

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ускорительный источник нейтронов
для бор-нейтронозахватной терапии

А.А. Иванов, А.Н. Смирнов, С.Ю. Таскаев, Б.Ф. Баянов, Ю.И. Бельченко, В.И. Давыденко, А. Дунаевский, И.С. Емелев, Д.А. Касатов, А.Н. Макаров, М. Микенс, Н.К. Куксанов, С.С. Попов, Р.А. Салимов, А.Л. Санин, И.Н. Сорокин, Т.В. Сычева, И.М. Щудло, Д.С. Воробьев, В.Г. Черепков, С.Н. Фадеев

Для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) онкологических заболеваний разработан ускорительный источник нейтронов. Генерация нейтронов в нём осуществляется при взаимодействии протонного пучка, ускоренного в электростатическом ускорителе-тандеме, с литиевой мишенью. Источник обеспечивает генерацию нейтронного потока, оптимального для проведения терапии, и обладает рядом уникальных практических характеристик для использования в клинических условиях. В частности, отличительными особенностями используемого ускорителя-тандема являются компактная конструкция (в которой не применяются ускорительные трубки), надёжность, простота и гибкость в эксплуатации, а также относительно невысокая стоимость. Представлен подробный обзор результатов, полученных в экспериментах с прототипом нейтронного источника. Обсуждаются предварительные результаты тестирования первого специализированного нейтронного источника, предназначенного для клинических испытаний БНЗТ.

Ключевые слова: ускорительный источник нейтронов, электростатический ускоритель, бор-нейтронозахватная терапия, источник отрицательных ионов водорода

PACS numbers: 29.20. – c, 29.25.Dz, 87.19.xj, 87.53. – j, 87.55. – x

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2021.02.038940>

А.А. Иванов^(1, a), А. Н. Смирнов^(2, 3, b), С.Ю. Таскаев^(1, 4, c), Б.Ф. Баянов^(1, d), Ю.И. Бельченко^(1, e), В.И. Давыденко^(1, f), А. Дунаевский⁽³⁾, И.С. Емелев^(1, 4, g), Д.А. Касатов^(1, 4, h), А.Н. Макаров^(1, 4, i), М. Микенс⁽³⁾, Н.К. Куксанов^(1, j), С.С. Попов^(1, k), Р.А. Салимов⁽¹⁾, А.Л. Санин^(1, l), И.Н. Сорокин^(1, 3, m), Т.В. Сычева^(1, 4), И.М. Щудло^(1, 4, n), Д.С. Воробьев^(1, o), В.Г. Черепков^(1, p), С.Н. Фадеев^(1, q)
⁽¹⁾ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск, Российская Федерация
⁽²⁾ TAE Life Sciences, 19631 Pauling, Foothill Ranch, CA 92610, USA
⁽³⁾ TAE Technologies, 19631 Pauling, Foothill Ranch, CA 92610, USA
⁽⁴⁾ Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Российская Федерация
 E-mail: ^(a)aaivanov5353@mail.ru, ^(b)ASmirnov@tae.com, ^(c)S.Yu.Taskaev@inp.nsk.su, ^(d)B.F.Bayanov@inp.nsk.su, ^(e)Yu.I.Belchenko@inp.nsk.su, ^(f)V.I.Davydenko@inp.nsk.su, ^(g)I.S.Emelev@inp.nsk.su, ^(h)D.A.Kasatov@inp.nsk.su, ⁽ⁱ⁾A.N.Makarov@inp.nsk.su, ^(j)N.K.Kuksanov@inp.nsk.su, ^(k)S.S.Popov@inp.nsk.su, ^(l)A.L.Sanin@inp.nsk.su, ^(m)I.N.Sorokin@inp.nsk.su, ⁽ⁿ⁾cshudlo.i.m@gmail.com, ^(o)D.S.Vorobev@inp.nsk.su, ^(p)V.G.Cherepkov@inp.nsk.su, ^(q)S.N.Fadeev@inp.nsk.su

Статья поступила 30 марта 2021 г.,
после доработки 7 апреля 2021 г.

Содержание

1. Введение (894).
 2. Источник нейтронов на основе ускорителя-тандема ИЯФ СО РАН (895).
 - 2.1. Поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов.
 - 2.2. Обдирочная мишень ускорителя.
 - 2.3. Литиевая мишень для генерации нейтронов.
 - 2.4. Развёртка пучка.
 - 2.5. Диагностика пучка в ускорителе-тандеме.
 3. Основные результаты исследований прототипа нейтронного генератора 2009 – 2020 (902).
 - 3.1. Исследование физических процессов в ускорителе.
 - 3.2. Исследование генерации нейтронов.
 - 3.3. Медико-биологические исследования *in vitro* и другие применения нейтронного источника.
 4. Источник нейтронов для клинических испытаний бор-нейтронозахватной терапии (905).
 - 4.1. Источник ускоряющего напряжения.
 - 4.2. Источник отрицательных ионов.
 - 4.3. Модернизация элементов нейтронного источника.
 - 4.4. Результаты моделирования ускорения и транспортировки пучка.
 - 4.5. Основные результаты испытаний прототипа ускорителя.
 5. Коммерческий источник нейтронов для клинических испытаний бор-нейтронозахватной терапии (909).
 6. Заключение (910).
- Список литературы (911).

1. Введение

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) является одним из перспективных методов лечения злокачественных опухолей [1–3]. Для проведения этой терапии пациенту вводится препарат, содержащий безвредный стабильный изотоп ^{10}B , который избирательно накапливается в раковых клетках организма больного. Затем зона опухоли в теле пациента подвергается облучению нейтронами, вступающими в ядерную реакцию с ядрами бора. Сечение захвата тепловых нейтронов ядром ^{10}B имеет аномально большую величину¹ — 3387 б. Поглощение нейтрона ядром ^{10}B приводит к мгновенной ядерной реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ с выделением энергии 2,79 МэВ. В 6,1 % случаев энергия распределяется только между ядром лития и α -частицей, в 93,9 % случаев ядро лития вылетает в возбуждённом состоянии и испускает γ -квант с энергией 0,48 МэВ. Продукты ядерной реакции, ядро лития с энергией 0,84 МэВ и α -частица с энергией 1,47 МэВ, имеют малый пробег в воде или в тканях организма — 5,2 и 7,5 мкм (характерный размер клеток млекопитающих). Темп торможения γ -кванта существенно ниже — 0,3 кэВ мкм⁻¹. Таким образом, выделение основной части энергии ядерной реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, а именно 84 %, ограничивается размером одной клетки, и селективное накопление бора внутри клеток опухоли и последующее облучение нейтронами должны приводить к её разрушению с относительно малыми повреждениями окружающих нормальных клеток.

По сравнению с традиционными видами радиационной терапии с использованием рентгеновского излучения и протонных пучков БНЗТ обладает рядом уникальных преимуществ. Адресная доставка бора в раковые клетки осуществляется в этом случае биохимическими методами. В результате значительно повышается избирательность воздействия на клетки по сравнению с таковой в традиционных видах радиотерапии, где она определяется точностью физической фокусировки пучков в опухоли. Относительная биологическая эффективность БНЗТ примерно в три раза выше, чем в традиционных методах, так как разрушение клеток производится более тяжёлыми частицами — ядрами Li и He. Повышенная избирательность БНЗТ позволяет применять её в случае плохо локализованных диффузных опухолей, не поддающихся лечению традиционными способами. Кроме того, БНЗТ можно проводить за один сеанс, тогда как широко распространённая в настоящее время фракционная рентгеновская или протонная радиотерапии требуют накопления терапевтической дозы радиации за много сеансов в течение нескольких недель. Тяжесть побочных эффектов и общий уровень токсичности при БНЗТ существенно ниже. Это повышает качество жизни и улучшает самочувствие пациентов в процессе лечения, что неоднократно подтверждено в клинических испытаниях БНЗТ.

Помимо того, пропускная способность клиники БНЗТ во много раз выше, что позволяет предоставить этот вид лечения гораздо большему числу пациентов.

Основы метода БНЗТ были заложены в экспериментах с реакторными источниками нейтронов [4–23]. Ранние эксперименты [6, 7] не продемонстрировали высокой терапевтической эффективности метода. В них использовались несовершенные препараты для доставки бора, не позволявшие достигнуть существенной селективности и высокой концентрации бора в раковых клетках. В дальнейшем был достигнут значительный прогресс, связанный с применением улучшенных низкомолекулярных препаратов: боркаптатата натрия $\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$ (BSH) [8, 9] и борфенилаланина $(\text{HO})_2^{10}\text{B}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)-\text{CO}_2\text{H}$ (BPA) [10]. Препараты BSH и BPA обеспечивают концентрацию бора 15–20 миллионов долей (part per million, ppm) в нормальной ткани и 60–70 ppm в опухоли. Соответственно имеет место перепад между концентрациями бора (контрастное отношение) в клетках опухоли и окружающей нормальной ткани примерно в три-четыре раза. Применение этих препаратов позволяет проводить весьма успешные клинические испытания. Впечатляющие начальные результаты, полученные в работах [9, 10], позволили перейти к клиническим испытаниям БНЗТ для глубоких внутримозговых опухолей.

