

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ СЕКЦИОНИРОВАННЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ ДЛЯ КОМПАКТНОГО УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

© 2017 г. Е. В. Домаров<sup>a</sup>, А. А. Иванов<sup>a, b</sup>, Н. К. Куксанов<sup>a</sup>, Р. А. Салимов<sup>a</sup>,  
И. Н. Сорокин<sup>a,\*</sup>, С. Ю. Таскаев<sup>a, b, \*\*</sup>, В. Г. Черепков<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

<sup>b</sup>Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

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

\*\*e-mail: S.Yu.Taskaev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 25.12.2015 г.

После доработки 11.02.2016 г.

В ИЯФ СО РАН создан прототип компактного секционированного источника высокого напряжения для модернизации ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. В отличие от существующего источника напряжения, в новом варианте появляется возможность задавать потенциал на ускоряющих электродах непосредственно от секций выпрямителя, а также уменьшать высоту ускорителя. В работе представлена конструкция нового источника и приведены результаты проведенных испытаний.

DOI: 10.7868/S0032816216060161

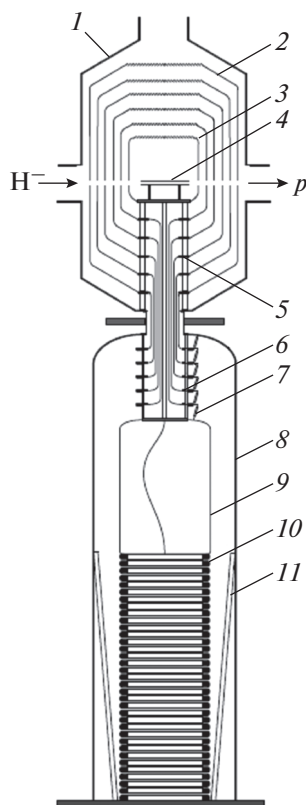
В ИЯФ СО РАН для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей [1] разработан источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой нейтроногенерирующей мишени [2–4]. В ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией (рис. 1) сначала ускоряются отрицательные ионы водорода, внутри высоковольтного электрода в обдирочной мишени они превращаются в протоны, которые тем же потенциалом ускоряются до удвоенной энергии.

В качестве высоковольтного источника напряжения использован секционированный выпрямитель промышленного ускорителя электронов серии ЭЛВ [5]. Для обеспечения стабильности фокусировки и ускорения ионного пучка предложено задавать потенциал промежуточных электродов не с помощью омического делителя, а непосредственно от секций выпрямителя [6].

В работе описана конструкция выпрямителя, который позволит подавать потенциал на промежуточные электроды ускорителя напрямую от его соответствующих секций, что должно уменьшить влияние темновых токов и переходных процессов на работу ускорителя. Также приводятся результаты испытаний выпрямителя.

В новой конструкции предусматривается размещение части проходного изолятора ускорителя, находящегося под давлением элегаза, непосредственно внутри секционированного выпрямителя. Конструкция выпрямителя приведена на рис. 2, внешний вид высоковольтной колонны показан на рис. 3. Сосуд 1 устанавливается на подставку 2. Первичная обмотка 3 опирается на опоры 4, установленные на нижнем фланце обечайки сосуда. Элементы цилиндрического магнитопровода 6 крепятся непосредственно к основанию первичной обмотки. Выпрямительная колонна из семнадцати секций 9 собрана на усиленном стеклотекстолитовом основании 10 высоковольтного электрода 11. На этом же основании на стойках 12 и дюралево-дисковом электроде 13 соосно колонне крепится газовая часть проходного изолятора ускорителя 14. Сверху изолятор закрыт дисковым дюралевым электродом 15.

Для защиты электродов изолятора от переменного магнитного поля изолятор экранирован 14-ю медными короткозамкнутыми кольцами 16 диаметром 400 и высотой 46 мм. Кольца изолятора соединены контактными проводниками с секциями выпрямительной колонны.



