

*На правах рукописи*

**ТАСКАЕВ Сергей Юрьевич**

**УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК  
ЭПИТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

**НОВОСИБИРСК - 2014**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- КОВАЛЬ  
Николай  
Николаевич – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, заместитель директора по научной работе
- СЫРЕСИН  
Евгений  
Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, главный научный сотрудник научно-экспериментального отдела новых ускорителей лаборатории ядерных проблем
- ШВЕЦ  
Василий  
Александрович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник лаборатории электрометрии полупроводниковых материалов и структур
- ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г. в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 11

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

По данным Всемирной организации здравоохранения онкологическая заболеваемость неуклонно растёт и приводит к значительной смертности. Разработка лекарств и методов лечения злокачественных опухолей является важной и до сих пор не до конца решённой научной задачей. В качестве перспективного подхода в лечении ряда злокачественных опухолей, в первую очередь, трудноизлечимых опухолей головного мозга, рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ), чрезвычайно привлекательная избирательным воздействием непосредственно на клетки злокачественных опухолей. БНЗТ является формой бинарной радиотерапии, использующей уникально высокую способность нерадиоактивного ядра бора-10 поглощать тепловой нейтрон. Поглощение нейтрона ядром  $^{10}\text{B}$  приводит к мгновенной ядерной реакции с большим выделением энергии, причем с большим выделением именно в той клетке, которая содержала ядро бора. Таким образом, селективное накопление бора-10 внутри клеток опухоли и последующее облучение нейтронами должны приводить к разрушению клеток опухоли с относительно малыми повреждениями окружающих здоровых клеток.

Клинические испытания методики БНЗТ, проведённые на ядерных реакторах, продемонстрировали её применимость для лечения целого ряда злокачественных опухолей, таких как глиобластома, меланома, менингиома, мезотелиома плевры, гепатоцеллюлярная карцинома и др. Несмотря на положительные клинические результаты, проведение терапии практически на всех ядерных реакторах прекращено в силу разных причин, зачастую политических и экономических. Дальнейшее развитие методики БНЗТ видится только с применением ускорителей заряженных частиц для получения пучков нейтронов, отличающихся высокой плотностью потока ( $10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) и спектром (максимум в районе 10 кэВ, минимум тепловых и быстрых нейтронов).

### **Цель и задачи**

**Целью** диссертационной работы является разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов, который отличался бы компактностью, безопасностью и требуемым качеством терапевтического нейтронного пучка и был бы востребован онкологическими клиниками для проведения БНЗТ, обеспечивая мощность дозы в опухоли не менее 1 Зв/мин, глубину терапии – 8 см и терапевтическое отношение – 3. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Определить способ генерации и формирования нейтронного пучка, наилучшим образом удовлетворяющего требованиям БНЗТ.
2. Разработать компактный сильноточный ускоритель, получить на нём и исследовать пучок заряженных частиц.
3. Разработать и испытать нейтроногенерирующую мишень.
4. Осуществить генерацию нейтронов и измерить их характеристики.
5. Провести *in vitro* исследования для демонстрации эффекта БНЗТ.

**Личный вклад автора** в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим.

При определяющем участии автора получены и проанализированы экспериментальные результаты на созданном электростатическом ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. Автором оптимизированы условия инжекции ионного пучка в ускоритель; предложен и реализован способ калибровки обдирочной мишени; идентифицирован и исследован поток заряженных частиц, сопутствующий ускоряемому ионному пучку, и предложен способ его уменьшения; автором исследована однородность пучка на мишени при использовании круговой развертки.

Автором лично определена концепция оптимальной для БНЗТ нейтроногенерирующей мишени и при его определяющем участии решены проблемы её реализации, в частности: напыление тонкого слоя чистого лития контролируемой толщины; обеспечение эффективного теплосъёма для сохранения лития в твёрдом состоянии при нагреве мощным протонным пучком; нахождение материала подложки, максимально стойкого к радиационным повреждениям; разработка конструкции мишени с возможностью легкого удаления подложки мишени с активированным литиевым слоем и утилизация активированной части мишени.

Автором лично предложены две системы формирования терапевтического пучка нейтронов. Для них сформулированы постановки задач численного моделирования переноса нейтронов и  $\gamma$ -излучения и проведена оптимизация этих систем.

При определяющем участии автора получены и проанализированы результаты измерений потока, спектра и мощности дозы генерируемых нейтронов.

Автором сформулирована постановка *in vitro* исследований для наглядной демонстрации эффекта БНЗТ и выдвинута новая концепция компактной медицинской установки для БНЗТ с системой ортогонального формирования пучка нейтронов, позволяющей направлять пучок нейтронов под любым углом, и с высоковольтной системой питания, интегрированной внутрь ускорителя.

Автором лично предложен и запатентован способ получения пучка моноэнергетических нейтронов, в том числе для калибровки детекторов тёмной материи. При определяющем участии автора определены приложения

использования разработанной установки в качестве мощного источника быстрых нейтронов, моноэнергетических и резонансных  $\gamma$ -квантов,  $\alpha$ -частиц и позитронов.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые экспериментально исследован источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой нейтроногенерирующей мишени.

Впервые на ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией получен и изучен протонный пучок энергией 2 МэВ с током 1,6 мА.

Впервые выявлен и изучен поток заряженных частиц, сопутствующий ионному пучку, и предложено решение по его уменьшению.

Определена концепция нейтроногенерирующей мишени, оптимальной для БНЗТ, и решены основные проблемы её реализации.

Впервые предложен и реализован метод определения толщины слоя лития по измерению электрической проводимости дистиллированной воды, в которую помещают свидетели с напылённым литием, находящиеся в процессе напыления в хорошем тепловом контакте с подложкой мишени.

Впервые предложен, оптимизирован и введён в эксплуатацию защитный заглублённый контейнер для выдержки и временного хранения активированных мишеней, выполненный в виде погруженного в грунт длинного стального стакана со свинцовой крышкой.

Впервые предложена система формирования пучка с  $MgF_2$ , Al и Ti фильтрами, позволяющая получить приемлемое качество нейтронного пучка для БНЗТ в режиме припороговой генерации нейтронов в реакции  ${}^7Li(p,n){}^7Be$ .

Впервые предложена система формирования ортогонального нейтронного пучка, позволяющая направлять пучок под любым углом и проводить облучение пациента с разных сторон.

Впервые предложен и запатентован способ получения пучка моноэнергетических нейтронов, использующий однозначную зависимость энергии нейтронов от угла их испускания из тонкого литиевого слоя в результате реакции  ${}^7Li(p,n){}^7Be$ .

### **Научная и практическая ценность работы**

Основная научная и практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что на экспериментальном образце источника эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени продемонстрирована возможность создания компактных, безопасных и относительно недорогих медицинских установок для проведения БНЗТ в условиях онкологических клиник.

Материалы диссертации могут быть использованы для создания источников быстрых и моноэнергетических нейтронов, резонансных и

моноэнергетических  $\gamma$ -квантов,  $\alpha$ -частиц и позитронов с целью применения для терапии быстрыми нейтронами и развития таких методик как оперативное обнаружение взрывчатых и наркотических веществ, калибровка детектора тёмной материи, датировка горных пород и пр.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Оптимизация ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и получение 2 МэВ 1,6 мА протонного пучка с высокой монохроматичностью по энергии и стабильностью по току.
2. Разработка и испытание нейтроногенерирующей мишени, оптимальной для формирования потока эпитепловых нейтронов для БНЗТ, включая изучение процессов напыления лития, теплосъёма, блистеринга, гамма-излучения, наведённой активности.
3. Оптимизация систем формирования пучка нейтронов для БНЗТ. Предложена система припорогового режима генерации в реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ , привлекательного малой активацией. Система позволяет сохранить направленность потока нейтронов, обусловленную кинематической коллимацией. Предложена ортогональная система, позволяющая направлять пучок нейтронов под любым углом и проводить облучение пациента с разных сторон.
4. Изучение генерации нейтронов и измерение их потока, спектра и мощности дозы, включая разработку и применение диагностических средств.
5. Демонстрация пригодности источника эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и генерации нейтронов в результате реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  для проведения БНЗТ в условиях онкологических клиник.
6. Формирование пучка моноэнергетических нейтронов с использованием однозначной зависимости энергии нейтронов от угла их испускания из тонкого литиевого слоя в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ . Такой пучок может быть применён для калибровки детекторов элементарных частиц.