В дальнейшем методика БНЗТ была успешно распространена и на многие другие виды опухолей [19–23]. Однако до недавнего времени развитие БНЗТ из многообещающей исследовательской методики в коммерчески доступную медицинскую технологию было ограничено двумя факторами, тесно связанными друг с другом. Прежде всего необходимо заметить, что недоступность ядерных реакторов и неудобство их использования в качестве источников нейтронов ограничивали доступ онкологов и пациентов к БНЗТ. Тем самым существенно снижались объём и скорость проведения клинических испытаний. Отсутствие перспективных широкомасштабных клинических исследований в свою очередь ограничивало интерес к тематике БНЗТ в фармакологическом сообществе и не способствовало разработкам более совершенных препаратов адресной доставки бора.

Эффективность БНЗТ определяется параметрами нейтронного пучка, концентрацией бора в раковых и нормальных клетках и контрастным отношением. Качество лечения характеризуется двумя параметрами: терапевтическим отношением и глубиной терапии. Терапевтическим отношением называется отношение максимальной мощности доз в опухоли и нормальных тканях. Глубиной терапии называется расстояние от кожи до поверхности, до достижения которой мощность дозы в опухоли превосходит максимальную мощность дозы в нормальных тканях. Исследования показали, что при использовании BPA и BSH терапевтический пучок должен обеспечивать плотность потока эпитепловых (0,5 эВ–10 кэВ) нейтронов на поверхности тела пациента выше 10^9 см⁻² с⁻¹, с тем чтобы длительность облучения была менее 1 ч. Использование эпитепловых нейтронов обусловлено необходимостью получить максимальную плотность тепловых нейтронов на глубине расположения опухоли. В терапевтическом пучке могут присутствовать потоки медленных нейтронов, быстрых нейтронов и γ -излучения. Медленные нейтроны приводят к дополнительной нелокализованной дозе вследствие поглощения их азотом или водородом с испусканием протона и γ -кванта соответственно. Быстрые нейтроны в результате упругого рассеяния преимущественно на ядрах водорода приводят к появлению протонов отдачи и вносят заметный

¹ Существуют и другие ядра, например: ^{113}Cd , ^{135}Xe , ^{149}Sm , ^{151}Eu , ^{155}Gd , ^{157}Gd , ^{147}Hf , ^{199}Hg — имеющие большое сечение поглощения теплового нейтрона. Однако для большинства из них захват нейтрона сопровождается нейтронным и γ -излучением, что не обеспечивает локальности выделения энергии в мягких тканях.

вклад в дозу на поверхности. Нейтронные пучки ядерных реакторов обеспечивали мощность дозы $0,2-2 \text{ Зв мин}^{-1}$, терапевтическое отношение 4–6 и глубину терапии от 8 до 10 см [3].

В настоящее время исследования в области БНЗТ получили новый толчок благодаря появлению нейтронных источников на основе ускорителей [24–37], которые позволяют получить необходимые параметры нейтронного потока. Такие источники имеют также высокий уровень безопасности, малые размеры и относительно небольшую стоимость, что даёт возможность размещать их непосредственно в клинике. Тем самым создаются идеальные условия для проведения широких клинических испытаний и исследований новых препаратов для адресной доставки бора. Важным практическим достижением стало коммерческое лицензирование БНЗТ с использованием ускорительного источника нейтронов в комбинации с препаратом ВРА для лечения злокачественных опухолей мозга в Японии [38]. Это должно ускорить лицензирование данного метода лечения в других странах.

Ожидается, что аналогичная лицензия будет скоро получена и для лечения опухолей головы и шеи [39]. В Европе, Китае, России, США и Японии ведутся активные работы по созданию более совершенных препаратов для доставки бора [40]. Появился целый ряд новых перспективных препаратов, среди которых борсодержащие порфирины [41], нуклеозиды [42], пептиды [43], моноклональные антитела [44], липосомы [45], наночастицы различных типов [46], сополимеры [47], полиэдрические бораны [48] и др. Лабораторные исследования *in vitro* демонстрируют, что избирательность (контрастное отношение) некоторых новых соединений в 10–100 раз превосходит избирательность ВРА и BSH. Это, несомненно, приведёт к огромному прогрессу в клиническом использовании БНЗТ в ближайшее время.

Для генерации нейтронов в источниках на основе ускорителей используются ядерные реакции при бомбардировке различных мишеней ускоренными пучками заряженных частиц [3, 24, 25]. Особенно привлекательны эндотермические реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$, ${}^{12}\text{C}(d, n){}^{13}\text{N}$, для которых требуются не слишком большие энергии пучков и, как следствие, ускоритель может быть достаточно компактным для размещения в клинике. Наиболее перспективной считается эндотермическая реакция ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ с порогом 1,88 МэВ, которая имеет достаточно большое сечение выше порога и позволяет в припороговом режиме получать нейтроны малой энергии. Для получения ускоренных пучков в нужном диапазоне токов и энергий используются различные виды циклических (циклотроны) [26, 27] и линейных (электростатические и радиочастотные) ускорителей [28–37]. Обзор существующих в настоящее время ускорительных источников нейтронов для БНЗТ приведён в [25].

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) (Новосибирск) совместно с компанией TAE Life Sciences (США) создан нейтронный источник на основе электростатического ускорителя-тандема, который идеально подходит для проведения БНЗТ в клинических условиях. Данный нейтронный источник, который создавался специально для БНЗТ, обладает рядом преимуществ по сравнению с другими источниками. В нём для генерации нейтронов используется литиевая мишень и пучок, в отличие от такового в циклотронах,

обладает относительно невысокой энергией, $\sim 2,5 \text{ МэВ}$, что позволяет получить оптимальные характеристики нейтронного пучка. Циклотроны имеют меньшие токи, чем линейные ускорители, при существенно большей энергии. Чаще всего нейтронные источники для БНЗТ, использующие циклотроны, работают с бериллиевой мишенью, и в нейтронном спектре доминирует быстрый компонент. Наличие быстрого компонента крайне негативно сказывается на результатах применения БНЗТ. Для замедления нейтронов и подавления быстрого компонента в этом случае используется громоздкая и дорогая система формирования пучка нейтронов (Beam Shaping Assembly — BSA), не способная произвести оптимальный для БНЗТ спектр энергии нейтронов. Тандемный ускоритель по сравнению с другими электростатическими ускорителями отличается компактностью, относительно простой конструкцией системы питания и надёжностью (отметим, что максимальный электрический потенциал в системе тандема составляет всего половину от полной энергии протонного пучка). Благодаря использованию электростатической технологии ускоритель-тандем прост и гибок в эксплуатации, а также относительно дешёв, что выгодно отличает его, например, от высокочастотных линейных ускорителей. В разделах 2–5 обсуждаются особенности нейтронного источника и основные результаты исследований, ведущихся в течение ряда лет вначале на прототипе нейтронного источника, а затем на его версии, предназначенной для клинических испытаний.

2. Источник нейтронов на основе ускорителя-тандема ИЯФ СО РАН

В 1998 г. сотрудниками ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и Физико-энергетического института (Обнинск) был предложен ускорительный источник нейтронов для терапии быстрыми нейтронами и нейтронозахватной терапии [36]. В этом источнике для получения сильноточного протонного пучка используется ускоритель-тандем с оригинальной конструкцией электродов, без применения традиционных ускорительных трубок. Основная идея состояла в том, чтобы отнести межэлектродные изоляторы подальше от пучка заряженных частиц для улучшения высоковольтной прочности. Для генерации нейтронов служит литиевая мишень, облучаемая ускоренным протонным пучком. Первоначально предлагалось использовать для терапии режим припороговой генерации нейтронов, в котором вследствие кинематической коллимации генерируемые частицы летят преимущественно вперёд и имеют относительно низкую энергию — около 40 кэВ.

Схема предложенного тандемного ускорителя показана на рис. 1. Пучок отрицательных ионов водорода вводится в тандемный ускоритель и далее ускоряется положительным потенциалом U , приложенным к центральному электроду тандема. После обдирки в газовой мишени, установленной на центральном электроде, протонный пучок ускоряется тем же потенциалом до энергии $2eU$. Ключевым преимуществом в этом случае является установка ионного источника под потенциалом земли, а также уменьшение необходимого ускоряющего напряжения вдвое, что упрощает электростатическую изоляцию и, следовательно, уменьшает размер и стоимость ускорителя.

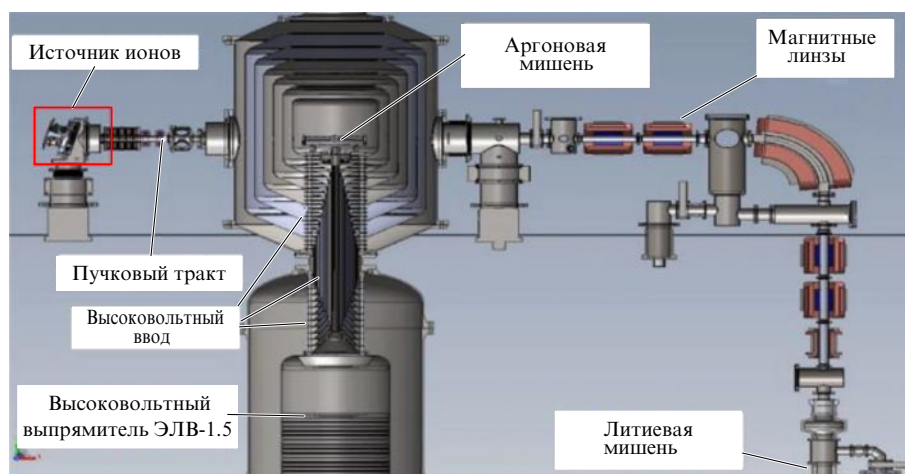


Рис. 1. (В цвете онлайн.) Схема тандемного ускорителя ИЯФ СО РАН.

