

## ГЕНЕРАТОР КОКРОФТА–УОЛТОНА В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

А. А. Кащеев<sup>a</sup>, Я. А. Колесников<sup>a, б</sup>, С. С. Савинов<sup>a, б</sup>,  
Н. Ш. Сингатулина<sup>a, б</sup>, И. Н. Сорокин<sup>a, б</sup>, С. Ю. Таскаев<sup>a, б, в</sup>

<sup>a</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>б</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>в</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Ускорительный источник нейтронов VITA в Институте ядерной физики СО РАН активно используют для генерации как потока эпипротермовых нейтронов с целью развития методики бор-нейтронозахватной терапии, так и потока быстрых нейтронов с целью радиационного тестирования перспективных материалов. Востребованность подобных источников нейтронов для широкого круга приложений, включая тестирование новых препаратов адресной доставки бора и облучение клеточных культур и лабораторных животных для развития методики бор-нейтронозахватной терапии, послужила основанием для разработки менее мощного, но компактного источника нейтронов, которым можно оснастить исследовательские группы для проведения ими данных научных исследований на постоянной основе. Главная идея состоит в том, чтобы вместо секционированного выпрямителя, подключаемого к ускорителю-тандему с вакуумной изоляцией через проходной изолятар, использовать генератор Кокрофта–Уолтона и разместить его в верхней вакуумной части проходного изолятара, исключив нижнюю газовую часть проходного изолятара, что кардинально уменьшил габариты и стоимость установки. Приводится описание симметричного каскадного умножителя Кокрофта–Уолтона, и даются его характеристики, представляются и обсуждаются результаты компьютерного моделирования идеальной и эквивалентной схем, результаты испытаний каскадного умножителя напряжения, а также планы дальнейших исследований.

The VITA accelerator based neutron source at the Budker Institute of Nuclear Physics is actively used both for the generation of epithermal neutron fluxes for the development of boron-neutron capture therapy and for the generation of fast neutron fluxes for radiation testing of promising materials. The demand for such neutron sources for a wide range of applications, including the testing of new boron-targeted drugs and irradiation of cell cultures and laboratory animals for the development of boron neutron capture therapy, has motivated the development of a less powerful but compact neutron source that can be used to equip research groups to carry out this research on a continuous basis. The basic idea is to use a Cockcroft-Walton generator instead of a sectioned rectifier connected to a vacuum-insulated tandem accelerator through a feedthrough insulator and to place it in the upper vacuum part of the feedthrough insulator, excluding the lower gas part of the feedthrough insulator, which significantly reduces the size and cost of the installation. The paper describes the Cockcroft-Walton symmetric cascade multiplier and gives its characteristics, presents and discusses the results of computer modelling of the ideal and equivalent circuits, test results of the cascade voltage multiplier, and plans for further research.

PACS: 84.30.Jc

## ВВЕДЕНИЕ

Генерация нейтронов на линейных ускорителях заряженных частиц происходит при взаимодействии ионов пучка с атомами мишени. Существуют различные нейтроногенерирующие ядерные реакции. На рис. 1 приведены кривые полного выхода нейтронов на 1 мкКл налетающего пучка. Наиболее перспективными из приведенных на рис. 1 реакций являются две —  $\text{Li}(p, n)$  и  $\text{Li}(d, n)$ .

Реакция  $\text{Li}(p, n)$  является пороговой с порогом генерации нейтронов 1,882 МэВ. При энергии налетающих протонов 2 МэВ в ходе реакции генерируется  $\sim 1,1 \cdot 10^{11}$  нейтронов на 1 мА тока протонов. Эта реакция применяется для генерации эпитетловых нейтронов, используемых для проведения исследований в области борнейтронозахватной терапии злокачественных опухолей [1, 2], таких как испытание препаратов адресной доставки бора, проведение испытаний на клеточных культурах, лабораторных и домашних животных.

