

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 537.521.7

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

© 2020 г. Я. А. Колесников^{a,b}, И. Н. Сорокин^{a,b,*}, С. Ю. Таскаев^{a,b}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

*e-mail: I.N.Sorokin@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 17.04.2020 г.

После доработки 20.05.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Представлены результаты исследований электрической прочности керамических изоляторов, проведенных на созданном высоковольтном вакуумном стенде, и результаты исследований электрической прочности ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией с модернизированными проходными изоляторами. По результатам проведенных исследований и модернизации напряжение в ускорителе повышено с 1 до 1.15 МВ и достигнут режим работы без высоковольтных пробоев.

DOI: 10.31857/S0032816220060105

ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН разработан источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени [1], созданный для развития перспективной методики лечения злокачественных опухолей – бор-нейтронозахватной терапии [2]. На установке получен стационарный протонный пучок с энергией 2 МэВ, осуществлена генерация нейтронов и проведены исследования влияния нейтронного излучения на клеточные культуры [3] и лабораторных животных [4]. Однако для лечения глубоко расположенных опухолей необходимо повысить энергию протонов до 2.3 МэВ [5], с тем чтобы сформировать терапевтический пучок нейтронов с требуемыми параметрами.

Цель данной работы – модернизация проходного изолятора ускорителя для достижения напряжения, необходимого для получения пучка протонов с энергией 2.3 МэВ.

КОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Схема ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией представлена на рис. 1. Пучок протонов с энергией 2 МэВ и током до 9 мА получают следующим образом. Из поверхностно-плазменного источника 1 вытягивают пучок отрицательных ионов водорода с энергией до 25 кэВ. В магнитном поле источника ионов пучок поворачивают

на угол 15°, после чего фокусируют магнитной линзой 2 на вход ускорителя 11, где ускоряют до энергии 1 МэВ. В газовой обдирочной мишени 7, установленной внутри высоковольтного электрода 5 ускорителя, отрицательные ионы водорода превращаются в протоны, которые тем же потенциалом 1 МВ ускоряются до энергии 2 МэВ.

Потенциал на высоковольтный электрод 5 и пять промежуточных электродов 6 ускорителя подаются от высоковольтного источника напряжения 10 через проходной изолятор 9, в котором установлен омический делитель. Откачку газа осуществляют турбомолекулярными насосами 8, установленными у источника ионов и на выходе ускорителя, и криогенным насосом 4 через жалюзи электродов.

Вакуумная часть высоковольтного проходного изолятора (рис. 2) собрана из 24-х кольцевых стеклянных изоляторов диаметром 394 мм и высотой 35 мм, вакуумно-плотно стянутых с промежуточными электродами. Газовая часть изолятора, расположенная в баке высоковольтного выпрямителя, состоит из 14-ти керамических колец диаметром 394 мм и высотой 30 и 60 мм, склеенных с электродами. Внутренняя часть проходного изолятора заполнена элегазом SF₆ при давлении 0.3 МПа. Бак высоковольтного выпрямителя заполнен элегазом при давлении 0.8 МПа.

Общее сопротивление резистивного делителя напряжения проходного изолятора составляет

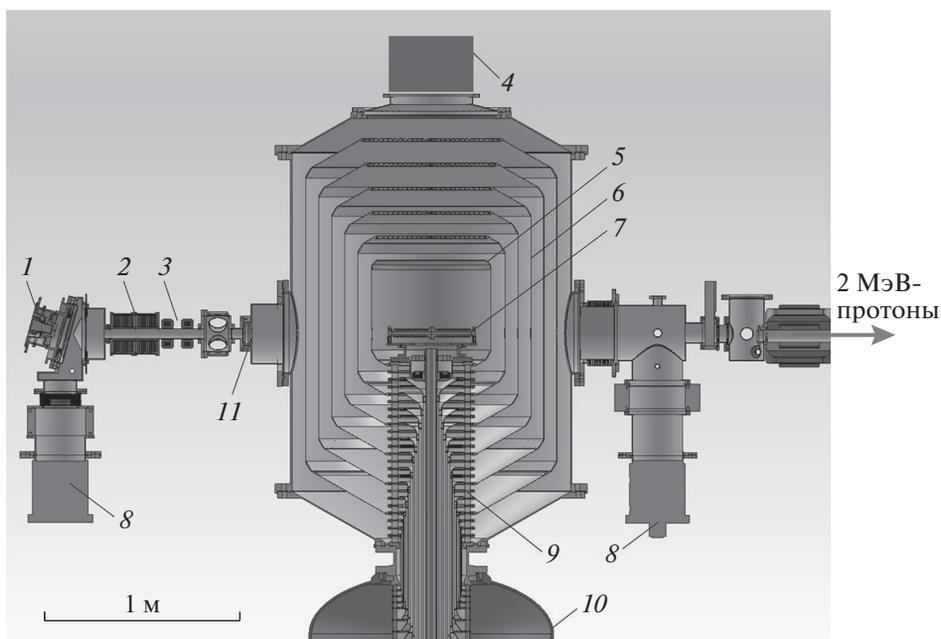


Рис. 1. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. 1 – источник отрицательных ионов водорода; 2 – магнитные линзы; 3 – корректоры; 4 – криогенный насос; 5 – высоковольтный электрод; 6 – промежуточные электроды; 7 – газовая обдирочная мишень; 8 – турбомолекулярный насос; 9 – проходной изолятор; 10 – высоковольтный источник питания; 11 – место размещения входной диафрагмы ускорителя.