Конфигурация ускорителя существенно отличается от стандартной отсутствием ускорительных трубок. Внутренние электроды ускорителя закреплены на одиночном проходном изоляторе, как показано на рис. 1. Потенциал высоковольтного электрода газонаполненного высоковольтного источника передаётся на электрод тандема по трубе, стягивающей обе части проходного изолятора. Распределение потенциала по электродам газонаполненного проходного изолятора задаётся резистивным делителем. Соответствующие потенциалы передаются на электроды, расположенные в вакууме, в верхней части ускорителя, с помощью системы внутренних коаксиальных цилиндров, связывающих электроды нижней (газовой) и верхней (вакуумной) частей проходного изолятора. Вакуумная часть проходного изолятора собрана из кольцевых стеклянных изоляторов с вставленными между ними электродами ускорителя. Первоначально для вакуумного уплотнения проходного изолятора использовался индий, что требовало много времени для усадки уплотнений. Кроме того, индиевые уплотнения показали недостаточно высокую надёжность, что приводило к появлению течей в изоляторе. Впоследствии индиевые уплотнения были заменены резиновыми с доработкой уплотняющих фланцев.

Промежуточные цилиндрические электроды тандема, расположенные соосно с высоковольтным электродом и корпусом вакуумного бака, закреплены на электродах верхней части проходного изолятора. Потенциалы электродов определяют распределение потенциала вдоль ускорительного тракта. Напряжённость электрического поля в межэлектродном промежутке при напряжении 1 МВ составляет $\sim 25 \text{ кВ см}^{-1}$. Общая площадь электродов тандема — несколько десятков квадратных метров.

Низкоэнергетический пучок отрицательных ионов водорода формируется ионным источником, фокусируется магнитной линзой-соленоидом на вход ускорителя, в котором ускоряется до энергии 1–1,15 МэВ. В обдирочной мишени, установленной внутри центрального электрода, отрицательные ионы водорода конвертируются в протоны, далее ускоряющиеся до энергии 2–2,3 МэВ. Газ из мишени откачивается набором турбомолекулярных и криогенных насосов через отверстия в электродах

и пучковом тракте. Для предотвращения пробоев отверстия в электродах закрыты специальными жалюзи. Рассматривался [49] также вариант мишени с рециркуляцией аргона. Для обеспечения рециркуляции внутри высоковольтного электрода устанавливается дополнительная рециркуляционная камера с малыми апертурами для прохождения пучка. Выходящий из обдирочной мишени аргон интенсивно откачивается установленным внутри камеры турбомолекулярным насосом, выход которого соединён с обдирочной мишенью. Оценки показывают, что рециркуляция позволяет снизить поток аргона в зазоры ускорителя более чем в 10 раз. В используемом ускорителе применяется версия мишени без рециркуляции.

Ускоренный пучок поступает в тракт транспортировки пучка высокой энергии. Он обеспечивает проводку вышедшего из ускорителя пучка протонов с энергией $\sim 2 \text{ МэВ}$ до нейтронообразующей мишени. В тракте пучок фокусируется парой квадрупольных линз, затем отклоняется на 90° в вертикальной плоскости поворотным магнитом. В вертикальной части тракта высокой энергии пучок снова фокусируется парой квадрупольных линз, проходит через систему магнитной развёртки и попадает на мишень.

В процессе ввода в строй ускорителя-тандема была усовершенствована его конструкция и разработан алгоритм высоковольтной тренировки с автоматическим подъёмом напряжения. Алгоритм автоматического подъёма напряжения состоял в измерении темновых токов ускорителя и ступенчатом подъёме напряжения при их падении до заданного уровня [50].

Была также применена процедура отдельной тренировки отдельных зазоров тандема после сборки. Повышение надёжности работы ускорителя было достигнуто в результате целого комплекса мер, включая улучшение вакуумных уплотнений, материала и формы кольцевых изоляторов проходного изолятора, а также оптимизацию формы электродов для снижения напряжённости электрического поля на их поверхности. На рисунке 2 показана динамика роста напряжения на высоковольтном электроде ускорителя-тандема, связанная с улучшением конструкции проходного изолятора, с момента ввода в строй в 2005 г.

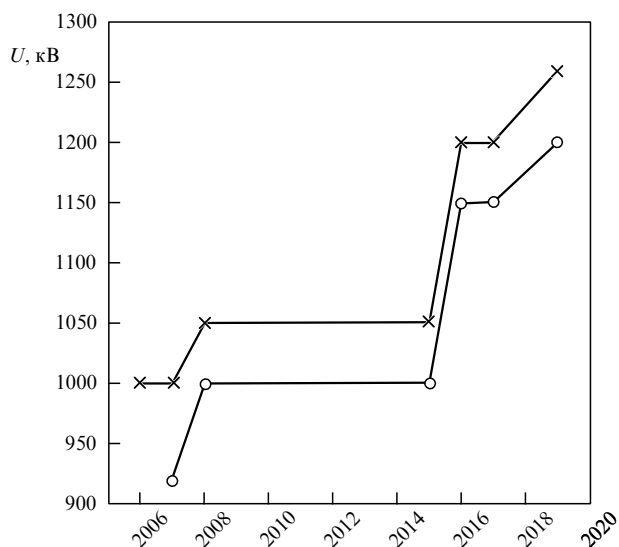


Рис. 2. Увеличение напряжения в ходе разработки и усовершенствования тандема: косые кресты соответствуют максимальному напряжению с пробоями, кружки — напряжению без пробоев в течение более 1 ч.

2.1. Поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов

Для инъекции в ускоритель-тандем в ИЯФ СО РАН используется поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов. Вначале предполагалось [37] использовать стационарный источник отрицательных ионов с независимым эмиттером. Одновременно велась разработка поверхностно-плазменного источника с пеннинговской геометрией газоразрядной камеры и массивными охлаждаемыми электродами. В 2002 г. на этом источнике была получена устойчивая генерация стационарного пучка с током 5 мА [51] и источник был установлен на ускорителе-тандеме [52].

Принципиальная схема пеннинговского поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов с инъекцией плазмы из полых катодов [53] показана на рис. 3.

Полые катоды, используемые для инъекции плазмы в пеннинговский разряд, выполнены в виде небольших цилиндрических вставок в массивные катодные выступы. Подача водорода и цезия в разряд осуществляется через полости катодов с малыми выходными отверстиями диаметром 1,2 мм. Для подачи цезия использована компактная внешняя цезиевая печь с таблетками хромата цезия с титаном. Эмиссия плазмы из полостей катода поддерживает стационарный пеннинговский разряд с токами до 10 А и напряжением 70–120 В при пониженном давлении водорода в газоразрядной камере 4–5 Па. Для быстрого старта источник прогревается встроенными омическими нагревателями.

Отрицательные ионы в пеннинговском источнике образуются за счёт конверсии быстрых атомов на покрытой цезием поверхности анода. Оптимальное для генерации отрицательных ионов покрытие анода цезием удаётся поддерживать в условиях стационарного пеннинговского разряда с током 7–10 А при рабочей температуре анода 250–300 °С. Извлечение и ускорение пучка производится с помощью трёхэлектродной ионно-оптической системы (ИОС). В экспериментальном источнике магнитное поле величиной $\sim 0,1$ Тл, необходимое для

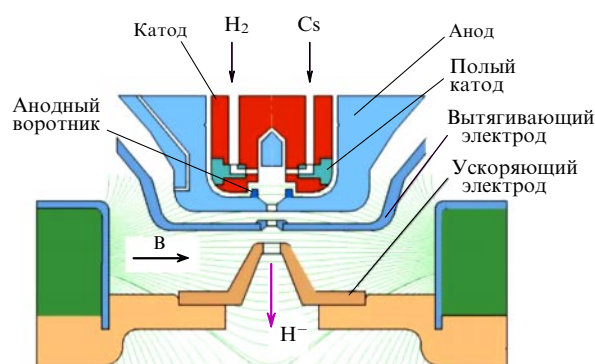


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Схема стационарного пеннинговского источника ионов с инъекцией плазмы из полых катодов (сечение вдоль силовых линий магнитного поля).

