

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.384.65

УСКОРИТЕЛЬ-ТАНДЕМ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ VITA И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ¹

© 2025 г. М. И. Бикчурин^{a, b}, Т. А. Быков^a, Г. Д. Верховод^a, И. С. Ибрагим^{a, b, c},
А. И. Касатова^a, Д. А. Касатов^a, Я. А. Колесников^a, В. Д. Коновалова^{a, b},
А. М. Кошкарев^{a, b}, А. С. Кузнецов^{a, b}, Г. М. Остреинов^a, В. В. Поросев^a, С. С. Савинов^a,
Н. Ш. Сингатулина^{a, d}, Е. О. Соколова^a, И. Н. Сорокин^a, Т. В. Сычева^{a, b},
Ю. С. Таскаева^a, А. А. Шуклина^{a, b}, И. М. Щудло^a, С. Ю. Таскаев^{a, b, *}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

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

^c Университет Тартуса
Сирийская Арабская Республика, Тартус, VWG5+X3G, M1

^d Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

* e-mail: taskaev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 08.12.2023 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 22.03.2024 г.

Одним из ускорителей заряженных частиц с относительно малой энергией и относительно большим током является ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. В работе отмечена оригинальность конструкции ускорителя и представлены результаты проведенных исследований. Показано, что замена керамических изоляторов с гладкой боковой поверхностью на изоляторы с гофрированной наружной поверхностью обеспечила получение требуемого напряжения 1.15 МВ без пробоев. Требуемый ток 10 мА получен за счет модернизации установки, последовавшей после экспериментального определения влияния пространственного заряда на транспортировку ионов, и существенного подавления потока вторичных заряженных частиц. Приведены измеренные фазовые портреты инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода и пучка протонов. Отмечено, что установка преимущественно используется для развития методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей, а также для радиационных испытаний и модификации перспективных материалов потоком нейтронов, для измерения сечения и выхода ядерных реакций и для других приложений.

DOI: 10.7868/S3034564225080245

1. ВВЕДЕНИЕ

Для внедрения в клиническую практику перспективной методики лечения злокачественных опухолей — бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [1] — требуются ускорительные источники эпитепловых нейтронов. Одним из таких источников рассматривается ускорительный

источник нейтронов VITA [2], состоящий из ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией для получения пучка протонов или дейтронов, тонкой литиевой мишени для генерации нейтронов и системы формирования терапевтического пучка нейтронов. По мере совершенствования установки ее стали активно использовать и для ряда других приложений из-за возможности

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

получения стационарного моноэнергетического пучка протонов или дейтронов с энергией до 2.3 МэВ, током до 10 мА, генерации потока нейтронов в реакциях ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ и ${}^7\text{Li}(d, n)$, α -частиц в реакциях ${}^7\text{Li}(p, \alpha)\alpha$ и ${}^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$, фотонов с энергией 478 кэВ в реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ и позитронов в реакции ${}^{19}\text{F}(p, e^+e^-){}^{16}\text{O}$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Ускорительный источник нейтронов ВИТА – современная физическая установка, включающая в себя электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией, для получения стационарного пучка протонов или дейтронов, оригинальную тонкую литиевую мишень для генерации нейтронов и ряд систем формирования пучка нейтронов с замедлителем из фторида магния, оргстекла или тяжелой воды. Установка постоянно модернизировалась по мере получения знаний и к настоящему времени выглядит так, как показано на рис. 1.

Установка в основном размещена в одном радиационно-защищенном бункере, в соседнем бункере размещают литиевую мишень с системой формирования пучка нейтронов, пригодной для терапии пациентов, либо нейтронный или гамма-спектрометр для проведения научных исследований. Установка оснащена современными средствами вакуумной откачки, питания, диагностики, управления, сбора и хранения данных.

