

# СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ИОНОВ ВОДОРОДА ИЯИ РАН. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Л.В. Кравчук, В.А. Матвеев, В.Л. Серов, А.В. Фещенко*  
*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия*  
*E-mail: feschenk@inr.ru*

Описано текущее состояние и перспективы сильноточного линейного ускорителя ионов водорода Института ядерных исследований РАН. Максимальная интенсивность пучка равна 150 мкА. Основными потребителями пучка являются многофункциональный нейтронный комплекс и комплекс по производству радиоизотопов. Среднегодовая продолжительность сеансов работы ускорителя составляет свыше 2000 часов. Главными направлениями работ являются поддержание ускорителя в рабочем состоянии, а также модернизация и ввод в действие новых систем.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Линейный ускоритель Института ядерных исследований РАН [1] проектировался как сильноточный ускоритель протонов и ионов  $H^-$  со следующими параметрами: энергия 600 МэВ, средний ток 500 мкА, импульсный ток 50 мА, длительность импульса 100 мкс, частота повторения импульсов 100 Гц. Структурная схема ускорителя показана на Рис.1. Ускоритель включает в себя 2 инжектора (ионы  $H^+$  и

$H^-$ ), инжекционный тракт, начальную часть ускорителя до энергии 100 МэВ и основную часть до энергии 600 МэВ. Начальная часть состоит из пяти ускоряющих резонаторов с трубками дрейфа, работающих на частоте 198,2 МГц, основная – из 27 четырехсекционных резонаторов с шайбами и диафрагмами, работающих на частоте 991 МГц. Предусмотрен промежуточный вывод пучка с энергией 160 МэВ.

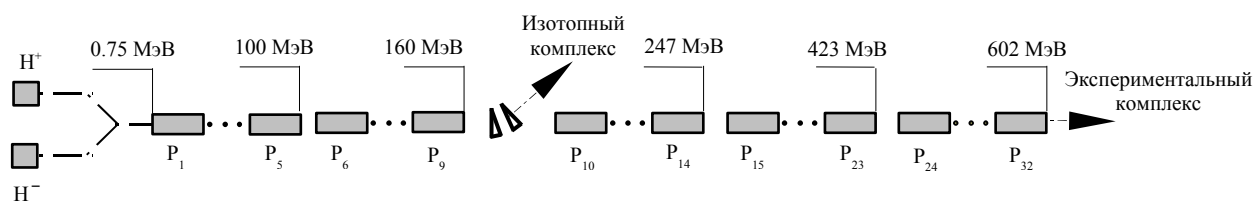


Рис.1. Схема линейного ускорителя ИЯИ РАН

( $H^+$ ,  $H^-$  - инжекторы протонов и отрицательных ионов водорода,  $P_1...P_{32}$  - ускоряющие резонаторы)

## 2. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ УСКОРИТЕЛЯ

Первый ускоренный пучок до энергии 20 МэВ в одном резонаторе с трубками дрейфа был получен в конце 1988 года. Энергия 100 МэВ была получена в 1990 году, 160 МэВ в 1991 году, 250 МэВ в 1992 году. Далее шло постепенное увеличение энергии по мере поступления клистронов КИУ-40 для системы ВЧ-питания основной части ускорителя. Максимальная энергия 502 МэВ была достигнута в 1996 году и определялась количеством имевшихся в наличии работающих клистронов. Регулярные сеансы работы ускорителя на физические и прикладные задачи проводятся с 1993 года. Всего на ускорителе было проведено 74 пучковых сеанса общей продолжительностью около 31 тысячи часов, в том числе после 2000 года – 52 сеанса общей продолжительностью около 16 тысяч часов (Табл. 1).

Таблица 1. Работа ускорителя с 2000 года

Год	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Кол. сеансов	8	7	6	7	7	6	7	4
Общая прод., ч	1800	2400	1400	2400	2200	1900	2250	1220

В Табл. 2 приведены основные параметры ускорителя.

Таблица 2. Основные параметры ускорителя

Параметр	Проект	Достигнуто	Состояние на сентябрь 2007 г.
Ускоряемые частицы	$H^+$ , $H^-$	$H^+$ , $H^-$	$H^+$
Энергия, МэВ	600	502	209
Импульсный ток, мА	50	16	12
Частота повторения, Гц	100	50	50
Длительность импульса, мкс	100	0,28...200	0,28...200
Средний ток, мкА	500	150	120

До недавнего времени проводилось ускорение только протонов, поскольку сооружение инжектора ионов  $H^-$  и соответствующего участка инжекционного тракта по экономическим причинам не было завершено. Несколько лет назад финансирование было восстановлено, работы по сооружению инжек-

тора возобновлены, и в конце 2006 года осуществлен физический пуск инжектора и пробное ускорение пучка ионов  $H^-$  до энергии 49 МэВ [2,3]. В настоящее время ведутся работы по подготовке инжектора к его вводу в эксплуатацию.