$\text{Li}(d, n)$  — реакция беспороговая, и при энергии налетающих дейtronов 1 МэВ генерируется  $\sim 10^{12}$  быстрых нейтронов на 1 мА тока пучка. Эта реакция применяется для проведения испытаний по радиационному тестированию перспективных материалов. Так, в 2022 г. на ускорительном источнике нейтронов VITA [3] был проведен длительный заход по генерации быстрых нейтронов для ряда научных групп [4], был облучен ряд материалов [5–8]. На протяжении всего экспериментального захода генерация быстрых нейтронов осуществлялась со стабильностью 10 %. Материалы, в зависимости от их расположения, были облучены флюенсом быстрых нейтронов от  $3 \cdot 10^{13}$  до  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Результатом этого исследования, в первую очередь, стало подтверждение того, что ускорительный источник нейтронов VITA является действительно надежной установкой. Также это исследование показало, что генерация мощного потока быстрых нейтронов является актуальной задачей, как и создание предназначенных для этого компактных мощных генераторов быстрых нейтронов.

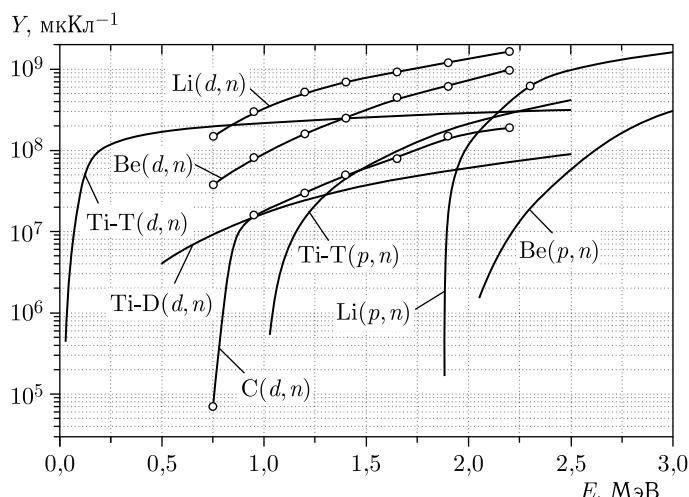


Рис. 1. Кривые полного выхода нейтронов основных нейтроногенерирующих ядерных реакций в зависимости от энергии на 1 мкКл налетающего пучка

## 1. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ VITA В КАЧЕСТВЕ ГЕНЕРАТОРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Ускорительный источник нейтронов VITA, который выступал в качестве генератора быстрых нейтронов, все-таки обладает некоторыми недостатками по отношению к такой задаче.

Во-первых, VITA проектировался и создавался для проведения исследований в области бор-нейтронозахватной терапии. Эта задача была выполнена. Действительно, получаемый пучок протонов на VITA удовлетворяет требованиям для проведения бор-нейтронозахватной терапии: энергия пучка варьируется от 0,3 до 2,3 МэВ, а ток пучка — от 1 нА до 10 мА. При этом VITA не оптимизирован для проведения дейтронного пучка. Так, ток пучка ограничивается 1,5 мА из-за оптики ионного источника, изначально разработанного для генерации пучка  $H^-$ , а энергия пучка ограничена 1,5 МэВ из-за поворотного магнита, также сконструированного и созданного для проведения пучка отрицательных ионов водорода.

Во-вторых, ускорительный источник нейтронов хоть и является относительно компактной установкой, но занимает три этажа помещения. Изначально ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией состоит из трех частей — высоковольтного источника питания серии ЭЛВ, проходного изолятора и ускоряющих электродов. Высоковольтный потенциал через проходной изолятор передается непосредственно на высоковольтный электрод, а промежуточные потенциалы передаются на промежуточные электроды через резистивный делитель.

В-третьих, на ускорительном источнике нейтронов проводится множество исследований: исследования, связанные с проведением бор-нейтронозахватной терапии, измерения полных и дифференциальных сечений ядерных реакций (к настоящему времени измерено 20), исследования по блистерингу на поверхности металлов при имплантации протонов и др.

По этим причинам актуальной задачей стала реализация идеи, изложенной в научной статье [9] и защищенной патентом [10]. Концепция ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией остается прежней: электроды и изоляторы разнесены друг от друга для сокращения расстояния, на котором ускоряется пучок. Однако теперь питание ускоряющих электродов будет реализовано непосредственно внутри верхней части проходного изолятора. В качестве питания для ускорителя-тандема выступит симметричный каскадный умножитель Кокрофта–Уолтона [11, 12]. Установка, предназначенная для генерации быстрых нейтронов на основе такого ускорителя, получила название VITAm<sub>i</sub>n.