### **Апробация диссертации**

Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН (Новосибирск), МИФИ (Москва), Университете Осака (Япония), компании IBA (Бельгия). Материалы диссертации в виде 41 доклада обсуждались на 23 международных и 5 российских конференциях: на IX – XVI международных конгрессах по нейтронозахватной терапии (Осака, Япония, 2000; Эссен, Германия, 2002; Бостон, США, 2004; Такамацу, Япония, 2006; Флоренция, Италия, 2008; Буэнос-Айрес, Аргентина, 2010; Цукуба, Япония, 2012; Хельсинки, Финляндия, 2014), на рабочих совещаниях по нейтронозахватной

терапии (Токай, Япония, 2000; Пиза, Италия, 2003; Кейптаун, ЮАР, 2009), на Международном симпозиуме по нейтронозахватной терапии (Новосибирск, 2004), на XIX Международной конференции по новым направлениям применения и технологий ядерной физики (Павия, Италия, 2005), на Всероссийской конференции "Фундаментальные науки – биотехнологии и медицине" (Новосибирск, 2006), на VIII Международном рабочем совещании по применению ускорителей для ядерных технологий (Покателло, США, 2007), на 2-ой Международной конференции по текущим проблемам ядерной физики и атомной энергии (Киев, Украина, 2008), на XI и XII международных симпозиумах по дозиметрии нейтронов и ионов (Кейптаун, ЮАР, 2009; Экс-ан-Прованс, Франция, 2013), на VIII Международном уральском семинаре по физике радиационных повреждений металлов и сплавов (Снежинск, 2009), на рабочих совещаниях "Физика для здоровья в Европе" (ЦЕРН, Швейцария, 2010), "Ионная терапия" (Владивосток, 2013), "Генерации нейтронов на ускорителях" (Линьяро, Италия, 2014), на 2-ой Международной конференции по ускорителям заряженных частиц (Сан-Себастьян, Испания, 2011), на научно-практическом семинаре с международным участием «Разработка и внедрение новых технологических решений и подготовка высококвалифицированных кадров для ядерной медицины» (Новосибирск, 2011), на научно-практическом семинаре "Ускорители для будущего России" (Москва, 2013), на всероссийских конференциях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 2004; Новосибирск, 2006; Санкт-Петербург, 2012).

Результаты диссертационной работы служили основанием получения поддержки на проведение исследований со стороны Международного научно-технического центра, Американского фонда гражданских исследований и развития, Министерства образования и науки РФ по программам уникальных установок, научных кадров и федеральных целевых программ, Российского научного фонда, Сибирского отделения Российской академии наук по междисциплинарным интеграционным проектам фундаментальных исследований.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 84 работы, из них 30 – в рецензируемых научных журналах, 41 – в трудах российских и международных научных конференций, 5 – в виде патентов, 2 – в виде заявок на получение патента РФ и 1 – в виде свидетельства о регистрации ноу-хау.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Материал работы изложен на 295 страницах, включает 163 рисунка, 20 таблиц и список цитируемой литературы из 260 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описана методика нейтронозахватной терапии, этапы её развития, приведены требования, предъявляемые к пучку нейтронов (плотность потока  $10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , узкое энергетическое распределение со средней энергией в районе 10 кэВ), обоснована актуальность разработки и создания источника нейтронов на основе ускорителя заряженных частиц, определена цель, сформулированы задачи, отмечена научная новизна темы диссертации, практическая значимость и уникальные особенности нового подхода.

**Первая глава** посвящена ускорителям заряженных частиц. Она начинается с обзора ускорителей, которые были предложены в мире за последние 20 лет для генерации нейтронов с целью проведения БНЗТ. Следует отметить, что, несмотря на предпринятые усилия, проблема создания ускорительных источников нейтронов для клиник не решена по сей день. Затем в § 1.2 дано описание предложенного проекта источника эпитепловых нейтронов на основе компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и припорогового режима генерации нейтронов в результате реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ . Схематически проект установки представлен на рисунке 1.

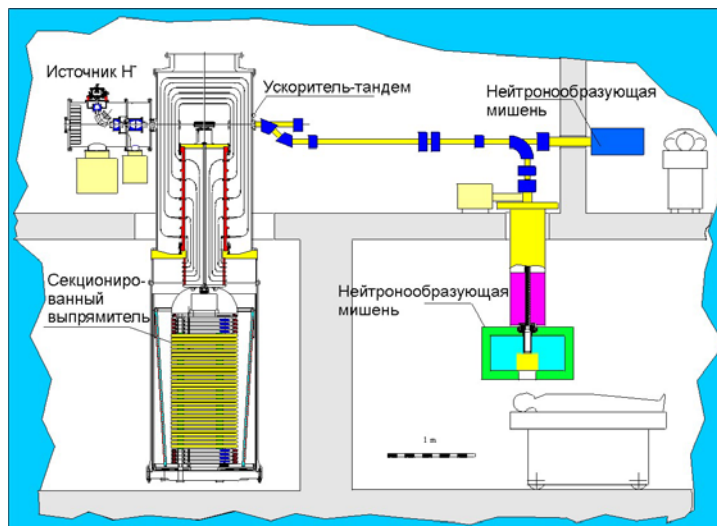


Рисунок 1. Схема источника нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.



Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией предназначен для получения 2,5 МэВ 10 мА протонного пучка. Генерируемые из источника  $\text{H}^-$  отрицательные ионы водорода инжектируются в ускоритель, ускоряются до 1,25 МэВ и обдираются в газовой обдирочной мишени, установленной в высоковольтном электроде. Затем получившиеся протоны ускоряются тем же потенциалом 1,25 МВ до энергии 2,5 МэВ и транспортируются до литиевой мишени, из которой генерируются нейтроны в результате реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ .

В § 1.3 приведён чертёж созданного ускорителя и дано описание принципа работы. Для генерации пучка отрицательных ионов водорода с током до 5 мА и энергией до 23 кэВ применён поверхностно-плазменный источник, использующий пеннинговский разряд с полыми катодами. Выходящий из источника пучок отрицательных ионов водорода подворачивается в магнитном поле на угол  $15^\circ$ , фокусируется парой магнитных линз, инжектируется в ускоритель и ускоряется в нём до 1 МВ с темпом 25 кВ/см. В газовой обдирочной мишени, установленной внутри высоковольтного электрода, отрицательные ионы водорода превращаются в протоны, которые затем тем же потенциалом 1 МВ ускоряются до энергии 2 МэВ и транспортируются до мишени, генерирующей нейтроны. В тракте транспортировки пучка высокой энергии установлены две пары квадрупольных линз, поворотный магнит и система развертки. Потенциал на высоковольтный и пять промежуточных электродов ускорителя подается от высоковольтного источника напряжения через проходной изолятор, в котором установлен омический делитель. Откачка газа осуществляется турбомолекулярными насосами, установленными у источника ионов и на выходе ускорителя, и криогенным насосом через жалюзи электродов. Диаметр вакуумного бака ускорителя равен 1400 мм, высоковольтного электрода – 600 мм.

В ускорителе с вакуумной изоляцией ускорительные трубки как таковые отсутствуют – изолятор отнесён от тракта ускорения пучка на значительное расстояние, что вместе с реализацией откачки газа через жалюзи электродов вне ускорительного промежутка позволяет надеяться на получение сильноточного протонного пучка. Особенностью ускорителя является большая энергия, запасённая в вакуумных зазорах, и быстрый темп ускорения заряженных частиц, что может приводить к проблемам высоковольтной прочности вакуумных зазоров и инжекции пучка в ускоритель.

Представлены и кратко обсуждены результаты проведённых экспериментов, продемонстрировавших сохранение высоковольтной прочности сантиметровых вакуумных зазоров с электродами площадью несколько квадратных метров до запасённой энергии 50 Дж и напряжённости электрического поля до 60 кВ/см. Обсуждена природа и динамика темнового

тока, неизбежно протекающего в межэлектродных промежутках. Показано, что темновой ток, связанный с десорбцией газа, уменьшается до приемлемого уровня за время часовой тренировки ускорителя подъёмом напряжения, а темновой ток, связанный с автоэмиссией, локализован и устранён. Проведение позаторной тренировки всех ускоряющих зазоров с помощью специально изготовленного устройства позволило обеспечить необходимую электрическую прочность ускорителя и получить на нём требуемое напряжение 1 МВ.

Параграф 1.4 посвящён решению второй проблемы ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией – большой силы входной линзы. Инжектируемый пучок отрицательных ионов водорода требуется перефокусировать перед входной линзой, с тем, чтобы потом его ускорить с темпом 25 кэВ/см в узком ускорительном канале и проводить через обдирочную мишень, задающую жесткие требования к эмиттансу пучка и качеству фокусировки. Рассмотрены и обсуждены различные способы инжекции пучка в ускоритель и изготовленный ионно-оптический тракт с магнитными фокусирующими линзами для ввода ионного пучка в ускоритель (рисунок 2).