1.8 ГОм. Резисторы, расположенные вокруг нижней газовой части проходного изолятора, распределяют потенциал на промежуточные ускоряющие электроды через электроды газовой части изолятора, металлические тонкостенные трубы, различные по длине и диаметру и расположенные коаксиально внутри проходного изолятора, и электроды верхней вакуумной части изолятора. Распределение потенциала на электродах вакуумной части изолятора, гальванически не связанных с коаксиальными трубками, задают резисторы, расположенные внутри вакуумной части проходного изолятора.

Проходной изолятор позволяет получить напряжение 1 МВ и работать в течение длительного времени. Повышение напряжения U до 1.15 МВ, как показано на рис. 3, достижимо. Выдержкой под напряжением осуществляется тренировка ускоряющих зазоров, и со временем уменьшаются остаточное давление $P_{\text{вак}}$, темновой ток $I_{\text{темн}}$ и мощность дозы D рентгеновского излучения.

В то же время темновой ток в ускоряющих зазорах остается значительным. Из-за этого в относительно маломощном резистивном делителе напряжения возникает перераспределение потенциала промежуточных электродов, что приводит к увеличению напряженности электрического

поля в отдельных ускоряющих зазорах и к высоковольтному пробое по поверхности изолятора.

Наибольший урон состоял в выгорании резисторов делителя напряжения (рис. 4), размещенного внутри проходного изолятора, из-за провисания цепочек резисторов вследствие значительного выделяемого тепла в ограниченном пространстве. Замена сопротивлений занимала длительное время, поскольку требовала полной разборки ускорителя и проходного изолятора.

Для решения проблемы с выгоранием резисторов было предложено увеличить высоту отдельных изоляторов в два раза и избавиться от той части омического делителя, которая находится внутри проходного изолятора, т.е. оставить в верхней вакуумной части проходного изолятора только электроды, электрически соединенные с электродами нижней газовой части внутренними коаксиальными металлическими трубками. Поскольку в проходном изоляторе также был убран ряд электродов изолятора, то для сохранения общей высоты проходного изолятора требовалось увеличить высоту отдельных изоляторов с 35 до 73 мм. Это привело к увеличению напряжения на единичном изоляторе с 50 до 100 кВ и потребовало экспериментальной проверки.

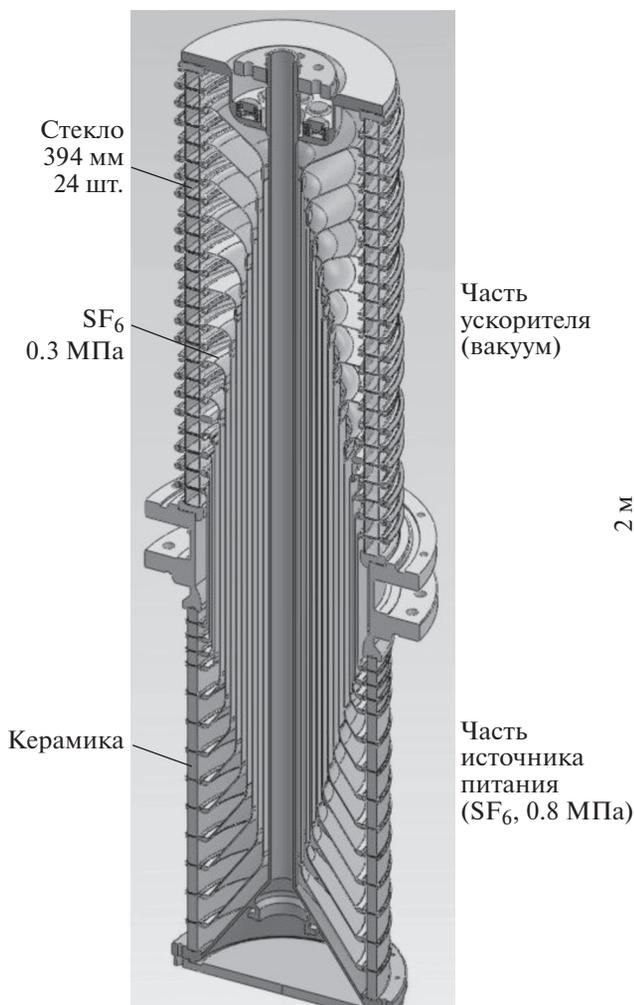


Рис. 2. Схема конструкции проходного изолятора ускорителя.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯТОРОВ

Для экспериментального исследования электрической прочности изоляторов сконструирован и изготовлен стенд. Испытуемый изолятор, вакуумно-плотно стянутый между заземленным и высоковольтным электродами, расположен внутри вакуумного объема высоковольтного стенда. Через высоковольтный ввод на испытуемый изолятор подавали высокое напряжение. Уровень мощности дозы рентгеновского излучения измеряли дозиметром.

