

существенных изменений используется фокусирующий соленоид, СВЧ-окно, датчик тока, сканирующий магнит и камера развертки. На камеру развертки устанавливается поворотный магнит, обеспечивающий параллельный выход электронов из ускорителя. Существенной переработке предлагается подвергнуть ускоряющую секцию и систему откачки. Ускоряющая секция имеет относительную длину $\xi = l/\lambda = 11,6$. Относительная фазовая скорость $\beta = v/c$ вдоль секции на отрезке от $\xi = 0$ до $\xi = 2$ плавно возрастает от 0,42 до 1 и далее остается постоянной. Напряженность ускоряющего поля E_z на оси круглого диафрагмированного волновода на отрезке от $\xi = 0$ до $\xi = 2$ плавно изменяется от 17 до 70 кВ/см, далее линейно возрастает до 106 кВ/см при $\xi = 8,6$, затем линейно уменьшается до 96 кВ/см при $\xi = 11,6$. Пучок на выходе ускоряющей секции с фокусирующим магнитным полем на оси 0,09 Тл, импульсной СВЧ-мощностью на входе 10 МВт, напряжением инжекции 30 кВ и импульсным током на выходе 0,7 А имеет диаметр около 4 мм, энергию 11 МэВ, ширину спектра ускоренных электронов по основанию 7% и около 2% на уровне 0,1.

Работа выполнена по гранту Минобразования России Т00-7.5-384.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завадцев А.А., Завадцев Д.А., Собенин Н.П., Фадин А.И. Проект промышленного ускорителя электронов на 10 МэВ. — В сб.: Докл. 17-го сов. по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 2000, с. 382—385.
2. Дворников В.А., Калюжный В.Е., Кузьмин И.А. Метод настройки КДВ с переменными размерами. — Труды научной сессии МИФИ-2001. т. 7, с. 139—140.
3. Грызлов А.В., Дворников В.А., Кузьмин И.А. и др. Технологический ускоритель с мощностью пучка 25 кВт. — Там же, т. 9, с. 28—29.

УДК 537.521.7

УСКОРИТЕЛЬ-ТАНДЕМ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ ДЛЯ БОРНЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ И ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ

*Димов Г.И., Бельченко Ю.И., Крайнов Г.С., Салимов Р.А., Куксанов Н.К.,
Сильвестров Г.И., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю., Тиунов М.А., Топорков Д.К.,
Широков В.В. (ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН)*

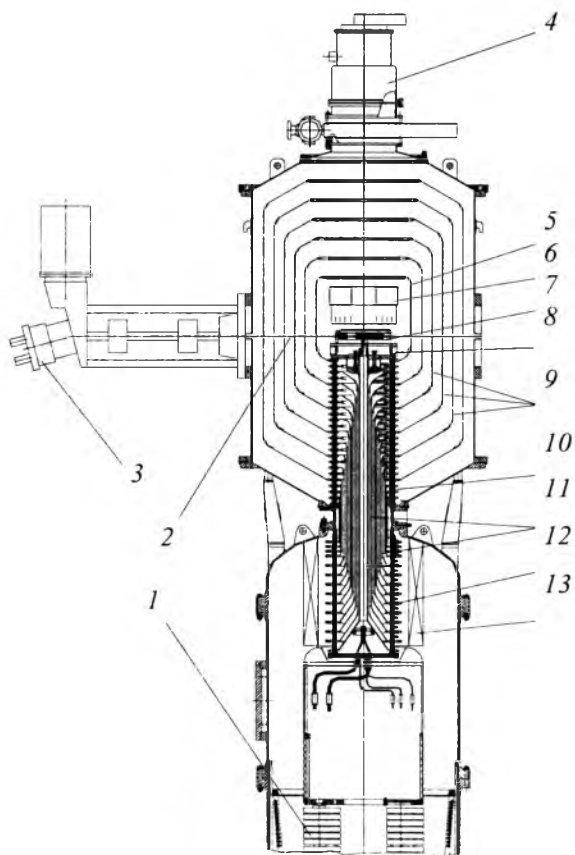
Нейтроннозахватная терапия рака основана на поглощении эпителиальных нейтронов стабильным изотопом ^{10}B , сорбируемым преимущественно в раковых клетках. Образующиеся в результате ядерной реакции α -частица и ион ^7Li тормозятся на длине размера клетки с выделением энергии $\sim 2,3$ МэВ в пределах клетки, содержащей ядро бора, что приводит к ее избирательному поражению. Нейтроны нужной энергии генерируются при сбросе протонного пучка энергией $E \cong 1,9$ МэВ (при разбросе энергии $dE/E \leq 0,1\%$) на литиевую мишень. Терапия быстрыми нейтронами осуществляется при энергии протонного пучка до 2,5 МэВ [1].

