

## ПОДЪЕМ НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВАКУУМНЫХ ЗАЗОРАХ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

© 2014 г. И. Н. Сорокин, С. Ю. Таскаев

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

*Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

*E-mail: I.N.Sorokin@inp.nsk.su, S.Yu.Taskaev@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 15.10.2013 г.

Для получения протонного пучка с энергией 2 МэВ и постоянным током до 10 мА был предложен, изготовлен и введен в эксплуатацию новый тип ускорителя — электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, отличающийся быстрым ускорением заряженных частиц и большой площадью поверхностей ускоряющих электродов. В работе изучается влияние пробоев на электрическую прочность высоковольтных элементов ускорителя.

DOI: 10.7868/S0032816214030094

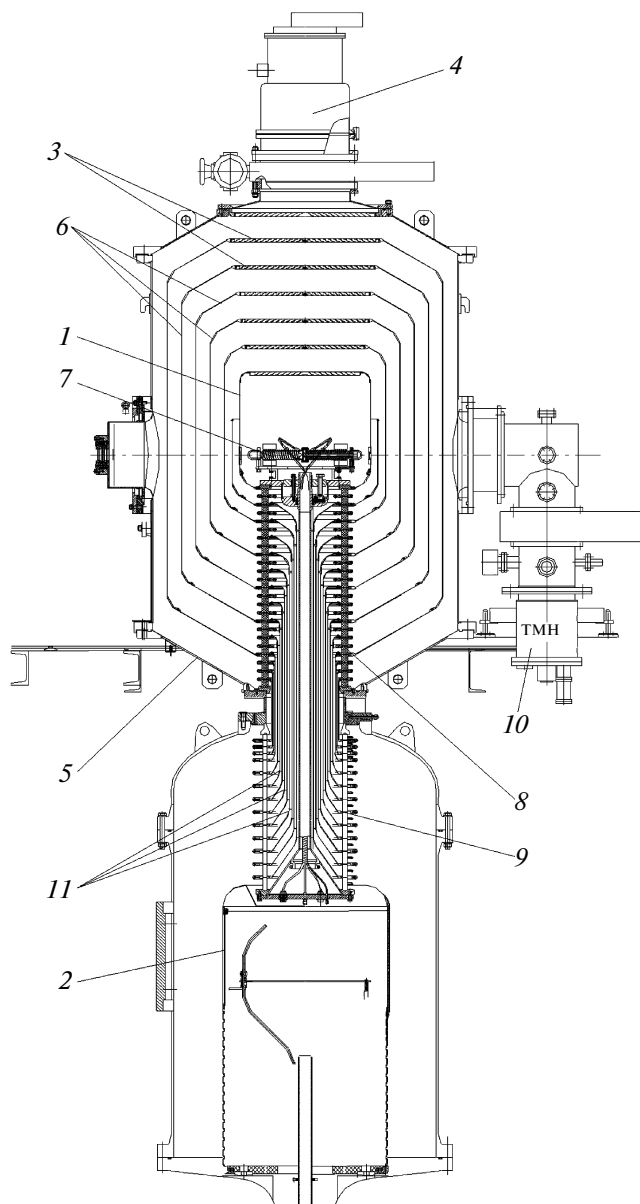
Для проведения бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей в условиях онкологических клиник был предложен источник эпитепловых нейтронов на основе нового типа ускорителя — электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией [1]. Общий вид ускорителя приведен на рис. 1. Инжектируемые отрицательные ионы водорода ускоряются до 1 МэВ подаваемым на высоковольтный электрод потенциалом, превращаются в протоны в газовой обдирочной мишени, и затем протоны тем же потенциалом ускоряются до 2 МэВ. Откачка газа обдирочной мишени осуществляется криогенным и турбомолекулярным насосами через систему жалюзи, расположенных в верхней части электродов-экранов. Потенциалы на высоковольтный электрод и промежуточные электроды-экраны подаются от высоковольтного источника напряжения через заполненный элегазом проходной изолятор, в котором установлен омический делитель.