Исследованию были подвергнуты керамические кольца высотой 73 мм, с внешним диаметром 394 мм и внутренним 336 мм, с гладкой (рис. 5а) и ребристой (рис. 5б) вакуумными поверхностями. Давление остаточного газа при проведении эксперимента составляло $2 \cdot 10^{-4}$ Па.

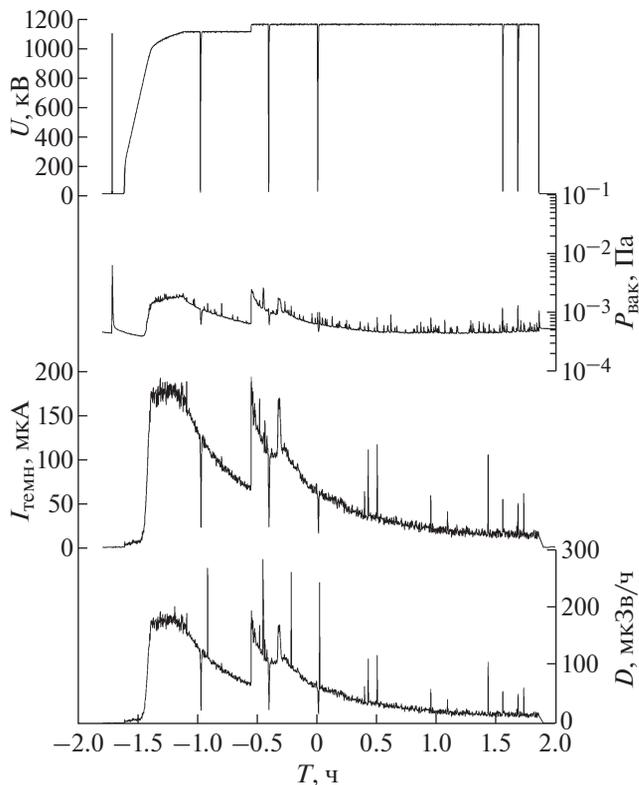


Рис. 3. Графики подъема напряжения на ускорителе.

На рис. 6 представлен график подъема напряжения на керамических изоляторах с гладкой (рис. 6а) и ребристой (рис. 6б) поверхностями. На обоих изоляторах получено требуемое напряжение 100 кВ, и любой из них может быть использован для решения проблемы с выгоранием резисторов, размещенных внутри проходного изолятора.

Было принято решение использовать керамические изоляторы с гладкой наружной поверхностью, поскольку они технологически более просты в изготовлении. Вместе с тем тренировка изолятора с ребристой поверхностью проходила быстрее, и максимальное напряжение, при котором не происходило множественных пробоев, составило 140 кВ, тогда как на изоляторе с гладкой поверхностью эта величина равна 120 кВ.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОХОДНОГО ИЗОЛЯТОРА

По результатам исследования электрической прочности отдельных керамических колец осуществлена модернизация проходного изолятора. Для этого стеклянные кольца в верхней вакуумной части проходного изолятора (рис. 7а) заменены на гладкие керамические кольца (рис. 7б). В первом

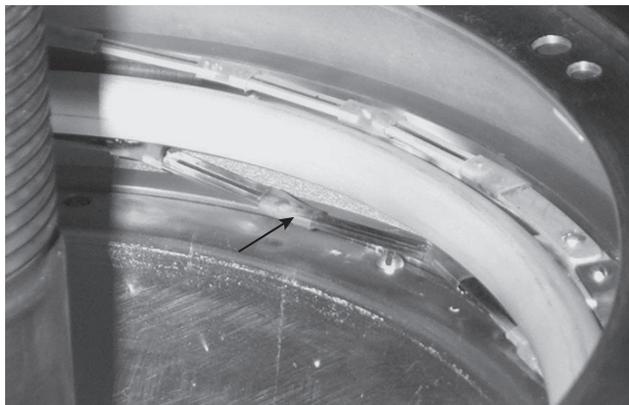


Рис. 4. Провисание и выгорание части делителя (показано стрелкой), находящегося внутри проходного изолятора.

ускорительном зазоре использовано четыре кольца высотой по 35 мм, в остальных пяти — по два кольца высотой по 73 мм.

Изолятор нижней газовой части остался прежний. Общая высота проходного изолятора не изменилась. Также был изготовлен и установлен снаружи нижней газовой части проходного изолятора новый резистивный делитель напряжения с суммарным сопротивлением 1.8 ГОм.

После установки нового проходного изолятора в ускоритель и стандартной тренировки, проводимой после вскрытия на атмосферу, напряжение 1 МВ было достигнуто без каких-либо отличий от процедуры, применяемой ранее. Это означало, что повышение напряжения на единичном изоляторном кольце в два раза за счет увеличения его высоты в два раза не привело к каким-либо ограничениям в достижении требуемого напряжения или к ухудшению его надежности.