Особенность взрывчатых веществ — повышенная концентрация азота. Метод ядерно-резонансного поглощения основан на эффективном поглощении ядрами азота γ -квантов энергией 9,17 МэВ и реализуется при просвечивании транспортных контейнеров или багажа пассажиров потоками γ -квантов указанной и немного отличающейся от нее энергией. γ -Кванты энергией 9,17 МэВ генерируются на мишени из изотопа ^{13}C при сбросе на нее протонного пучка энергией 1,747 МэВ [2].

Для эффективного применения ускорителя в терапии рака и на таможене ток ускоренного до полной энергии пучка протонов должен быть не менее 10 мА.

Необходимую стабильность энергии протонного пучка обеспечивает электростатический ускоритель в тандемном варианте, преимущества которого хорошо известны. Вынужденная откачка газа перезарядной мишени тандема частично или полностью через объем ускорительных трубок и близость вакуумной поверхности изоляторов трубок к тракту ускорения ограничивают ток ионного пучка в лучшем случае единицами миллиампер.

В ИЯФ им. Г.И. Будкера разрабатывается тандемный электростатический ускоритель с вакуумной изоляцией, в котором ускорительные трубки отсутствуют (рис. 1). В качестве мощного высоковольтного источника, обеспечивающего необходимую стабильность энергии протонного пучка, выбран секционированный выпрямитель промышленного ускорителя электронов серии ЭЛВ на напряжение 1,25 МВ и необходимую мощность. На рис. 1 показана верхняя часть выпрямителя 1.



Р и с. 1. Общий вид тандема

1. Высоковольтный электрод 5, окружающие его промежуточные цилиндрические электроды 9, перезарядная газовая мишень 7 с вакуумным насосом 6 для откачки газа мишени размещены внутри вакуумного объема, откачиваемого криогенным насосом 4 через горловину вакуумного объема и профилированные (с жалюзи) крышки промежуточных электродов.

Секционированный разборный проходной изолятор, подающий потенциал высоковольтного выпрямителя высоковольтному электроду и потенциалы на промежуточные электроды, состоит из двух частей. Верхняя вакуумная часть 10 состоит из кольцевых стеклянных изоляторов, вакуумно-плотно стянутых со своими электродами через индиевый уплотнитель, нижняя газовая часть 12 собрана на кольцевых керамических изоляторах, склеенных со своими электродами. Обе части изолятора по оси стянуты централь-

ной трубой, внутри которой, как и внутри диэлектрической трубы, расположенной по оси выпрямителя, проходят коммуникации перезарядной мишени и насоса мишени. Канал подачи газа мишени выходит в герметичный объем 8.

Внутренняя часть проходного изолятора находится в атмосфере элегаза под давлением, отличным от давления элегаза, в котором находятся выпрямитель и нижняя внешняя газовая поверхность изолятора. Верхняя наружная поверхность проходного изолятора находится в вакууме.

Соосные промежуточные электроды создают равномерное распределение ускоряющего поля по зазорам. Потенциал к промежуточным электродам подводится через электроды вакуумной части проходного изолятора, расположенного вне области ускорения и прохождения пучка. Распределение потенциала по электродам газовой части изолятора задается резистивным делителем напряжения, закрепленным снаружи на электродах газовой части изолятора. Металлические тонкостенные трубы 11 различной длины, коаксиально расположенные внутри проходного изолятора, передают потенциалы электродов газовой части соответствующим электродам вакуумной части изолятора. На электроды вакуумной части изолятора, гальванически не связанные с электродами газовой части, потенциал подается через отдельные резистивные цепочки, закрепленные в газе внутри вакуумной части изолятора.

Для выравнивания распределения потенциалов промежуточных электродов в случае осаждения на них дополнительного заряда при прохождении ионного пучка предусмотрен резистивный делитель напряжения 13.