## 2. ГЕНЕРАТОР КОКРОФТА–УОЛТОНА В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ VITAm<sub>i</sub>n

Каскадный умножитель напряжения будет располагаться внутри верхней части проходного изолятора ускорителя и включать в себя 12 ступеней каскада, каждая ступень цепи — внутри изолятора. Между изоляторами находятся электроды, к которым через одну секцию будут подводиться высоковольтные электроды тандемного ускорителя, как показано на рис. 2.

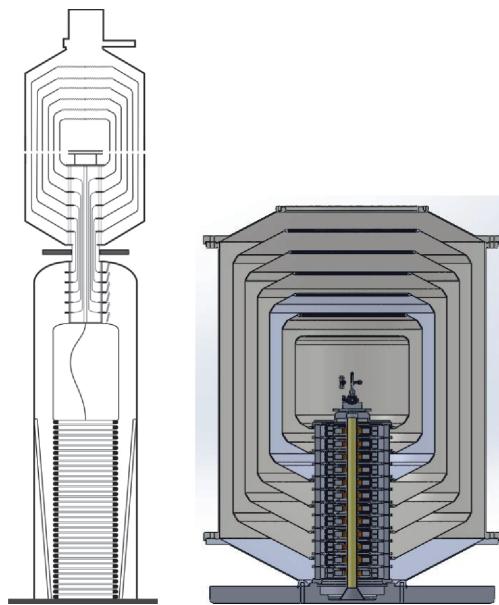


Рис. 2. Схема ускорителя-тандема VITA с источником питания ЭЛВ (слева), модель ускорителя-тандема VITAmín с генератором Кокрофта–Уолтона в качестве источника питания (справа)

В электрической схеме генератора подведенные электроды ускорителя отображены как подключенные параллельно емкости. Диоды соединяют два блока высоковольтных конденсаторов с переменным напряжением, которые питают центральный блок конденсаторов с постоянным напряжением. Для равномерного распределения электрического потенциала в конструкцию между ступенями каскада, параллельно конденсаторам колонны выпрямителя, внесены резисторы. Такая электрическая схема каскадного генератора с нагрузкой 500 МОм показана на рис. 3, что эквивалентно току проводимого пучка 1 мА. Ожидаемое выходное напряжение на каскадном генераторе при входном напряжении амплитудой 20 кВ и токе пучка 10 мА согласно расчетам приблизительно равно 435 кВ при падении напряжения на 46 кВ и пульсации 0,5 кВ. При выходном напряжении высоковольтного трансформатора до 24 кВ выходное напряжение генератора составит до 530 кВ, итоговое значение зависит от тока нагрузки генератора.

Выходное напряжение уменьшается за счет влияния паразитных параметров системы и нагрузки генератора. Конденсаторы в электрической цепи обладают собственными сопротивлением и индуктивностью. Была смоделирована эквивалентная электрическая схема изготавливаемого каскадного умножителя с учетом эффектов, связанных с наличием в системе паразитных параметров единичных элементов. Для этого было проведено моделирование происходящих процессов при зарядке генератора на частотах 75 и 10 кГц, поскольку требовалось определить параметры источника питания для высоковольтного трансформатора. На рис. 3, справа приведен график заряда каскадного умножителя. Кривая 1 соответствует напряжению на вы-