На рис. 8 представлены результаты эксперимента по получению напряжения 1.15 МВ. Первый пробой прошел при напряжении выше 1 МВ, и требуемое напряжение 1.15 МВ получено при наличии нечастых пробоев. После этого за 2 ч тренировки напряжение было повышено до 1.21 МВ и продержалось на этом уровне в течение 1 ч при одном пробое. Затем напряжение было снижено до 1.15 МВ и достигнута его стабилизация на этом уровне в течение более 1 ч, как это следует из рис. 9, сопровождаемая снижением темнового тока и уровня мощности дозы тормозного излучения.

Для наблюдения разрядов и пробоев в вакуумном баке ускорителя были просверлены отверстия, в которые вварены патрубки КФ с окнами. На патрубки с окнами установлены видеокамеры Hikvision (Китай). Две камеры были направлены на входную диафрагму первого ускоряющего электрода, две камеры — на выходную диафрагму



Рис. 5. Керамический изолятор с гладкой (а) и ребристой (б) наружной поверхностью.

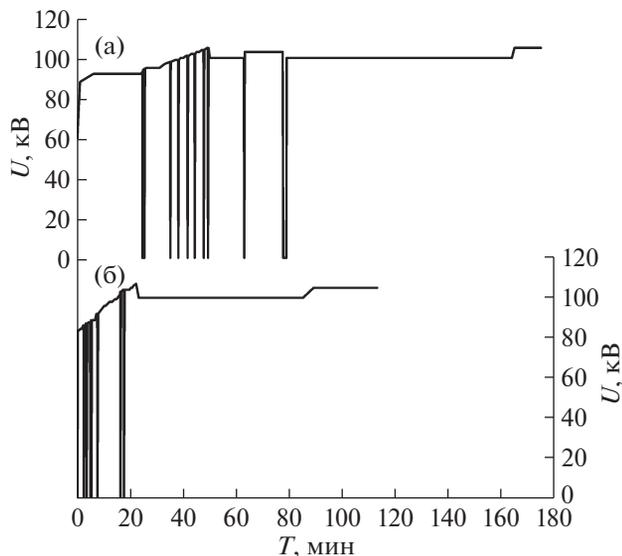


Рис. 6. Подъем напряжения на изоляторах высотой 73 мм с гладкой (а) и ребристой (б) наружными поверхностями.

первого ускоряющего электрода и две камеры сверху смотрели на первый ускоряющий зазор.

На один из патрубков в нижнем конусе вакуумного бака ускорителя была установлена видеокамера, направленная на керамические изоляторы высотой 35 мм. На втором патрубке в нижнем конусе вакуумного бака ускорителя была закреплена галогенная лампа LFP-10WP-R (Shibuya, Япония) для подсветки. Еще одна камера была установлена на торце горизонтального тракта транспортировки пучка протонов, она смотрела вдоль ускоряющего канала.

Видеокамерами зарегистрированы разряды и пробой. Фотографии пробоев по поверхности керамических колец проходного изолятора приведены на рис. 10. После пробоя на поверхности изолятора остается видимый трек (рис. 11б). Стоит заметить, что молния может пройти совсем рядом с ранее образовавшимся треком, как это видно на рис. 10а.

Наблюдение за разрядами позволяет утверждать, что перед вспышкой молнии в одном из ускоряющих зазоров загорается разряд с током от 1 до 3 мА. Протекание тока такой величины в зазоре приводит к уменьшению напряжения в этом зазоре и к увеличению напряжения в других ускоряющих зазорах, поскольку потенциал на промежуточные электроды задается относительно маломощным омическим делителем напряжения 1.8 ГОм.

Стоит обратить внимание на то, что средняя напряженность электрического поля по поверхности изолятора составляет 14 кВ/см, что в 1.4 ра-