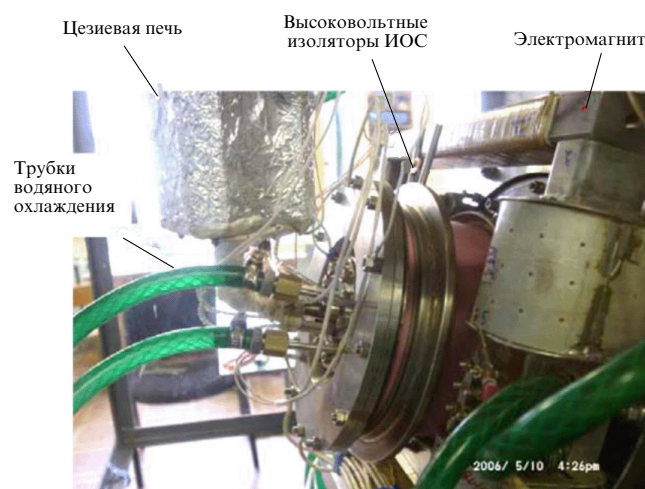


Рис. 4. (В цвете онлайн.) Первый стационарный пеннинговский ионный источник, разработанный для ускорителя-тандема.

поддержания пеннинговского разряда и отделения пучка отрицательных ионов от сопутствующих электронов, создавалось внешним магнитом. Прототип источника на стенде обеспечивал получение стационарного пучка ионов H^- с током до 8 мА и нормализованным эмиттансом $\sim 0,7$ мм мрад (для 90 % пучка с энергией 23,5 кэВ) [53].

Детально конструкция и характеристики пеннинговского поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов с полыми катодами описаны в работах [54–56]. В 2006 г. этот источник был установлен на тандемный ускоритель (рис. 4). В течение более чем десятилетнего срока эксплуатации в его конструкцию было внесено несколько модификаций, увеличивающих срок службы и упрощающих обслуживание. Полное время работы источника в 2006–2018 гг. составило более 3200 ч при средней ежедневной продолжительности около 5 ч. Общая операционная статистика работы источника на тандеме ИЯФ приведена в [56]. С помощью этого источника на ускорителе был получен пучок протонов с током 6,7 мА и энергией 2 МэВ [57]. Для получения пучков отрицательных ионов с увеличенными током и энергией в условиях длительной непрерывной эксплуатации были разработаны модифицированные версии пеннинговского источника с полыми катодами [58, 59]. Ионный источник [58] позволяет получать стационарные пучки

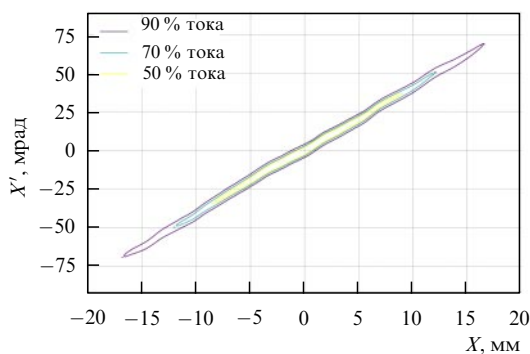


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Контурная диаграмма эмиттанса пучка отрицательных ионов с током 15 мА.

ионов H^- с током до 15 мА при токе разряда 6–7 А, напряжении разряда 75–85 В, подаче водорода $0,15 \text{ л Торр с}^{-1}$ и магнитном поле $\sim 0,1 \text{ Тл}$.

XX' -диаграмма пучка отрицательных ионов с током 15 мА и энергией 30,7 кэВ, характеризующая его угловой разброс и эмиттанс, приведена на рис. 5, на котором показаны контуры, содержащие внутри себя 50 %, 70 % и 90 % тока пучка.

Среднеквадратичный 1RMS-эмиттанс (RMS — root mean square) в фазовой плоскости XX' определяется выражением: $\epsilon_{1\text{RMS}} = \beta\gamma [\langle X^2 \rangle \langle X'^2 \rangle - \langle XX' \rangle^2]^{1/2}$, где β, γ — релятивистские факторы, X — поперечная координата, X' — угол наклона траектории к оси Z (направлению распространения пучка) в плоскости XZ . Угловыми скобками обозначены средние значения величин X^2, X'^2 и XX' , определённые с учётом функции распределения частиц пучка в фазовой плоскости XX' . Величина 1RMS-эмиттанса пучка для диаграммы, показанной на рис. 5, $\epsilon_{1\text{RMS}} \approx 0,2\pi \text{ мм мрад}$.

В дальнейшем пеннинговский поверхностно-плазменный источник с полыми катодами был усовершенствован с целью увеличения тока ионов [60, 61]. Для этого диаметр эмиссионного отверстия в аноде и ионно-оптической системе был увеличен до 5 мм. Была модифицирована магнитная система источника. Для снижения потока электронов, вытягиваемых из плазмы совместно с отрицательными ионами из отверстия с увеличенной апертурой, в прианодной области вокруг эмиссионного отверстия был сделан специальный выступ (см. рис. 3). Благодаря снижению потока сопутствующих электронов были уменьшены распыление анодной крышки и эрозия вытягивающего электрода. Внесённые усовершенствования обеспечили продолжительную работу ионного источника с током пучка 25 мА и эмиссионной плотностью тока более $0,125 \text{ А см}^{-2}$ при разрядном токе $\sim 10 \text{ А}$ [61]. При токе разряда более 10 А насыщения тока пучка не наблюдалось. В настоящее время планируется установка разработанного источника ионов с повышенным током на ускоритель-тандем ИЯФ СО РАН.

Также для инъекции в ускоритель-тандем БНЗТ в ИЯФ им. Г.И. Будкера разрабатывается стационарный

перезарядный источник пучка отрицательных ионов водорода с током $\sim 10 \text{ мА}$. В разрабатываемом источнике пучок отрицательных ионов создаётся за счёт диссоциации пучка первичных молекулярных ионов и последующей перезарядки в мишени из газообразного водорода. Для получения первичного пучка с высоким содержанием молекулярных ионов H_2^+ используется плазменный высокочастотный (ВЧ) эмиттер. Достоинством данного подхода являются пониженная требуемая мощность ВЧ-разряда и относительно малая подача водорода в разряд по сравнению с таковой в источниках, генерирующих пучки с высоким содержанием протонов. Кроме того, при такой энергии достаточно легко получить слаборасходящиеся пучки без использования мелкоструктурных сеток и с пониженными требованиями к точности их изготовления. Первичный пучок ионов водорода с током 1–2 А и энергией 30 кэВ формируется многоапертурной четырёхэлектродной ионно-оптической системой с баллистической фокусировкой.

Далее сформированный пучок ионов водорода проходит через водородную перезарядную мишень. Молекулярные ионы H_2^+ в перезарядной мишени диссоциируют на два протона с половинной энергией, соответствующей максимальному выходу отрицательных ионов в водороде. Протоны с энергией 15 кэВ после последовательных актов перезарядки или непосредственно двойной перезарядки формируют пучок ионов H^- на выходе из мишени. Полученный в результате пучок отклоняется фокусирующим поворотным магнитом на 90° и затем ускоряется одноапертурной ионно-оптической системой до энергии 100 кэВ. Прошедший через магнит пучок быстрых атомов и пучки протонов, отклонённых магнитом, поступают в наклонные приёмники с интенсивным водяным охлаждением. Для снижения обдирки пучка отрицательных ионов в области транспортировки поддерживается высокий вакуум благодаря дифференциальной откачке источника турбомолекулярными насосами. В настоящее время завершено проектирование ионного источника и ведётся изготовление его элементов. Подготовлены системы питания и управления ионным источником.

2.2. Обдирочная мишень ускорителя

Для обдирки пучка отрицательных ионов после начальной фазы ускорения на высоковольтном электроде была установлена аргоновая обдирочная мишень, выполненная в виде охлаждаемой трубки с внутренним диаметром 16 мм и длиной 400 мм. Газ напускается в мишень посередине. Для отрицательного иона водорода с энергией 1 МэВ сечения процессов его взаимодействия с атомами аргона приведены в таблице [62].

Процессами с захватом электрона при таких энергиях можно, очевидно, пренебречь, тогда можно записать выход отрицательных ионов (N^-), атомов (N^0) и протонов (N^+) из мишени как:

$$N^- = \exp [- (\sigma_{-10} + \sigma_{-11}) \pi], \quad (1)$$

Таблица. Сечения процессов взаимодействия иона водорода с атомами аргона

$\sigma_{-10}, \text{ см}^2$	$\sigma_{01}, \text{ см}^2$	$\sigma_{-11}, \text{ см}^2$	$\sigma_{0-1}, \text{ см}^2$	$\sigma_{10}, \text{ см}^2$	$\sigma_{1-1}, \text{ см}^2$	$F_{+\infty}, \%$
$4,2 \times 10^{-16}$	$1,6 \times 10^{-16}$	$0,22 \times 10^{-16}$	6×10^{-21}	8×10^{-20}	$1,7 \times 10^{-24}$	99,988

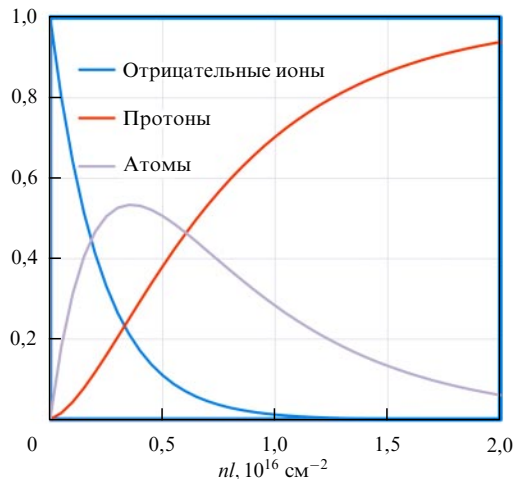


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Доли компонентов пучка после прохождения обдирочной мишени.

$$N^0 = \frac{\sigma_{-10}}{\sigma_{-10} + \sigma_{-11} - \sigma_{01}} \left\{ \exp(-\sigma_{01}\pi) - \exp[-(\sigma_{01}\pi + \sigma_{-11}\pi)] \right\}, \quad (2)$$

$$N^+ = 1 - \frac{\sigma_{-10}}{\sigma_{-10} + \sigma_{-11} - \sigma_{01}} \exp(-\sigma_{01}\pi) + \frac{\sigma_{-10}\sigma_{01} - \sigma_{-11}(\sigma_{-10} + \sigma_{-11} - \sigma_{01})}{(\sigma_{-10} + \sigma_{-11} - \sigma_{01})(\sigma_{-10} + \sigma_{-11})} \times \exp[-(\sigma_{01}\pi + \sigma_{-11}\pi)], \quad (3)$$

где π — толщина мишени.