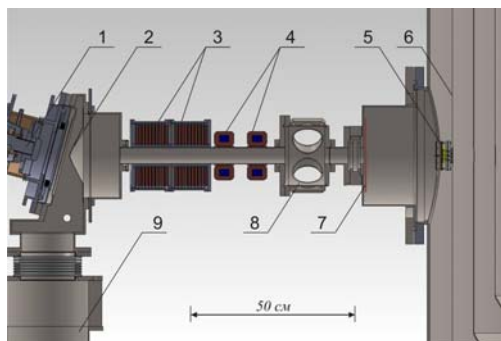


Рисунок 2. Тракт транспортировки пучка Н<sup>+</sup>:  
1 – источник Н<sup>+</sup>; 2 – конусная диафрагма; 3 – магнитные линзы; 4 – корректор; 5 – детектор; 6 – первый электрод ускорителя; 7 – входная диафрагма (убрана на время эксперимента); 8 – диагностическая камера; 9 – насос.

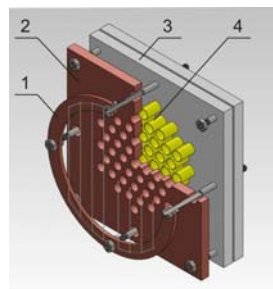


Рисунок 3. Детектор:  
1 – запирающая сетка,  
2 – медная пластина,  
3 – изоляторы,  
4 – медные гильзы.

Обращено внимание на получаемый из ускорителя первоначально малый ток протонного пучка (сотня микроампер) и на уменьшение потенциала первого ускоряющего электрода ускорителя. Выяснено, что уменьшение потенциала первого электрода ускорителя обусловлено током электронов, эмитируемых с диафрагмы (7 на рисунке 2), отделяющей тракт транспортировки пучка Н<sup>+</sup> от ускорителя и нагреваемой периферийной частью инжектируемого ионного пучка. Приведены результаты детального исследования фокусировки пучка отрицательных ионов водорода магнитными линзами с помощью многоканального детектора,

установленного перед входным отверстием первого ускоряющего электрода (рисунок 3). Выяснено, что i) в тракте транспортировки Н<sup>+</sup> реализуется режим полной компенсации пространственного заряда ионного пучка, ii) поперечная температура ионов на плазменной границе источника ионов имеет величину 1-2 эВ. Удаление диафрагмы и задание оптимальных параметров фокусирующих магнитных линз позволили обеспечить инжекцию и ускорение пучка практически без потерь и значительно увеличить ток протонного пучка.

В § 1.5 после рассмотрения разных типов обдирочных мишеней приведена конструкция изготовленной, выполненной в виде охлаждаемой цилиндрической трубки с внутренним диаметром 16 мм, длиной 400 мм с напуском аргона посередине и установленной внутри высоковольтного электрода на проходном изоляторе (рисунок 4). Приведены результаты расчётной и измеренной зависимости тока пучка заряженных частиц от газонапуска, которые хорошо согласуются между собой (рисунок 5). В § 1.5 изложен способ калибровки обдирочной мишени, основанный на измерении газонапуска, при котором на выходе из ускорителя ток протонов сравнивается с током неперезарядившихся отрицательных ионов водорода. Описана процедура задания параметров системы газонапуска для обеспечения требуемой степени обдирки пучка.



Рисунок 4.  
Обдирочная мишень.

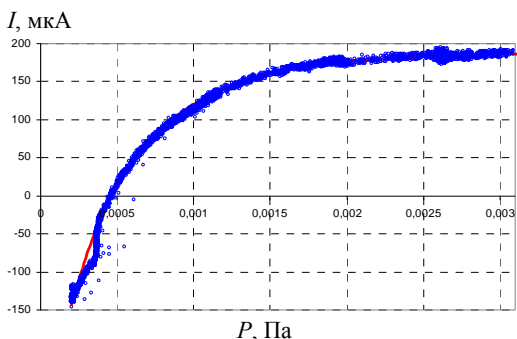


Рисунок 5. Измеренная и расчётная (линия) зависимости тока на выходе ускорителя от давления остаточного газа.

В § 1.6 обращено внимание на модификацию поверхности подвижной входной диафрагмы, на значительный уровень мощности поглощенной дозы тормозного излучения при ускорении ионного пучка без напуска газа в обдирочную мишень. Подача газа в обдирочную мишень сопровождается увеличением тока в ускорительном канале, мощности дозы тормозного излучения и тока на детекторе, охватывающего по периферии ускорительный канал. Выяснено, что увеличение тока в ускорительном канале обусловлено

ионизацией пучком газа, вытекающего как из обдирочной мишени, так и из источника отрицательных ионов, а также процессом, когда ионизованные в обдирочной мишени положительные ионы аргона вытекают через отверстие высоковольтного электрода в канал и ускоряются. Предложено решение, позволяющее существенно уменьшить сопутствующий поток заряженных частиц. В пространстве между обдирочной трубкой и диафрагмами высоковольтного электрода размещают 2-полюсные магниты с сильным полем и приподнимают обдирочную трубку на расстояние большее диаметра отверстия диафрагмы электрода. Помимо подавления потока положительных ионов аргона в ускорительный канал, ультрафиолет из слабоионизованной плазмы обдирочной мишени будет светить не в канал, а в стенку электрода. Также значительно уменьшится поток газа в канал и можно будет реализовать его дифференциальную откачку с рециркуляцией.

Далее в § 1.7 описан тракт транспортировки протонного пучка и представлены результаты проведённых исследований по развёртке пучка путём регистрации свечения танталовой фольги, размещённой вместо нейтроногенерирующей мишени внутри охлаждаемого вакуумного объёма. В § 1.8 дано описание диагностических средств измерения параметров протонного пучка и приведены характерные значения измеренных величин: ток протонного пучка – до 1,6 мА со стабильностью 0,5 % (рисунок 6), энергия – до 2 МэВ с монохроматичностью 0,1 %. В заключительном параграфе Главы 1 обсуждены предложения по увеличению параметров протонного пучка.

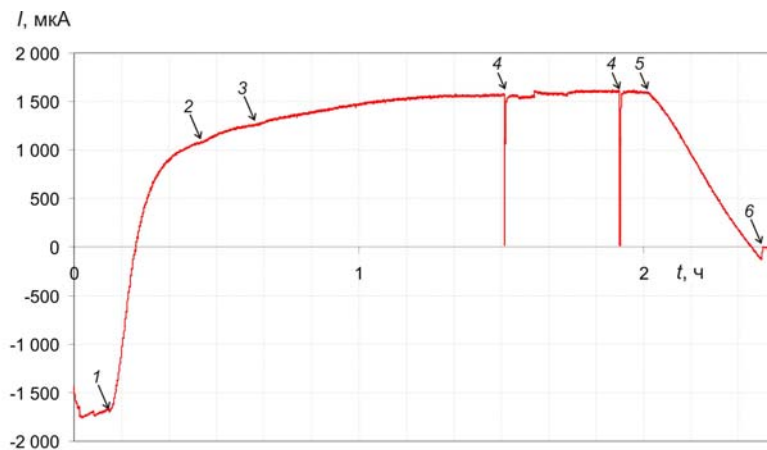


Рисунок 6. Временная зависимость тока ионного пучка (стрелкой 1 отмечено начало подачи газа в обдирочную мишень с частотой открывания клапана 1/10 Гц, 2– 1/7 Гц, 3 – 1/5 Гц; стрелкой 4 отмечены пробой по полному напряжению, 5 – момент выключения подачи газа, 6 – выключение источника).

**Вторая глава** посвящена нейтроногенирующей мишени. В § 2.1 приведены и обсуждены основные реакции генерации нейтронов и обоснована привлекательность реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  – наибольший выход нейтронов с наименьшей энергией. В следующем параграфе главы описаны и обсуждены все различные типы нейтроногенирующей литиевой мишени и обоснована привлекательность стационарной мишени, несмотря на сложность её практической реализации. Параграф 2.3 посвящён формулировке требований, выполнение которых позволит создать мишень, оптимальную для БНЗТ. Основные из них следующие: нейтроногенирующий слой должен быть в виде тонкого слоя чистого лития и оставаться в твёрдом состоянии при его нагреве протонным пучком. Подложка, на которую напыляется литиевый слой, должна быть тонкой, интенсивно охлаждаемой, стойкой к радиационным повреждениям, простой в изготовлении и легкоутилимой для её утилизации после активации.

В § 2.4 приведены экспериментальные результаты измерения мощности поглощённой дозы  $\gamma$ -излучения при облучении различных конструкционных материалов протонным пучком и показано, что использование тонкого литиевого слоя, нанесённого на подложку практически из любого материала, позволяет существенно уменьшить поток  $\gamma$ -квантов по сравнению со случаем поглощения протонов в литии. Толщина литиевого слоя определяется длиной пробега протона, на которой его энергия уменьшается с начальной до 1,882 МэВ – порога генерации нейтронов.

