

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.

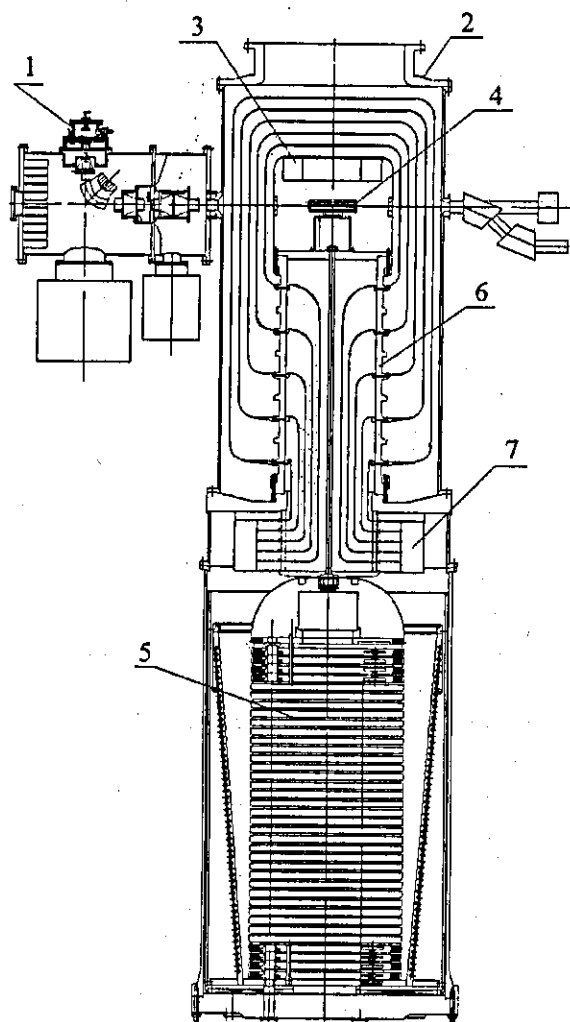


Рис. 1: Сильноточный электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (VITA). 1 – источник H^- , 2 – ускоритель-тандем, 3 – азотная ловушка, 4 – перезарядная мишень, 5 – высоковольтный источник, 6 – высоковольтный проходной изолятор, 7 – резистивно-емкостный делитель.

Газовая перезарядная мишень представляет собой трубку внутреннего диаметра ~ 10 мм и длиной ~ 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 ~ 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 $\sim 0.5 \text{ м}^2$. 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.

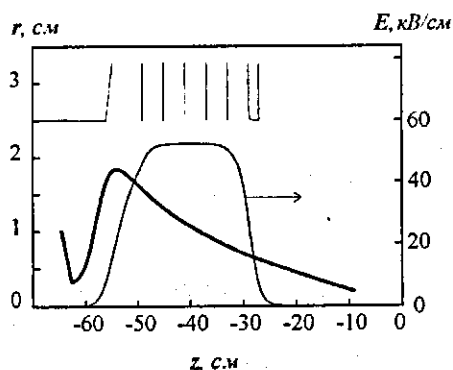


Рис. 2: Огибающая 50 мА пучка.

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° 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. 9th Int. Symp. on Neutron Capture Therapy for Cancer. Osaka, Japan, October 2-6, 2000.
- [2] V.Конов et al. Pros. 1st Int. Workshop on Accelerator Based Neutron Sources for BNCT. Jackson, USA, Sept. 11-14, 1994, Vol.2, 447-483.

Система питания для малодозной рентгеновской установки

Е.А. Бабичев, И.А. Гусев, А.Г. Ли, А.В. Маглели, Е.М. Мандрик, А.С. Медведко,
В.А. Неустроев, А.Ю. Протопопов, В.В. Ращенко, Ш.Р. Сингатулин,
Д.Н. Скоробогатов, Ю.Ф. Токарев

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В Институте ядерной физики СО РАН разработаны и в течение нескольких лет производятся малодозные цифровые рентгеновские установки (МЦРУ), предназначенные для диагностики в медицине [1, 2, 3]. В отличие от обычных рентгеновских аппаратов такие установки позволяют существенно снизить дозу облучения пациентов, кроме этого, хранение и обработка снимков в таких установках осуществляется в ЭВМ, что позволяет в отдельных случаях улучшить качество диагностики.

Таблица 1. Основные характеристики рентгеновского питающего устройства (РПУ).

№ п/п	Название параметра	Обозначение	Един. измер.	Значение параметра
1	Общее напряжение анод-катод	U_{CA}	кВ	$0 \leq U_{CA} \leq 125$ (+62.5кВ - 62.5кВ)
2	Ток катода	I	мА	0...132
3	Максимальная мощность при длительности экспозиции до 10 сек	P_{max}	кВт	16.5
4	Нестабильность выходного напряжения внутри рабочего импульса не более	ΔU	%	± 1
5	Средняя мощность на рентгеновской трубке	P	Вт	до 350
6	Время экспозиции	T	сек.	до 10
7	Длительность фронта нарастания импульса высокого напряжения	τ_{ϕ}	мс	~10

Установки работают в сканирующем режиме, время сканирования изображения может достигать 10 секунд. Поэтому предъявляются жесткие требования к качеству питания элементов рентгеновского излучателя: здесь необходимо обеспечить быструю установку и удержание в заданных пределах в течение всего времени экспозиции анодного напряжения на рентгеновской трубке, необходимо обеспечить управление двигателем раскрутки и вращения анода, а также необходимо обеспечить питание накала трубки. Эти задачи решает рентгеновское питающее устройство (РПУ), разработанное в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера и представленное в данной работе. В табл. 1. приведены основные характеристики устройства.

