

Концепция компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией

**Я.А. Колесников^{а,б,1}, А.А. Кашеев^а, С.С. Савинов^{а,б}, Н.Ш. Сингатулина^{а,б},
Ш.Р. Сингатулин^а, И.Н. Сорокин^{а,б} и С.Ю. Таскаев^{а,б}**

^а *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия, ул. Ак. Лаврентьева 11, 630090*

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

В Институте ядерной физики СО РАН предложен, создан и эффективно используется электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией VITA. Ускоритель обеспечивает получение стационарного моноэнергетического пучка протонов или дейтронов с энергией от 0,1 до 2,3 МэВ и током до 10 мА. Ускоритель используют для многих приложений, включая радиационное тестирование потоком быстрых нейтронов перспективных материалов, представляющее большой исследовательский интерес для разных научных групп.

В Институте начаты пионерские работы по созданию компактного источника быстрых нейтронов. Идея состоит в том, чтобы в качестве источника питания для ускорителя использовать каскадный умножитель Кокрофта-Уолтона VITamin вместо секционированного выпрямителя ускорителя электронов ЭЛВ. Текущий этап работ предполагает высоковольтное тестирование диэлектрической трубы для газо-вакуумного уплотнения умножителя напряжения, пуско-наладочные работы инвертора и трансформатора, проведение исследований по напуску обдирочного газа с земляного потенциала и проведение высоковольтного тестирования каскадного умножителя.

На основе проделанной инженерно-технической работы предложены две концепции компактных генераторов, – один для генерации нейтронов эпитеплового диапазона с высоковольтным потенциалом 1,135 МВ (энергия 2,3 МэВ) и током протонного пучка 7 мА для применения в БНЗТ, второй для генерации быстрых нейтронов с высоковольтным потенциалом 0,5 МВ (энергия 1,03 МэВ) и током дейтронного пучка 5 мА. В работе представлены результаты испытаний каскадного умножителя, представлены концепции компактного генератора быстрых нейтронов и компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.

Concept of compact Vacuum Insulated Tandem Accelerator

**Ya. Kolesnikov^{а,б}, A. Kashcheev^а, S. Savinov^{а,б}, N. Singatulina^{а,б},
Sh. Singatulin^а, I. Sorokin^{а,б} and S. Taskaev^{а,б}**

^а *Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, Lavrentiev str. 11, 630090*

^б *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, Pirogova str. 1, 630090*

An electrostatic tandem accelerator of charged particles with an original design, later named the vacuum-insulated tandem accelerator (VITA), was proposed, created, and is now effectively used at the Budker Institute of Nuclear Physics. The accelerator provides a stationary monoenergetic beam of protons or deuterons with energies ranging from 0.1 to 2.3 MeV and currents up to 10 mA. The accelerator is used for many applications, including radiation testing of promising materials with a fast neutron flux, which is of great research interest to various scientific groups.

At the Institute, there were started pioneering work on creating a compact fast neutron source. The idea is to use a Cockcroft-Walton cascade multiplier VITamin as the power source for the accelerator instead of the sectioned rectifier of the ELV electron accelerator. The current stage of work involves high-voltage testing of the dielectric tube for gas-vacuum sealing of the voltage multiplier, commission and adjustment of the inverter and transformer, research on the supply of stripping gas from ground potential, and high-voltage testing of the cascade multiplier.

Based on the engineering and technical work carried out, two concepts for compact generators have been proposed: one for generating epithermal neutrons with a high-voltage potential of 1.135 MV (energy 2.3 MeV) and a proton beam current of 7 mA for use in BNCT, and the second for generating fast neutrons with a high-voltage potential of 0.5 MV (energy 1.03 MeV) and a proton beam current of 5 mA. The paper presents the results of tests of the cascade multiplier, as well as concepts for a compact fast neutron generator and a compact vacuum insulated tandem accelerator.

PACS: 29.20.Ej.

1. ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН предложен, создан и эффективно используется электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией VITA [1]. Ускоритель обеспечивает получение стационарного моноэнергетического пучка протонов или дейтронов с энергией от 0,1 до 2,3 МэВ и током до 10 мА. Такие параметры протонного/дейтронного пучка и возможность их варьировать в широком диапазоне открывает широкий спектр применений для VITA, – проведение исследований в области бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ), тестирование препаратов адресной доставки бора, лечение домашних животных (кошек и собак), облучение различных материалов пучком протонов/дейтронов или потоком нейтронов (от медленных до быстрых), измерение сечений ядерных реакций и для других приложений. Облучение перспективных материалов потоком быстрых нейтронов представляет большой исследовательский интерес для различных научных групп, – от отдельных лабораторий институтов до передовых международных проектов в области физики, таких как Большой адронный коллайдер (CERN) и Международный экспериментальный термоядерный реактор (ITER). В 2022 году на ускорителе VITA был проведен длительный экспериментальный заход по облучению различных материалов быстрыми нейтронами [2], средний интегральный флюенс, полученный образцами, был 10^{14} нейтронов/см².

Несмотря на то, что VITA продемонстрировал высокую стабильность и надежность на протяжении этого захода, существуют несколько ограничений. Первое ограничение наложено на энергию дейтронов существующим источником питания поворотного магнита, – их энергия не может превышать 1,5 МэВ. Второе, более существенное, ограничение связано с конструкцией поверхностно-плазменного источника ионов, созданного в ИЯФ СО РАН. Поскольку источник изначально создавался для генерации пучка отрицательных ионов водорода, пучок дейтронов в нем ограничен током в 1,5 мА. Последнее ограничение связано с тем, что у VITA множество других применений, а генерация быстрых нейтронов связана с режимом повышенной радиационной нагрузки и

требует время для перестройки установки с режима генерации протонного пучка в режим генерации дейтронного пучка.

2. УСКОРИТЕЛЬ VITAmín

Идея компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией VITAmín, первоначально изложенная в статье [3] и защищенная патентом [4] начала свою реализацию после проведенного длительного захода по генерации быстрых нейтронов на ускорителе VITA. Идея заключается в том, чтобы на месте верхней части проходного изолятора VITA разместить симметричный каскадный умножитель Кокрофта-Уолтона. Текущая версия VITAmín имеет привязку к существующим элементам, использовавшимся ранее на ускорителе VITA, – к керамическим изоляторам определенного размера (высота 73 мм, внешний диаметр ~400 мм), к межизоляторным электродам, к ускоряющим электродам и вакуумному баку (электрод под земляным потенциалом) На рисунках 1а и 1б приведены схемы VITA и VITAmín.

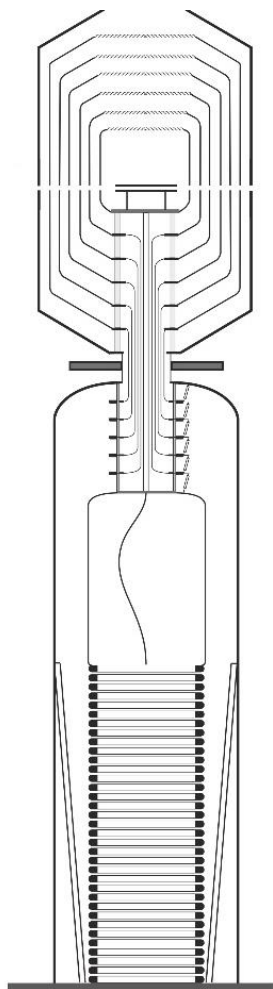
Конструктивно каскадный умножитель состоит из 12 секций, в передающих колоннах в каждой секции расположено по одному конденсатору UNV-12A (50 кВ, 1,7 нФ), в фильтрующей колонне по четыре параллельно соединенных таких же конденсаторов и две пары диодов (2CLG50kV-1A), образующих подобие диодного моста. Для питания каскадного умножителя в ИЯФ СО РАН на этапе пуско-наладочных работ находится источник питания инверторного типа, состоящий из цепочки: AC-DC конвертер (MeanWell SHP-10K-380), инвертор на трансформацию постоянного напряжения в переменное с частотой 75 кГц, повышающий трансформатор с резонансной схемой с суммарным коэффициентом повышения 60. Таким образом, на вход каскадного умножителя планируется подавать переменное напряжение с амплитудой до 24 кВ и частотой 75 кГц. Для измерения выходного напряжения планируют использование сделанного в ИЯФ СО РАН высоковольтного делителя напряжения и закупленного делителя напряжения KBM-100 (измерение постоянного напряжения с амплитудой до 140 кВ), также будет проводиться измерение напряжения на первой секции и сравнение всех измеренных значений с параметрами контроллера инвертора.