Параграф 2.5 содержит подробное описание решения проблемы эффективного теплосъёма, позволяющее поддерживать литиевый слой мишени в твёрдом состоянии при её нагреве мощным протонным пучком. Приведены результаты расчёта температуры литиевого слоя мишени при нагреве протонным пучком и охлаждении жидким теплоносителем (галлием и водой), а также результаты расчёта гидравлического сопротивления при течении теплоносителя в охлаждающих каналах мишени. Приведены, обсуждены и сравнены результаты экспериментального исследования охлаждения мишени жидким металлом (галлием) и водой при её нагреве 20 кВт электронным пучком. В процессе испытаний под электронным пучком произошло разрушение мишени, охлаждаемой жидким металлом. Обнаружено растворение части конструкционных материалов мишени, что может быть связано со значительным возрастанием химической активности галлия при его подогреве. При обсуждении перспективы определено, что увеличение диаметра мишени с 5 до 10 см не приводит к заметному падению качества нейтронного пучка, зато позволяет использовать водяное охлаждение. Далее приведены результаты тепловых испытаний мишени при нагреве мощным омическим нагревателем, изготовленным в виде спирали Архимеда из ниобиевой или танталовой фольги и покрытым пятиокисью

этих металлов для электроизоляции (рисунок 7), и охлаждении турбулентным потоком воды со скоростью 3 м/с.

На рисунке 8 представлен график экспериментально измеренной зависимости температуры поверхности подложки мишени от плотности мощности нагрева, отражающий три режима теплосъёма, включая пузырьковое и плёночное кипение. Определено, что при нагреве мишени диаметром 10 см мощностью 25 кВт турбулентное течение воды со скоростью 10 м/с обеспечит поддержание лития в твёрдом состоянии (ниже температуры плавления 182°C). Более того, такой режим обеспечит двукратный запас по мощности от случайного локального перегрева, поскольку турбулентное течение воды с плёночным кипением практически не сопровождается ростом температуры.



Рисунок 7.  
Омический нагреватель.

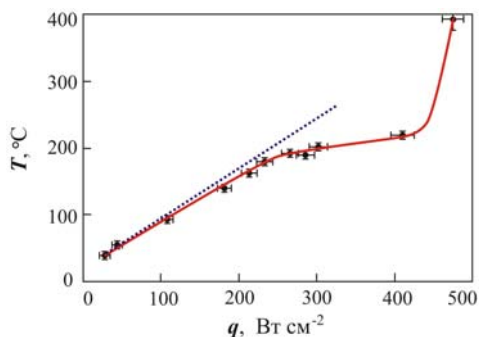


Рисунок 8. Зависимость температуры поверхности мишени от плотности мощности нагрева: сплошная линия – измеренная, пунктирная – расчётная турбулентного течения без закипания.

В § 2.6 обсуждается радиационный блистеринг материалов при имплантации протонного пучка, ограничивающий время эксплуатации мишени. Приведены и проанализированы результаты экспериментальных исследований критической дозы блистерообразования в различных материалах. Приведена оценка времени стойкости мишени диаметром 10 см из различных материалов к радиационному блистерингу при их облучении 2 МэВ 10 мА протонным пучком: 7 часов для Cu, W, Al, 20 часов для Pd и более 200 часов для V, Ta,  $\alpha$ -Fe. Поскольку время терапии не превышает 1 часа, то возможно применение различных металлов для изготовления мишени. Следовательно, радиационный блистеринг ограничивает время эксплуатации мишени, но не является критической проблемой.

Параграф 2.7 посвящён контролируемому напылению тонкого литиевого слоя на подложку мишени. Сначала описана разработанная и

изготовленная система термического напыления литиевого слоя и сама процедура напыления с указанием на ряд новаторских решений – заворачивание лития в алюминиевую фольгу для упрощения работы с ним в процессе подготовки напыления; нагрев такого литиевого контейнера до температуры ниже температуры плавления алюминия. Далее раскрыт новый метод измерения толщины литиевого слоя – по измерению электрической проводимости дистиллированной воды, в которую помещают тонкие свидетели с напылённым литием, находящиеся в хорошем тепловом контакте с подложкой мишени в процессе напыления (рисунок 9). Приведены результаты экспериментального измерения радиального распределения толщины литиевого слоя (рисунок 10) и доказательства того, что плотность напылённого лития равна кристаллической плотности лития. В заключительном подразделе параграфа приведены результаты экспериментального исследования литиевого слоя методом масс-спектрометрии вторичных ионов, показавшие, что чистота литиевого слоя и его стойкость к остаточному газу в вакуумной камере установки достаточны для эффективной генерации нейтронов.

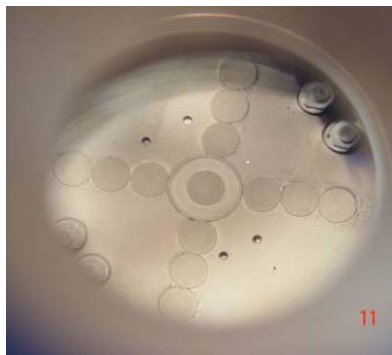


Рисунок 9. Мишень со свидетелями в вакуумной камере после напыления лития.

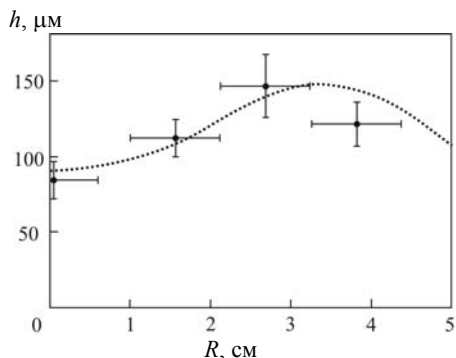


Рисунок 10. Радиальное распределение литиевого слоя: ● – измеренное, ..... – расчётное.

В § 2.8 приведено решение проблемы активации мишени бериллием-7, неизбежно образующимся при генерации нейтронов в реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ . Обращено внимание на то, что период полураспада  ${}^7\text{Be}$  (53,3 сут.) не слишком велик для реализации простой возможности дезактивации мишени в контейнере естественным путём, с другой стороны, он достаточно велик для проведения превентивных кратковременных операций по снятию мишени с установки и помещению её в контейнер. Описано предложенное решение дезактивации мишени путём помещения её в защитный контейнер, выполненный в виде погружённого в грунт длинного стального стакана со

свинцовой крышкой. Приведены результаты расчёта переноса  $\gamma$ -излучения для его оптимизации. После согласования технического проекта защитный заглублённый контейнер для выдержки и временного хранения активированных мишеней был изготовлен и введён в эксплуатацию, тем самым позволив осуществлять длительную генерацию нейтронов.

В заключительном параграфе Главы 2 приведено описание конструкции разработанной мишени, используемой для генерации нейтронов (рисунок 11) и частично повторённой в ряде современных проектов.

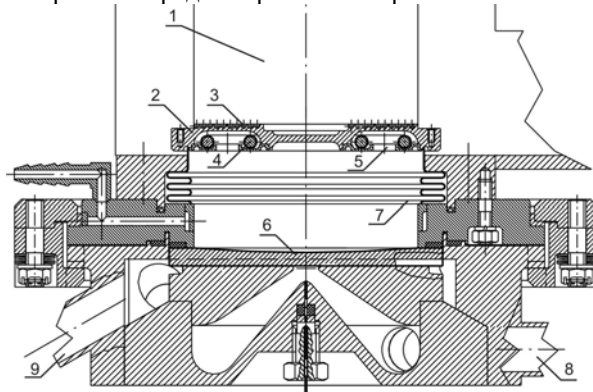


Рисунок 11. Нейтроногенерирующая мишень с системой напыления лития:

- 1 – протонопровод, 2 – тарелка шибера, 3 – нагреватель, 4 – контейнер с литием,
- 5 – круговое отверстие для выхода паров лития, 6 – приемник пучка, на который напыляется литий, 7 – сильфон, 8 и 9 – ввод и вывод воды для охлаждения.

**В Главе 3** предложены, описаны и обсуждены две новые системы формирования терапевтического пучка нейтронов для БНЗТ. Первая система позволяет реализовать припороговый режим генерации нейтронов, привлекательный вследствие малой активации мишени и установки. Вместо водородосодержащего замедлителя использованы фильтры из  $MgF_2$ , Al и Ti, которые рассеивают только быстрые нейтроны. Такая система позволяет сохранить направленность потока нейтронов, обусловленную кинематической коллимацией вблизи порога генерации. Вторая система, формирующая терапевтический пучок нейтронов, ортогональный протонному, помимо высокого качества пучка привносит новое качество в терапию – позволяет направлять пучок под любым углом (рисунок 12) и проводить облучение пациента с разных сторон. Для каждой из систем методом Монте-Карло проведены расчёты переноса нейтронов и  $\gamma$ -квантов. Определены спектр нейтронов и глубинное распределение мощности поглощённой дозы в модифицированном фантоме головы Снайдера. Показано, что полученные значения мощности поглощённой дозы, глубины терапии и терапевтического отношения удовлетворяют требованиям БНЗТ.