Созданный ускоритель отличается большой площадью электродов — 41 м<sup>2</sup>. Из-за отсутствия данных о высоковольтной прочности подобных систем сначала была определена напряженность электрического поля на одноззорном (45 мм) прототипе с площадью высоковольтного электрода 0.7 м<sup>2</sup>, составившая 60 кВ/см [2]. Этот результат послужил основой выбора напряженности электрического поля в межэлектродных промежутках создаваемого ускорителя величиной 25 кВ/см. Помимо вакуумных зазоров высоковольтную прочность ускорителя определяет и проходной изолятор. При проектировании изолятора учитывался результат работы [3] — высоковольтная прочность по поверхности изоляторов в виде колец, эксплу-

атируемых в среде элегаза под давлением более 3 атм, составляет более 100 кВ/см. Также из практики известно, что первые поверхностные вакуумные пробои изоляторов высотой несколько сантиметров проходят при напряженности ~10 кВ/см. В итоге, в газовой части спроектированного проходного изолятора (9 на рис. 1) напряженность электрического поля по поверхности керамических колец составила 15 кВ/см, а в вакуумной части изолятора (8) — 12 кВ/см по поверхности стеклянных колец. Видно, что экспериментальными данными не был полностью подтвержден выбор напряженности электрического поля в межэлектродных промежутках и по внешней поверхности стеклянных колец вакуумной части проходного изолятора.

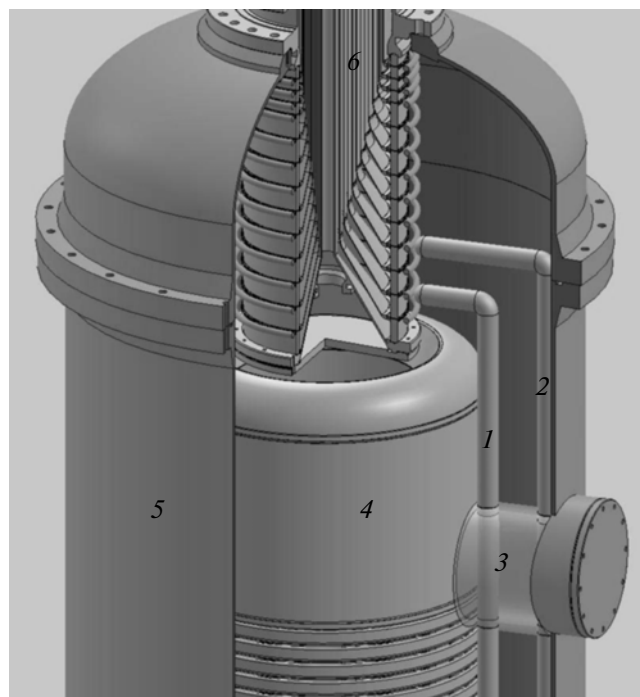
Достижение расчетной напряженности поля в межэлектродных промежутках и по поверхности изолятора может быть осуществлено высоковольтной тренировкой пробоями. Данная работа посвящена изучению влияния пробоев на электрическую прочность высоковольтных элементов ускорителя с целью получения требуемого напряжения на ускорителе.

Из-за новизны конструкции ускорителя-тандема, т.е. большой площади электродов и сложной конструкции проходного изолятора, было предложено проводить тренировку пробоями в два этапа. Сначала осуществлялся подъем напряжения на отдельных зазорах, а затем последовательное подключение зазоров и подъем на полное напряжение. Перед подъемом напряжения вакуумный бак ускорителя прогревался до температуры 110°С с помощью нагревателей, расположенных на внешней поверхности бака.



**Рис. 1.** Общий вид электростатического 6-зазорного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. 1 – высоковольтный электрод ускорителя-тандема; 2 – высоковольтный электрод источника напряжения; 3 – жалюзи электродов-экранов; 4 – криогенный насос; 5 – вакуумный бак ускорителя; 6 – промежуточные электроды-экраны; 7 – газовая обдирочная мишень; 8 – вакуумная часть проходного изолятора; 9 – газовая часть проходного изолятора; 10 – турбомолекулярный насос; 11 – внутренние коаксиальные цилиндры.

Для испытания как отдельных, так и последовательно подключаемых зазоров было разработано и изготовлено специальное приспособление (рис. 2) в виде двух перемещающихся по высоте штанг, закрепленных на изоляторе между высоковольтным электродом и стенкой бака высоко-



**Рис. 2.** Приспособление для одиночного и последовательного подключения зазоров. 1 – штанга с высоким потенциалом; 2 – земляная штанга; 3 – изолятор; 4 – высоковольтный электрод выпрямителя; 5 – бак выпрямителя; 6 – газовая часть проходного изолятора.