Устройство обеспечивает питание любой из двух цепей накала катодов трубки, находящихся под напряжением до -62.5 кВ. Обеспечивается также питание трехфазным напряжением двигателя вращения анода трубки. Полученное время раскрутки двигателя 3 сек.

Управление питающим устройством, контроль за состоянием его элементов, а также контроль за процессами в устройстве осуществляются с помощью встроенного микроконтроллера, который связан с персональной ЭВМ через последовательный интерфейс.

Блок-схема РПУ представлена на рис. 1. РПУ включает в себя следующие компоненты: блок управления РПУ, источник питания накалов, источник внутреннего питания, инвертор, блок раскрутки анода лампы и высоковольтный выпрямитель. На рисунке дополнительно представлен рентгеновский излучатель, включающий рентгеновскую трубку и сопутствующие ей элементы. Рассмотрим назначение отдельных узлов РПУ.

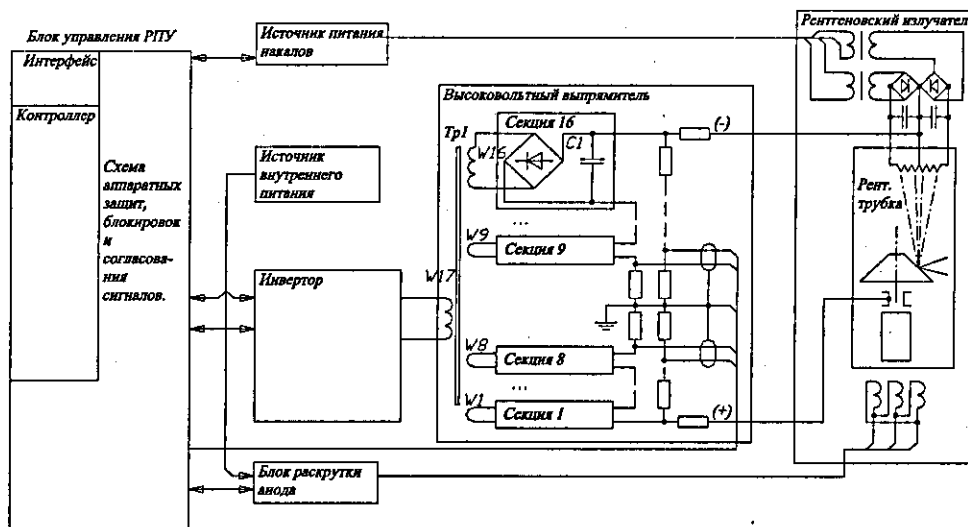


Рис. 1. Блок-схема рентгеновского питающего устройства (РПУ).

Блок управления включает интерфейс, схемы: аппаратных защит, блокировок и схему согласования сигналов. Блок управления служит для управления всеми подсистемами РПУ. Режимы работы подсистем задаются с помощью двоичных сигналов ЦАП (цифроаналоговые преобразователи). Измерения параметров питающего устройства осуществляются с помощью АЦП (аналого-цифровые преобразователи). Состояние РПУ контролируется сбором и обработкой двоичных сигналов, в том числе сигналов блокировок. Схемы ЦАП, АЦП и схемы обработки двоичных сигналов находятся непосредственно в микроконтроллере. Интерфейс обеспечивает связь контроллера с управляющей персональной ЭВМ через последовательный канал связи.

Схемы аппаратных защит, блокировок и согласования сигналов выполнены на общей плате, которая служит промежуточным звеном между контроллером и отдельными узлами РПУ. Источник питания накалов управляется от контроллера и обеспечивает питание одного из двух накалов рентгеновской трубки. Цепи накалов могут находиться под потенциалом катода (до 62.5 кВ).

Источник внутреннего питания служит для питания блоков, входящих в состав РПУ. Источник выдает переменное прямоугольное напряжение 48 В с частотой 50 кГц и с максимальным током в нагрузке до 8 А для питания блока раскрутки анода и схем управления в инверторе. Кроме того, источник выдает необходимые напряжения для питания блока управления.

На рис. 1. показан высоковольтный (ВВ) выпрямитель. Он генерирует два одинаковых по величине напряжения положительной и отрицательной полярности относительно нулевого потенциала для питания анода и катода трубки соответственно. ВВ-выпрямитель включает в себя силовой трансформатор, секционированный выпрямитель, накальные трансформаторы, а также делители и шунты для измерения выходного напряжения и тока. На рис. 1 схематично представлен также рентгеновский излучатель. Все элементы ВВ-выпрямителя помещены в бак, наполненный трансформаторным маслом.

Наличие встроенного микроконтроллера позволяет реализовать любой алгоритм управления и защиты РПУ. В частности, он позволяет по эмпирически снятым и заложенным в него таблицам в зависимости от установленного требуемого напряжения анод-катод устанавливать напряжение или ток накала катода для получения требуемого значения тока трубки.

Стабилизация напряжения на трубке в процессе экспозиции осуществляется с помощью инвертора, работающего на частоте 25 кГц. Схема его представлена на рис. 2. Выходное напряжение инвертора поступает на первичную обмотку силового трансформатора ВВ-выпрямителя. Инвертор состоит из двух функциональных узлов: стабилизатора тока и мостового инвер-

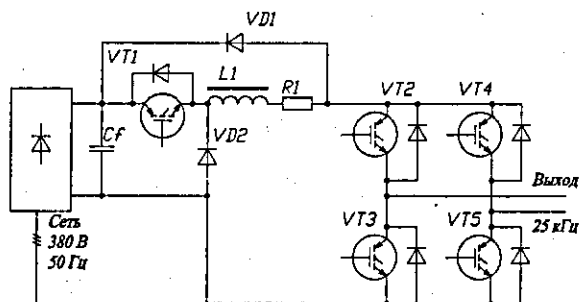


Рис. 2. Упрощенная схема инвертора.