Зависимость зарядового состава пучка от линейной плотности аргона в мишени приведена на рис. 6. Для установки нужной толщины мишени, обеспечивающей 90%-ный выход протонов, использовался цилиндр Фарадея, измерявший ток пучка на выходе ускорителя.

При этом подбиралась величина напуска газа, которая обеспечивала на выходе равенство протонного тока току отрицательных ионов водорода, когда ток на цилиндр Фарадея равнялся нулю. Расчётная толщина мишени составила при этом $0,32 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Затем напуск газа увеличивался в 5,3 раза для обеспечения требуемой 90%-ной конверсии начального пучка в протоны [63].

Взаимодействие интенсивного пучка с мишенью приводит к её частичной ионизации [49, 64]. В обдирочной мишени ион водорода с энергией 1 МэВ теряет около 600 эВ и ионизует соответственно ~ 8 атомов аргона. Перезарядка отрицательного иона водорода в протон сопровождается также появлением двух электронов с энергией 500 эВ, которые ионизуют около 10 атомов аргона. Таким образом, полное число ионизаций K в обдирочной мишени, производимых одним отрицательным ионом водорода, составит около 18. При характерном токе пучка 1 мА будет набираться $\sim 10^{17}$ ионов аргона в 1 с, что много меньше, чем напуск газа в мишень ($\sim 10^{19} \text{ с}^{-1}$), и образующаяся плазма будет слабоионизованной. Таким образом, скорость генерации ионов аргона $dn_i/dt \approx KI_b/(\pi a^2 L)$, где I_b — ток пучка, a — его радиус, L — длина мишени. Ионы нейтрализуются на стенках мишени со скоростью n_i/τ_i , при этом среднее

время τ_i пролёта ионов до стенки можно оценить как $\tau_i \approx a/V_i$, где V_i — скорость ионов аргона в мишени.

Поскольку электроны более подвижны, чем ионы, для сохранения квазинейтральности плазма в обдирочной мишени должна иметь положительный потенциал относительно стенки. Примем температуру электронов вторичной плазмы равной 5 эВ. Тогда, учитывая, что потенциал плазмы в мишени равен приблизительно трём электронным температурам, получим оценку для потенциала ~ 15 эВ. Таким образом, можно оценить энергию ионов аргона в мишени ~ 15 эВ, соответственно $V_i \sim \sim 5 \times 10^5 \text{ см} \text{ с}^{-1}$.

В результате в равновесии плотность ионов аргона в мишени составит $n_i \approx KI_b/(\pi a L V_i) \approx 3 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Под действием этого потенциала часть положительных ионов аргона выходит из перезарядной трубки и попадает в каналы ускорения отрицательных ионов водорода и протонов. В ускорительных каналах ионы аргона ускоряются до энергии 1 МэВ и дефокусируются входной или выходной линзой ускорителя.

Учитывая телесный угол, под которым видно отверстие в ускорительный канал, получаем, что ток ионов из мишени в торец в электродную систему ускорителя $I_{Ar} \approx 2\pi a^2 n_i V_i b^2/s^2 \approx 40$ мкА, где b — радиус ускорительного канала, s — расстояние между торцом мишени и первым электродом. Ускоренные до энергии ~ 1 МэВ ионы аргона, попадая на стенки ускорительного канала, вызывают потоки вторичных электронов, которые могут составлять значительную долю тока пучка. Кроме того, взаимодействие пучка с мишенью приводит к возбуждению атомов аргона с высвечиванием фотонов с энергией 10–15 эВ. Количество возбуждённых атомов F на одну частицу пучка можно оценить как $F \sim 30$. При токе пучка 1 мА поток фотонов в ускоряющие зазоры можно оценить величиной $\sim 5 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$. Принимая коэффициент вторичной эмиссии этих фотонов 0,1, получим, что в зазорах ускорителя генерируется ток вторичных электронов ~ 80 мкА. Фотоны имеют достаточно большие коэффициенты отражения ($\sim 0,6$) и могут попадать на керамические изоляторы между электродами, вызывая пробой. Суммируя вышесказанное, отметим, что потоки вторичных частиц в ускорителе могут быть значительными и необходимо принимать все меры для их подавления.

Взаимодействие пучка с газом и плазмой в мишени приводит к появлению углового разброса и некоторому торможению пучка. Тормозная способность и сечение рассеяния протона с энергией 1 МэВ приведены, например, в [65]. Согласно данным работы [65], для толщины мишени $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ потеря энергии пучка составит ~ 400 эВ, а приобретённым в результате взаимодействия с мишенью энергетическим разбросом можно пренебречь. Появляющимся угловым разбросом, который составляет $\sim 4 \times 10^{-3}$ мрад, также можно пренебречь ввиду его малости по сравнению с угловым разбросом пучка на входе в мишень.

Наличие плазмы в мишени в принципе может приводить к появлению пучково-плазменной неустойчивости, тоже вызывающей рассеяние пучка. Инкремент неустойчивости $\gamma \approx 0,7(n_{\text{beam}}/n_{\text{plasma}})^{1/3} \omega_{pe}$ в случае тока пучка 10 мА составляет $\sim 1,5 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$. Столкновения электронов плазмы с атомами аргона в мишени приводят к стабилизации пучково-плазменной неустойчивости, поскольку их частота больше инкремента неустойчивости. Дополнительным стабилизирующим фактором является не-

однородность конвертируемого пучка и вторичной плазмы вдоль мишени. Таким образом, рассеянием и торможением пучка в конверсионной мишени можно пренебречь.

2.3. Литиевая мишень для генерации нейтронов

Для генерации нейтронов применялась мишень из твёрдого лития [66]. Для получения слоя лития нужной толщины использовалось вакуумное осаждение из паровой фазы на подложку, интенсивно охлаждающуюся для поддержания слоя лития в твёрдом состоянии во время его нагрева мощным протонным пучком [67]. Температура подложки контролировалась в процессе напыления.

Толщина литиевого слоя определялась измерением электропроводности дистиллированной воды, в которую помещалась мишень с напылённым литием [68]. Толщину мишени можно было также измерять по интенсивности фотонов с энергией 478 кэВ, возникающих в реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ при сканировании протонного пучка по поверхности мишени [69]. Измерения показали, что плотность напылённого лития соответствует плотности твёрдого вещества. Методом вторичной ионной масс-спектрометрии было установлено, что чистота слоя лития и его устойчивость по отношению к остаточному газу в ускорителе достаточны для эффективной генерации нейтронов [70].

Напылённый слой лития имеет толщину, необходимую для замедления протонов до порога генерации нейтронов 1,882 МэВ. Это позволяет уменьшить сопутствующий поток γ -лучей с энергией 0,478 МэВ и температуру лития.

Для правильного выбора материалов, используемых в конструкции мишени, были измерены мощность дозы и спектр γ -излучения, мощность дозы нейтронного излучения и спектр излучения от остаточной активности при облучении протонами с энергией 2 МэВ различных конструкционных материалов [71]. При энергии протонов от 0,7 до 1,85 МэВ измерено сечение реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ и впервые измерен выход фотонов с энергией 478 кэВ из толстой литиевой мишени [72]. Установлено, что при энергии протонов 2,3 МэВ уменьшение толщины лития от 300 до 60 мкм ведёт к уменьшению дозы нежелательного γ -излучения в 1,9 раза без изменения выхода нейтронов [73].

С применением ПЗС-камеры (ПЗС — прибор с зарядовой связью) и удалённого микроскопа наблюдался *in situ* блистеринг при облучении меди и тантала протонами с энергией 2 МэВ [74]. Определено, что порог образования блистеров на поверхности меди зависит от чистоты меди. Так, для сверхчистой меди он оказался равным $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ при температуре около 150°C , в обычной меди — в семь раз меньше. В случае тантала при флюенсе $3,6 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ происходит модификация поверхности с образованием рельефа с характерным размером ячеек $\sim 1 \text{ мкм}$, а образование блистеров при температуре подложки $160\text{--}200^\circ\text{C}$ происходит при флюенсе, превышающем $6,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$.

Установлено, что образование блистеров на поверхности меди не приводит к уменьшению выхода нейтронов и мишень можно продолжать использовать для генерации нейтронов.