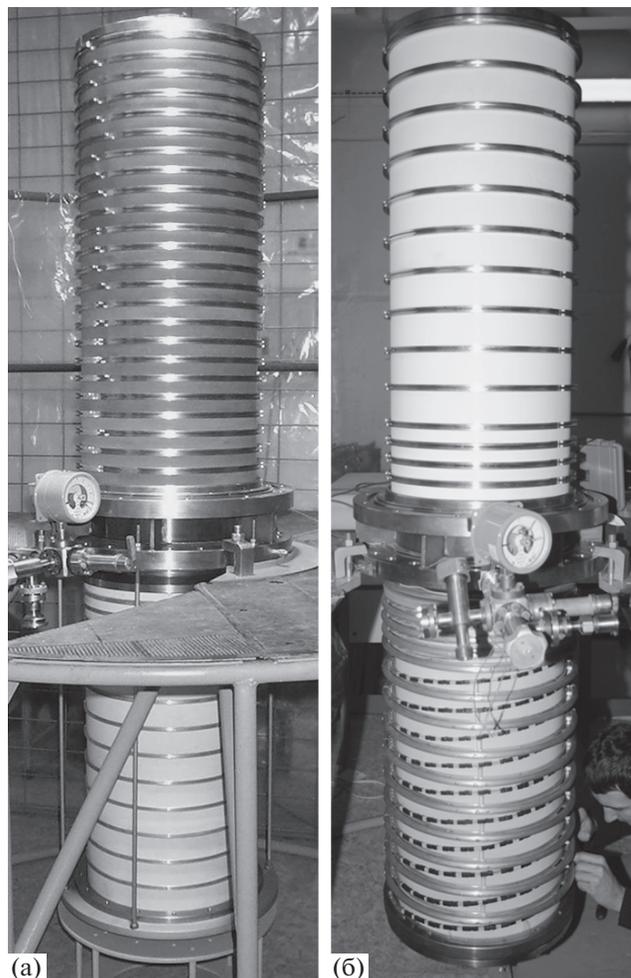


Рис. 7. Фотографии проходного изолятора со стеклянными кольцами высотой 35 мм (а) и с гладкими керамическими кольцами высотой 73 и 35 мм (б).

за выше рекомендуемой для работы без пробоев. Естественно, что при загорании разряда в одном из зазоров в остальных зазорах напряженность электрического поля возрастает еще сильнее и происходит пробой.

При получении пучка протонов и генерации нейтронов в результате реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ программное обеспечение системы управления и сбора данных установки автоматически восстанавливает параметры ускорителя за 10 с после пробоя. Пробои, приводящие к временному прекращению генерации нейтронов, происходят каждые 3–10 мин и, в принципе, могут не мешать проведению терапии, но избавление от них желательно.

Для решения этой проблемы есть два пути. Первый – увеличить высоту отдельных изоляторов в 1.4 раза, что приведет к увеличению габаритов ускорителя и повышению энергии, запасен-

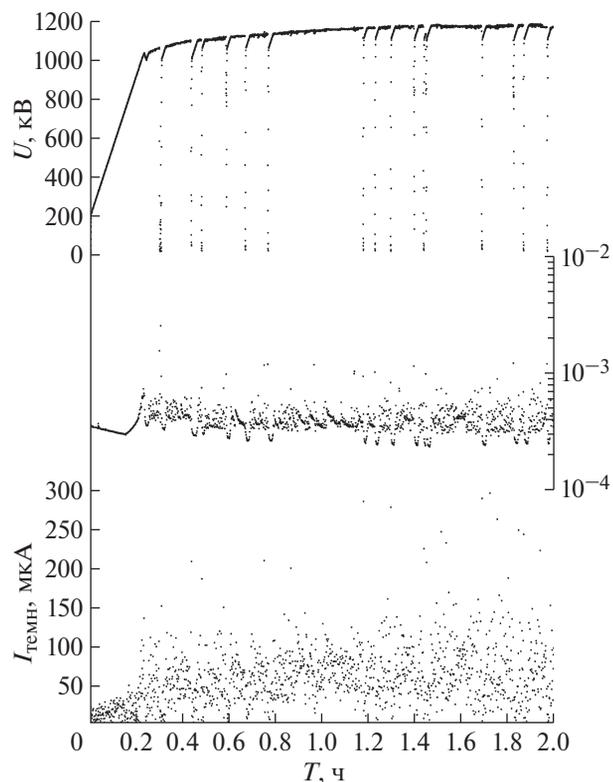


Рис. 8. Графики зависимости напряжения U , остаточного давления $P_{\text{вак}}$, темнового тока $I_{\text{темн}}$ на ускорителе от времени T при подъеме напряжения.

ной в ускоряющих зазорах. Второй – сделать поверхность вакуумной части керамических колец гофрированной, что увеличит путь вдоль поверхности изолятора и, как следствие, снизит среднюю напряженность электрического поля по поверхности. Ранее нами по результатам испытаний на стенде установлено, что ребристая поверхность обеспечивает повышение электрической прочности до 1.5 раза по сравнению с гладкой поверхностью [6].

Однако гофрирование также приводит к повышению максимальной напряженности поля в некоторых местах, поскольку эквипотенциали электрического поля в конструкции компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией не перпендикулярны поверхности гладких керамических колец, поэтому не очевидно, какой эффект будет преобладающим.

Керамические кольца с ребристой наружной вакуумной поверхностью были изготовлены (рис. 12) и установлены вместо гладких керамических изоляторов в проходном изоляторе. Радиус ребер и впадин был выбран 1 мм, исходя из ранее полученных результатов [6]. Высота новых отдельных

