 кВ и ускорительной трубки, а также общая компоновка высоковольтного оборудования обоих инжекторов в большой мере унифицирована для удобства обслуживания. Устройства питания и управления ИИ разработаны и изготовлены в виде блоков, собранных в три стойки конструктива «Вишня» [3]. В качестве источника ионов H^- применен поверхностно-плазменный ИИ Института ядерной физики СО РАН [4].

Были проведены испытания и получены номинальные параметры на генераторах ускоряющего напряжения 400 кВ, тока разряда ИИ, вытягивающего напряжения ИИ [5]. Общее электропитание оборудования, находящегося под ускоряющим напряжением, производится через бифиляр высоковольтной обмотки импульсного трансформатора 400 кВ на частоте сети 50 Гц в отличие от протонного инжектора, где используется преобразователь 400 Гц.

В ноябре 2006 г. ИИ H^- был испытан на отдельном вакуумном стенде с питанием от своей штатной системы и после этого установлен в вакуумной камере ионного источника (ВКИИ), которая крепится на УТ так, что одна стенка ВКИИ является вакуумной крышкой УТ. В этой стенке имеется отверстие $\varnothing 30$ мм, через которое пучок ионов H^- из ИИ поступает на вход УТ и производится откачка ВКИИ. На крышке УТ после отверстия закреплен индукционный датчик тока пучка. В дальнейшем показания именно этого датчика считаются током пучка из ИИ. Во время пуска инжектора вакуум в УТ и, соответственно, в ВКИИ создавался турбомолекулярным насосом фирмы VARIAN производительностью 3500 л/с.

Электромагнитом в разрядной камере ИИ создаётся магнитное поле примерно 1,5 кЭ. Импульсным газовым клапаном (при частоте 10 Гц) в ИИ подаётся водород, который повышает давление в ВКИИ примерно на 2×10^{-2} Па. Приложение импульсного напряжения до 800 В от генератора тока разряда к разрядному промежутку вызывает высоковольтный тлеющий разряд с напряжением на разряде около 600 В и током разряда 10...15 А. Поступление в разряд паров цезия из подогреваемого контейнера понижает напряжение горения разряда, разрядный ток увеличивается и только при этом наблюдается существенный выход ионов H^- из ИИ. Время для установления стабильного выхода паров цезия составляет примерно 0,5...1 ч. Регулирование подачи цезия достаточно тонкое. Чрезмерное количество цезия переводит разряд в режим дугового, когда выработка ионов H^- прекращается и требуется продолжительная тренировка разрядного промежутка, чтобы уменьшить количество цезия и восстановить тлеющий разряд. В неблагоприятном случае конденсация цезия может вызвать короткое замыкание разрядного промежутка с необходимостью вскрытия ВКИИ для механической очистки разрядного промежутка.

Отрицательное импульсное напряжение с амплитудой до 20 кВ подается от генератора вытягивающего напряжения через токоограничивающее сопротивление на корпус разрядной камеры. Электроды вытягивания заземлены. Отрицательные ионы

извлекаются из разрядной камеры через эмиссионную щель, имеющую размеры $0,6 \times 15$ мм и толщину стенок $0,5$ мм. Магнитное поле направлено вдоль меньшего размера эмиссионной щели. Вытягиваемые вместе с отрицательными ионами электроны уходят вдоль силовых линий магнитного поля на стенки эмиссионной щели. Вытягивающий зазор имеет длину 1 мм, а наименьшая ширина щели в вытягивающих электродах составляет 1 мм.

Вытягивающая система формирует ленточный пучок. Он имеет большую угловую расходимость и малый размер в направлении силовых линий магнитного поля. Для формирования квазипараллельного пучка с близкими размерами во взаимно перпендикулярных плоскостях используется поворотный магнит с показателем спада поля по радиусу $n \sim 1$, радиусом равновесной орбиты 70 мм и углом поворота 90° . Зазор между полюсами магнита на радиусе равновесной орбиты равен 30 мм.

Типичные характеристики тлеющего разряда приведены на Рис.1.

