

# Сильноточный электростатический ускоритель–тандем для генерации нейтронов для BNCT

Б.Ф. Баянов, В.П. Белов, Г.И. Димов, Г.Е. Деревянкин, В.М. Долгушин, А.Н. Драничников,  
Г.С. Крайнов, А.С. Кривенко, Н.К. Куксанов, В.Е. Пальчиков, В.Я. Савкин, Р.А. Салимов,  
Г.И. Сильвестров, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, В.В. Широков  
*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*  
В.Н. Кононов

*ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск, Россия*

Представлен проект протонного тандемного ускорителя на энергию 2.5 МэВ и постоянный ток до 40 мА для решения задач нейтронной, в частности, бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) и терапии быстрыми нейтронами (ТБН). В качестве высоковольтного источника напряжением 1.25 МВ и мощностью 100 кВт выбран секционированный высоковольтный выпрямитель ускорителя электронов серии ЭЛВ, разработанной в ИЯФ и широко используемой в промышленности. При использовании выпрямителя как высоковольтного источника ускорителя-тандема для целей БНЗТ напряжение выпрямителя необходимо стабилизировать с точностью 0.1%. Канал ускорения сильноточного пучка отрицательных ионов водорода до перезарядной мишени и протонов после мишени образован электродами с вакуумной изоляцией. Газовая перезарядная мишень и система криогенной вакуумной откачки расположены внутри высоковольтного электрода. Обсуждены проблемы создания надежного источника отрицательных ионов водорода, способного обеспечить на входе в канал ускорения тандема постоянный ток до 40 мА. Приведены сведения о прототипе разрабатываемого тандемного ускорителя, использовавшегося ранее в ИЯФ в качестве инжектора импульсных пучков протонов в синхротрон.

## Введение

При выборе ускорителя для нейтронного источника [1] учитывалась возможность работы источника нейтронов в двух режимах. Первый режим (для варианта БНЗТ) осуществляется при значении энергии протонов в области порога выхода нейтронов [2] и позволяет использовать выходящие из мишени нейтроны в “открытой” геометрии без внешнего коллиматора. Из-за специфического пространственно-энергетического распределения выходящих нейтронов в области вблизи порога, энергию протонного пучка необходимо стабилизировать на уровне 0.1%. Второй режим (при энергии протонного пучка в 2.5 МэВ) позволяет получать как быстрые нейтроны (для варианта ТБН), так и после их замедления эпитепловые (для БНЗТ).

Общепринятая схема тандема включает в себя 2 ускорительные трубки с расположенной между ними перезарядной мишенью, находящейся, как и присоединенные к ней соответствующие концы трубок, под потенциалом высоковольтного источника. Вторые концы трубок находятся под “земляным” потенциалом. Необходимость откачки вытекающего газа перезарядной мишени через объем ускорительных трубок и осаждение (рассеянного при ускорении или вторичного) заряда на электроды и внутренние поверхности изоляторов ускорительных трубок при ускоряемых ионных токах в десятки миллиампер вызывают большие трудности при использовании общепринятой схемы тандема.

## Результаты и обсуждение

Предложен источник нейтронов, основанный на ускорителе тандемного типа с вакуумной изоляцией (ВИТА), разрабатываемый в ИЯФ. В качестве мощного высоковольтного источника выбран секционированный выпрямитель промышленного ускорителя электронов ЭЛВ (рис. 1). В предлагаемом тандеме ускорительные трубки отсутствуют. Центральный высоковольтный

электрод, цилиндрические электроды-экраны, окружающие этот электрод, и перезарядная мишень размещены внутри вакуумного объема. Высоковольтный электрод, как и расположенная внутри него перезарядная мишень, имеют потенциал высоковольтного источника. Соосные цилиндрические электроды-экраны создают равномерное распределение поля и ограничивают эффект полного напряжения в высоковольтном вакуумном зазоре. Высокое напряжение к электродам-экранам подводится через электроды проходного изолятора, на вакуумной части которого они крепятся. Проходной изолятор размещен вне области ускорения и прохождения пучка.