Первый эксперимент планируют провести без использования повышающего трансформатора с умножителем, находящимся в воздушной среде. Это позволит измерить итоговый коэффициент умножения напряжения генератором Кокрофта-Уолтона, измерить паразитные параметры, оценить коэффициент эффективности умножителя F по следующему выражению:

$$U = (2NU_0 - \Delta U \pm \delta U) \cdot F, \quad (1)$$

где N – число секций умножителя, U_0 – входное в умножитель напряжение, ΔU – суммарное падение напряжения при нагрузке умножителя током и с учетом паразитных параметров, δU – разброс напряжения при нагрузке умножителя током.

(a)



(б)

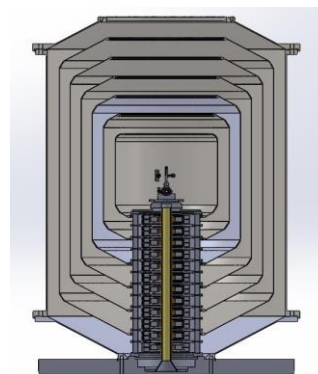


Рисунок 1: Схема ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией VITA с источником питания типа ЭЛВ (а) и компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией VITAmín с симметричным каскадным умножителем Кокрофта-Уолтона (б).

Второй эксперимент предполагает подключение повышающего трансформатора и испытание секций каскадного умножителя в воздушной среде. На данном этапе к экспериментальному оборудованию дополнительно необходимо добавить детекторы гамма-излучения, подключить видеокамеры для визуального контроля обстановки и разрядов, обеспечить возможность дистанционного подключения к установке для измерения и контроля параметров.

Третий этап является завершающим в этом цикле и будет направлен на достижение максимального выходного напряжения при размещении каскадного умножителя в среде элегаза.

3. КОНЦЕПЦИИ УСКОРИТЕЛЕЙ

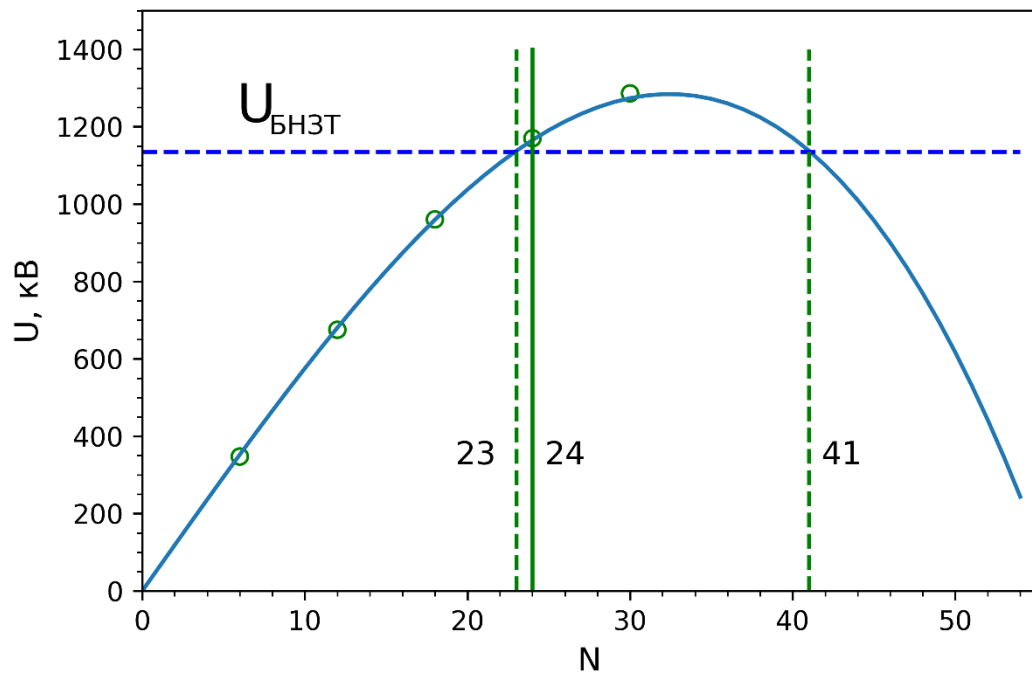
На основе предварительных результатов предложены две концепции генераторов и, соответственно, две концепции компактных ускорителей-танDEMов с вакуумной изоляцией.