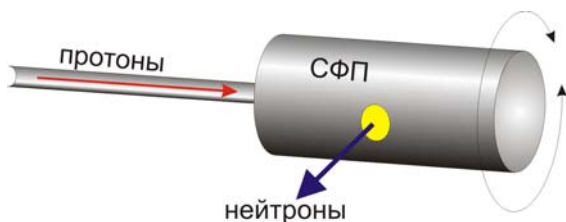


Рисунок 12. Система формирования ортогонального пучка нейтронов с возможностью направления пучка под любым углом.

В Главе 4 приведены результаты, связанные с генерацией нейтронов. В § 4.1 приведены и обсуждены результаты измерения потока нейтронов по активации мишени изотопом  $^7\text{Be}$  и по активации NaI сцинтиллятора  $\gamma$ -спектрометра, а также спектра сопутствующего  $\gamma$ -излучения. Затем в § 4.2 представлены результаты измерения спектра нейтронов: качественного – пузырьковыми детекторами BDT и BD100R (рисунок 13); с высокой степени детализации – времяпролётной методикой (рисунок 14) с новым техническим решением генерации коротких импульсов излучения подачей импульсов высокого напряжения на электрически изолированную мишень, переводящих энергию протонного пучка с допороговой на надпороговую. В заключительном параграфе главы приведены данные по измерению пространственного распределения мощности доз нейтронов и  $\gamma$ -квантов.



Рисунок 13. Пузырьковые детекторы BDT после генерации нейтронов.

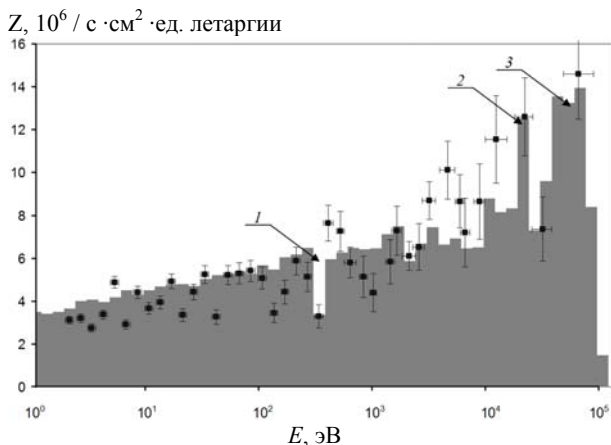


Рисунок 14. Результаты измерения спектра нейтронов: столбцы отображают расчетный спектр нейтронов, точками показан измеренный спектр, цифрами 1–3 отмечены характерные особенности спектра.

**Пятая глава** посвящена практическим приложениям созданного ускорителя и источника нейтронов. Основное предназначение источника связано с развитием методики БНЗТ. В § 5.1 приведены и обсуждены результаты проведенных *in vitro* исследований, наглядно продемонстрировавших избирательное уничтожение клеток опухоли. Приведён план работ, реализация которого позволит проводить *in vivo* исследования и БНЗТ больных злокачественной опухолью, и новая концепция компактной медицинской установки для БНЗТ (рисунок 15), вобравшая в себя предложения ортогональной системы формирования пучка нейтронов и интегрированной внутрь ускорителя высоковольтной системы питания.

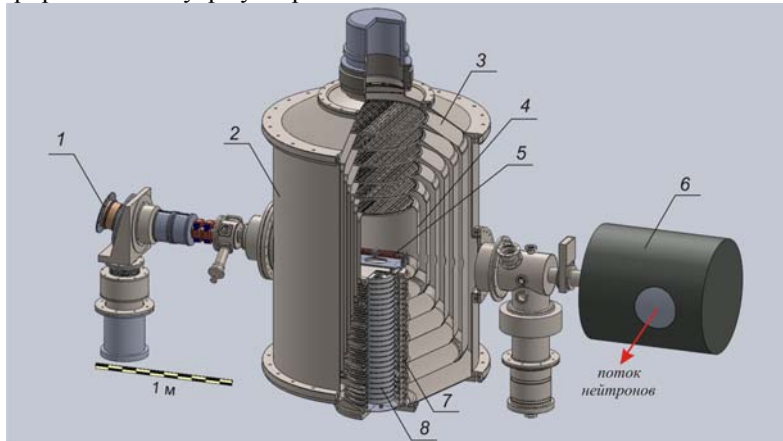


Рисунок 15. Источник нейтронов для БНЗТ. 1 – источник Н<sup>+</sup>, 2 – ускоритель, 3 – промежуточные электроды, 4 – высоковольтный электрод, 5 – обдирочная мишень, 6 – система формирования пучка, 7 – изолятор, 8 – источник высокого напряжения.

В § 5.2 обсуждается новый способ формирования пучка моноэнергетических нейтронов и описана возможность его практического применения для калибровки детекторов тёмной материи. Параграф 5.3 содержит ещё два предложения применения источника нейтронов – для терапии быстрыми нейтронами и для датировки горных пород, содержащих уран. В § 5.4 приведено описание двух приложений ускорителя для генерации потоков  $\gamma$ -квантов – моноэнергетических и резонансных с энергией 9,17 МэВ с целью развития методики оперативного обнаружения взрывчатых и наркотических веществ. Параграф 5.5 содержит предложение о применении ускорителя для генерации  $\alpha$ -частиц, в том числе с целью детального изучения перспективной безнейтронной термоядерной реакции  $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$ . В заключительном параграфе главы представлено предложение об источнике позитронов.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы следующие:

1. Предложен и впервые экспериментально исследован ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, характеризующийся быстрым темпом ускорения заряженных частиц и удалённостью от тракта ускорения ионного пучка изолятора, на котором крепятся промежуточные электроды, и отличающийся большой запасённой энергией в ускоряющих вакуумных зазорах и сильной входной электростатической линзой. На ускорителе получен стационарный протонный пучок с энергией 2 МэВ и током 1,6 мА. Пучок характеризуется высокой монохроматичностью энергии  $\pm 0,1\%$  и стабильностью тока  $\pm 0,5\%$ .

2. Предложена, разработана и экспериментально исследована нейтроногенерирующая мишень, оптимальная для формирования потока эпитепловых нейтронов, удовлетворяющего требованиям БНЗТ.

3. Доказано, что система формирования пучка, включающая в себя фильтры из  $MgF_2$ , Al и Ti, позволяет сохранить направленность потока нейтронов, обусловленную кинематической коллимацией вблизи порога генерации, и использовать для БНЗТ припороговый режим генерации нейтронов в результате реакции  ${}^7Li(p,n){}^7Be$ , привлекательный вследствие малой активации мишени и установки.

Установлено, что формирование ортогонального пучка нейтронов обеспечивает высокое качество пучка для БНЗТ и привносит новую возможность направлять пучок нейтронов под любым углом и проводить облучение пациента с разных сторон.

4. Осуществлена генерация нейтронов и экспериментально измерены: поток нейтронов по активации мишени изотопом  ${}^7Be$  и по активации NaI сцинтиллятора  $\gamma$ -спектрометра; спектр нейтронов – пузырьковыми детекторами BDT и BD100R и времяпролётной методикой с применением нового технического решения генерации коротких импульсов нейтронного излучения; пространственное распределение мощности дозы нейтронов – дозиметром-радиометром.

5. Доказано, что формируемый поток эпитепловых нейтронов в *in vitro* условиях обеспечивает избирательное уничтожение клеток злокачественной опухоли, инкубированных в среде борфенилаланина.

Предложена новая концепция компактной медицинской установки для БНЗТ, заключающаяся в использовании системы формирования ортогонального пучка нейтронов и в размещении источника высоковольтного питания внутри изолятора ускорителя.

Предложен и запатентован новый способ формирования потока моноэнергетических нейтронов, использующий однозначную зависимость энергии нейтронов от угла их испускания из тонкого литиевого слоя в

результате реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ . Установлена возможность применения данного способа для калибровки детекторов тёмной материи.