Установка обеспечивает:

- получение мощного стационарного пучка протонов или дейтронов с энергией, изменяемой в диапазоне от 0.3 до 2.3 МэВ, с током от 0.5 до 10 мА. Пучок ионов отличается высокой монохроматичностью и стабильностью энергии (0.1 %) и высокой стабильностью тока (до 0.4 %). На выходе из ускорителя пучок ионов имеет диаметр 10 ± 1 мм, угловую расходимость ± 1.5 мрад, нормализованный геометрический эмиттанс $\epsilon_{\text{норм}} = 0.2$ мм · мрад;
- генерацию мощного потока нейтронов (до $2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$) и формирование пучка нейтронов различного энергетического диапазона: холодных, тепловых, эпитепловых, исключительно

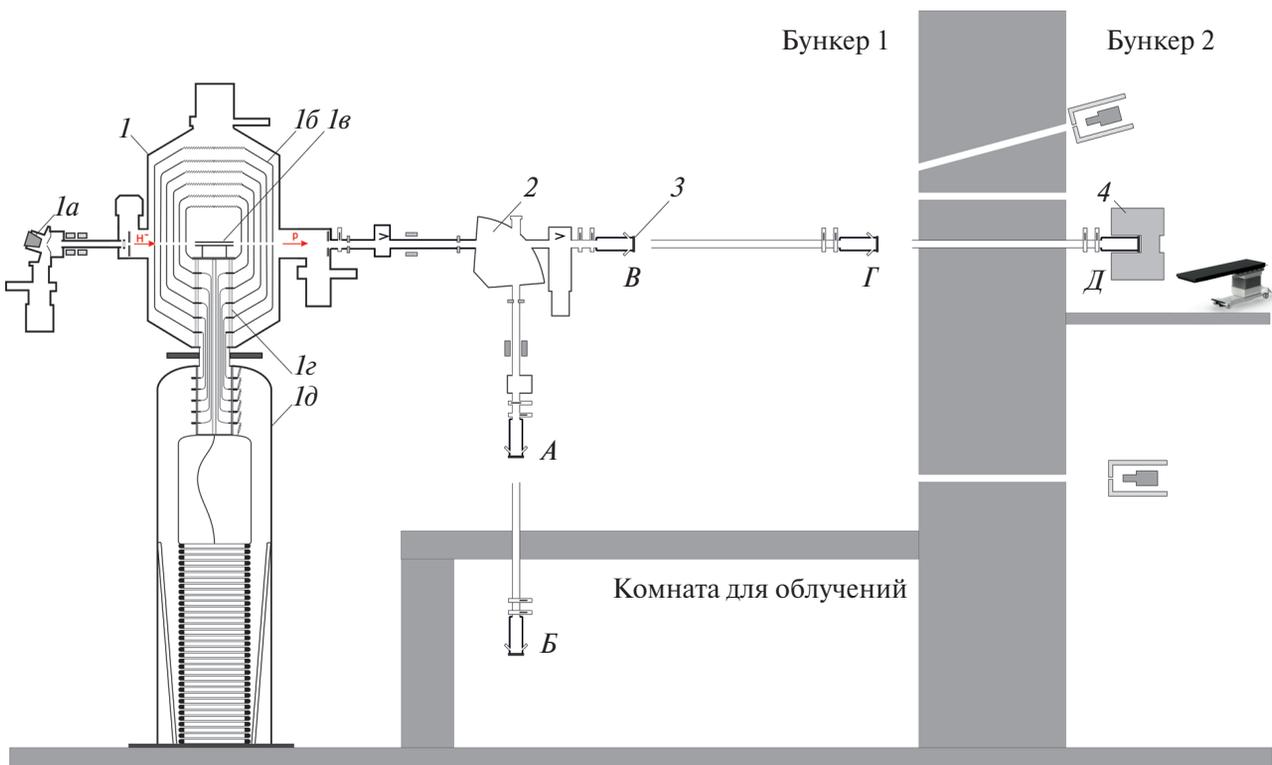


Рис. 1. Схема ускорительного источника нейтронов ВИТА: 1 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (а – источник отрицательных ионов, б – высоковольтный и промежуточные электроды, в – газовая обдирочная мишень, г – проходной изолятор, д – высоковольтный источник питания), 2 – поворотный магнит, 3 – литиевая мишень для генерации нейтронов, 4 – система формирования пучка нейтронов. Литиевую мишень размещают в положениях А, Б, В, Г или Д.

эпитепловых, моноэнергетичных, надэпитепловых или быстрых;

- генерацию моноэнергетических фотонов с энергией 478 кэВ, 511 кэВ или 9.17 МэВ;
- получение α -частиц и позитронов.

Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией – это линейный электростатический ускоритель заряженных частиц тандемного типа оригинальной конструкции. В характеристике ускорителя термин “линейный” означает, что пучок ионов однократно проходит ускоряющие промежутки. Термин “электростатический” означает, что ускорение заряженных частиц происходит неизменным электрическим полем. Термин “тандемный” означает, что высоковольтный потенциал используется дважды: сначала для ускорения отрицательных ионов, а затем после смены полярности их заряда в высоковольтном терминале – для ускорения положительных ионов.