Ионный пучок проходит от источника отрицательных ионов водорода 3 по низкоэнергетичному тракту с фокусирующими электромагнитными линзами и до попадания в перезарядную мишень ускоряется до половинной энергии. После перезарядки на мишени отрицательных ионов водорода в протоны пучок ускоряется до полной энергии. Траектория пучка 2 проходит через круглые отверстия, концентрично расположенные в стенках вакуумного сосуда, промежуточных и высоковольтного электродов.

Предварительные расчеты показали возможность проводки ионного пучка током 10 и 40 мА внутри перезарядной трубки диаметром 8 и 12 мм соответственно при длине трубки 400 мм [3]. Теплоноситель для принудительного охлаждения перезарядной трубки транспортируется по полиэтиленовым трубкам, расположенным по оси тандема и высоковольтного выпрямителя.

При эксплуатации ускорителя возможны пробои как высоковольтного источника (пробои по полному напряжению), так и отдельных ускоряющих промежутков тандема. При этом дополнительные напряжения, возникающие на отдельных зазорах, так называемые перенапряжения, не должны приводить к последовательному пробоем всех промежутков с выделением энергии, запасенной в выходной емкости высоковольтного источника и емкостях всех зазоров.

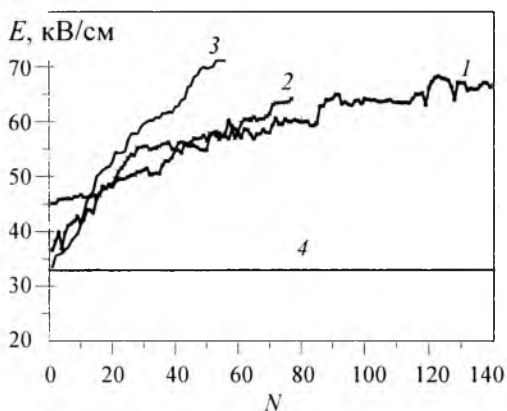
Результаты расчета перенапряжения на вакуумных зазорах при пробое по полному напряжению показывают, что максимальное перенапряжение $\sim 1,1$ будет только на первом зазоре 12-зазорного тандема. На остальных зазорах как 12-, так и 6-, 4-зазорного тандема перенапряжения меньше 1.

При пробое отдельных вакуумных зазоров максимальное возрастание напряжения на соседних с ним зазорах выше, чем при пробое по полному напряжению, и составляет 1,08, 1,14 и 1,17 для 12-, 6- и 4-зазорного тандема соответственно.

Энергия, запасаемая как в емкостях высоковольтных зазоров тандема, так и в выходной емкости высоковольтного источника и выделяемая при пробоях вакуумных зазоров, не только существенно влияет на режим тренировки вакуумных зазоров последовательными пробоями, но и определяет их конечную электрическую прочность. Для 4-, 6- и 12-зазорного тандема при потенциале высоковольтного электрода 1,25 МВ в емкостях отдельных зазоров запасается энергия до 44, 30 и 15 Дж соответственно.

Эксперименты по определению электрической прочности сантиметровых вакуумных зазоров с электродами большой площади и влияния на электрическую прочность зазоров запасенной энергии проводили в геометрии соосных цилиндров с площадью поверхности электродов $\sim 0,7 \text{ м}^2$ и межэлектродным зазором 45 мм при изменении емкости, подключаемой к испытываемому зазору.

Тренировочные кривые высоковольтного вакуумного зазора показаны на рис. 2, где N — номер последовательного пробоя; E — напряженность поля на поверхности высоковольтного электрода, при которой произошел пробой промежутка. Кривая 4 показывает рабочую напряженность 33 кВ/см, принятую для высоковольтных ускоряющих промежутков тандема.