вольтного выпрямителя. Штанга 1 имела общий потенциал с выпрямителем, штанга 2 – с землей. Каждый из вакуумных ускоряющих зазоров (совместно с соответствующими газовыми зазорами, стеклянными и керамическими изоляторами) испытывался на напряжение до 200 кВ.

На рис. 3 показан подъем напряжения на одном из ускоряющих зазоров при позазорной тренировке. Видно, что первый пробой прошел при 140 кВ, что соответствует напряженности по поверхности стеклянного изолятора  $\sim 10$  кВ/см.

Испытания с последовательно подключаемыми зазорами проводились при давлении элегаза внутри бака высоковольтного выпрямителя 6 атм, внутри проходного изолятора – 3 атм. На рис. 4 представлены кривые зависимости пробивного напряжения от количества пробоев для одного, двух, трех, четырех и пяти последовательно подключенных зазоров. Из графиков видно, что с увеличением числа зазоров пробивное напряжение ускорителя растет, а на пяти зазорах было достигнуто напряжение 1 МВ. Кратковременно достигнутые в экспериментах напряженности  $\sim 30$  кВ/см (рис. 5) на 20% выше уровня рабочей напряженности (на графике обозначен штриховой линией).

После проверки на высоковольтную прочность всех элементов отдельных ускоряющих зазоров ускоритель был включен на полное напря-

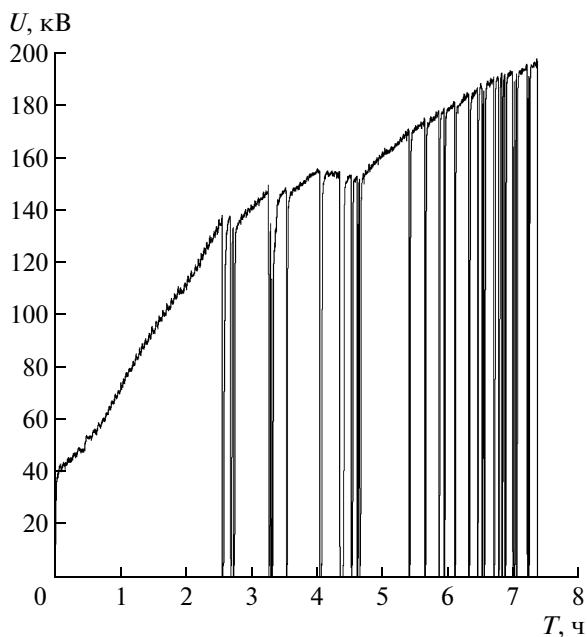


Рис. 3. Подъем напряжения на одиночном зазоре.

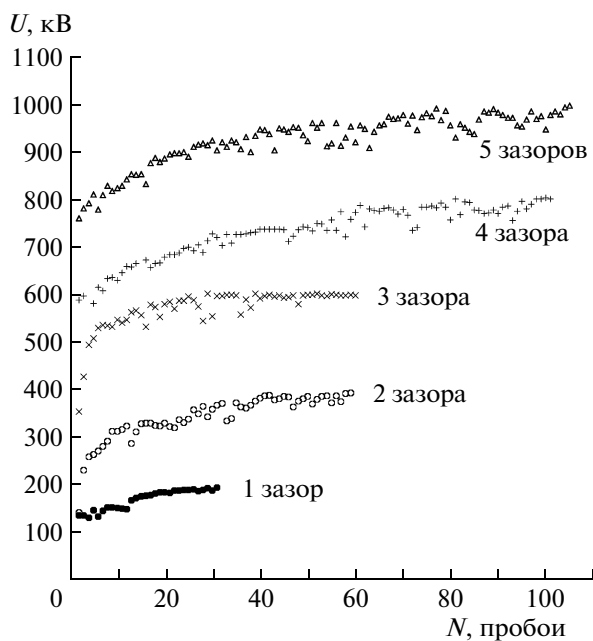


Рис. 4. Зависимость пробивного напряжения от количества пробоев.