Ключевым преимуществом концепции тандемного ускорения является снижение необходимого ускоряющего напряжения наполовину, что значительно упрощает электростатическую изоляцию и, следовательно, уменьшает размер и стоимость ускорителя. Оригинальность конструкции заключается в использовании не традиционных ускорительных трубок, а электродов в виде вложенных друг в друга соосных цилиндров, которые крепят на единственном проходном изоляторе, как показано на рис. 1. Основная идея состояла в том, чтобы отнести межэлектродные изоляторы подальше от пучка заряженных частиц для улучшения высоковольтной прочности и обеспечить высокий темп ускорения ионов в ускорительном зазоре за счет близкого размещения электродов для увеличения тока пучка ионов.

Ускоритель в ИЯФ СО РАН состоит из:

- вакуумного бака цилиндрической формы диаметром 1.4 м, высотой 2.3 м с отверстиями для ввода и вывода пучка ионов для вакуумной откачки и подключения к высоковольтному источнику питания;
- высоковольтного и пяти промежуточных электродов цилиндрической формы, в которые с двух сторон вварены рамки для крепления диафрагм и вставлены диафрагмы, формирующие ускорительный канал;
- проходного изолятора, предназначенного для подачи потенциала на высоковольтный и промежуточные электроды от высоковольтного источника питания;

- газовой обдирочной мишени;
- источника отрицательных ионов водорода или дейтерия;
- высоковольтного источника питания – секционированного выпрямителя промышленного ускорителя электронов серии ЭЛВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией VITA – новый тип ускорителя заряженных частиц, достигнутые параметры получены в результате модернизации всех элементов ускорителя и проведения множества научных исследований, зачастую изменивших первоначальные представления.

Напряжение 1.15 МВ получено после изменений вакуумной части проходного изолятора: замены индиевого уплотнения на резиновое; исключения размещенного внутри резистивного делителя за счет увеличения в два раза высоты изоляторных колец; замены стеклянных изоляторов на керамические; замены керамических изоляторов с гладкой боковой поверхностью на изоляторы с гофрированной наружной поверхностью [3]. Установлено, что высоковольтная прочность ускорителя ограничена прочностью ускоряющего зазора, а не эффектом полного напряжения.

Ток пучка протонов 10 мА получен после проведения следующих исследований и изменений. При проектировании ускорителя предполагалось, что пространственный заряд не влияет на транспортировку пучка отрицательных ионов из-за большого напуска газа и влияет на транспортировку пучка протонов. В действительности все получилось противоположным образом.

Обнаруженное влияние пространственного заряда на транспортировку пучка отрицательных ионов водорода [4] потребовало разработки и внедрения в эксплуатацию ряда диагностических средств, обеспечивающих контролируемый ввод пучка ионов в ускоритель при изменении тока и энергии ионов. Это видеокамеры и телескоп, регистрирующие свечение пучка ионов при его взаимодействии с остаточным и обдирочным газом, проволочный сканер, измеритель эмиттанса.

Обнаруженное отсутствие влияния пространственного заряда на транспортировку пучка протонов [5] позволило заменить две пары квадрупольных линз на охлаждаемые диафрагмы

с равномерно разнесенными по азимуту термосопротивлениями, что обеспечило предотвращение прожигания вакуумной камеры пучком ионов и контроль его положения.

Значительный прогресс в увеличении тока пучка протонов достигнут в результате существенного подавления потока вторичных заряженных частиц за счет улучшения вакуумной откачки и размещения охлаждаемой диафрагмы на входе в ускоритель, а также частичного покрытия стенок вакуумной камеры металлической сеткой под отрицательным потенциалом [6].

Особая конструкция диафрагм высоковольтного электрода ускорителя кардинально подавляет нежелательный поток ионов аргона из газовой обдирочной мишени в ускорительные каналы [7].

Ионно-оптическая система ускорителя обеспечивает возможность реализации оперативного контроля эффективности газовой обдирочной мишени [8].

Замена водорода на дейтерий в источнике ионов обеспечивает получение пучка дейтронов [9].