Р и с. 2. Тренировочные кривые вакуумного зазора

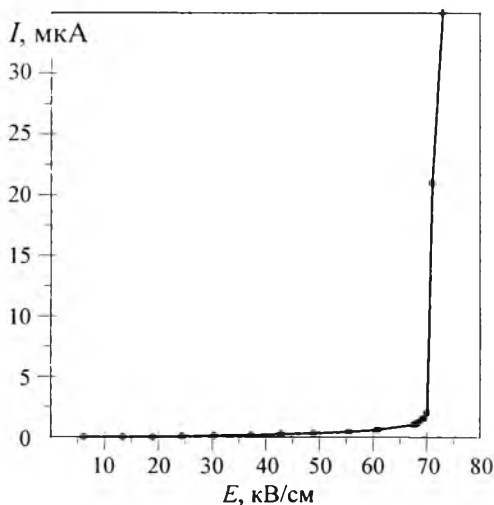
энергия 50 Дж также не снижает электрической прочности зазора 45 мм. Высоковольтная тренировка зазора начинается при напряженности электрического поля, превышающей принятую для ускоряющих зазоров тандема с вакуумной изоляцией. При двойной напряженности (68 кВ/см) исследуемый промежуток не пробивался часами. Для 6-зазорного тандема запас электрической прочности зазоров и отсутствие эффекта детренировки позволяют позазорно тренировать ускоряющие промежутки тандема повышенным напряжением.

На рис. 3 приведена зависимость автоэмиссионного тока от напряженности электрического поля в высоковольтном зазоре, где E — напряженность поля на поверхности высоковольтного электрода. При напряженности поля 33 кВ/см зарегистрирована плотность тока $\sim 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2$. Ожидаемый автоэмиссионный ток не требует увеличения мощности резистивного делителя напряжения. Газовый поток с поверхностей электродов, стимулированный электронной бомбардировкой, ожидается незначительным.

Максимальная напряженность пробоя 1, 2 соответствует запасенной энергии 9 Дж, 3 — 31 Дж. Видно, что при хорошей повторяемости экспериментальных данных на напряжение пробоя зазора не влияют предыдущие пробои и наблюдается последовательный рост пробивного напряжения. Дальнейшие эксперименты показали, что выделяемая при пробое

Наряду с расчетами и экспериментами в ИЯФ закончена конструкторская проработка основных узлов ускорителя-тандема и начато их изготовление. К настоящему времени на ионном источнике с малым эмиттансом пучка получен устойчивый ток отрицательных ионов водорода 5 мА [4]. Разработан технический проект и начато изготовление источника на ток до 50 мА. На высоковольтном выпрямителе тандема без нагрузки получено напряжение 1,4 МВ, превышающее рабочее (1,25 МВ). Допущенные при испытаниях выпрямителя редкие пробои по полному напряжению не повлияли на его работоспособность.

Способ откачки газа перезарядной мишени [5] будет выбран после проведения экспериментов по определению влияния потока газа на электрическую прочность высоковольтных ускоряющих вакуумных зазоров, корректность задания начальных характеристик ионного пучка будет проверена в экспериментах с импульсным пучком.



Р и с. 3. Зависимость автоэмиссионного тока от напряженности электрического поля в высоковольтном зазоре

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bayanov B.F., Belov V.P., Bender E.D. et al. Accelerator Based Neutron Source for the Neutron-Capture and Fast Neutron Therapy at Hospital: Preprint BINP 97-89. 1997.
2. Vartsky D., Engler G., Goldberg M.V. Method for detection of nuclear explosives based on nuclear resonance absorption of gamma rays in ^{14}N . — NIM. section A. 1994, p. 688—691.
3. Деревянкин Г.Е., Крайнов Г.С., Крючков А.М. и др. Ионно-оптический тракт 2,5 МэВ 10 мА ускорителя-тандема: Препринт ИЯФ 2002-24. 2002.
4. Бельченко Ю.И., Григорьев Е.В. Прототип стационарного источника отрицательных ионов водорода для применения в медицине. — Тезисы докл. 28-й конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород. 2001, с. 167.
5. Деревянкин Г.Е., Димов Г.И., Долгушин В.М. и др. Перезарядная мишень 40 мА 2 МэВ ускорителя-тандема: Препринт ИЯФ 2001-23.

УДК 621.384.663+615.849

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОБЛУЧЕНИЯ ЛЕЖАЩИХ ПАЦИЕНТОВ

Кац М.М., Дружинин Б.Л. (ГНЦ РФ — ИТЭФ)

В работах [1, 2] предложена схема простой плоской системы, обеспечивающая облучение лежащего горизонтально пациента пучками протонов, направление которых по отношению к горизонтальной плоскости не превышает фиксированного угла φ , например, 45° . В этой установке для выбора направления облучения применяется неподвижный магнит, который поворачивает пучок в вертикальной плоскости, а горизонтально зафиксированный пациент процедурным столом перемещается