Первый ускоритель предназначен для генерации нейтронов эпитеплогового диапазона для применения в области БНЗТ, для этого необходим высоковольтный потенциал 1,135 МВ (энергия протонного пучка 2,3 МэВ) и ток протонного пучка 7 мА. На рис. 2 приведена зависимость выходного напряжения от числа секций умножителя. Кривая показывает теоретическое предсказание, точками обозначены значения, промоделированные в коде NL5, горизонтальная пунктирная линия показывает необходимое для проведения БНЗТ напряжение.

В этих расчетах для параметров были заданы следующие значения: входное напряжение $U_0 = 33$ кВ, емкость конденсаторов $C = 1,7$ нФ, частота входного напряжения $f = 150$ кГц, ток нагрузки $I = 14$ мА (вдвое больше необходимого для БНЗТ тока 7 мА, поскольку ускоритель тандемный и необходимо перезарядить пучок), коэффициент эффективности умножителя $F = 0,9$. Видно, что, теоретически, 24 секций при заданных параметрах достаточно для достижения необходимого напряжения. Для формирования умножителя с таким числом секций можно использовать керамические изоляторы с высотой 100 мм и внешним диаметром 300 мм с гофрированной внешней поверхностью. Это позволит разместить по две секции умножителя внутри одного изолятора, применить уменьшенную аргоновую обдирочную мишень, применить новые ускоряющие электроды меньшего размера.

Второй ускоритель предназначен для генерации мощного потока быстрых нейтронов для проведения радиационного тестирования различных материалов, для этого необходим высоковольтный потенциал 0,5 МВ и ток дейтронного пучка 5 мА. На рис. 3 приведена зависимость выходного напряжения от числа секций умножителя. Кривая показывает теоретическое предсказание, точками обозначены значения, промоделированные в коде NL5, горизонтальная пунктирная линия показывает необходимое для генерации быстрых нейтронов напряжение. В этих расчетах для параметров были заданы следующие значения: входное напряжение $U_0 = 26$ кВ, емкость конденсаторов $C = 1,7$ нФ, частота входного напряжения $f = 75$ кГц, ток нагрузки $I = 10$ мА (вдвое больше необходимого для генерации быстрых нейтронов тока 5 мА, поскольку ускоритель тандемный и необходимо перезарядить пучок), коэффициент эффективности умножителя $F = 0,9$.

(a)



(б)