Полученные знания и оснащение ускорителя большим набором диагностических средств позволяют в течение длительного времени стабильно получать пучок протонов или дейтронов в широком диапазоне энергий и тока. Характерный фазовый портрет инжектируемого в уско-

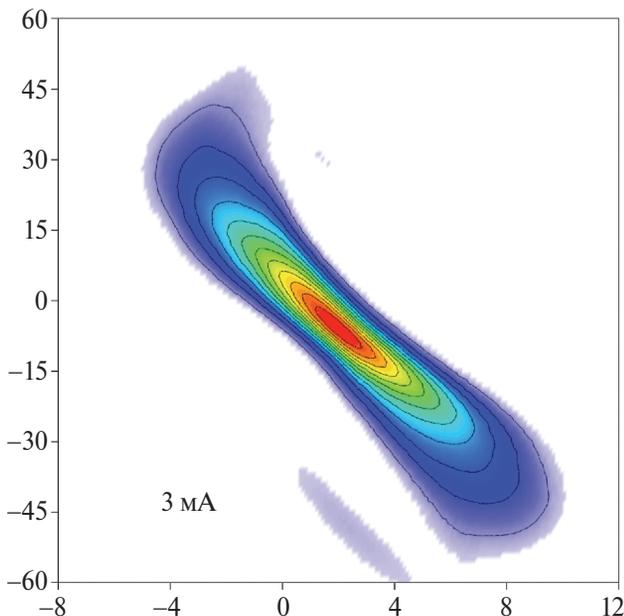


Рис. 2. Фазовый портрет инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода.

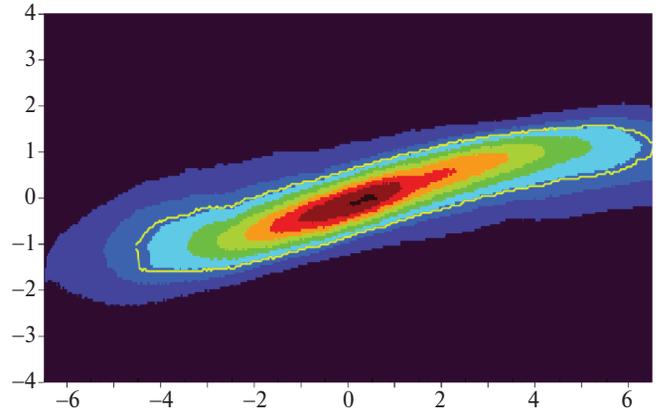


Рис. 3. Фазовый портрет пучка протонов.

ритель пучка отрицательных ионов водорода представлен на рис. 2, фазовый портрет пучка протонов – на рис. 3 [10].

4. ПРИМЕНЕНИЕ

Основное предназначение предлагаемого ускорителя – использование для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей. На установке в ИЯФ СО РАН получены следующие важные результаты: 1) облучение нейтронами опухолевых клеток, предварительно инкубированных в среде с бором, ведет к значительному подавлению их жизнеспособности, облучение мышей с привитой опухолью приводит к их излечению [11, 12]; 2) позитивный эффект достигнут при облучении крупных домашних животных со спонтанными опухолями [13, 14]; 3) разработаны средства и методы дозиметрии [15–18]; 4) протестированы новые препараты адресной доставки бора [19–25]; 5) измерены выход нейтронов в реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ [26], выход фотонов с энергией 478 кэВ в реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ [27], сечение реакций ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ [27] и ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ [28].

Разработанный ускорительный источник нейтронов ВИТА используется в клинике г. Сямынь (Китай) [29] для лечения онкологических больных (вторыми в мире) и изготавливается для Центра адронной терапии в области онкологии в Павии (Италия) и для Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н.Н. Блохина в Москве.

На ускорителе в деталях изучен процесс образования блистеров на поверхности металлов при имплантации протонов [30]. Изучено влияние радиационного блистеринга на выход нейтронов из мишени, выполненной в виде тонкого слоя

лития, напыленного на эффективно охлаждаемую медную подложку [31].

Предложен и реализован неразрушающий метод измерения *in situ* толщины слоя лития путем измерения интенсивности излучения фотонов с энергией 478 кэВ в реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ [32].

Установка используется для радиационного тестирования образцов карбида бора и стали для Международного термоядерного реактора ИТЭР [33], оптических кабелей для Большого адронного коллайдера (ЦЕРН), неодимовых магнитов для мощного линака, газовых сенсоров на основе фталоцианинов титанила [34], полупроводниковых фотоумножителей, электронных компонент и устройств.