Энергия пучка определяется наличием работающих клистронов КИУ-40, используемых в каналах усиления ВЧ-мощности основной части ускорителя. Несколько лет назад ФГУП «Торий» восстановило выпуск клистронов, однако реально выпускаемое количество, в среднем, два клистрона в год, позволяет лишь поддерживать энергию на уровне 209 МэВ.

Увеличение длительности импульса стало возможным после модернизации в 1998 году системы инжекции ускорителя [4]. Использование бустерной секции RFQ позволило снизить напряжение на ускорительной трубке инжектора с 750 кВ до 400 кВ, что привело к резкому повышению надежности работы модулятора, высоковольтного трансформатора и ускорительной трубки. После модернизации формирующей линии длительность плоской вершины высоковольтного импульса превысила 200 мкс без насыщения сердечника импульсного трансформатора, что позволило увеличить длительность импульса тока пучка инжектора до 200 мкс [5]. Для обеспечения дальнейшего ускорения импульсов тока такой длительности были увеличены длительности ВЧ-импульсов каналов ВЧ-питания начальной части и основной части до энергии 247 МэВ, а также мощного задающего устройства. Короткие импульсы тока пучка (сотни наносекунд), используемые для экспериментов на нейтронном комплексе, формируются с помощью чопперов, установленных на инжекционном тракте [6]. На протонном пучке в пределах 200 мкс формируются один или два импульса длительностью от 280 нс до 50 мкс. На пучке  $H^-$  предусмотрена возможность формирования временной структуры для обеспечения перезарядной инжекции пучка в накопитель, который в будущем может быть установлен на выходе ускорителя.

Проектом предусмотрена частота повторения импульсов 100 Гц, однако, до настоящего времени все импульсные системы ускорителя работают на частоте 50 Гц. Проведены испытания основных систем ускорителя на частоте 100 Гц: инжектора протонов, отдельных ВЧ-каналов начальной и основной частей при работе на ускоряющие резонаторы, системы авторегулирования собственной частоты резонаторов. Результаты испытаний подтверждают принципиальную возможность перехода на 100 Гц, однако, обнаружен эффект дробления импульсов огибающей ВЧ-поля в резонаторах, который может затруднить решение задачи.

Величина импульсного тока 12 мА, с которой в настоящее время работает ускоритель, не является предельной. Такой режим, с одной стороны, обеспечивает нынешних потребителей пучка, а с другой – достаточно прост в реализации. Тем не менее, повышение импульсного тока является актуальной задачей. В настоящее время ведутся работы по повышению импульсного тока пучка из инжектора, что не

является принципиальной проблемой, поскольку подобные режимы уже реализовывались [4]. По состоянию на сегодняшний день мы полагаем, что импульсный ток будет ограничен мощностью выходных каскадов каналов усиления второго и третьего резонаторов начальной части ускорителя. Максимальная мощность лампы 71А («Катран»), на которую были переведены выходные каскады [7], по паспорту составляет величину 3 МВт. По оценкам при такой мощности можно рассчитывать на ускоренные импульсных токов до 25 мА.

Эффективность работы ускорителя можно продемонстрировать на следующем примере. В сеансах по наработке радиоизотопов ускоритель работает со средним током 100 мкА. Такой режим отработан на протяжении ряда лет, достаточно просто реализуем и оптимален с точки зрения тепловой нагрузки выходного окна ускорителя и радиоизотопной мишени. При планировании сеанса облучения закладывается величина наработки 700 мкА·часов за 12 часовую смену. Эта цифра выбирается с запасом на случай непредвиденных аварийных ситуаций. Обычно наработка бывает несколько выше, и облучение мишени завершается раньше запланированного срока. Так, например, средняя наработка в 2006 году составила 840 мкА·часов за 12 часовую смену при суммарной наработке за год свыше 85 тысяч мкА·часов.

### 3. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ И ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время основными потребителями пучка являются комплекс по производству радиоизотопов [8] и многофункциональный нейтронный комплекс [9], включающий установку РАДЭКС, спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100 и импульсный источник нейтронов ИН-06. В 2007 году завершено сооружение комплекса протонной терапии и начата пробная проводка пучка в камеру облучения. Эти установки, в отличие от проектного сильноточного режима, требуют существенно различающиеся параметры пучка по длительности импульса и величине импульсного тока. Так для комплекса по производству радиоизотопов и некоторых нейтронных экспериментов требуется сильноточный режим (от 30 до 100 мкА среднего тока при длительности импульса от 60 до 200 мкс и частоте повторения 50 Гц). Для спектрометра СВЗ-100 нужны короткие импульсы от 0,3 до 2 мкс и максимально возможный импульсный ток. Для комплекса протонной терапии импульсный ток должен быть малым, на уровне 0,1 мА.