Показано, что созданный ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией со специализированными мишенями позволяет генерировать быстрые нейтроны для терапии быстрыми нейтронами и для датировки горных пород, монохроматические  $\gamma$ -кванты, резонансные  $\gamma$ -кванты для развития методики оперативного обнаружения взрывчатых и наркотических веществ,  $\alpha$ -частицы для исследования перспективной безнейтронной термоядерной реакции  ${}^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha\alpha$  и позитроны.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. B. Bayanov, V. Belov, E. Bender, M. Bokhovko, G. Dimov, V. Kononov, O. Kononov, N. Kuksanov, V. Palchikov, V. Pivovarov, R. Salimov, G. Silvestrov, A. Skrinsky, N. Soloviov, S. Taskaev. Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital. Nuclear Instr. and Methods in Physics Research A 413/2-3 (1998) 397-426.
2. B. Bayanov, V. Belov, E. Bender, M. Bokhovko, G. Dimov, V. Kononov, O. Kononov, N. Kuksanov, V. Palchikov, V. Pivovarov, R. Salimov, G. Silvestrov, A. Skrinsky, S. Taskaev. Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital. Proc. First Asian Particle Accelerator Conference, March 23-27, 1998, Tsukuba, Japan, p. 795.
3. В.Н. Кононов, Г.И. Сильвестров, А.С. Сысоев, С.Ю. Таскаев. Основанный на ускорителе источник нейтронов для нейтронной терапии рака в условиях госпиталя. Объединенная научная сессия СО РАН и СО РАМН, 22-23 июня 2000, Новосибирск, Россия, стр. 13.
4. B. Bayanov, V. Belov, G. Dimov, G. Derevyankin, V. Dolgushin, A. Dranichnikov, V. Kononov, G. Kraynov, A. Krivenko, N. Kuksanov, V. Palchikov, R. Salimov, V. Savkin, V. Shirokov, G. Silvestrov, I. Sorokin, and S. Taskaev. High-current electrostatic accelerator-tandem for the neutron therapy facility. Proc. 9<sup>th</sup> International Symposium on Neutron Capture Therapy for Cancer, October 2-6, 2000, Osaka, Japan, p. 251-252.
5. V. Belov, S. Fadeev, V. Karasyuk, V. Kononov, O. Kononov, A. Krivenko, N. Markov, V. Palchikov, G. Silvestrov, G. Smirnov, and S. Taskaev. Neutron producing target for neutron capture therapy. Proc. 9<sup>th</sup> International Symposium on Neutron Capture Therapy for Cancer, October 2-6, 2000, Osaka, Japan, p. 253-254.
6. V. Kononov, G. Silvestrov, A. Sysoev, and S. Taskaev. Fast neutron therapy and boron neutron capture therapy in Russia. Proc. 2<sup>nd</sup> Neutron Irradiation Technical Meeting on BNCT, Tokai, Japan, October 9-11, 2000, p. 21-22.

7. Г.Е. Деревянкин, Г.И. Димов, В.М. Долгушин, А.Н. Драничников, Г.С. Крайнов, А.С. Кривенко, В.Е. Пальчиков, М.В. Петриченко, Е.И. Похлебин, Р.А. Салимов, Г.И. Сильвестров, С.Ю. Таскаев, В.В. Широков. Перезарядная мишень 40 мА 2 МэВ ускорителя-тандема. Препринт ИЯФ 2001-23. Новосибирск. 2001.
8. Ю.И. Бельченко, В.Н. Белов, Г.И. Димов, Г.Е. Деревянкин, В.М. Долгушин, А.Н. Драничников, Г.С. Крайнов, А.С. Кривенко, Н.К. Куксанов, В.Е. Пальчиков, М.В. Петриченко, В.В. Прудников, В.Я. Савкин, Р.А. Салимов, Г.И. Сильвестров, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, С.Н. Фадеев, В.В. Широков. Высоковольтный ускоритель для нейтрон-захватной терапии. 10-е международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября 2001. Сборник докладов, Москва, ЦНИИатоминформ, 2001, стр.208-211.
9. Г.И. Сильвестров, С.Ю. Таскаев, В.В. Широков. Источник нейтронов на основе протонного ускорителя для бор-нейтронозахватной терапии и терапии быстрыми нейтронами. Вестник "Радтех-Евразия", Номер 1 (11), Москва-Новосибирск, 2002, стр. 132-141.
10. М.Е. Вейс, С.Н. Фадеев, Н.К. Куксанов, П. И. Немытов, В.В. Прудников, Р.А. Салимов, С.Ю. Таскаев. Стабилизация ускоряющего напряжения в высоковольтном ускорителе-тандеме для нейтронозахватной терапии. Препринт ИЯФ 2002-17. Новосибирск. 2002.
11. Г.Е. Деревянкин, Г.С. Крайнов, А.М. Крючков, Г.И. Сильвестров, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов. Ионно-оптический тракт 2,5 МэВ 10 мА ускорителя-тандема. Препринт ИЯФ 2002-24. Новосибирск. 2002.
12. J. Farrell, V. Dudnikov, N. Guardala, G. Merkel and S. Taskaev. An Intense Positron Beam Source Based on a High Current 2 MeV Vacuum Insulated Tandem Accelerator. 7<sup>th</sup> International Workshop on Positron and Positronium Chemistry and Symposium on Positron Production, Storage and Energy Conversion, 2002, p. 47.
13. Г.И. Димов, Г.Е. Деревянкин, В.М. Долгушин, А.Н. Драничников, Г.С. Крайнов, А.С. Кривенко, В.Е. Пальчиков, М.В. Петриченко, Е.И. Похлебин, Р.А. Салимов, Г.И. Сильвестров, С.Ю. Таскаев, В.В. Широков. Перезарядная мишень ускорителя-тандема для целей бор-нейтронозахватной терапии. XIV Международная конференция по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям. Обнинск, Россия, 6-9 июня 2001. Сборник трудов. - Обнинск. - 2002. Стр. 238-244.
14. G. Silvestrov, B. Bayanov, V. Belov, G. Dimov, S. Danilov, V. Karasyuk, T. Sokolova, S. Taskaev, G. Villevald, V. Kononov. High power neutron producing target with liquid metal cooling. Abstract Brochure of 8<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference, Paris, 3-7 June 2002, p. 17.

15. V. Belov, S. Fadeev, V. Karasyuk, V. Kononov, O. Kononov, N. Kuksanov, G. Kraynov, Y. Petrov, V. Pidyakov, V. Rachkov, R. Salimov, G. Silvestrov, G. Smirnov, S. Taskaev and G. Villeval'd. Neutron producing target for accelerator based neutron source for NCT. Research and Development in Neutron Capture Therapy. Eds.: W. Sauerwein, R. Moss, and A. Wittig. Monduzzi Editore, 2002, p. 247-252.
16. O. Kononov, V. Kononov, V. Korobeinikov, S. Ognev, W. Chu, G. Silvestrov, N. Soloviev, S. Taskaev, A. Zhitnik. Investigations of using near-threshold  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  reaction for NCT based on in-phantom dose distribution. Research and Development in Neutron Capture Therapy. Eds.: W. Sauerwein, R. Moss, and A. Wittig. Monduzzi Editore, 2002, p. 241-246.
17. Г.И. Димов, Ю.И. Бельченко, Г.С. Крайнов, Р.А. Салимов, Н.К. Куксанов, Г.И. Сильвестров, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, Д.К. Топорков, В.В. Широков. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для бор-нейтронозахватной терапии и обнаружения взрывчатых веществ методом резонансного поглощения гамма-излучения. Атомная энергия 94(2) (2003) 155-159.
18. V. Bayanov, V. Belov, V. Kindyuk, E. Oparin, S. Taskaev. Lithium neutron producing target for BINP accelerator-based neutron source. Applied Radiation and Isotopes 61 (2004) 817-821.
19. А.С. Сысоев, И.А. Гулидов, С.Е. Ульяновко, Е.Б. Бузаев, В.Н. Кононов, О.Е. Кононов, В.В. Коробейников, С.Ю. Таскаев. Клинические аспекты использования различных источников нейтронов для нейтронозахватной терапии. Современное состояние и перспективы развития экспериментальной и клинической онкологии. Материалы Российской научно-практической конференции, посвященной 25-летию НИИ онкологии ТНЦ СО РАМН, Томск, 24-25 июня 2004, стр. 246-247.
20. Proceedings of International Symposium on Boron Neutron Capture Therapy, Sergey TASKAEV, Ed., July 7-9, 2004, Novosibirsk, Russia, 113 p.
21. V. Kononov, G. Smirnov, S. Taskaev. Tape high power neutron producing target for NCT. Program of Eleventh World Congress on Neutron Capture Therapy, Boston, MA, USA, October 11-15, 2004, p. 46-47.
22. V. Bayanov, V. Belov, V. Kindyuk, E. Oparin, S. Taskaev. Lithium neutron producing target for BINP accelerator-based neutron source. Program of Eleventh World Congress on Neutron Capture Therapy, Boston, MA, USA, October 11-15, 2004, p. 13-14.
23. Б.Ф. Баянов, В.П. Белов, С.Ю. Таскаев. Нейтроногенирующая мишень ускорительного источника нейтронов для нейтронозахватной терапии. Препринт ИЯФ 2005-4. Новосибирск. 2005.
24. Ю.И. Бельченко, А.В. Бурдаков, В.И. Давыденко, В.М. Долгушин, А.Н. Драничников, А.А. Иванов, В.В. Кобец, С.Г. Константинов, А.С. Кривенко, А.М. Кудрявцев, В.Я. Савкин, А.Л. Санин, И.Н. Сорокин,