На установке ведутся работы по получению пучка холодных нейтронов для нейтронографии и БНЗТ; реализации метода мгновенной γ -спектроскопии для измерения борной дозы при проведении БНЗТ; реализации литий-нейтронозахватной терапии, обеспечивающей 100-процентное выделение энергии ядерной реакции в клетках опухоли [35]; модификации перспективных материалов; разработке метода стерилизации эндопротезов *in situ*; разработке мощного компактного источника быстрых нейтронов и для других приложений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в работе электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией VITA характеризуется широким диапазоном изменения энергии и тока пучка протонов или дейтронов, что позволяет его использовать для генерации потоков нейтронов, фотонов, α -частиц и позитронов, востребованных различными приложениями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30005, <https://rscf.ru/project/19-72-30005/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Advances in Boron Neutron Capture Therapy*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023. ISBN: 978-92-0-132723-9
2. *Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A.,*

- Ostreinov G., Porosev V., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E., Sorokin I., Sycheva T., Verkhovod G.* // *Biology*. 2021. V. 10. № 5. P. 350. <https://doi.org/10.3390/biology10050350>
3. *Колесников Я.А., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю.* // *ПТЭ*. 2020. № 6. С. 17. <https://doi.org/10.31857/S0032816220060105>
4. *Быков Т.А., Касатов Д.А., Колесников Я.А., Кошкарёв А.М., Макаров А.Н., Остреинов Ю.М., Соколова Е.О., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ПТЭ*. 2018. № 5. С. 90. <https://doi.org/10.1134/S003281621805018X>
5. *Быков Т.А., Касатов Д.А., Колесников Я.А., Кошкарёв А.М., Макаров А.Н., Остреинов Ю.М., Соколова Е.О., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ЖТФ*. 2021. Т. 91. № 1. С. 105. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.01.50280.86-20>
6. *Касатов Д.А., Макаров А.Н., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. С. 74. <https://doi.org/10.1134/S1063785015020078>
7. *Колесников Я.А., Остреинов Ю.М., Пономарев П.Д., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ПТЭ*. 2021. № 4. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S0032816221040194>
8. *Колесников Я.А., Кошкарёв А.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ПТЭ*. 2020. № 3. С. 25. <https://doi.org/10.31857/S0032816220040060>
9. *Касатов Д.А., Кошкарёв А.М., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ПТЭ*. 2020. № 5. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050158>
10. *Бикчурина М.И., Быков Т.А., Колесников Я.А., М., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ПТЭ*. 2022. № 4. С. 18. <https://doi.org/10.31857/S0032816222040164>
11. *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. Rad. Research*. 2018. V. 59. P. 101. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrx071>
12. *Zavjalov E., Zaboronok A., Kanygin V., Kasatova A., Kichigin A., Mukhamadiyarov R., Razumov I., Sycheva T., Mathis B., Maezono S., Matsumura A., Taskaev S.* // *Int. J. Rad. Biol.* 2020. V. 96. № 7. P. 868. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1761039>
13. *Kanygin V., Kichigin A., Zaboronok A., Kasatova A., Petrova E., Tsygankova A., Zavjalov E., Mathis B., Taskaev S.* // *Biology*. 2022. V. 11. P. 138. <https://doi.org/10.3390/biology11010138>
14. *Kanygin V., Zaboronok A., Kichigin A., Petrova E., Guselnikova T., Kozlov A., Lukichev D., Mathis B., Taskaev S.* // *Veterinary Sciences*. 2023. V. 10. P. 274. <https://doi.org/10.3390/vetsci10040274>
15. *Bykov T., Kasatov D., Koshkarev A., Makarov A., Porosev V., Savinov G., Shchudlo I., Taskaev S., Verkhovod G.* // *JINST*. 2021. V. 16. P. 01024. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/01/P01024>