жение, и тренировочная кривая одного из первых экспериментов представлена на рис. 6а. Первый пробой прошел при напряжении 770 кВ, что соответствует напряженности электрического поля в зазорах 20 кВ/см. Подъем напряжения и пробой сопровождались изменением остаточного давления в вакуумном баке. На ускорителе было полу-

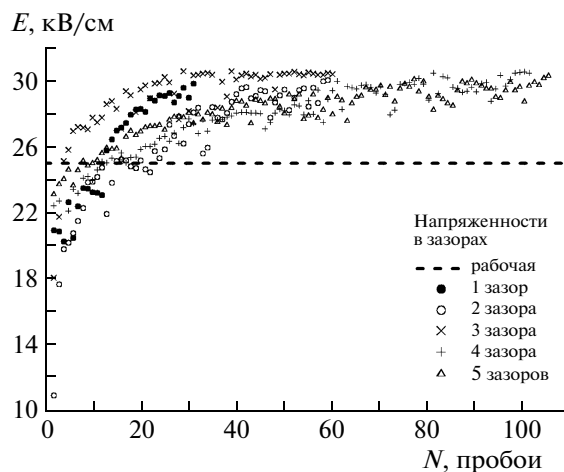


Рис. 5. Зависимость напряженности в зазорах от количества пробоев.

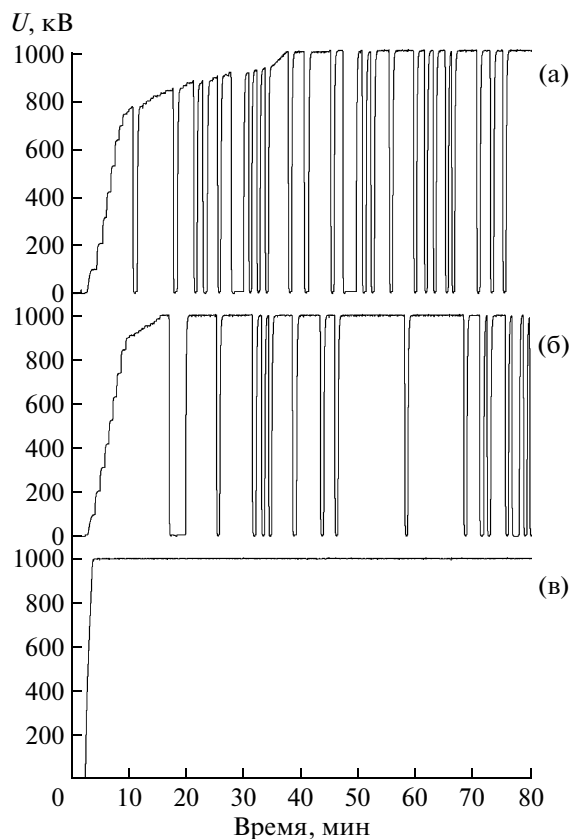


Рис. 6. Динамика выхода напряжения на режим без пробоев (а – начало, б – середина, в – окончание тренировки).

чено напряжение 1 МВ, динамика выхода на режим без пробоев показана на рис. 6. Максимальное время выстойки напряжения без пробоев составило более 2 ч.

Таким образом, на ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией электродов изучено влияние пробоев на электрическую прочность высоковольтных вакуумных ускоряющих зазоров. Проведена позазорная тренировка всех зазоров. Подтверждено, что вакуумные пробои не снижают высоковольтной прочности ускорителя-тандема. В результате проведенных экспериментов достигнуто требуемое напряжение 1 МВ и обеспечена устойчивая работа ускорителя без пробоев в течение нескольких часов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bayanov B.F., Belov V.P., Bender E.D., Bokhovko M.V., Dimov G.I., Kononov V.N., Kononov O.E., Kuksanov N.K., Palchikov V.E., Pivovarov V.A., Salimov R.A., Silvestrov G.I., Skrinsky A.N., Taskaev S.Yu.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 1998. V. 413/2-3. P. 397. DOI: 10.1016/S0168-9002(98)00425-2.
2. *Сорокин И.Н., Широков В.В.* // ПТЭ. 2003. № 1. С. 5.
3. *Крючков А.М., Сорокин И.Н., Широков В.В.* Препринт ИЯФ СО РАН 94-54. Новосибирск, 1994. С. 40.