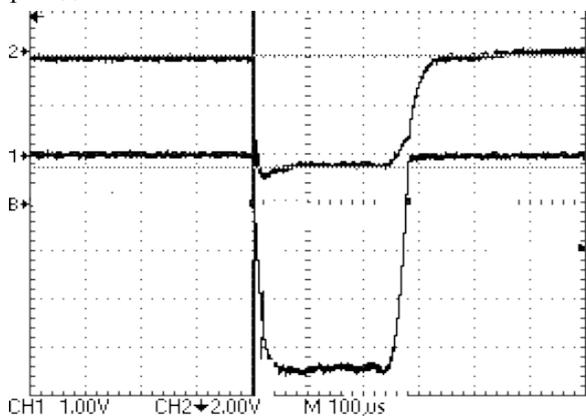


Рис.1. Верхний луч – напряжение на разряде, 200 В/дел.

Нижний луч – ток разряда, 10 А/дел.
По горизонтали – 100 мкс/дел.

При этом же разряде получен ток пучка ионов H примерно 6 мА, напряжение на разряде 450 В и ток разряда 45 А (см. Рис.2).

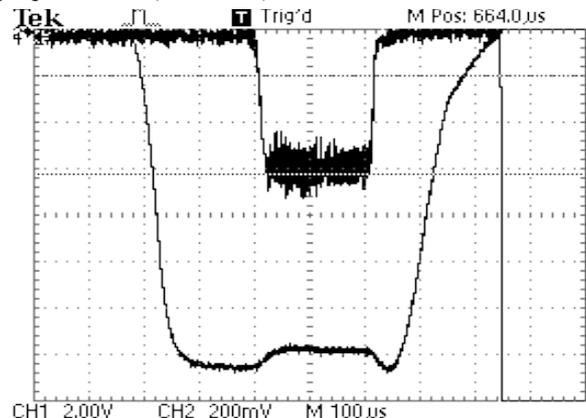


Рис.2. Нижняя кривая - вытягивающее напряжение 2 кВ/дел. Ток ионов H из ИИ 2 мА/дел.

Напряжение разряда большое, что говорит о недостаточной тренировке разрядной камеры. Оценка общего тока в цепи вытягивания по падению

напряжения разряда на токоограничивающем сопротивлении даёт значение примерно 40 мА.

При более согласованных условиях подачи водорода и паров цезия в ИИ и лучшей тренировке поверхностей разрядной камеры на частоте 10 Гц был получен ток до 10 мА при напряжении и токе разряда 250 В и 70 А, соответственно. На частоте 25 Гц тренировка происходила легче, и ток до 14 мА достигался при разряде с параметрами $200 \dots 300$ В и 60 А практически при той же подаче водорода в ИИ.

В декабре 2006 г. на инжекторе впервые был получен пучок ионов H . Генератор ускоряющего напряжения и ИИ работали на частоте 10 Гц. На источнике был установлен импульсный ток 7 мА, ускоряющее напряжение 400 кВ. Индукционный датчик зарегистрировал в начале канала транспортировки ток пучка примерно 10 мА. Осциллограмма приведена на Рис.3, полярность сигнала обратная. Завышенное показание датчика обусловлено вторичными электронами.

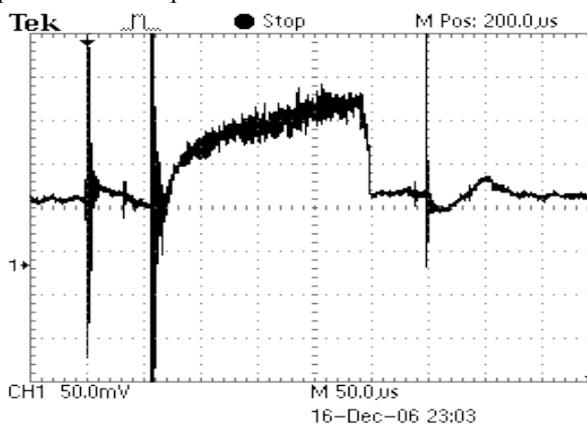


Рис.3. Ток пучка в канале транспортировки. Индукционный датчик, 5 мА/дел.