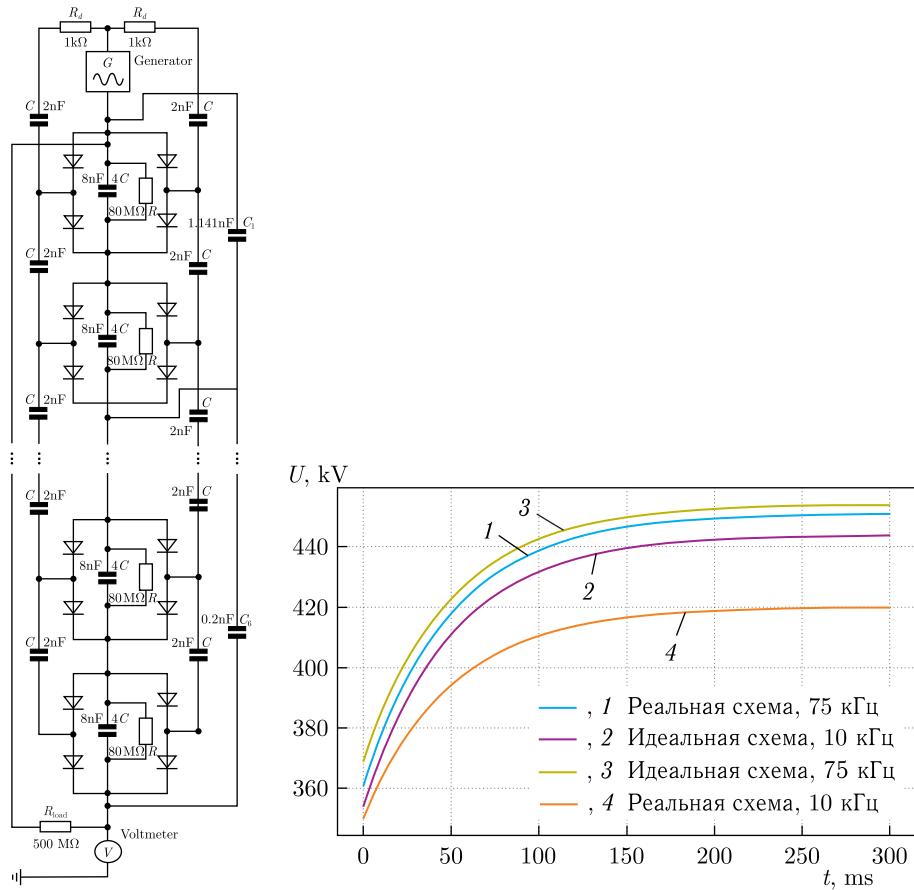


Рис. 3. Схема изготавливаемого каскадного умножителя с подключенными электродами ускорителя (слева), график выходных напряжений на каскадном умножителе при разных входных частотах напряжения (справа)

ходе реальной схемы с подведенными электродами ускорителя на частоте 75 кГц, кривая 3 — идеальной схеме аналогично с электродами. Также приведены результаты моделирования на частоте 10 кГц — кривые 4 и 2 соответственно. Очевидно, что использование источника питания с частотой 75 кГц целесообразнее, а увеличение падения напряжения за счет увеличения индуктивности рассеяния трансформатора несущественно.

Конструкция умножителя Кокрофта–Уолтона включает в своей схеме подходящее сопротивление для защиты по току в случае короткого замыкания для предотвращения серьезного повреждения электрических элементов. Исследования показывают, что диоды верхнего и нижнего каскада умножителя наиболее подвержены такого рода повреждениям [13]. Диод 2CLG50KV-1A, используемый в конструкции умножителя, начинает проводить ток при напряжении 27 В, максимально допустимый для него ток 1 А. Для расчета защитного сопротивления  $R_0$  выбран максимальный рабочий ток

диода  $I_m = 1$  А согласно формуле  $R_0 = 2 \frac{U_0}{I_m} \sqrt{\frac{\tau}{T_m}}$ , где  $\tau$  — время короткозамкнутого переходного процесса, обычно находящееся в диапазоне от 10 до 1000 мкс,  $T_m$  — период времени, равный  $T_m = 1/f$ , где  $f$  — частота генератора. Значение  $R_0$  рассчитывается при  $\tau = 1000$  мкс. При тех же параметрах входного напряжения и частоте получено, что  $R_0 = 347$  кОм. При высоковольтном тестировании каскадного умножителя осуществляется подбор подходящих резисторов для защиты по току элементов цепи.