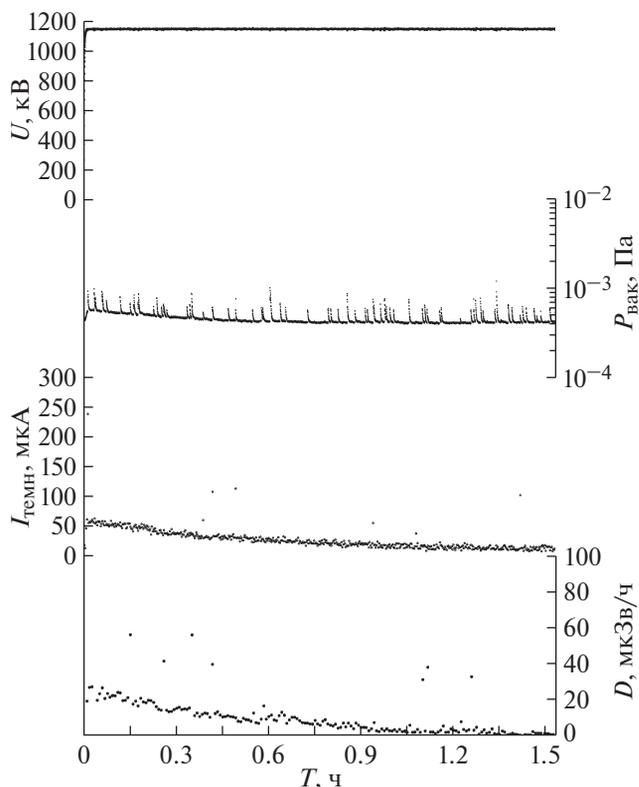


Рис. 9. Графики зависимости напряжения U , остаточного давления $P_{\text{вак}}$, темнового тока $I_{\text{темн}}$ и мощности тормозного излучения D ускорителя при выставлении напряжения на уровне 1.15 МВ.

ребристых керамических изоляторов не изменилась. Общая высота проходного изолятора также осталась прежней.

После установки проходного изолятора с ребристой наружной вакуумной поверхностью керамических колец и стандартной тренировки ускорителя напряжение 1 МВ было достигнуто за время, в два раза меньшее, и с меньшим количеством пробоев, чем на проходном изоляторе с гладкой керамической поверхностью колец (рис. 13). Затем напряжение было повышено до 1.2 МВ (рис. 14), при этом в течение 1 ч прошло всего 2 пробоя. Величина темнового тока снизилась и не превышала 20 мкА.

В третьей серии экспериментов поднялись до уровня рабочего напряжения 1.15 МВ без пробоев (рис. 15). Заметим, что средняя напряженность электрического поля на изоляторе с гладкой поверхностью составила ~ 14 кВ/см, а на изоляторе с ребристой вакуумной поверхностью, с учетом увеличения ее длины, ~ 9 кВ/см. Эта величина часто приводится в литературных источниках как обеспечивающая требуемую прочность.

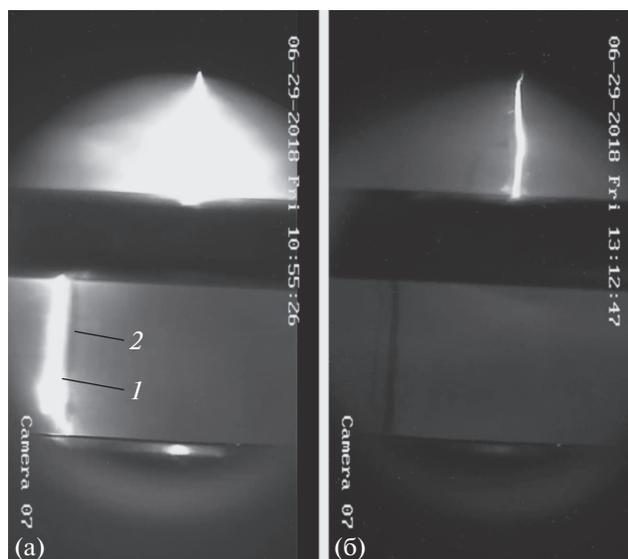


Рис. 10. Фотографии пробоев по поверхности изолятора: 1 – текущий пробой, 2 – трек, образовавшийся от ранее прошедшего пробоя.

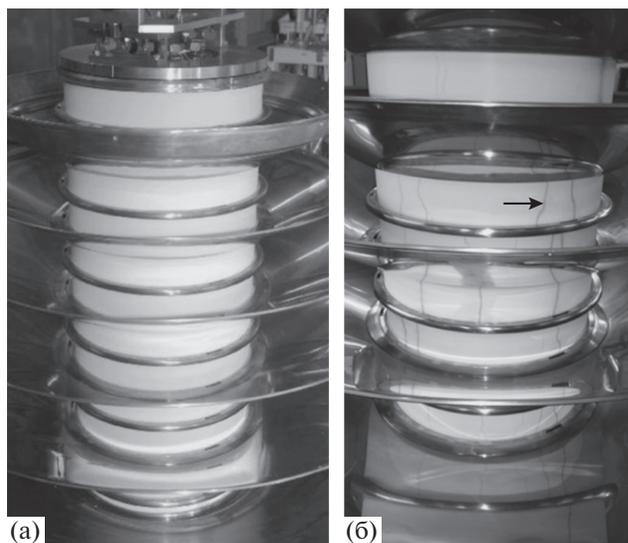


Рис. 11. Фотографии гладкой керамической поверхности изолятора до (а) и после тренировки со следами пробоев (б). Стрелка указывает на один из треков, образовавшихся после пробоя.