2.4. Развёртка пучка

Применение магнитной развёртки [75] протонного пучка обеспечивает нужный профиль плотности тока пучка на

мишени, который гарантирует отсутствие локального перегрева до температуры, превышающей температуру плавления слоя лития. Пучок диаметром около 2,5 см разворачивается по спиральной траектории, имея постоянную азимутальную скорость, что обеспечивает более однородное облучение мишени. Развёртка имеет четыре токовые обмотки, помещённые в коробчатый магнитопровод с внутренним проёмом квадратного сечения для прохода пучка. Синусоидальные токи в обмотках формируются с помощью широтно-импульсной модуляции.

Развёртка осуществляется за счёт сдвига фаз тока в парах противоположных обмоток на 90° . Развёртка пучка производится близким к однородному магнитным полем с напряжённостью до 500 Гс, вращающимся с частотой 100–2000 Гц. Сканирование по радиусу происходит с частотой 1–10 Гц.

2.5. Диагностика пучка в ускорителе-тандеме

Ускоритель-тандем оснащён средствами диагностики для определения характеристик пучка, его положения, а также регистрации гамма-излучения и нейтронов. Для измерения энергии протонного пучка использовался резистивный делитель, подсоединённый непосредственно к высоковольтному электроду тандема. Делитель расположен в баке, заполненном элегазом, внутри вторичного контура выпрямителя и одним концом соединён с высоковольтным электродом источника, а другим — с "земляным" электродом. Промежуточные точки соединения делителя с элементами установки отсутствуют. Калибровка делителя осуществлялась измерением зависимости мощности дозы нейтронов от напряжения, которая появлялась при превышении порога энергии протонов 1,882 МэВ в реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$. Использовалась также пороговая реакция генерации монохроматических резонансных γ -квантов с энергией 9,17 МэВ в реакции ${}^{13}\text{C}(p, \gamma){}^{14}\text{N}$. Гамма-кванты генерируются при резонансной энергии протонов 1,746 МэВ [76], причём ширина резонансного уровня ядра ${}^{14}\text{N}$ составляет всего 128 эВ [77, 78]. Благодаря малой ширине резонанса захвата протонов крутизна регистрируемой кривой возбуждения этой спектральной линии будет определяться разбросом энергии протонов в пучке, что позволяет измерять энергетический разброс пучка с высокой точностью. Измеренная величина энергетического разброса при энергии 1,75 МэВ составила $1,2 \pm 0,15 \text{ кэВ}$ при токе пучка 1,5 мА [79].

Для регистрации γ -излучения, возникающего при взаимодействии пучка с мишенью, использовался детектор на основе кристалла NaI диаметром 6 см и длиной 6 см и фотоумножитель Photonis XP3312B. Сигнал фотоумножителя регистрировался быстродействующим спектрометрическим аналого-цифровым преобразователем. Детектор располагался на расстоянии около 2 м от мишени. Прямоугольное входное отверстие коллиматора имеет размеры $10 \times 15 \text{ см}$ [80]. Использовались также NaI- и ВГО-гамма-спектрометры и спектрометр гамма-излучения СЕГ-1КП. Полупроводниковый детектор производства Института физико-технических проблем (Дубна), выполненный из особо чистого германия, применялся для измерения потока и спектра гамма-излучения.

Для измерения мощности пучка, падающего на мишень, измерялась температура охлаждающей воды на

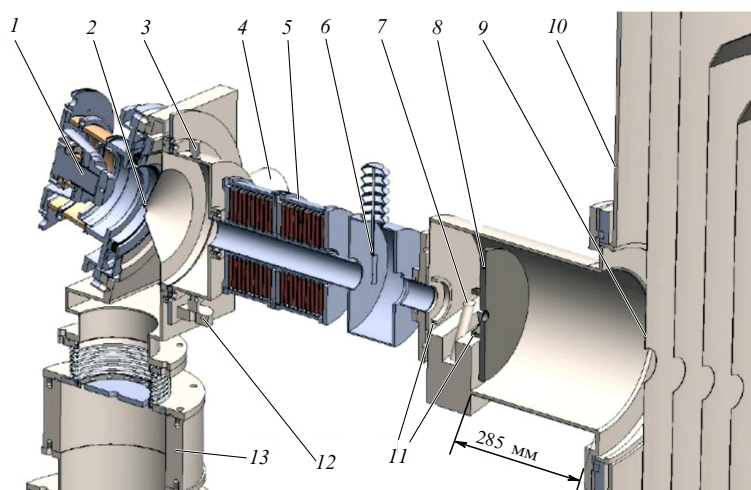


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Тракт пучка низкой энергии: 1 — ионный источник, 2 — коническая диафрагма, 3 — вакуумный датчик, 4, 13 — турбомолекулярный насос, 5 — магнитная линза, 6 — подвижная диафрагма, 7 — сканер OWS-30, 8 — охлаждаемая диафрагма, 9 — первый электрод ускорителя, 10 — вакуумный объём, 11 — кольцевые электроды для записывания вторичной эмиссии, 12 — натекагель.

входе в мишень и выходе из неё. Измерялась также температура масла в системе охлаждения обдирочной мишени, что позволяло определить выделение на ней мощности от протонного пучка.

Измерения потока нейтронов производились с использованием пузырьковых детекторов BDT (Bubble Detector Thermal) и BD100R (Bubble Technology Industries, Канада). Первый детектор имеет наибольшую чувствительность в области тепловых энергий нейтронов, а второй более чувствителен к нейтронам с энергией ~ 100 кэВ. Для дистанционных измерений потока нейтронов использовался литийсодержащий сцинтиллятор GS20 (The Saint-Gobain Crystals, США), смонтированный на фотоэлектронном умножителе Hamamatsu R6095 с высоковольтным источником питания MHV12-1.5K1300P (TRACO Electronics, Япония). Набор активационных фольг SWX-1552 (Shieldwex, США) использовался для измерения спектра нейтронов.

Величина темнового тока между электродами тандема определялась из разницы показаний двух делителей, подсоединённых к высоковольтному электроду. Первый из них, как указывалось выше, использовался для измерения энергии пучка, а второй — для задания потенциалов на электродах тандема [81]. Второй делитель располагался также в элегазе, а его соединительные элементы были закреплены на электродах как вакуумной, так и газовой части проходного изолятора. В отсутствие темновых токов токи обоих делителей совпадали. При появлении темновых токов возникала разница, по которой можно было определить непосредственно ток в зазоре между вакуумным баком и первым ускоряющим электродом. Темновой ток в других ускоряющих зазорах непосредственно не измерялся. Его можно было оценивать при предположении о равенстве темновых токов во всех зазорах.

Сканер (измеритель профиля пучка) OWS-30 производства фирмы D-race (Канада) применялся для измерения профиля, положения и тока пучка отрицательных ионов водорода в режиме реального времени. Расположение сканера показано на рис. 7. Ток пучка измерялся бесконтактным датчиком тока NPCT-CF4"1/2-47.7-120-

UHV (Bergoz Instrumentation, Франция) в полосе 8 кГц (на рисунке не показан). Сканер в комбинации с подвижной диафрагмой 6 использовался для контроля *in situ* эмиттанса пучка отрицательных ионов [82]. Для записывания вторичной эмиссии с проволочек сканера на кольцевые электроды 11 подавалось отрицательное смещение.

Положение и размер пучка ионов контролировались с помощью видеокамер Hikvision, направленных на входную и выходную диафрагмы ускоряющего электрода и регистрирующих видимое излучение, вызванное ионизацией остаточного и обдирочного газа ионами [83]. Ток пучка и его положение определялись с помощью подвижных цилиндров Фарадея в различных сечениях вдоль пучка.

Узел литиевой мишени, используемый для генерации нейтронов, был электрически изолирован, что позволяло подавать на него короткие импульсы высокого напряжения для измерения спектра нейтронов с помощью времяпролётной методики при работе в режиме пороговой генерации нейтронов. Ускоритель при этом работал при энергии протонного пучка ниже порога реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ (1,882 МэВ). При подаче отрицательного короткого (200 нс) импульса напряжения 45 кВ на мишень, генерирующую нейтроны, энергия протонов увеличивается до 1,915 МэВ, что приводит к вспышке нейтронного излучения. Прямоугольные импульсы высокого напряжения создавались с использованием двойной формирующей линии и тиратрона, работающего в качестве ключа с частотой до 250 Гц. Нейтроны регистрируются удалённым детектором, состоящим из литийсодержащего сцинтиллятора GS20 диаметром 18 и толщиной 4 мм и фотоэлектронного умножителя. Время пролёта нейтрона определялось время-цифровым преобразователем ВЦП-1: измерялся интервал времени между моментами подачи высокого напряжения на мишень и появлением сигнала с нейтронного детектора [84].

Электрическая изоляция мишени также позволяла проводить измерения тока пучка непосредственно на мишень. Была измерена вольт-амперная характеристика мишени. При подаче небольшого положительного смещения на мишень ток на неё с хорошей точностью совпадал

с током пучка, измеренным подвижным цилиндром Фа-радея.