**Рис. 1.** Схема ускорителя-тандема в вакуумной изоляции. 1 – бак ускорителя-тендема; 2 – промежуточные ускоряющие электроды; 3 – высоковольтный электрод; 4 – газовая перезарядная мишень; 5 – вакуумная часть проходного изолятора; 6 – газовая часть проходного изолятора; 7 – резистивный делитель; 8 – бак высоковольтного источника (секционированного выпрямителя); 9 – высоковольтный электрод выпрямителя; 10 – секции выпрямителя; 11 – первичная обмотка выпрямителя.  $H^-$  – пучок отрицательных ионов водорода;  $p$  – протонный пучок.

Собранная колонна подвешивается к донному магнитопроводу с помощью трех тяг 17, которые размещаются внутри опор выпрямительных секций.

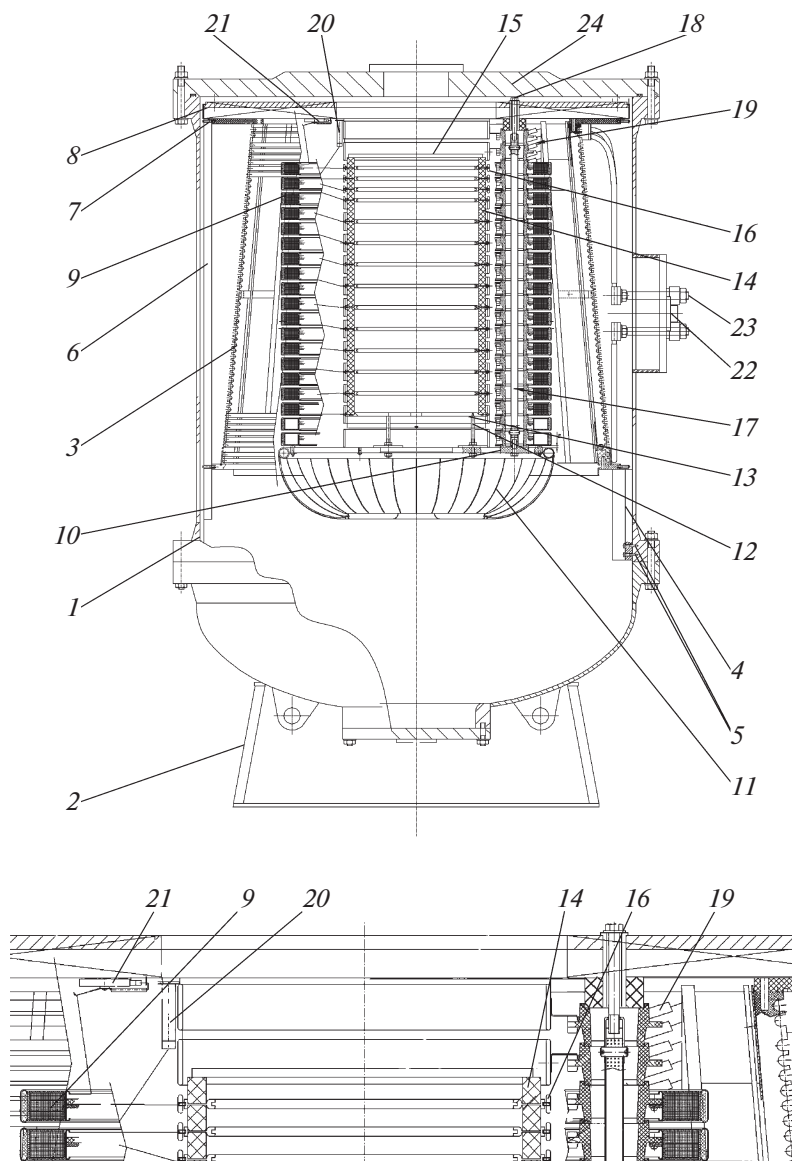
Для измерения полного напряжения выпрямителя  $U_0$  в колонне установлен омический делитель 19, состоящий из 121 резистора с сопротивлением 100 МОм каждый. Напряжение первой секции  $U_c$  измеряется омическим делителем секции 20 с общим сопротивлением 1 ГОм. Полный ток выпрямителя  $I_0$  измерялся через датчик 21. Все измерительные цепи  $U_0$ ,  $U_c$ ,  $I_0$  выводятся через разъем 22 на боковом фланце сосуда. Напряжение питания первичной обмотки 3 подается через стандартные вводы 23.