Рабочее напряжение 1.15 МВ продержалось 1.5 часа без пробоев. Требуемый режим работы ускорителя был достигнут. Следовательно, электрическую прочность ускорителя удалось повысить за счет уменьшения средней напряженности электрического поля по поверхности изолятора до 8.4 кВ/см,

при этом максимальная напряженность в некоторых местах достигала 21 кВ/см.

После шести месяцев эксплуатации, в течение которых обеспечивалось получение пучка протонов и генерация нейтронов без пробоев, установка была разобрана. Было обнаружено, что на реб-

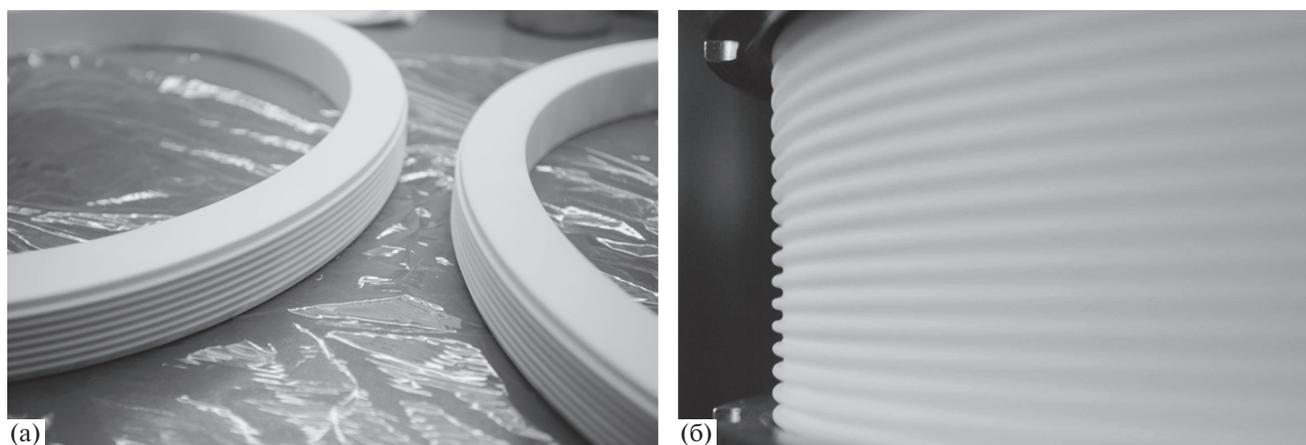


Рис. 12. Керамические изоляторы с ребристой наружной поверхностью высотой 35 мм (а) и 70 мм (б).

ристой вакуумной поверхности проходного изолятора следов от пробоев нет (рис. 16). Даже те редкие пробои, которые случались при подъеме напряжения и тренировке, вероятнее всего, не были связаны с пробоями по поверхности изолятора.

Таким образом, экспериментально установлено, что применение в проходном изоляторе единичных керамических колец удвоенной высоты с ребристой вакуумной поверхностью и отказ от использования части резистивного делителя

внутри проходного изолятора оправданы: напряжение 1.15 МВ получено и надежность работы ускорительного источника нейтронов существенно повышена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН создан и функционирует источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени, предназначенный для развития перспективной методики лечения злокачественных опухолей – бор-нейтронозахватной терапии и других приложений.

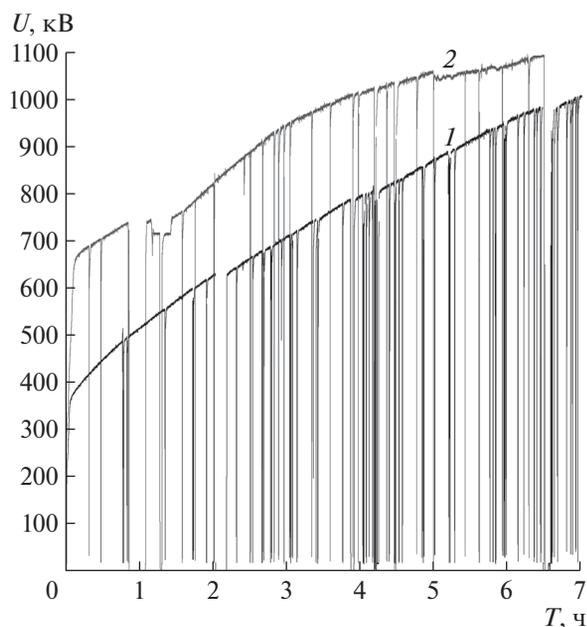


Рис. 13. Графики первого подъема напряжения на ускорителе: 1 – для гладкой керамической поверхности изолятора, 2 – для ребристой поверхности керамики.