В условиях несколько лучшей тренировки ИИ в январе 2007 г. на частоте импульсов 25 Гц практически при том же уровне подачи водорода получен пучок с током 15 мА (Рис.4). Параметры разряда в ИИ- 210 В и 78 А. С той же частотой 25 Гц на УТ подавалось напряжение 400 кВ, $1/26$ часть которого использовалась для фокусировки. Весь ток пучка проходил через электроды УТ без потерь.

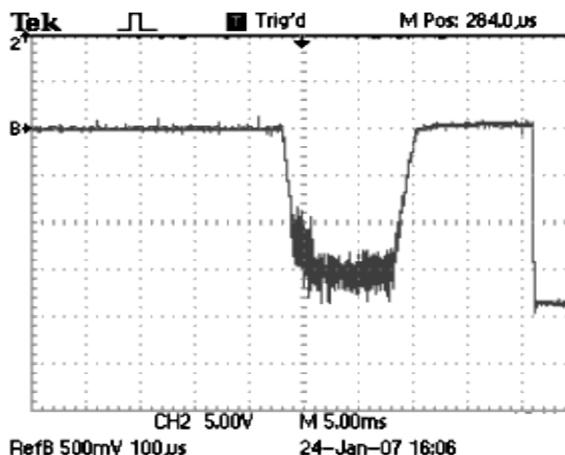


Рис.4. Ток пучка ионов H на входе в УТ:

*по вертикали – 5 мА/дел,
по горизонтали – 100 мкс/дел.*

Справа показан калибровочный сигнал 20 мА

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Грант №04-02-16315.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.P. Yakushev, S.K. Esin, A.V. Feschenko, et al. The MMFL linac H⁻ injector development. <http://accelconf.web.cern.ch/fcftlconf/r04/papers/TU-IP15.pdf>
2. S.K. Esin, E.S. Nikulin, A.V. Feschenko, et al. The MMFL H⁺ and H⁻ injectors computational studies // *NIM*. 2006, v.A558, p.220-224.
3. A.S. Belov, V.I. Derbilov, S.K. Esin, et al. H⁻ injector for Moscow meson factory linac // *Problems of atomic science and technology*. 2006, №2 (46), p.52.
4. G.I. Dimov, G.E. Derevyankin and V.G. Dudnikov // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1977, v.24, p.1545.
5. E.S. Nikulin, A.S. Belov, V.I. Derbilov, et al. The injector of negative hydrogen ions for INR linac. <http://rupac2006nsk.su/ready/momp01.pdf>

START-UP OF THE H⁻ INJECTOR FOR THE INR LINAC

A.S. Belov, V.I. Derbilov, S.K. Esin, V.N. Zubets, Yu.J. Kalinin, V.S. Klenov, L.P. Nechaeva, E.S. Nikulin, V.L. Serov, A.V. Turbabin, A.V. Feschenko, O.T. Frolov, V.P. Yakushev

In the INR of RAS the H⁻ injector was developed with the following parameters: mean current up to 400 μA; pulse repetition rate 50 Hz; energy of ions 400 keV. Commissioning of the H⁻ injector was started in the end of 2006 and 7 mA pulse H⁻ current with 180 μs pulse duration, 10 Hz pulse repetition rate has been obtained.

ПУСК ІНЖЕКТОРА НЕГАТИВНИХ ІОНІВ ВОДНЮ ДЛЯ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІЯД РАН

A.S. Белов, В.І. Дербилов, С.К. Єсін, В.Н. Зубец, Ю.Ж. Калінін, В.С. Кльонов, Л.П. Нечаєва, Є.С. Нікулін, В.Л. Серов, А.В. Турбабін, А.В. Фещенко, О.Т. Фролов, В.П. Якушев

В ІЯД РАН на потужнострумівому лінійному прискорювачі створюється інжектор іонів H⁻ з енергією 400 кеВ з середнім струмом пучка до 400 мкА і частотою проходження імпульсів до 50 Гц. Пуск інжектора зроблений у грудні 2006 р. Отримано імпульсний струм 7 мА при частоті і тривалості імпульсів 10 Гц і 180 мкс.