тора. Импульсный стабилизатор тока, построен на транзисторе VT1, дросселе L1 и диоде VD2. Ток, вырабатываемый стабилизатором, с некоторым превышением соответствует току трубки. Стабилизация напряжения на трубке осуществляется следующим способом: в каждом полупериоде частоты работы инвертора при достижении напряжением на трубке требуемого значения все транзисторы моста VT2 – VT5 отпираются до окончания этого полупериода. Таким образом они шунтируют первичную обмотку силового трансформатора и прекращают рост напряжения до начала следующего полупериода.

Инвертор построен на IGBT транзисторах фирмы SIEMENS. При его разработке за основу была взята схема зарядного преобразователя, разработанного в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера и применяющегося для зарядки конденсаторов в импульсных генераторах [4], а также использовалось дальнейшее развитие этой схемы, представленное в [5]. В последнем случае стабилизация выходного напряжения осуществляется так же, как и в предлагаемой работе, – шунтированием.

В настоящее время проводятся испытания питающего устройства совместно с рентгеновской трубкой 15–40ВД46–150. Достигнутые параметры устройства представлены в табл.1.

На рис. 3 показано рентгеновское питающее устройство в процессе наладки: справа показан шкаф РПУ с открытой дверью, по центру шкафа размещается инвертор. Впереди внизу на фото показан вынутый из бака высоковольтный выпрямитель.



Рис. 3. Рентгеновское питающее устройство в процессе наладки.

Список литературы

1. E.A. Babichev, S.E. Baru, V.V. Gusev et al. Report of the Institute of Nuclear Physics N89-73.
2. S.E. Baru, A.G. Khabakhpashev, L.I. Shekhtman. Nucl. Instr. and Meth. A.283 (1989) 431.
3. E.A. Babichev, S.E. Baru, V.V. Gusev, A.G. Khabakhpashev et al. Nucl. Instr. and Meth. A.323 (1992) 49.
4. Валька И.Е., Токарев Ю.Ф. Многоканальный генератор импульсов тока для питания магнитных элементов комплекса ВЭПП-2М. 14-е Совещ. по ускорителям заряженных частиц. - Протвино, 1994. Сб. докладов, 1995, Т4, с.39.
5. Yu.F. Tokarev, A.G. Lee, R.A. Lokhtin, Ye.M. Mandrik, A.S. Medvedko, V.V. Rashenko, E.P. Semenov et al. "137 kW HV-Modulator for Ion Injector," EPAC 2000, Vienna, 2000, "<http://accelconf.web.cern/accelconf/e00/>".

Вращающаяся углеродная мишень для высокоинтенсивного источника нейтронов

М.С. Авилов, А.В. Антошин, К.В. Губин, Н.Х. Кот, Н.Н. Лебедев, П.В. Логачев, П.В. Мартышкин,
С.Н. Морозов, И.Л. Пивоваров, А.А. Старостенко, С.В. Шиянков
Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

Представлен проект высокоинтенсивного источника нейтронов со средней производительностью до 10^{14} нейтронов в секунду. Источник представляет собой вращающуюся углеродную мишень, облучаемую пучком дейтронов с энергией 20 МэВ, средней мощностью до 100 кВт, средним током 5 мА и поперечным размером 1 см. Мишень охлаждается излучением. Проведенные испытания показали, что предложенные материалы способны работать при тепловых и механических режимах мишени долгое время (несколько тысяч часов).

Введение

Для проведения экспериментов с пучками радиоактивных нуклидов необходим высокоинтенсивный (до 10^{14} частиц в секунду) источник быстрых нейтронов с малым поперечным размером пучка (порядка 1 см). Такие источники могут базироваться на мишенях из легких материалов (Li, Be, C), облучаемых пучками протонов или дейтронов. Большая мощность пучка (100 кВт) накладывает существенные ограничения на выбор как материала, так и конструкции мишени. Во-первых, для увеличения эффективной площади мишени, принимающей и рассеивающей энергию пучка, необходима конструкция с движущейся рабочей зоной. Во-вторых, конструкция, в которой рабочая зона охлаждается излучением, делает мишень более надежной и безопасной, существенно упрощая и удешевляя ее.