Положение и размер пучка протонов на поверхности литиевой мишени контролировались восемью термопарами, вставленными с торца в отверстия в медной подложке мишени. Также для этих целей использовался тепловизор Flir T650sc (США), установленный на патрубок поворотного магнита с окном из фторида бария. Состояние поверхности мишени контролировалось *in situ* видеокамерой Hikvision через патрубок со стеклом из плавленного кварца.

Инфракрасные камеры (тепловизоры) Flir T650sc (FLIR Systems Inc., США) и Optris PI 640 (Германия) использовались для изучения процессов нагрева внутренних элементов ускорителя и нейтроногенерирующей мишени.

Длиннофокусный микроскоп KX InfiniMax™ (Infinity Photo-optical Co., США) применялся для изучения блистеринга мишени при облучении протонным пучком. С помощью газоанализатора RGA300 (Stanford Research Systems, США) определялся состав остаточного газа внутри вакуумной камеры ускорителя.

Для дозиметрии ионизирующего излучения и обеспечения радиационной безопасности персонала использовались дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоками детектирования БДМН-96 и БДМГ-96 (ООО "Доза", Россия), дозиметр гамма-излучения ДБГ-С11Д, устройство детектирования нейтронов УДМН-100 и блок обработки и передачи данных БОП-1М (ООО "Доза", Россия), а также сферические ионизационные камеры и гамма-детекторы LB6500-3H-10 с блоком индикации Micro Gamma LB 112 (Berthold Technologies, Германия). Мощность эквивалента дозы нейтронного излучения в бункере ускорителя измерялась блоком детектирования БДМН-100-07 (ООО "Доза"), состоящим из шарового замедлителя с размещённым в нём узлом детектирования УДМН-100. Блок детектирования был закреплён на стене радиационно-защищённого помещения на расстоянии 3,6 м от мишени под углом 34° к направлению пучка протонов. Погрешность измерения мощности дозы составляла 25 %. Радиометрическая установка РЗБ-05Д-01 использовалась для обеспечения радиационной безопасности персонала при проведении работ с открытыми источниками ионизирующего излучения.

3. Основные результаты исследований прототипа нейтронного генератора 2009 – 2020

3.1. Исследование физических процессов в ускорителе

У используемой конструкции ускорителя-тандема есть специфическая проблема, связанная с относительно большой энергией, порядка нескольких десятков джоулей, запасаемой в ёмкостях вложенных электродов системы благодаря их большой площади. Во время пробоев выделение запасённой энергии может приводить к повреждениям поверхности электродов и ухудшению высоковольтной прочности. Тем не менее эксперименты показали, что пробой с энергией до 50 Дж не повреждает существенно поверхность и не снижают высоковольтной прочности вложенных электродов, а величина темнового тока приемлемо мала при напряжённости электрического поля на электродах вплоть до 60 кВ см^{-1} [37]. Были определены возможные источники темнового

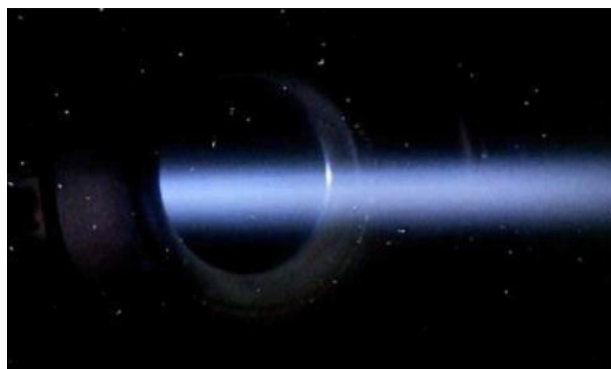


Рис. 8. (В цвете онлайн.) Изображение пучка, снятое видеокамерой при протонном токе 9 мА.

тока, и конструкция ускорителя была оптимизирована так, чтобы снизить до приемлемого уровня локальную напряжённость электрического поля в этих местах. Для высоковольтной тренировки ускорителя был разработан специальный компьютерный алгоритм, который автоматически реализуется в случае необходимости [85, 86].

Проведённые эксперименты показали, что пространственный заряд заметно влиял на фокусировку пучка в тракте низкой энергии, его форму и потери пучка в ускорителе. Была измерена зависимость профиля пучка отрицательных ионов водорода от остаточного давления газа. Профиль пучка измерялся проволочным сканером, а фазовая диаграмма пучка измерялась сканером и подвижной диафрагмой перед ним [87]. Обнаружено влияние пространственного заряда, а также сферической аберрации фокусирующих магнитных линз на ионный пучок. Установлено, что пучок имеет круглую форму (рис. 8), а максимальной плотности ток пучка достигает при промежуточном давлении в канале транспортировки.

Также был исследован поток вторичных заряженных частиц, выходящих из ускорителя [88, 89]. Эксперименты показали, что большинство вторичных частиц образуется вследствие ионизации пучком остаточного газа в зазорах между электродами, а также газа в обдирочной мишени. Существенную роль играла также вторичная электронная эмиссия со стенок пучкового тракта при облучении ионами аргона с большой энергией, которые образовывались в обдирочной мишени в результате взаимодействия с пучком. Данные о коэффициенте вторичной электронной эмиссии K для ионов аргона для различных материалов при энергии $\sim 1 \text{ МэВ}$ приведены в [90]. Согласно [90] при энергии ионов аргона $E \geq 1 \text{ МэВ}$ при нормальном падении $K \geq 10$. При наклонном падении и наличии газовых слоёв на поверхности коэффициент ещё более возрастает [91, 92]. С учётом указанного обстоятельства были приняты меры для подавления эмиссии электронов с торцевых стенок ускорителя — на входе и выходе тандема были установлены охлаждаемые диафрагмы, перед которыми располагались сетки под отрицательным потенциалом для подавления эмиссии электронов. Эти меры, а также увеличение скорости откачки на входе/выходе ускорителя позволили уменьшить ток вторичных частиц с 60 % тока ионного пучка до менее чем 8 % [93].

Проведённые исследования и модернизация ускорителя позволили увеличить ток протонного пучка со 100 мкА при первоначальном вводе в эксплуатацию [94]

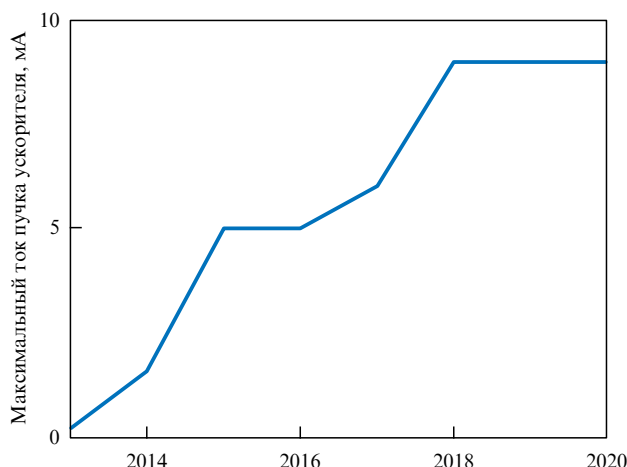


Рис. 9. Максимальный ток пучка ускорителя.

до 1,6 мА после оптимизации инъекции ионного пучка в обдирочную мишень [95]. Затем ток пучка был увеличен до 5 мА после подавления вторичных заряженных частиц [89]. После тщательной юстировки и оптимизации размера ионного пучка на входе ускорителя ток был увеличен до 7 мА, а затем до 9 мА. В настоящее время потери пучка в ускорителе минимизированы, а ток протонного пучка ограничен током отрицательных ионов водорода от источника ионов.

На рисунке 9 показано изменение максимального тока ускоренного пучка в ускорителе-тандеме в процессе ввода ускорителя в строй и его модернизации.

На начальном этапе, в 2006–2013 гг., работы велись при токе пучка 0,05–0,2 мА [94]. Устойчивой работы ускорителя-тандема при токе 1,6 мА [95] удалось добиться благодаря удалению неохлаждаемой диафрагмы на входе в ускоритель, которая при разогреве эмитировала электроны, что приводило к пробоям. Положение пучка на входе в ускоритель контролировалось с помощью видеокамеры. При этом одновременно с увеличением тока удалось также улучшить вакуум в установке и снизить мощность дозы рентгеновского излучения при работе ускорителя.

Дальнейшее возрастание тока пучка [88, 93] до 5 мА было обусловлено снижением потоков вторичных электронов, выбиваемых со стенок пучкового тракта ускоренными ионами аргона из обдирочной мишени ускорителя. Для этого на входе и выходе ускорителя устанавливались охлаждаемые диафрагмы, вторичная эмиссия с которых подавлялась с помощью сеточных электродов. Также перед входом в ускоритель была установлена диафрагма, на которую подавалось отрицательное смещение. Она служила для запираения вторичных электронов, образовавшихся в тракте пучка низкой энергии при обдирке отрицательных ионов и ионизации остаточного газа.

Возрастание тока пучка до 6 мА было достигнуто [87] благодаря более точному контролю размеров и положения пучка с помощью проволочного датчика, установленного на входе в ускоритель. Проведенные измерения позволили выявить заметное влияние на размер пучка эффекта пространственного заряда и скорректировать фокусировку пучка перед входом в ускоритель для компенсации этого эффекта. В дальнейшем ток пучка был увеличен до 7 мА [96] и далее до 9 мА при более де-

тальном контроле за положением пучка в ускорительном тракте с помощью оптической диагностики. Ток пучка отрицательных ионов на входе в ускоритель при этом составлял ~ 10 мА. По-видимому, некоторую ошибку в измерение тока протонного пучка вносила неполная обдирка пучка отрицательных ионов в газовой мишени.