При работе с короткими импульсами и малыми импульсными токами возникает проблема регистрации параметров пучка. Предпринимаются определенные усилия в решении этой проблемы: в частности, разработаны и изготовлены датчик стеночного тока, а также опытный образец быстродействующего индукционного датчика [10].

Также возникает проблема работоспособности системы автоматического регулирования опорной

фазы для каналов усиления основной части. Эта система работает непосредственно по пучку, и в случае коротких импульсов и малых импульсных токов не работоспособна. Данная проблема может быть частично решена, если обеспечить стабилизацию разности фаз в линиях опорных фаз начальной и основной частей ускорителя радиотехническими методами.

Кроме того, при работе с короткими импульсами существующая система стабилизации полей в ускоряющих резонаторах принципиально не обеспечивает стабилизацию амплитуд и фаз: фактически ускорение всего импульса идет во время переходного процесса, и, как результат, происходит неустраиваемая модуляция параметров пучка. Например, при токе 7 мА и длительности импульса 2 мкс внутриимпульсная модуляция энергии составляет 0,3% при энергии 209 МэВ.

При работе с высокой интенсивностью пучка необходима тщательная настройка всего ускорителя как по продольному, так и по поперечному движению. На наш взгляд, применяемые процедуры продольной настройки (метод фазового сканирования, времяпролетные методы и пр.) позволяют проводить продольную настройку с достаточной точностью. Для поперечной настройки также разработаны и внедрены процедуры согласования и коррекции положения пучка [11]. Важность применения этих процедур обусловлена тем, что наблюдаются смещения пучка, достигающие до 8 мм при диаметре апертуры 40 мм.

Серьезной проблемой является прекращение выпуска мощных генераторных и модуляторных ламп, используемых в системе ВЧ-питания начальной части. Помимо лампы ГИ-54А, которая уже заменена на лампу ГИ-71А в оконечных каскадах, прекращен выпуск и ламп ГИ-51А, используемых в предоконечных каскадах, а также мощных модуляторных ламп ГМИ-44А. На базе имеющихся предоконечных каскадов ведется разработка каскадов на лампе ГИ-57А [7]. При испытаниях опытного образца получена выходная импульсная мощность 240 кВт, что превышает значения, получаемые на лампе ГИ-51А. Что касается модуляторных ламп, то имеется значительный их запас, поэтому вопрос об их замене, хотя и находится в поле зрения, не является первоочередным.

Серьезной проблемой является повреждение трубок дрейфа резонаторов начальной части, возникающее в процессе длительной эксплуатации. За период с 1998 года в десяти трубках и двух полутрубках образовались водяные течи в форвакуумную полость, где расположены электромагнитные линзы. Последствия выхода трубок из строя с точки зрения работоспособности ускорителя различны. Так линзы трубок дрейфа, заполненных водой, в большинстве случаев продолжают работать в течение ряда лет. Взамен поврежденных трубок в НИИЭФА изготовлены новые трубки и в настоящее время проводится их замена.

В ряде случаев аварийная ситуация с трубкой дрейфа приводит к выходу трубки из строя. В этом

случае для продолжения работы ускорителя линза отключается и изменением питания линз соседних трубок удается восстановить согласование пучка с последующим фокусирующим каналом. Следует отметить, что до сих пор последствия выхода трубок из строя удавалось преодолевать оперативно и за последние десять лет не было ни одного срыва программы пучковых сеансов.

#### 4. БЛИЖАЙШИЕ ЗАДАЧИ

В ближайшее время планируется завершить сооружение инжектора и инжекционного тракта ионов  $H^-$  и ввести их в регулярную эксплуатацию. Далее встает задача освоения режима ускорения двух пучков, протонов и ионов  $H^-$ . Ускорение частиц разного знака предполагается в разных ВЧ-импульсах.

В последние годы в связи с увеличением количества пользователей встала задача повышения эффективности использования ускорителя. Для решения этой задачи начата реконструкция участка промежуточного вывода пучка 160 МэВ. Вместо первого поворотного магнита (Рис.1), работающего на постоянном токе, будет установлен импульсный магнит, работающий на частотах до 50 Гц, изготовление которого вместе с системой питания завершается в НИИЭФА в текущем году. Наличие такого магнита позволит создать систему гибкого и оперативного распределения пучка между изотопным и экспериментальным комплексом, что особенно важно при наличии двух пучков, протонов и ионов  $H^-$ .