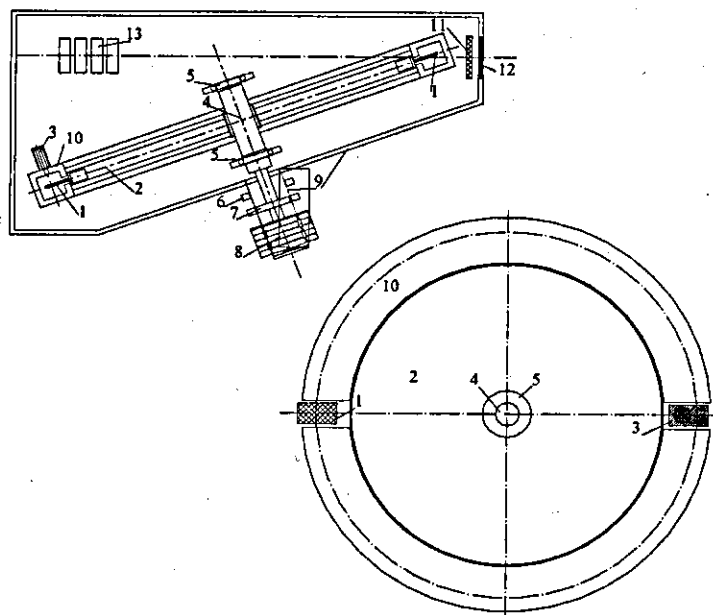


Рис. 1. Конструкция нейтронной мишени. 1 – графитовые пластины, 2 – титановый диск, 3 – болометр, 4 – вал, 5 – подшипники, 6 – вибродатчики, 7 – магнитный датчик вращения, 8 – ввод вращения, 9 – стенки вакуумной камеры, 10 – канал охлаждения, 11 – емкостной датчик, 12 – окно выхода нейтронного пучка, 13 – коллиматор.

При энергии дейтронов 10–20 МэВ основным каналом получения нейтронов является реакция "срыва". Спектр и угловое распределение нейтронов "срыва" можно оценить по схеме, предложенной Р. Сербром [1]. Результаты таких расчетов с учетом торможения дейтронов [2, 3] в толстой графитовой мишени полного поглощения хорошо согласуются с экспериментальными данными при различных энергиях дейтронов [4]. Из них следует, что при облучении толстой графитовой мишени пучком D^+ с энергией 20 МэВ и

средним током 5 мА возможно получение до 10^{14} нейтронов в секунду в направлении потока дейтронов с углом конуса направленности 40° – 50° . Максимум энергетического спектра находится в районе 6-7 МэВ, его ширина на полувысоте около 10 МэВ.

Конструкция мишени

Предлагаемая конструкция нейтронной мишени представляет собой (рис. 1) обод, набранный из графитовых пластин шириной 3 см и толщиной 2 мм, закрепленных на титановом диске диаметром 60 см и толщиной 1 см. Диск закреплен на валу диаметром 5 см и вращается с частотой 50 Гц. Поверхность рабочей зоны наклонена относительно направления пучка дейтронов под углом 20° . Ввод вращения в вакуумный объем осуществляется с помощью магнитной муфты. Прием излучения и отвод тепла производится водой, протекающей через жестко прикрепленные к вакуумной камере каналы теплосъема из алюминия – 2 полукольца, в разрывах которых расположены рабочая (пучок) и диагностическая (болومتر) зоны. Перед мишенью расположен коллиматор, служащий одновременно для контроля положения пучка дейтронов. За рабочей зоной находится окно для выхода нейтронов, перед которым расположена графитовая пластина, служащая датчиком повреждения графита. Для контроля и защиты предусмотрены датчики вращения и вибрации мишени, а также расходомеры и манометры в гидросистеме.

Габариты и угол наклона мишени обусловлены максимально допустимой температурой рабочей зоны, которая не должна превышать 1900 – 2000°C . Минимальная скорость вращения определяется скачком температуры при прохождении пучком рабочей зоны. Такой скачок не должен превышать 15 – 20°C .

Тепловые и механические режимы работы мишени

Для определения теплового режима работы мишени с большим энерговыделением и оценки термомеханических нагрузок в ее наиболее напряженных элементах было проведено численное моделирование, при котором решалось нестационарное уравнение теплопроводности с учетом излучения тепла с поверхности мишени. Источниками тепла являлись поглощающие пучок элементы мишени. Важно отметить, что решение нестационарной задачи в данном случае нужно не только для нахождения стационарного решения, но и для определения тепловых и механических нагрузок, возникающих в элементах мишени в процессе её разогрева. Это связано с тем, что именно в процессе разогрева термомеханические напряжения достигают своего максимума.

Расчеты полей температуры в графитовой части мишени и в титановом диске проводились при согласовании потока тепла, передаваемого из графита в титан с учетом измеренной тепловой изоляции узла крепления графита. На рис. 2 приведены результаты расчета для одной из геометрий мишени с использованием графита марки МПГ-6.

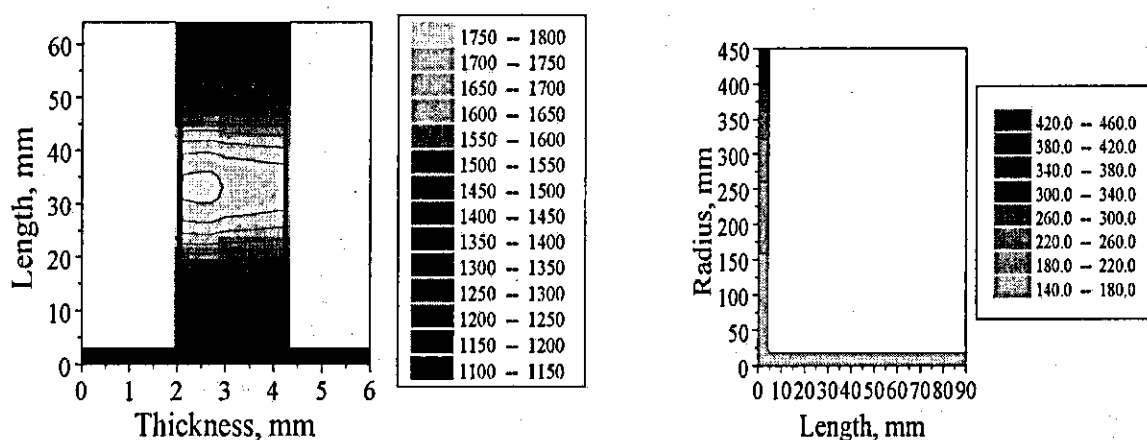


Рис. 2. Распределение температуры по сечению графитового обода (слева) и титанового диска с валом (справа) в $^{\circ}\text{C}$ для длины графита 64 мм, толщины диска 1 см. Длина для титана отсчитывается от плоскости симметрии, для графита – от обечайки титанового диска.