16. *Dymova M., Dmitrieva M., Kuligina E., Richter V., Savinov S., Shchudlo I., Sycheva T., Taskaeva I., Taskaev S.* // Radiat. Res. 2021. V. 196. P. 192.
<https://doi.org/10.1667/RADE-21-00015.1>
17. *Zaboronok A., Taskaev S., Volkova O., Mechetina L., Kasatova A., Sycheva T., Nakai K., Kasatov D., Makarov A., Kolesnikov Ia., Shchudlo I., Bykov T., Sokolova E., Koshkarev A., Kanygin V., Kichigin A., Mathis B., Ishikawa E., Matsumura A.* // Pharmaceutics. 2021. V. 13. P. 1490.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091490>
18. *Byambatseren E., Burdakov A., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Savinov S., Sycheva T., Taskaev S.* // JINST. 2023. V. 18. P. 02020.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/P02020>
19. *Успенский С.А., Хантаханова П.А., Заборонок А.А., Куркин Т.С., Волкова О.Ю., Мечетина Л.В., Таранин А.Н., Каныгин В.В., Мацумура А., Таскаев С.Ю.* // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2020. Т. 491. С. 1.
<https://doi.org/10.31857/S2686953520020119>
20. *Vorobyeva M., Dymova M., Novopashina D., Kuligina E., Timoshenko V., Kolesnikov Ia., Taskaev S., Richter V., Venyaminova A.* // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. P. 7326.
<https://doi.org/10.3390/ijms22147326>
21. *Popova T., Dymova M., Koroleva L., Zakharova O., Lisitskiy V., Raskolupova V., Sycheva T., Taskaev S., Silnikov V., Godovikova T.* // Molecules. 2021. V. 26. P. 6537.
<https://doi.org/10.3390/molecules26216537>
22. *Kanygin V., Razumov I., Zaboronok A., Zavjalov E., Kichigin A., Solovieva O., Tsygankova A., Guselnikova T., Kasatov D., Sycheva T., Mathis B., Taskaev S.* // Biology. 2021. V. 10. P. 1124.
<https://doi.org/10.3390/biology10111124>
23. *Zaboronok A., Khaptakhanova P., Uspenskii S., Bekarevich R., Mechetina L., Volkova O., Mathis B., Kanygin V., Ishikawa E., Kasatova A., Kasatov D., Shchudlo I., Sycheva T., Taskaev S., Matsumura A.* // Pharmaceutics. 2022. V. 14. P. 761.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14040761>
24. *Aiyzyzhy K., Barmina E., Zavestovskaya I., Kasatova A., Petrunya D., Uvarov O., Saraykin V., Zhilnikova M., Voronov V., Shafeev G., Taskaev S., Zelepukin I., Deyev S.* // Laser Phys. Lett. 2022. V. 19. P. 066002.
<https://doi.org/10.1088/1612-202X/ac642c>
25. *Novopashina D., A. Dymova M., Davydova A., Meschaninova M., Malysheva D., Kuligina E., Richter V., Kolesnikov Ia., Taskaev S.* // Int. J. Mol. Sci. 2023. V. 24. P. 306.
<https://doi.org/10.3390/ijms24010306>
26. *Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Makarov A., Shchudlo I., Sokolova E., Taskaev S.* // Biology. 2021. V. 10. P. 824.
<https://doi.org/10.3390/biology10090824>
27. *Taskaev S., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. B. 2021. V. 502. P. 85.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.010>
28. *Taskaev S., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Makarov A., Ostreinov G., Savinov S., Sokolova E.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. B. 2022. V. 525. P. 55.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.06.010>
29. Going down in History: China Reaches a New Milestone to Develop an Advanced In-Hospital BNCT Solution for Clinical Use.
<https://isnct.net/blog/2023/03/08/newsletter-19/>
30. *Badrutdinov A., Bykov T., Gromilov S., Higashi Y., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Miyazawa T., Shchudlo I., Sokolova E., Sugawara H., Taskaev S.* // Metals. 2017. V. 7. № 12. P. 558.
<https://doi.org/10.3390/met7120558>
31. *Bykov T., Goloshevskii N., Gromilov S., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Ruktuev A., Shchudlo I., Sokolova E., Taskaev S.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research B. 2020. V. 481. P. 62.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.08.010>
32. *Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Sokolova E., Shchudlo I., Taskaev S.* // JINST. 2020. V. 15. P. 10006.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/10/P10006>
33. *Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Semenov A., Sulyaev Yu., Zaitsev E., Polozova P., Taskaev S., Kasatov D., Shchudlo I., Bikchurina M.* // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 168. P. 112426.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112426>
34. *Дюсенова С.Е., Клямер Д.Д., Сухих А.С., Шудло И.М., Таскаев С.Ю., Басова Т.В., Громилов С.А.* // Журнал структурной химии. 2023. Т. 64. № 3. P. 106824.
https://doi.org/10.26902/JSC_id106824
35. *Taskaeva I., Kasatova A., Surodin D., Bgatova N., Taskaev S.* // Life. 2023. V. 13. P. 518.
<https://doi.org/10.3390/life13020518>