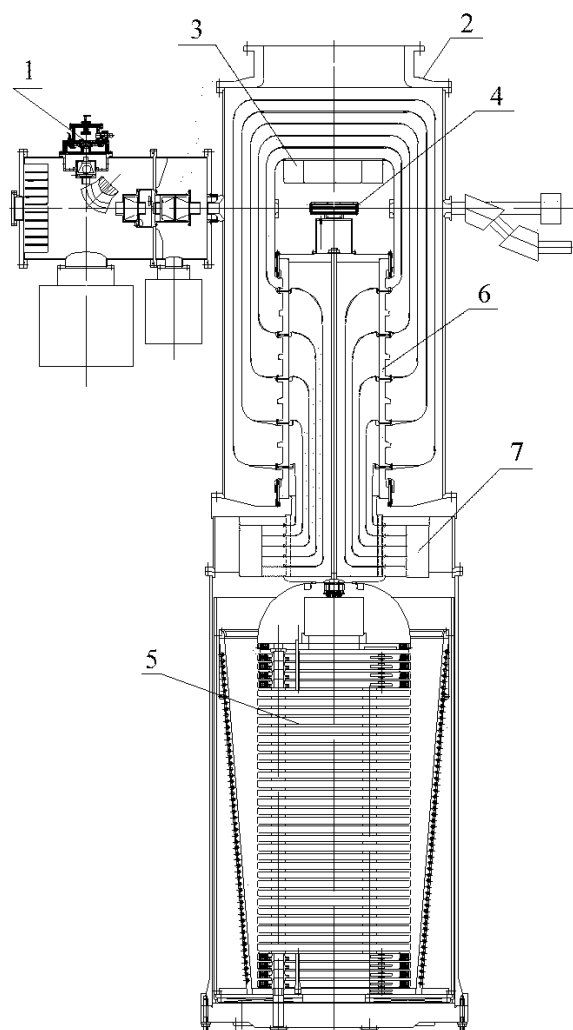


Рис. 1: Сильноточный электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (VITA). 1 – источник  $H^-$ , 2 – ускоритель-тандем, 3 – азотная ловушка, 4 – перезарядная мишень, 5 – высоковольтный источник, 6 – высоковольтный проходной изолятор, 7 – резистивно-емкостный делитель.

Газовая перезарядная мишень представляет собой трубку внутреннего диаметра  $\sim 10$  мм и длиной  $\sim 300$  мм и расположена на оси движения ионного пучка. Посередине перезарядной трубки втекает поток газа со скоростью, необходимой для создания толщины мишени в  $3 \cdot 10^{16}$   $см^{-2}$ , определяемой перезарядными процессами. В качестве перезарядной мишени предложен углекислый газ  $CO_2$ , конденсирующийся при  $-56^\circ C$  и имеющий приемлемую теплопроводность в твердой фазе. В предлагаемой геометрии тандема для обеспечения достаточной электрической прочности высоковольтных зазоров необходима скорость откачки  $CO_2$ , вытекающего из мишени в вакуум, до 40000 литров в секунду.

Такую скорость откачки углекислого газа обеспечивает поверхность азотной ловушки, расположенной в верхней части высоковольтного электрода над перезарядной мишенью. Ловушка представляет собой тороидальный объем емкостью  $\sim 20$  литров, заполненный жидким азотом. Поверхности нижней части тора, изготовленного из нержавеющей стали и приваренных к днищу нескольких коаксиальных медных колец конденсируют на себе основное количество газа, выходящего из перезарядной мишени. Медные кольца имеют хороший тепловой контакт с днищем тора и увеличивают площадь откачивающей поверхности до  $\sim 0.5$  м<sup>2</sup>. Полиэтиленовая трубка для подачи  $CO_2$  в область центрального электрода, как и полиэтиленовая трубка для подачи жидкого азота проходят по оси выпрямителя внутри трубы из органического стекла, заполненной газообразным азотом.

Важным элементом ускорителя является секционированный разборный проходной изолятор, подающий на высоковольтный электрод, расположенный в центре вакуумного объема, потенциал мощного высоковольтного источника, работающего в атмосфере сжатого газа  $SF_6$ . Высоковольтный электрод крепится на металлическом фланце, вакуумно-плотно соединенном с верхним концом проходного изолятора. При помощи специального устройства этот фланец осевой стяжкой, через набор высоковольтных кольцевых стеклянных изоляторов, электродов и уплотнителей между ними стягивается с фланцем, расположенным на нижнем конце проходного изолятора. Этим обеспечивается уплотнение как верхней вакуумной, так и нижней газовой частей проходного изолятора. Стяжкой служит металлическая труба, а в качестве уплотнителя применена раздавливаемая индиевая проволока. Таким образом, верхняя наружная поверхность проходного изолятора работает в вакууме, а нижняя наружная часть, как и высоковольтный выпрямитель — в сжатом газе под высоким давлением, большим, чем давление газа  $SF_6$  внутри проходного изолятора. Высоковольтный источник соединен с нижним фланцем проходного изолятора. Металлические тонкостенные цилиндрические трубы различной длины, коаксиально расположенные внутри проходного изолятора, передают потенциалы электродов газовой части соответствующим электродам вакуумной части изолятора. Распределение потенциала по электродам газовой и, соответственно, вакуумной частей изолятора, определяющее распределение напряженности электрического поля вдоль проходного изолятора и в высоковольтном вакуумном зазоре между электродами-экранами, задается резистивно-емкостным делителем, окружающим нижнюю газовую часть изолятора. Этот же делитель предотвращает аварийное перераспределение напряжения вдоль проходного изолятора (как и между электродами-экранами вакуумного зазора) при быстропротекающих пробивных процессах.