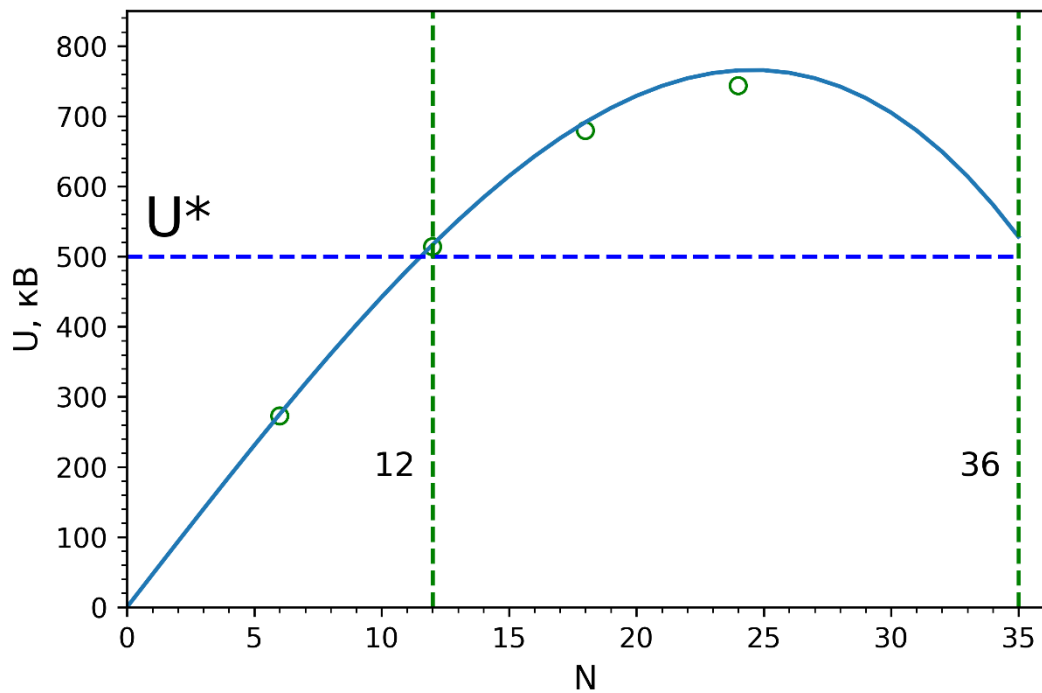


Рисунок 2. Зависимость полного напряжения на каскадном умножителе от числа секций. (а) – каскадный умножитель для проведения БНЗТ, (б) – каскадный умножитель для генерации быстрых нейтронов. Сплошная линия – теоретическое предсказание, точки – результат моделирования в NL5, горизонтальная пунктирная линия – требуемое напряжение.

Напомним, что в текущей реализации входное напряжение U_0 предполагается до 24 кВ, емкость конденсаторов $C = 1,7$ нФ, частота входного напряжения $f = 75$ кГц, коэффициент эффективности умножителя предстоит вычислить, для других умножителей обычно приводят значения $0,93 \div 0,97$. Таким образом, для реализации концепции компактного ускорителя для БНЗТ требуется сделать каскадный умножитель «с нуля», а в случае ускорителя для генерации мощного потока быстрых нейтронов для начальных исследований, по оценкам, пригоден уже существующий VITamin. При использовании таких же керамических изоляторов с высотой 100 мм, внешним диаметром 300 мм и гофрированной внешней поверхностью и размещении по две секции умножителя в один изолятор необходимо шесть керамических промежутков, внешний земляной электрод (вакуумный бак), два промежуточных и высоковольтный ускоряющие электроды, и использование уменьшенной версии газовой обдирочной мишени.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН предложен, создан и эффективно используется ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией VITA. На нем в 2022 году был проведен длительный экспериментальный заход по генерации быстрых нейтронов для радиационного тестирования перспективных материалов. На основе ускорителя разрабатывается компактная версия, в которой для питания ускорителя вместо ЭЛВ используется симметричный каскадный умножитель Кокроф-та-Уолтона, который располагается на верхнем уровне установки. Эта модификация значительно уменьшает высоту установки. Осуществление предложенных концепций ускорителей для проведения исследований в области БНЗТ и для генерации мощного потока быстрых нейтронов позволит уменьшить и диаметр самого ускорителя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005), <https://rscf.ru/project/19-72-30005>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.Ю. Таскаев. Ускорительный источник нейтронов VITA. М.: Физматлит, 2024, 248 с.
2. D.A. Kasatov et. al., “Vacuum-Insulated Tandem Accelerator as a Powerful Fast Neutron Generator”, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, Vol. 22, No. 4, pp. 713–716, 2025. doi:10.1134/S154747712570044X
3. I. Sorokin and S. Taskaev, “A new concept of a Vacuum Insulation Tandem Accelerator”, *Applied Radiation and Iso-topes*, Vol. 106, pp. 101-103, 2015. doi:10.1016/j.apradiso.2015.06.015
4. S. Taskaev and I. Sorokin, “Vacuum Insulated Tandem Accelerator”, Patent for the Invention No. 2653840, 05.15.2018.