Помимо указанных задач будут продолжены работы по реконструкции системы ВЧ-питания начальной части ускорителя в связи с переходом на новые лампы, по увеличению частоты повторения импульсов тока пучка до 100 Гц и по увеличению энергии пучка по мере поступления клистронов.

Следует также отметить, что линейный ускоритель ИЯИ РАН вместе с уже существующими, а также создаваемыми экспериментальными установками, представляет собой эффективный инструмент для исследования свойств вещества, поэтому большие надежды возлагаются на участие в программе по развитию нанотехнологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б.П. Мурин. Проект линейного ускорителя протонов – мезонной фабрики // *Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям*. Москва, “Наука”, 1993, т.1, с.234.
2. А.С. Белов, В.И. Дербиллов, С.К. Есин и др. Пуск инжектора ионов  $H^-$  для линейного ускорителя ИЯИ РАН // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (49). 2008, №3, с.110-112.
3. В.А. Гайдаш, Ю.Н. Готовцев, О.В. Грехов и др. 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.K. Esin, L.V. Kravchuk, et al. Commissioning of New Injection Line at INR Proton Linac // *Proc. of the 18<sup>th</sup> PAC*, New York, March 1999, p.3561-3563.
5. В.И. Дербилов, С.К. Есин и др. Качество инжектируемого в ЛУ ММФ пучка при снижении энергии инжекции // *Труды XVI совещания по ускорителям*. Протвино, 1999, т.1, с.128.
6. V.V. Kuznetsov, A.N. Mirzojan, A.N. Naboka, et al. Pulse Shaping System for INR Proton Linac // *Problems of atomic science and technology. Series "Nuclear Physics Investigations" (47)*. 2005, N 3, p.46-48.
7. A.I. Kvasha. Moscow Meson Factory DTL RF system upgrade // *Proc. of LINAC 2004*, Lubeck, August 2004, p.733-735.
8. B.L. Zhuikov, V.M. Kokhanyuk, N.A. Konyakhin, J.Vincent. Target Irradiation Facility and Targetry Development at 160 MeV Proton Beam of Moscow Linac // *Nucl. Instr. Meth.* 1999, A438, p.173.
9. M.I. Grachev, E.A. Koptelov, L.V. Kravchuk, et al. Status of Neutron Complex of INR RAS // *Proc. of the 15<sup>th</sup> Meeting of the Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources*, Tsukuba, Japan, 2000, p.71-83.
10. P. Reingardt-Nikoulin, V. Gaidash, A. Menshov, A.N. Mirzojan, A.V. Feschenko. Universal BCT Monitor for INR Proton Linac Pulse Beam // *Problems of atomic science and technology. Series "Nuclear Physics Investigations" (46)*. 2005, N 2, p.113-116.
11. S.E. Bragin, A.V. Feschenko, A.N. Mirzojan, V.A. Moiseev, O.M. Volodkevich. An Interactive Procedures of the Transverse Beam Matching and Correction in INR Linac // *Problems of atomic science and technology. Series "Nuclear Physics Investigations" (47)*. 2005, N 3, p.116-118.

#### HIGH INTENSITY INR LINAC. STATUS AND PROSPECTS

*L.V. Kravchuk, V.A. Matveev, V.L. Serov, A.V. Feschenko*

The status and the prospects of High Intensity INR Linac is presented. Maximum beam intensity is equal to 150  $\mu$ A. An annual accelerator run duration averaged over the recent five year period exceeds 2000 hours. The main beam user facilities are multipurpose complex for neutron science as well as an isotope production facility for medicine and industry. Trial beam transportation to proton therapy complex scheduled for construction completion this year has been carried recently. The primary activities are accelerator maintenance, modernization and improvement of accelerator systems.

#### ПОТУЖНОСТРУМОВИЙ ЛІНІЙНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ ІОНІВ ВОДНЮ ІЯД РАН. СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

*Л.В. Кравчук, В.А. Матвеев, В.Л. Серов, А.В. Фещенко*

Описано поточний стан і перспективи потужнострумового лінійного прискорювача іонів водню Інституту ядерних досліджень РАН. Максимальна інтенсивність пучку дорівнює 150 мкА. Основними споживачами пучку є багатофункціональний нейтронний комплекс і комплекс по виробництву радіоізоотопів. Середньорічна тривалість сеансів роботи прискорювача становить понад 2000 годин. Головними напрямками робіт є підтримка прискорювача в робочому стані, а також модернізація і запровадження в дію нових систем.