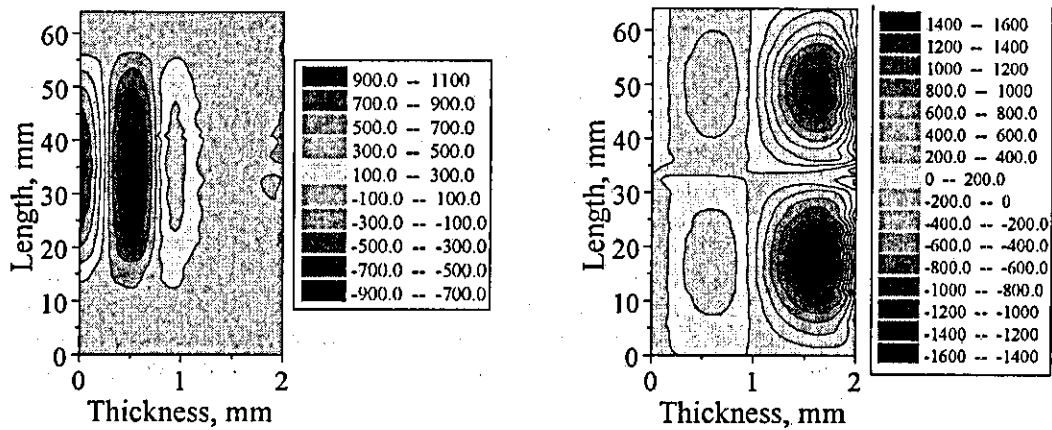


Рис. 3. Распределение продольного (слева) и касательного (справа) термического напряжения (кПа) по радиальному сечению графита в мишени для распределения температуры, приведенного на рис. 2.

При расчете полей напряжений в мишени решалось уравнение упругости с учетом вращения мишени и полей температуры для конкретной геометрии [5]. При этом выяснилось, что наиболее близки к пределу прочности возникающие в графитовой части напряжения (см. рис. 3), обусловленные в основном температурными полями.

Тепловые эксперименты

Для проверки надежности графитовой мишени при данных тепловых режимах был проведен ряд экспериментов с целью:

- определения максимально допустимого числа термоциклов быстрый нагрев до рабочей температуры и быстрое охлаждение до комнатной температуры;
- определения максимально допустимых градиентов температуры;
- определения влияния теплового удара;
- определения времени жизни мишени при температурах 2200 – 2500 $^{\circ}\text{C}$.

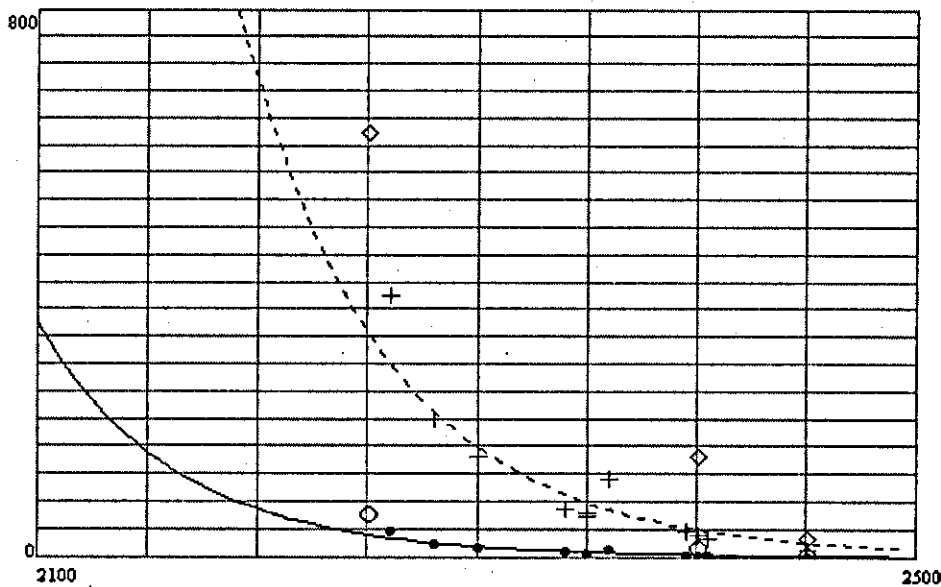


Рис. 4. Зависимость времени жизни образцов (τ) от температуры ($^{\circ}\text{C}$). • и \circ – измеренные значения, + и \diamond – те же значения, умноженные на 10, сплошная линия – аппроксимация, пунктир – то же, умноженное на 10.

В ходе экспериментов графитовые образцы с сечением 1.5 x 1.5 мм и длиной 15–20 мм нагревались в вакуумном объеме импульсным током в форме полусинусоиды с длительностью импульса 96 мкс и частотой повторения 50 Гц. Такой режим соответствует рабочему режиму мишени, вращающейся с частотой 50 Гц. В ходе экспериментов измерялись ток и напряжение на образце, по которым рассчитывались излучаемая мощность, средняя температура и тепловой удар на образце. Контроль распределения температуры по поверхности образца осуществлялся с помощью оптического пирометра через окно в вакуумном объеме. Микроструктура образцов до и после испытаний исследовалась с помощью электронного микроскопа.