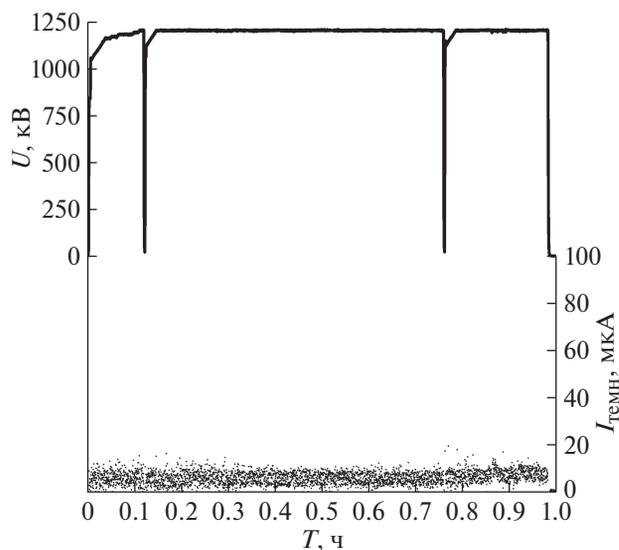


Рис. 14. Графики зависимости напряжения U и темнового тока $I_{\text{темн}}$ от времени T на ускорителе.

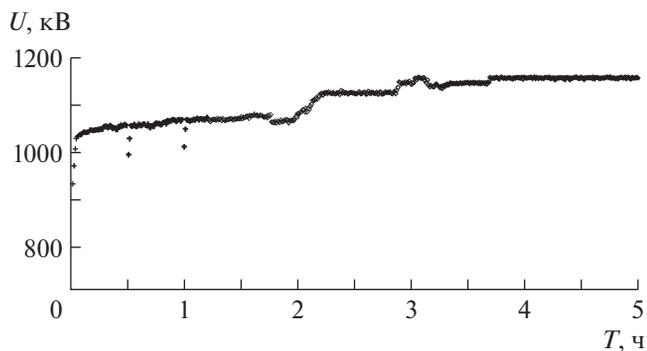


Рис. 15. График зависимости напряжения U на ускорителе от времени T при подъеме и выстойке на уровне 1.15 МВ.

Для решения задач, связанных с получением терапевтического пучка нейтронов, в наибольшей степени удовлетворяющего требованиям бор-нейтронозахватной терапии, необходимо было повысить энергию протонов с 2 до 2.3 МэВ, т.е. повысить напряжение тандемного ускорителя с 1 до 1.15 МВ. Для достижения поставленной цели изучена электрическая прочность керамических изоляторов и проведена модернизация проходного изолятора, на первом этапе состоящая в замене стеклянных колец на гладкие керамические кольца удвоенной высоты, что позволило также отказаться от размещения части резистивного делителя напряжения внутри проходного изолятора, а на втором – в замене гладких керамических колец на гофрированные.

В результате проведенных исследований установлено, что повышение электрической прочности проходного изолятора достигается снижением средней напряженности электрического поля по поверхности изолятора за счет гофрировки, несмотря на формирование локальных мест с повышенной напряженностью поля. После модернизации в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией получено требуемое напряжение 1.15 МВ и обеспечен режим работы без высоковольтных пробоев, что важно для применения источника нейтронов в терапии и для других приложений.

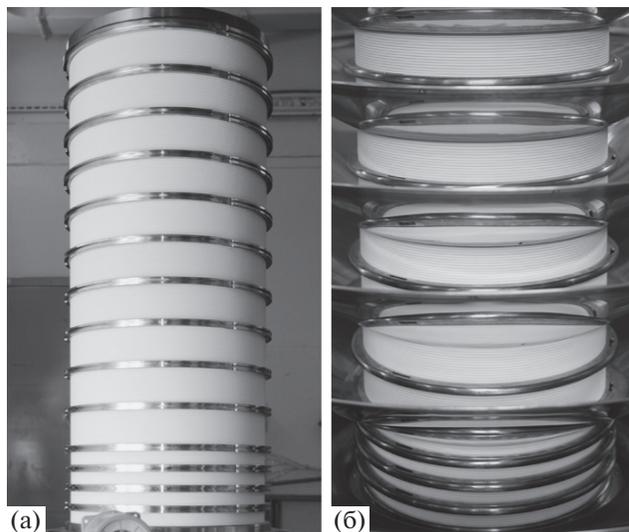


Рис. 16. Фотографии ребристой поверхности керамического изолятора до (а) и после тренировки (б).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005) при поддержке Института ядерной физики СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Таскаев С.Ю.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. № 6. С. 1770. <https://doi.org/10.1134/S1063779615060064>
2. Neutron Capture Therapy: Principles and Applications / Eds. W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa. Springer, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31334-9>
3. *Sato E., Zaboronok A., Yamamoto T., Nakai K., Taskaev S., Volkova O., Mechetina L., Taranin A., Kanygin V., Isobe T., Mathis B., Matsumura A.* // J. Radiat Res. 2018. V. 59. P. 101. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrx071>
4. *Таскаев С.Ю.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2019. Т. 50. № 5. С. 657. <https://doi.org/10.1134/S1063779619050228>
5. *Zaidi L., Belgaid M., Taskaev S., Khelifi R.* // Applied Radiation and Isotopes. 2018. V. 139. P. 316. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.05.029>
6. *Kolesnikov Ya., Sorokin I., Taskaev S.* // Proc. 27th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Suzhou, China, 2016. V. 2. P. 778. <https://doi.org/10.1109/DEIV.2016.7764033>