Поворот выпрямителя на  $180^\circ$  по сравнению с первоначальной конструкцией привел к изменению опорных точек большинства конструктивных узлов. Вследствие этого все узлы выпрямителя (первичная обмотка, выпрямительная колонна, донный магнитопровод) установлены в обечайке сосуда на опорах 4. Каждая опора крепится к

фланцу обечайки сосуда. Расчеты показали, что при общем весе всех узлов выпрямителя 560 кг коэффициент запаса прочности данной конструкции составил 6.4.

В источнике высокого напряжения использовалась первичная обмотка ускорителя ЭЛВ-05-03. Она имеет 28 витков, намотанных на каркас сдвоенной медной трубкой. Высота каркаса равна 993 мм, максимальный диаметр экрана – 1010 мм. Смонтированная в сосуде внутренним диаметром 1200 мм и высотой 1900 мм первичная обмотка проверялась на исправность при максимально возможном напряжении 400 В с частотой 426 Гц и током 250 А в течение 12 мин. Испытание показало полную работоспособность первичной обмотки при нагрузках в рабочем диапазоне.

Оценка прочности оргстеклянных тяг высоковольтной колонны при массе высоковольтной колонны в сборе с изолятором, медными кольцами и высоковольтным электродом 336 кг (рис. 3) показала двукратный запас. В собранном виде выпрямитель находился в течение трех месяцев.



**Рис. 2.** Конструкция выпрямителя. 1 – сосуд высокого давления; 2 – подставка под сосудом высокого давления; 3 – первичная обмотка; 4 – опора первичной обмотки; 5 – винты для крепления опор первичной обмотки; 6 – магнитопровод первичной обмотки; 7 – крепления магнитопровода первичной обмотки; 8 – донный магнитопровод; 9 – выпрямительные секции; 10 – текстолитовое основание; 11 – высоковольтный электрод; 12 – стойки высоковольтного электрода; 13 – дюралевый дисковый электрод; 14 – газовая часть проходного изолятора ускорителя; 15 – дисковый дюралевый электрод; 16 – медные короткозамкнутые кольца; 17 – тяги высоковольтной колонны; 18 – гайки крепления тяг; 19 – делитель энергии; 20 – делитель первой секции; 21 – датчик тока; 22 – разъем для измерительных сигналов; 23 – вводы первичной обмотки; 24 – днище сосуда.

Осмотр тяг при его разборке показал отсутствие заметных деформаций. Собранный и испытанный на воздухе выпрямитель помещался в герметично закрываемый сосуд и испытывался в среде элегаза ( $SF_6$ ) при давлении до 0.5 МПа.

Напряжение, наводимое на катушку выпрямительной секции в колонне, измерено с помощью кольцевой измерительной катушки с 30 витками, которую помещали на расстоянии  $h$  от дон-

ного магнитопровода. Диаметр катушки равен 695 мм, что соответствует диаметру среднего витка катушки выпрямительной секции. Распределение напряжения измерялось как с установленными медными экранирующими кольцами, так и без них.

На рис. 4 приведены графики зависимости  $U = f(h)$ , измеренные при действующем напряжении на первичной обмотке  $U_1 = 100$  В. Область,