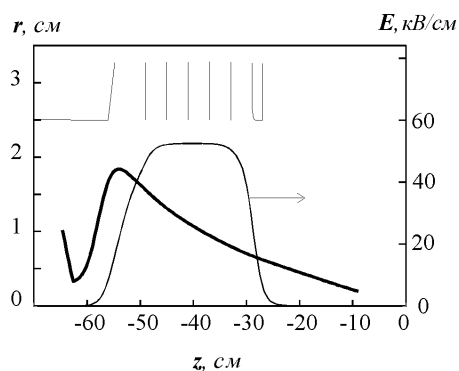


Рис. 2: Огибающая 50 мА пучка.

Канал ускорения ионного пучка проходит через круглые отверстия, концентрично расположенные в стенках вакуумного сосуда, электродов-экранов и высоковольтного электрода. Высокий темп ускорения и сильнофокусирующая (для пучка низкоэнергетических отрицательных ионов водорода) линза, образующаяся в районе входного отверстия в тандем, являются его особенностями. Толщина стенок экранов мала, и поэтому отверстия для прохождения пучка, расположенные в экранах, не вносят значительного вклада в фокусировку пучка. Вторая (дефокусирующая) линза, расположенная в районе входа уже ускоренного пучка ионов в центральный электрод,

оказывает на движение ионов слабое влияние. Диаметры всех отверстий, внутри которых расположен ускорительный канал меньше 50 мм. Фокусное расстояние входной линзы возрастет, если отверстие в толстой стенке будет не круглым, а коническим. Диаметр входного отверстия

в заземленной стенке вакуумного объема конусно расширяется с 50 до 110 мм под углом  $45^\circ$  и фокус входной линзы находится в 80 мм от внутренней поверхности вакуумного объема. На рис. 2 показаны огибающая 50 мА пучка, рассчитанная с учетом объемного заряда, и продольное, вдоль канала ускорения, распределение электрического поля. Продольный и поперечный масштабы различаются. Поверхности электродов показаны в области  $r \sim 2.5$  см.

Надежная работа в условиях клиники протонного ускорителя-тандема, как составной части нейтронного источника, требует долговременной работы источника отрицательных ионов водорода в режиме постоянного тока. Требованиям получения пучка  $H^-$  с малым эмиттансом и током на входе в тандем до 40 мА удовлетворяет поверхностно-плазменный источник  $H^-$ . Вакуумный объем, соединяющий источник  $H^-$  и транспортный канал пучка ионов с ускорителем-тандемом, показан на рис. 1. Объем состоит из 2 камер, горизонтальные оси которых совпадают с осью тракта ускорения пучка. Транспортировка пучка  $H^-$  с током до 40 мА по каналу от источника ионов до входа в тандем требует хорошо организованной фокусировки.

Прототип тандема с вакуумной изоляцией (VITA) успешно использовался в ИЯФ как инжектор импульсных пучков протонов в синхротрон при постоянном напряжении, задаваемом каскадным генератором, до 400 кВ. Длительность импульса тока протонного пучка составляла 10 мксек при амплитуде до 5 мА. Этот прототип будет использован в экспериментах по отработке основных узлов сильноточного электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией (VITA).

## Список литературы

- [1] В.Баянов et al. Accelerator based neutron source for the neutron capture therapy at hospital. 9<sup>th</sup> Int. Symp. on Neutron Capture Therapy for Cancer. Osaka, Japan, October 2-6, 2000.
- [2] V.Kononov et al. Pros. 1<sup>st</sup> Int. Workshop on Accelerator Based Neutron Sources for BNCT. Jackson, USA, Sept. 11-14, 1994, Vol.2, 447-483.