На каскадном генераторе теоретически получаемое значение выходного напряжения  $U$  [кВ] =  $(2nU_0 - kI)F = 465 - 1,4I$  [mA], где  $F$  — коэффициент использования и  $k$  — целое число, обычно  $k \geq 3$  при числе каскадов  $n = 12$ , с пульсацией напряжения  $\delta U$  [кВ] =  $\pm 0,1I$  [mA]. Поскольку каскадный генератор предназначен в качестве источника питания для тандемного ускорителя, то получаемая энергия пучка дейtronов на нем удваивается:  $E = E_0 + 2(465 - 1,4I) = E_0 + 900 \div 930$  [кэВ], где  $E_0$  — энергия инжектируемого пучка. Такой энергии пучка с током от 1 до 10 мА достаточно для проведения исследований по радиационному тестированию перспективных материалов и других приложений, в частности, возможно применение ускорителя для проведения исследований по терапии быстрыми нейтронами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте ядерной физики на основе существующего ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией предложена новая установка — VITAmin, отличающаяся компактностью и размещением питания внутри верхней части проходного изолятора. В качестве источника питания для ускорителя выбран двенадцатиступенчатый симметричный каскадный умножитель Кокрофта–Уолтона. В данной работе описан ускорительный источник нейтронов VITA в качестве генератора быстрых нейтронов, кратко приведены результаты длительного экспериментального захода. Рассмотрены проектные параметры VITAmin, показано, что они достаточны для генерации большого потока быстрых нейтронов, необходимого для проведения радиационного тестирования перспективных материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-62-00018, <https://rscf.ru/project/24-62-00018/>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neutron Capture Therapy: Principles and Applications / Eds.: W. Saurwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa. Berlin: Springer, 2012. 533 p.
2. Таскаев С. Ю., Каныгин В. В. Бор-нейтронозахватная терапия. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 216 с.
3. Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov I., Koskhakov A., Makarov A., Ostreinov G., Porosev V., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E., Sorokin I., Sycheva T., Verkhovod G. Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target // Biology. 2021. V. 10. P. 350.
4. Kolesnikov I., Kasatov D., Singatulina N., Shchudlo I., Sokolova E., Taskaev S. Generation of a High-Yield Fast Neutron Flux on the Accelerator Based Neutron Source VITA // 2024

- IEEE 25th Intern. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russia, 2024. Р. 960–963.
5. Касатов Д. А., Кошкарев А. М., Макаров А. Н., Острейнов Г. М., Таскаев С. Ю., Щудло И. М. Источник быстрых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литневой мишени // ПТЭ. 2020. № 5. С. 5–9.
  6. Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Semenov A., Sulyaev Yu., Zaitsev E., Polozova P., Taskaev S., Kasatov D., Shchudlo I., Bikchurina M. Test Results of Boron Carbide Ceramics for ITER Port Protection // Fusion Engin. Design. 2021. V. 168. P. 112426.
  7. Kilmetova I., Kozlov A., Kropachev G., Kulevoy T., Liakin D., Sergeeva O., Skachkov V., Stasevich Yu. Hybrid Quadrupole Lens for the Focusing Channel of the DARIA Complex // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2023. V. 17. P. 772–777.
  8. Dyusenova S., Klyamer D., Sukhikh A., Shchudlo I., Taskaev S., Basova T., Gromilov S. Influence of Magnetic Field on the Structure and Sensor Properties of Thin Titanyl Phthalocyanine Layers // J. Struct. Chem. 2023. V. 64, No. 3. P. 337–346.
  9. Sorokin I., Taskaev S. A New Concept of a Vacuum Insulation Tandem Accelerator // Radiat. Isot. 2015. V. 106. P. 101.
  10. Patent for the Invention. No. 2653840.2. 2018. Vacuum Insulated Tandem Accelerator / S. Taskaev, I. Sorokin.
  11. Cockcroft-Walton High Voltage Generator. CERN-OBJ-AC-018. Microcosm Exhibition (CERN), 1964.
  12. Альбертинский Б. С., Свильин М. П. Каскадные генераторы. М.: Атомиздат, 1980. 210 с.
  13. Su Tong-Ling, Zhang Yi-Min, Chen Shang-Wen, Liu Yan-Tong, Lv Hui-Yi, Liu Jiang-Tao. A 600 kV 15 mA Cockcroft-Walton High-Voltage Power Supply with High Stability and Low-Ripple Voltage // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 560. P. 613.

Получено 28 октября 2024 г.