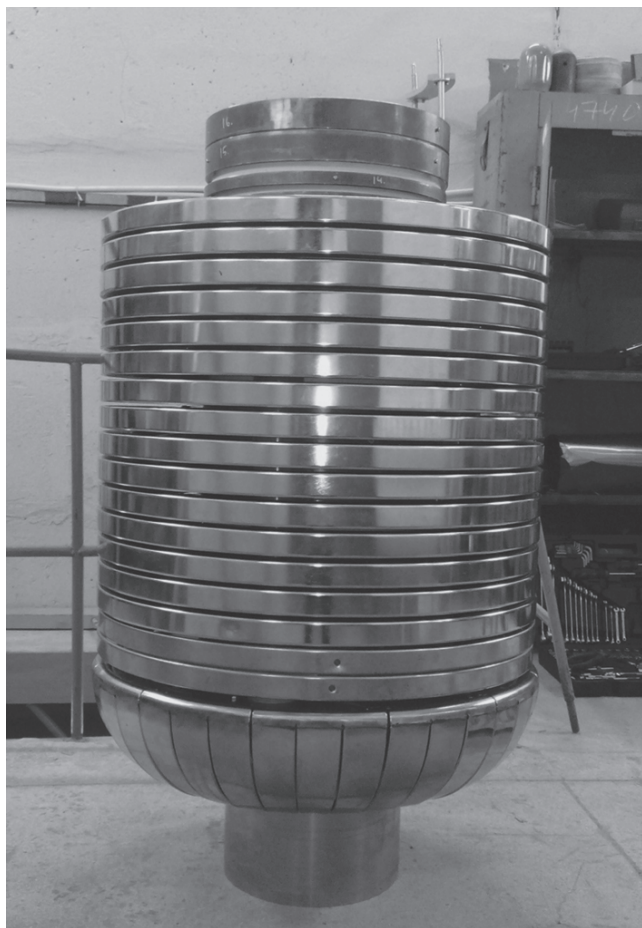


Рис. 3. Внешний вид высоковольтной колонны.

соответствующая  $n$  секциям выпрямительной колонны, расположена между ординатами  $U_{n1}$  и  $U_{n17}$ . Ниже приведены оценочные значения величин напряжений в выпрямительной колонне: напряжение первой секции  $U_{c1}$  равно 12.4 кВ при  $U_1 = 100$  В; среднее напряжение секции  $U_{c\text{cp}}$  равно 12.7 кВ при  $U_1 = 100$  В, 35.3 кВ при  $U_1 = 600$  В и 41.2 кВ при  $U_1 = 700$  В; максимальное напряжение  $U_{c\text{max}}$  равно 13.5 кВ при  $U_1 = 100$  В, 37.5 кВ при  $U_1 = 600$  В и 43.7 кВ при  $U_1 = 700$  В; полное напряжение источника  $U_0 = 217.1$  кВ при  $U_1 = 100$  В; среднее напряжение витка катушки секции  $U_{\text{витка}} = 1.51$  В при  $U_1 = 100$  В; отношение  $U_{1\text{витка}}/U_{\text{витка}}$  ( $U_{\text{витка}}/U_{1\text{витка}} = 2.36$  (0.42)).

Проверка степени нагрева медных экранирующих колец проведена при напряжении на первичной обмотке 400 В, токе 288 А в течение 30 мин. Выяснено, что первое от высоковольтного электрода кольцо (рис. 2) нагрелось до температуры 60°C и значение тока в кольце составило 458 А. Остальные экранирующие кольца нагрелись до