Определение допустимого числа термоциклов проводилось следующим образом: на образец подавались нагревающие импульсы тока в течение 30 сек, в результате чего он разогревался до температуры 2000° С. После этого нагрев прекращался на 30 сек, и образец остывал почти до начальной температуры. При испытаниях образец выдержал без разрушения более 500 термоциклов. Следует отметить, что за первые 200 циклов сопротивление образца возросло примерно на 7% и затем стабилизировалось на новом уровне. На срезе образца отмечено изменение топологии и характера поверхности пор по сравнению с негретым материалом. Эти данные свидетельствуют о том, что после частичного разрушения структура материала образца стабилизируется в новом состоянии и успешно выдерживает подобные тепловые нагрузки. Таким образом, перед облучением мишени пучком дейтронов ее не надо специально разогревать.

Измерения распределения температуры по поверхности образца, находящегося при квазистационарной температуре около 2000° С, с помощью оптического пирометра дали следующие результаты: максимальная температура наблюдалась в середине образца длиной 16 мм, на краях образца температура была на 80° С меньше. Это означает, что графит устойчиво выдерживает градиенты температуры по крайней мере до 100° С/см.

Для определения времени жизни мишени была проведена серия экспериментов, в которой образец выдерживался при постоянной средней температуре в диапазоне 2200–2500° С. Об изменении физических свойств графита свидетельствовало изменение со временем сопротивления образца. С течением времени сопротивление образца увеличивалось с нарастающей скоростью, и при его росте на 20–25% происходило разрушение. По экспериментальным данным построена кривая для определения времени жизни образца (рис. 4). Время от момента выхода на рабочую температуру до разрушения принимается за время жизни образца. Определенное таким образом время жизни при 2100° С составит 300–400 часов, при 2000° С – около 2000 часов.

Заключение

Основным результатом настоящей работы является демонстрация возможности создания высокоинтенсивного источника нейтронов, рассчитанного на большую мощность первичного пучка дейтронов, на базе углеродной мишени, охлаждаемой излучением. Подготовлен физический проект такого источника.

Литература

- [1] R. Serber. Phys. Review 72, 1948.
- [2] Физические величины. Справочник под редакцией И.С. Григорьева и Е.З. Мелихова. – М. Энергоатомиздат, 1991.
- [3] J. V. Marion, F. C. Young. Nuclear Reaction Analysis. North-Holland publishing company. Amsterdam 1968.
- [4] S. Menard et. al. Fast Neutron Forward Distribution from C, Be and U Thick Targets Bombarded by Deuterons.
- [5]. B. A. Boley, J. H. Weiner. Theory of Thermal Stresses. New York – London, John Willes and sons, INS, 1960.

Ускорители электронов типа ИЛУ с энергией более 4 МэВ и мощностью более 50 кВт

В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, Л.А. Воронин, Г.А. Васильев,
В.А. Горбунов, М. В. Коробейников, Е. Н. Кокин, С.А. Максимов,
В.Е. Нехаев, А.Д. Панфилов, В. М. Радченко, В.О. Ткаченко,
А.А. Тувик, Б.Л. Факторович

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской Академии наук, Россия
E-mail auslen@inp.nsk.su*

Представлены результаты разработки и испытаний новых вариантов ускорителей электронов серии ИЛУ для промышленного применения с обсуждением перспектив их дальнейшего развития.

Введение

Начиная с 1970 года, в Институте ядерной физики СО РАН разрабатываются и поставляются в промышленность импульсные линейные высокочастотные ускорители ИЛУ-6 с диапазоном энергии 1.2 – 2.5 МэВ и ИЛУ-8 с диапазоном энергии 0.8 – 1.5 МэВ, предназначенные для широкого применения в различных технологических процессах и рассчитанные на длительную непрерывную и круглосуточную работу в промышленных условиях. В отличие от широко распространенных высоковольтных ускорителей, генерирующих непрерывный пучок, импульсный характер пучка позволяет легко адаптировать ускорители ИЛУ к технологическим процессам, требующим создания нескольких зон облучения. Например, при облучении полимерной изоляции кабелей и термоусаживаемых трубок применение четырехстороннего облучения позволяет без повышения энергии электронов резко повысить производительность процесса, улучшить качество продукции и расширить номенклатуру обрабатываемых изделий.

Ниже приведены основные параметры производимых Институтом ускорителей серии ИЛУ, перекрывающих диапазон энергий от 0.5 до 5 МэВ и имеющих мощность пучка до 50 кВт.

Таблица 1. Основные параметры ускорителей типа ИЛУ.

Параметры	ИЛУ-8	ИЛУ-6	ИЛУ-6М	ИЛУ-10	ИЛУ-10М
Диапазон энергий, МэВ	0.5 ÷ 1.0	1.2 ÷ 2.5	1.0 ÷ 2.5	3.0 ÷ 5.0	2.5 ÷ 4.0
Мощность пучка (макс), кВт	20	40	20	50	20
Средний ток пучка (макс), мА	25	25	20	15	8
Потребляемая мощность (3 × 380 В), кВт	80	150	100	180	100
Потребление воды, л/мин	60	60	60	150	100
Вес, т	1.75	2.2	2.2	2.9	2.5

Основой ускорителей серии ИЛУ является тороидальный резонатор с одним ускоряющим зазором. Электронная пушка располагается на одном из выступающих электродов, формирующих ускоряющий зазор. Возбуждение резонатора осуществляется от однокаскадного автогенератора, реализованного на мощном импульсном триоде ГИ-50А. Отсутствие внешней инжекции и использование схемы с самовозбуждением обеспечивают компактность ускорителя и упрощение конструкции при сохранении достаточно высокого коэффициента преобразования высокочастотной мощности генератора в мощность электронного пучка в рабочем диапазоне энергий.