- С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, А.Д. Хильченко, В.В. Широков. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией как основа медицинского комплекса для лечения злокачественных опухолей методом борнейтронозахватной терапии и таможенного комплекса для дистанционного обнаружения взрывчатых веществ. Вестник НГУ: серия "Физика" 1(2) (2006) 82-88.
25. B. Bayanov, V. Belov, S. Taskaev. Neutron producing target for accelerator based neutron capture therapy. *Journal of Physics* 41 (2006) 460-465.
  26. S. Taskaev, B. Bayanov, V. Belov and E. Zhoorov. Development of lithium target for accelerator based neutron capture therapy. *Advances in Neutron Capture Therapy* 2006, p. 292-295.
  27. Y. Belchenko, A. Burdakov, V. Davydenko, A. Ivanov, V. Kobets, A. Kudryavtsev, V. Savkin, V. Shirokov, S. Taskaev. BINP pilot accelerator-based neutron source for neutron capture therapy. *Advances in Neutron Capture Therapy* 2006, p. 296-299.
  28. Г.Г. Смирнов, С.Ю. Таскаев, Г.И. Сильвестров, В.Н. Кононов. Нейтроно-продуцирующий мишенный узел. Патент РФ № 2282908 от 27.08.2006.
  29. Г.Г. Смирнов, С.Ю. Таскаев, Г.И. Сильвестров, В.Н. Кононов. Способ получения нейтронов. Патент РФ № 2282909 от 27.08.2006.
  30. B. Bayanov, V. Belov, S. Taskaev. Neutron producing target for accelerator based neutron capture therapy. *Proc. XX Russian Particle Accelerator Conference RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia, 10-14 September 2006*, p. 360-362.
  31. Б.Ф. Баянов, Е.В. Журов, С.Ю. Таскаев. Измерение толщины литиевого слоя. *Приборы и техника эксперимента* 1 (2008) 160-162.
  32. Б.Ф. Баянов, С.Ю. Таскаев, В.И. Ободников, Е.Г. Тишковский. Влияние остаточного газа на литиевый слой нейтроногенерирующей мишени. *Приборы и техника эксперимента* 3 (2008) 119-124.
  33. Г.Г. Смирнов, С.Ю. Таскаев, Г.И. Сильвестров, В.Н. Кононов. Нейтроно-продуцирующий мишенный узел. Патент РФ 2326513 от 06.10.2008.
  34. B. Bayanov, A. Burdakov, V. Chudaev, A. Ivanov, S. Konstantinov, A. Kuznetsov, A. Makarov, G. Malyshkin, K. Mekler, I. Sorokin, Yu. Sulyaev, and S. Taskaev. First neutron generation in the BINP accelerator based neutron source. *Proc. XIII Int. Congress on Neutron Capture Therapy, Florence, Italy, 2-7 November 2008*, Edited by A.Zonta, et al., p. 514-517.
  35. B. Bayanov, E. Kashaeva, A. Makarov, G. Malyshkin, S. Samarin, and S. Taskaev. A neutron producing target for BINP accelerator-based neutron source. *Proc. XIII Int. Congress on Neutron Capture Therapy, Florence, Italy, 2-7 November 2008*, Edited by A.Zonta, et al., p. 490-493.
  36. Б.Ф. Баянов, С.Ю. Таскаев. Литиевый контейнер. Патент WO/2008/147239 от 04.12.2008.

37. А.С. Кузнецов, Г.Н. Малышкин, А.Н. Макаров, И.Н. Сорокин, Ю.С. Суляев, С.Ю. Таскаев. Первые эксперименты по регистрации нейтронов на ускорительном источнике для бор-нейтронозахватной терапии. Письма в ЖТФ 35(8) (2009) 1-6.
38. B. Bayanov, E. Kashaeva, A. Makarov, G. Malyshkin, S. Samarin, S. Taskaev. A neutron producing target for BINP accelerator-based neutron source. Applied Radiation and Isotopes 67(7-8) (2009) S282-S284.
39. B. Bayanov, A. Burdakov, V. Chudaev, A. Ivanov, S. Konstantinov, A. Kuznetsov, A. Makarov, G. Malyshkin, K. Mekler, I. Sorokin, Yu. Sulyaev, S. Taskaev. First neutron generation in the BINP accelerator based neutron source. Applied Radiation and Isotopes 67(7-8) (2009) S285-S287.
40. A. Kuznetsov, Yu. Belchenko, A. Burdakov, V. Davydenko, A. Donin, A. Ivanov, S. Konstantinov, A. Krivenko, A. Kudryavtsev, K. Mekler, A. Sanin, I. Sorokin, Yu. Sulyaev, S. Taskaev, V. Shirokov and Yu. Eidelman. The detection of nitrogen using nuclear resonance absorption of mono-energetic gamma rays. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A 606 (2009) 238-242.
41. B. Bayanov, A. Kuznetsov, S. Sinitskii, Yu. Sulyaev, S. Taskaev. Dosimetry and spectrometry at accelerator based neutron source for boron neutron capture therapy. Proc. 11<sup>th</sup> Neutron and Ion Dosimetry Symposium, Cape Town, South Africa, 12-16 October 2009, p. 108.
42. S. Taskaev. No technical problems for realization of best reaction to form the beam of epithermal neutrons for BNCT. Satellite Symposium on Neutrons for Therapy, Cape Town, South Africa, 12 October 2009, p. 20.
43. B. Bayanov, A. Burdakov, V. Chudaev, A. Ivanov, S. Konstantinov, A. Kuznetsov, A. Makarov, G. Malyshkin, K. Mekler, I. Sorokin, Yu. Sulyaev, S. Taskaev. Results of first experiments on neutron generation in the VITA neutron source. Proc. 2<sup>nd</sup> Intern. Conference on Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, June 9-15, 2008. Kyiv, Ukraine, 2009. Part II, p. 772-776.
44. B. Bayanov, A. Burdakov, V. Davydenko, A. Ivanov, A. Kudryavtsev, G. Malyshkin, V. Shirokov, S. Taskaev. Innovative accelerator based neutron source. Proc. 2<sup>nd</sup> Intern. Conference on Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, June 9-15, 2008. Kyiv, Ukraine, 2009. Part II, p. 799-802.
45. B. Bayanov, A. Burdakov, A. Ivanov, A. Kuznetsov, S. Taskaev. Accelerator based epithermal neutron source for boron neutron capture therapy. Physics for Health in Europe Workshop, 2-4 February 2010, CERN - Switzerland. Book of Abstracts, p. 11.
46. В.И. Алейник, А.В. Бурдаков, Э.В. Григорьева, В.И. Давыденко, А.А. Иванов, В.В. Каныгин, А.С. Кузнецов, А.Н. Макаров, Ю.В. Пахомова, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев. Характеристики и возможности



- ускорительного источника эпитепловых нейтронов ИЯФ СО РАН. Материалы IV Всероссийского Национального конгресса лучевых диагностов и терапевтов, Москва, 25-27 мая 2010, стр. 18-19.
47. V. Aleynik, B. Bayanov, A. Burdakov, A. Kuznetsov, A. Makarov, S. Sinitskii, S. Taskaev. The time-of-flight technique for the neutron spectrum measurement on VITA-facility. Proc. 3<sup>rd</sup> International Conference on Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv2010), June 7-12, 2010, Kyiv, Ukraine, p. 559-562.
  48. V. Aleinik, A. Burdakov, V. Davydenko, A. Ivanov, V. Kanygin, A. Kuznetsov, A. Makarov, I. Sorokin and S. Taskaev. BINP accelerator based epithermal neutron source. Proc. 14<sup>th</sup> International Congress on Neutron Capture Therapy. October 25-29, 2010, Buenos Aires, Argentina, p.441-444.
  49. S. Taskaev, B. Bayanov, V. Chudaev, Ya. Kandiev, E. Kashaeva, G. Malyshkin. A protective subsurface container for activated target holding and temporary storage. Proc. 14<sup>th</sup> International Congress on Neutron Capture Therapy. October 25-29, 2010, Buenos Aires, Argentina, p.503-506.
  50. Ya. Kandiev, E. Kashaeva, G. Malyshkin, S. Taskaev, B. Bayanov. Optimization of the target of an accelerator-driven neutron source through Monte Carlo numerical simulation of neutron and gamma transport by the PRIZMA code. Proc. 14<sup>th</sup> International Congress on Neutron Capture Therapy. October 25-29, 2010, Buenos Aires, Argentina, p.507-510.
  51. V. Aleinik, B. Bayanov, A. Burdakov, A. Makarov, S. Sinitskiy and S. Taskaev. New technical solution for use the time-of-flight technique to measure neutron spectra. Proc. 14<sup>th</sup> International Congress on Neutron Capture Therapy. October 25-29, 2010, Buenos Aires, Argentina, p.511-514.
  52. W. Sauerwein, V. Kulakov, A. Lipengolts, S. Taskaev, C. Doll. The ISTC BNCT Task Force. Proc. 14<sup>th</sup> International Congress on Neutron Capture Therapy. October 25-29, 2010, Buenos Aires, Argentina, p.535.
  53. Б.Ф. Баянов, Я.З. Кандиев, Е.А. Кашаева, Г.Н.Малышкин, С.Ю. Таскаев, В.Я. Чудаев. Защитный заглубленный контейнер для выдержки и временного хранения активированных мишеней. Приборы и техника эксперимента 6 (2010) 117-120.
  54. B. Bayanov, A. Burdakov, A. Kuznetsov, A. Makarov, S. Sinitskii, Yu. Sulyaev, S. Taskaev. Dosimetry and spectrometry at accelerator based neutron source for boron neutron capture therapy. Radiation Measurements 45 (2010) 1462-1464.
  55. V. Aleynik, B. Bayanov, A. Burdakov, D. Kasatov, A. Makarov, S. Sinitskiy, I. Shudlo and S. Taskaev. New technical solution for using the time-of-flight technique to measure neutron spectra. The Front Edge of BNCT Development, Proc. 6<sup>th</sup> Young Researchers Boron Neutron Capture Therapy Meeting, December 4-8, 2011, Hsinchu, Taiwan (R.O.C), pp. 152-157.