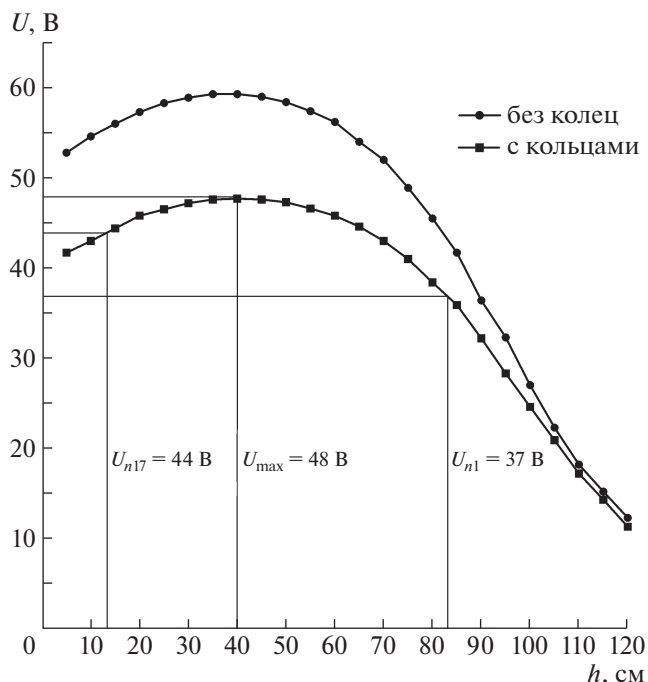


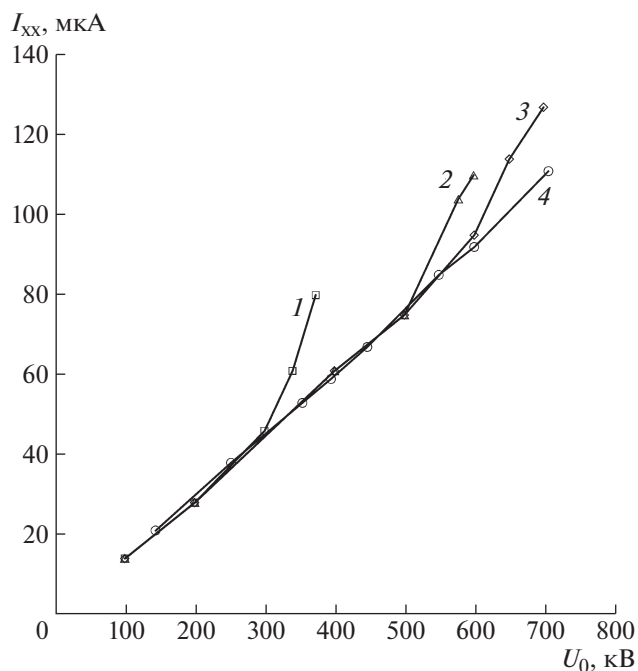
Рис. 4. Зависимость напряжения на измерительной катушке от высоты  $h$ .

40°C. Дисковый дюралевый электрод 15 (рис. 2) остался холодным – 25°C. Для уменьшения нагрева первого кольца между ним и высоковольтным электродом было поставлено дополнительное медное экранирующее кольцо.

При запуске выпрямителя на воздухе измеренные значения с точностью лучше 3% согласуются с расчетными значениями, полученными из данных рис. 4. Пробои по полному напряжению начались на воздухе при значении 125 кВ.

На рис. 5 приведена вольт-амперная характеристика выпрямителя после испытаний на полное напряжение 700 кВ при различных давлениях элегаза. Видно, что источник может эксплуатироваться при давлении элегаза  $P_{\text{SF}_6} = 0.5$  МПа.

Итак, разработан высоковольтный секционированный выпрямитель типа ЭЛВ, внутрь которого может быть вставлена газовая часть проходного изолятора ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Такая модификация позволяет подавать потенциал на промежуточные электроды ускорителя напрямую от соответствующих секций и уменьшить влияние темновых токов и переходных процессов, в частности ввода пучка в ускоритель, на оптические свойства ускорителя и, как следствие, на стабильность его работы. Применение такой конфигурации выпрямителя позволяет существенно уменьшить высоту всего



**Рис. 5.** Зависимость тока холостого хода  $I_{xx}$  от напряжения выпрямителя  $U_0$  при  $P_{SF_6}$ , МПа: 1 – 0.2; 2 – 0.3; 3 – 0.4; 4 – 0.5.

источника нейтронов, что дает возможность его размещения непосредственно в онкологических

клиниках.

На выпрямителе получено напряжение 700 кВ в длительном режиме. Планируется модифицировать выпрямитель для получения напряжения 1.15 МВ, требуемого для питания ускорителя.

Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор прикладных научных исследований – RFMEFI60414X0066).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neutron Capture Therapy. Principles and Applications / Eds. W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa. Springer, 2012. doi 10.1007/978-3-642-31334-9
2. Bayanov B., Belov V., Bender E., Bokhovko M., Dimov G., Kononov V., Kononov O., Kuksanov N., Palchikov V., Pivovarov V., Salimov R., Silvestrov G., Skrinsky A., Taskaev S. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. A413. P. 397. doi 10.1016/S0168-9002(98)00425-2
3. Kasatov D., Kuznetsov A., Makarov A., Shchudlo I., Sorokin I., Taskaev S. // J. Instrumentation. 2014. V. 9. P. 12016. doi 10.1088/1748-0221/9/12/P12016
4. Taskaev С.Ю. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. № 6. С. 1770. doi 10.1134/S1063779615060064
5. Salimov R., Cherepkov V., Golubenko Yu., Krainov G., Korabelnikov M., Kuznetsov S., Kuksanov N., Malinin A., Nemytov P., Petrov S., Prudnikov V., Fadeev S., Veis M. // Rad. Phys. Chem. 2000. V. 57. P. 661.
6. Sorokin I., Taskaev S. // Applied Radiation and Isotopes. 2015. V. 106. P. 101. doi 10.1016/j.apradiso. 2015.06.015