1. Ускоритель ИЛУ-10

Ускоритель ИЛУ-10 является новой разработкой и предназначен в основном для процессов, требующих повышенной энергии электронов и мощности пучка. Общий вид ускорителя показан на рис. 1.

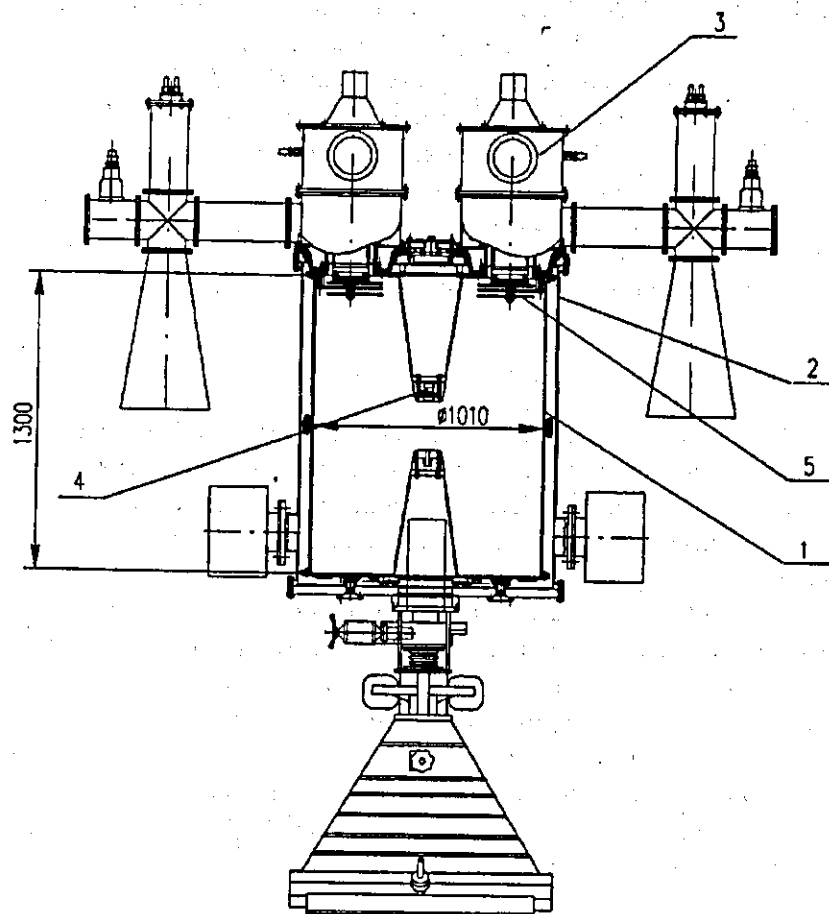


Рис. 1: Ускоритель ИЛУ-10. 1 – резонатор; 2 – вакуумный бак; 3 – высокочастотный генератор; 4 – электронная пушка; 5 – разделительный вакуумный конденсатор.

Габариты этого ускорителя не намного превышают габариты ИЛУ-6. Для повышения мощности пучка на ускорителе ИЛУ-10 устанавливаются два ВЧ-генератора (ускоритель ИЛУ-6 выпускается с одним ВЧ-генератором).

Произведя оптимизацию параметров резонатора ускорителя ИЛУ-6, несколько увеличив его размеры и длину ускоряющего промежутка, удалось снизить высокочастотные потери в резонаторе при сохранении прежней резонансной частоты. Кроме того, расположение двух ВЧ-генераторов симметрично по диаметру на верхней поверхности резонатора обеспечивает подавление резонансного высокочастотного разряда в полости резонатора за счет высоковольтного потенциала на пластинах разделительных вакуумных конденсаторов в анодных цепях генераторов. Это позволило изготовить внешнюю обечайку резонатора единой и таким образом отказаться от подачи напряжения смещения на изолированную нижнюю половину резонатора, как это сделано в ускорителях ИЛУ-6 и ИЛУ-8 [1].

Основные параметры резонатора:

Резонансная частота — 115 МГц; добротность — $35 \cdot 10^3$; шунтовое сопротивление — 9.6 МОм; высота — 1300 мм; диаметр — 1010 мм; длина ускоряющего зазора — 270 мм.

Эти изменения обеспечили повышение максимальной энергии электронов и максимальной мощности в пучке. При испытаниях ускорителей ИЛУ-10 были достигнуты следующие параметры: энергия электронов 5.5 МэВ при малом токе пучка, энергия 5 МэВ при мощности пучка 50 кВт, энергия 4.5 МэВ при мощности пучка 60 кВт.

2. Ускоритель ИЛУ-11

Опыт разработки и эксплуатации импульсных высокочастотных ускорителей типа ИЛУ (ИЛУ-6, ИЛУ-8, ИЛУ-10) показал, что однорезонаторные ускорители с одним ускоряющим зазором могут быть эффективно использованы для ускорения электронов в диапазоне энергий $0.7 \div 5$ МэВ при мощности электронного пучка $20 \div 50$ кВт. В области верхней границы указанного диапазона наступают ограничения как по энергии, так и по мощности электронного пучка из-за роста высокочастотных потерь в резонаторе и снижения электрической прочности зазора при возрастающих значениях напряженности электрического поля и запасенной энергии. Дальнейшее повышение энергии электронного пучка требует перехода на использование многозазорных ускоряющих структур, например, цепочек связанных резонаторов.