56. S. Taskaev, V. Aleynik, A. Burdakov, A. Ivanov, A. Kuznetsov, A. Makarov, I. Sorokin. Vacuum-insulation tandem accelerator for boron neutron capture therapy. Proc. 2<sup>nd</sup> International Particle Accelerator Conference, September 4-9, 2011, San Sebastian, Spain, p. 3615-3617.
57. Л.А. Мостович, Н.В. Губанова, О.С. Куценко, В.И. Алейник, А.С. Кузнецов, А.Н. Макаров, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, Г.И. Непомнящих, Э.В. Григорьева. Влияние эпитепловых нейтронов на жизнеспособность опухолевых клеток глиобластомы *in vitro*. Бюллетень экспериментальной биологии и медицины 151(2) (2011) 229-235.
58. С.Ю. Таскаев. VITA значит жизнь. Наука из первых рук 4 (2011) 88-95.
59. V. Aleynik, A. Burdakov, V. Davydenko, A. Ivanov, V. Kanygin, A. Kuznetsov, A. Makarov, I. Sorokin, and S. Taskaev. BINP accelerator based epithermal neutron source. Applied Radiation and Isotopes 69 (2011) 1635-1638.
60. V. Aleynik, B. Bayanov, A. Burdakov, A. Makarov, S. Sinitskiy, S. Taskaev. New technical solution for using the time-of-flight technique to measure neutron spectra. Applied Radiation and Isotopes 69 (2011) 1639-1641.
61. Ya. Kandiev, E. Kashaeva, G. Malyshkin, B. Bayanov, S. Taskaev. Optimization of the target of an accelerator-driven neutron source through Monte Carlo numerical simulation of neutron and gamma transport by the PRIZMA code. Applied Radiation and Isotopes 69 (2011) 1632-1634.
62. А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, В.Я. Чудаев. Рентгеновское излучение высоковольтных элементов тандемного ускорителя с вакуумной изоляцией. Медицинская физика 2 (2012) 5-11.
63. V. Kanygin, S. Taskaev. New design of medical facility for BNCT based on VITA neutron source. Abstracts of the 15<sup>th</sup> International Congress on Neutron Capture Therapy, 10-14 September 2012, Tsukuba, Japan, p. 133.
64. E. Kashaeva, G. Malyshkin, S. Samarina, S. Taskaev. Regimes of therapeutic beam shaping from an accelerator neutron source. Abstracts of the 15<sup>th</sup> International Congress on Neutron Capture Therapy, 10-14 September 2012, Tsukuba, Japan, p. 138-139.
65. S. Taskaev, V. Aleynik, A. Bashkirtsev, B. Bayanov, M. Kamkin, D. Kasatov, A. Kuznetsov, A. Makarov, I. Schudlo, I. Sorokin, M. Tiunov. VITA based neutron source – status and prospects. Proc. XXIII Russian Particle Accelerator Conference, September 24-28, 2012, Saint-Petersburg, Russia, p. 230-232.
66. I. Sorokin, A. Bashkirtsev, V. Chudaev, A. Ivanov, D. Kasatov, A. Kuznetsov, S. Taskaev. X-ray radiation high-voltage elements of the tandem accelerator with vacuum insulation. Proc. XXIII Russian Particle Accelerator Conference, September 24-28, 2012, Saint-Petersburg, Russia, p. 299-301.

67. A. Kuznetsov, V. Aleynik, I. Shchudlo, I. Sorokin, S. Taskaev, M. Tiunov. Calibration testing of the stripping target of the vacuum insulated tandem accelerator. Proceedings of XXIII Russian Particle Accelerator Conference, September 24-28, 2012, Saint-Petersburg, Russia, p. 560-562.
68. A. Makarov, V. Aleynik, A. Bashkirtsev, A. Kuznetsov, I. Schudlo, I. Sorokin, S. Taskaev, M. Tiunov. Optimization of the negative hydrogen ion beam injection into the tandem accelerator with vacuum insulation. Proc. XXIII Russian Particle Accelerator Conference, September 24-28, 2012, Saint-Petersburg, Russia, p. 623-625.
69. V. Byvaltsev, V. Kanygin, E. Belykh, S. Taskaev. Prospects in Boron Neutron Capture Therapy of Brain Tumors. World Neurosurgery 78(1-2) (2012) 8-9.
70. В.В. Каныгин, С.Ю. Таскаев. Система формирования ортогонального пучка нейтронов. Заявка на патент РФ. Регистрационный номер 2013105995 от 12.02.2013 (приоритетная дата).
71. В.И. Алейник, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, И.М. Щудло. Калибровка обдирочной мишени ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета 50(1) (2013) 83-92.
72. В.И. Алейник, А.Г. Башкирцев, А.С. Кузнецов, А.Н. Макаров, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, И.М. Щудло. Оптимизация транспортировки пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации 20(1) (2013) 47-55.
73. А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, В.Я. Чудаев. Рентгеновское излучение высоковольтных элементов ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации 20(1) (2013) 56-62.
74. A. Kuznetsov, V. Aleynik, A. Bashkirtsev, D. Kasatov, A. Makarov, I. Schudlo, I. Sorokin, S. Taskaev, M. Tiunov. Raising the generating current in the VITA neutron source for BNCT. Proc. 4 Intern. Particle Accelerator Conference, 12-14 May 2013, Shanghai, China, p. 3693-3695.
75. В.И. Алейник, З.Ш. Аннаев, А.Г. Башкирцев, А.В. Бурдаков, Н.В. Губанова, В.В. Каныгин, Д.А. Касатов, А.И. Кичигин, А.С. Кузнецов, А.Н. Макаров, Р.А. Морозов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, И.М. Щудло. Исследования на новаторском ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. Программа и тезисы докладов. Научно-практический семинар "Ускорители для будущего России", 24-25 июня 2013, Москва, стр. 28-31.

76. А.Н. Макаров и С.Ю. Таскаев. Пучок моноэнергетических нейтронов для калибровки детектора темной материи. Письма в ЖЭТФ 97(12) (2013) 769-771.
77. С.Ю. Таскаев. Газовая обдирочная мишень. Заявка на патент РФ. Регистрационный номер 2013140568 от 02.09.2013 (приоритетная дата).
78. В.И. Алейник, А.А. Иванов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев. Темновые токи ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Приборы и техника эксперимента 5 (2013) 5-13.
79. А.Е. Бондарь, А.Ф. Бузулуцков, А.В. Бурдаков, Е.С. Гришняев, А.Д. Долгов, А.Н. Макаров, С.В. Полосаткин, А.В. Соколов, С.Ю. Таскаев, Л.И. Шехтман. Проект систем рассеяния нейтронов для калибровки детекторов темной материи и низкоэнергетических нейтрино. Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика, 8(3) (2013) 27-38.
80. А.Н. Макаров и С.Ю. Таскаев. Способ определения соотношения сигнал/шум во время измерения энергетического спектра нейтронов времяпролетным методом. Свидетельство о регистрации ноу-хау № 19 от 16.12.2013. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.
81. С.Ю. Таскаев. Способ получения пучка моноэнергетических нейтронов, устройство для получения пучка моноэнергетических нейтронов и способ калибровки детектора темной материи с использованием пучка моноэнергетических нейтронов. Патент РФ № 2515523 от 14.03.2014.
82. И.Н. Сорокин и С.Ю. Таскаев. Подъем напряжения на высоковольтных вакуумных зазорах ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Приборы и техника эксперимента 4 (2014) 5-8.
83. В.И. Алейник, Д.А. Касатов, А.Н. Макаров, С.Ю. Таскаев. Измерение спектра нейтронов ускорительного источника времяпролетным методом. Приборы и техника эксперимента 4 (2014) 9-13.
84. V. Aleynik, A. Bashkirtsev, V. Kanygin, D. Kasatov, A. Kuznetsov, A. Makarov, I. Schudlo, I. Sorokin, S. Taskaev, M. Tiunov. Current progress and future prospects of the VITA based neutron source. Applied Radiation and Isotopes 88 (2014) 177-179.