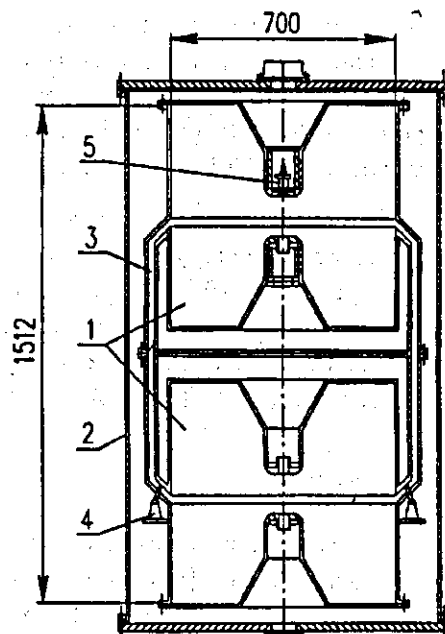


Рис. 2: Ускоритель ИЛУ-10. 1 — резонатор; 2 — вакуумный бак; 3 — высокочастотный генератор; 4 — электронная пушка; 5 — разделительный вакуумный конденсатор.

Наличие базовой модели резонатора ускорителя ИЛУ-8 [2] на энергию до 1 МэВ, отработанного ВЧ-генератора и системы его питания и управления с учетом преимущественности конструкции и унификации основных узлов позволило разработать ускоритель ИЛУ-11 для промышленного применения с максимальной энергией электронов до 5 МэВ при сохранении относительной простоты изготовления и наладки.

На рис. 2 изображен общий вид ускорителя. Ускорительная секция, выполненная из двух связанных симметричных тороидальных резонаторов 1, помещена внутрь стального вакуумного бака 2. Связь между резонаторами осуществляется с помощью коаксиальной линии 3 длиной $\lambda/2$. Рабочий тип колебаний в ускоряющих резонаторах π . Внутренние половины обоих резонаторов соединены вместе и установлены на опорных изоляторах 4 для изоляции их

от наружного корпуса резонатора. На эти половины через соответствующий вакуумный ввод подается постоянное напряжение смещения — 7 кВ для подавления высокочастотного резонансного разряда и отсоса ионов из ускоряющих зазоров. Опорные изоляторы и ввод напряжения смещения расположены в минимуме электрического высокочастотного поля на нижнем конце коаксиальной линии связи. На верхнем выступе первого резонатора установлена электронная пушка 5 с катодом, изготовленным из гексаборида лантана. Для получения требуемой моноэнергетичности пучка ускоренных электронов инжектор имеет управляющую сетку и снабжен схемой автоматического смещения.

В конструкции ускоряющей структуры предусмотрена взаимная подстройка ускоряющих резонаторов на одинаковую частоту за счет изменения положения внутренней изолированной части относительно наружного корпуса резонатора.

Коэффициент связи между резонаторами зависит от длины коаксиальной линии связи и величины ее волнового сопротивления. При длине линии связи близкой к $\lambda/2$ обеспечивается вполне удовлетворительное значение коэффициента связи $3 \div 4\%$. При этом высокочастотные потери в линии связи составляют не более 12% от общих потерь в стенках резонаторов.

Основные параметры ускоряющей структуры:

Резонансная частота — 176 МГц; добротность — $29 \cdot 10^3$; шунтовое сопротивление — 13 МОм; длина каждого ускоряющего зазора — 116 мм.

Возбуждение ускоряющей структуры ускорителя ИЛУ-11 осуществляется от внешнего автогенератора, реализованного на мощном генераторном триоде ГИ-50А, через воздушный коаксиальный фидер и петлю ввода мощности.

Основные параметры ускорителя ИЛУ-11:

Максимальная энергия электронов — 5 МэВ; максимальная средняя мощность пучка электронов — 20 кВт (с 1 ВЧ-генератором) и 50 кВт (с 2 ВЧ-генераторами); частота повторения импульсов до 50 Гц; длительность импульса — 0.7 мс.

При последовательном соединении двух аналогичных ускорительных секций посредством соответствующего устройства связи имеется возможность построения ускорителя электронов на энергию 8 – 10 МэВ, или, ограничившись энергией 5 МэВ, при уменьшившихся высокочастотных потерях в ускоряющей структуре и используя более мощный высокочастотный генератор, можно повысить ток инжектора и соответственно увеличить мощность пучка ускоренных электронов до $100 \div 150$ кВт.

Заключение

Одним из возможных применений ускорителей данного типа является облучение пищевых продуктов (пастеризация), в том числе и с использованием тормозного излучения. Это в значительной степени стимулировало разработку ускорителей ИЛУ-10 и ИЛУ-11.

Наши оценки показывают, что производительность технологической линии по обработке пищевых продуктов при энергии 5 МэВ и мощности пучка 50 кВт может достигать до 4 тонн продукции в час при дозе облучения 100 крад.

Список литературы

- [1] V.L. Auslender. ILU-type electron accelerators for industrial technologies. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B 89 (1994) 46-48.
- [2] V.L. Auslender et al. Compact ILU-type electron accelerators as a base for industrial 4-sided irradiation systems for cable and tubes. Radiation Physics and Chemistry 54 (1999) 609-618.