После ускорения протонный пучок транспортировался к литиевой мишени, расположенной примерно в 5 м от ускорителя. Положение пучка в тракте высокой энергии контролировалось набором магнитных корректоров. Протонный пучок имеет диаметр около 10 мм [97] на выходе из ускорителя и около 30 мм на мишени. Диаметр протонного пучка на выходе практически не зависел от тока, что свидетельствует об отсутствии эффекта пространственного заряда при его транспортировке в тракте высокой энергии.

3.2. Исследование генерации нейтронов

Как указывалось в разделе 2.3, облучение протонами мишени, генерирующей нейтроны, приводит к её блистерингу, т.е. образованию пузырей (рис. 10), в медных и танталовых подложках. После появления блистеров дальнейшее облучение не приводит к изменению поверхности, что может быть связано с появлением отверстий и трещин во время образования блистеров. Образцы, полученные четырьмя различными методами осаждения тантала на медь (сварка взрывом, диффузионная сварка, пайка и плазменно-дуговое осаждение порошков тантала и меди), механически устойчивы к стационарной и импульсной тепловой нагрузке до 1 кВт см^{-2} . В экспериментах установлено, что в процессе длительного облучения температура поверхности тантала повышается. По-видимому, этот эффект связан со снижением теплопроводности вследствие образования блистеров в кристаллической структуре подложки.

В результате проведенных исследований была разработана трёхслойная литиевая мишень, состоящая из тонкого слоя чистого лития, тонкого слоя материала, стойкого к образованию радиационных блистеров, для поглощения протонов и медной подложки для эффективного отвода тепла. Такая конструкция обеспечивает стабильный выход нейтронов с увеличенным сроком службы мишени [98].

Для получения пучка нейтронов, пригодного для клинического применения, был разработан специальный формирователь (BSA). Формирователь состоит из замедлителя, отражателя, поглотителя и фильтров. Используются композитный замедлитель (фторид магния вблизи мишени для производства нейтронов и фторид алюминия вблизи выходного отверстия) и композитный отражатель (графит в передней полусфере и свинец в зад-

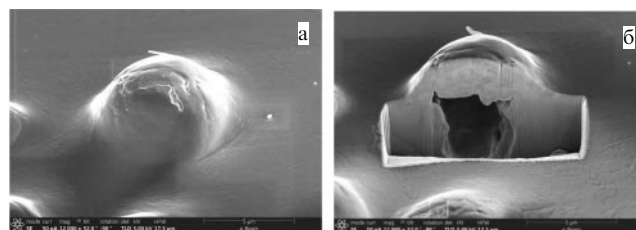


Рис. 10. (а, б) Изображения поверхности 99,996 % меди, полученные на электронном микроскопе FIB-SEM Helios G3 UC. На рисунке б показан блистер, специально разрезанный ионным пучком.

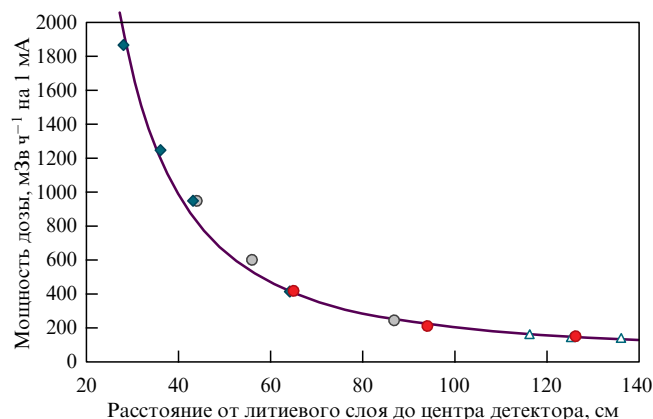


Рис. 11. Зависимость мощности дозы от расстояния от литиевой мишени вдоль направления протонного пучка.

ней). Как показало численное моделирование, этот подход обеспечивает нужный спектр нейтронов и сопутствующего гамма-излучения в реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ при энергии протонного пучка 2,3 МэВ [98, 99].

Реакция ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ сопровождается накоплением радиоактивного изотопа ${}^7\text{Be}$ в слое лития. Специальное исследование показало, что при работе нейтронного источника практически весь радиоактивный бериллий остаётся в слое лития. Изотоп ${}^7\text{Be}$ имеет период полураспада 53,3 сут, что требует специального обращения с литиевыми мишенями и хранения использованных литиевых мишеней. Использованные мишени помещались в защищённый заглублённый контейнер на период времени, необходимый для их охлаждения [100].

Интегральный выход нейтронов определялся по интенсивности гамма-излучения, образовавшегося в мишени ${}^7\text{Be}$. Измерения проводились с помощью γ -спектрометра с сцинтиллятором NaI. Нейтронный спектр измерялся времяпролётным методом при генерации коротких импульсов нейтронного излучения [101]. Для этого был разработан малогабаритный нейтронный детектор с полистирольным литым сцинтиллятором с бором [102], обеспечивающий измерение теплового потока нейтронов [103].

Пространственное распределение мощности дозы нейтронного излучения определялось с помощью дозиметра-радиометра ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96, изготовленного научно-производственным предприятием "Доза". Результаты измерений представлены на рис. 11 при энергии протонного пучка 2 МэВ (разными символами показаны значения, измеренные в различные дни).

Мощность дозы, нормированная на ток пучка 1 мА, убывала с увеличением расстояния z по закону $D = 1500/z^2 + 0,05$, где D — мощность дозы в единицах $[\text{Зв ч}^{-1}]$. Постоянный член в этой зависимости связан с вкладом рассеянных нейтронов. По-видимому, мощность дозы несколько завышена, что обусловлено относительно мягким спектром нейтронов и, как следствие, завышенными показаниями дозиметра. Измерения углового распределения мощности дозы подтвердили направленность потока нейтронов: при измерениях под углом 90° мощность дозы уменьшалась в 2,7 раза. Измеренная мощность дозы сопутствующего гамма-излучения была примерно в 60 раз меньше.

3.3. Медико-биологические исследования *in vitro* и другие применения нейтронного источника

В экспериментах изучалось влияние нейтронного облучения на жизнеспособность опухолевых клеток человека. Использовались клеточная линия глиобластомы человека U87, которая является линией опухолевых клеток глиомного происхождения и хорошо соответствует целям БНЗТ диффузных опухолей головного мозга, а также клеточная линия фибробластов мыши. Для проведения исследований *in vitro* применялся обогащённый изотопом бора-10 борфенилаланин в оптически изомерной форме L. Эксперименты проводились с помощью фантома, имитирующего структуру головы человека. Клеточные образцы размещались перед фантомом из оргстекла и после него. При этом образцы, расположенные перед фантомом, находились в условиях, подобных возникающим при облучении кожи пациента быстрыми и тепловыми нейтронами и γ -излучением. Эксперименты с клеточной линией глиобластомы человека U87 показали, что при интегральной работе ускорителя, соответствующей 1 мА ч, существенных изменений в жизнеспособности клеток во всех образцах не происходило в течение нескольких дней. Существенные изменения жизнеспособности клеток обнаруживались через две недели, когда практически все клетки, содержащие бор, были уничтожены [104, 105]. Клоногенный анализ клеточных структур после облучения изучался в работе [106]. Тест на клоногенность показал значительное увеличение цитопатического воздействия пучка медленных нейтронов при наличии борфенилаланина [107]. В настоящее время эксперименты продолжаются на лабораторных животных.

Разработанный нейтронный генератор на базе ускорителя-гандема с вакуумной изоляцией находит также и другие применения, помимо генерации эпитепловых нейтронов для БНЗТ. Так, недавно он был использован для измерения содержания опасных примесей в образцах карбида бора, разработанных для Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) [108].

Источник нейтронов планируется использовать для радиационных испытаний волокон калибровочной системы лазерного калориметра электромагнитного детектора CMS (Compact Muon Solenoid), разработанного для Большого адронного коллайдера в ЦЕРНе [109, 110]. Для генерации быстрых нейтронов водород в источнике ионов был заменён дейтерием, а для генерации нейтронов с энергией 5,7 МэВ применялся пучок дейтронов с энергией 2 МэВ и током 1,1 мА. При этом выход нейтронов составил $1,4 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$ [111].

Ускоритель при использовании специальной мишени (${}^{13}\text{C}$) позволяет генерировать поток монохроматических γ -квантов для оперативного обнаружения взрывчатых и наркотических веществ [112], α -частиц для исследования перспективного безнейтронного термоядерного синтеза ${}^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ [113] и позитронов через реакцию ${}^{19}\text{F}(p, \alpha e^+ e^-){}^{16}\text{O}$ [114].

Работа по совершенствованию конструкции ускорителя постоянно продолжается. Для уменьшения габаритов и повышения стабильности распределения потенциала между электродами было предложено разместить высоковольтный выпрямитель внутри проходного изолятора [115]. Возможность поворота BSA или его части, содержащей замедлитель, относительно оси распростра-

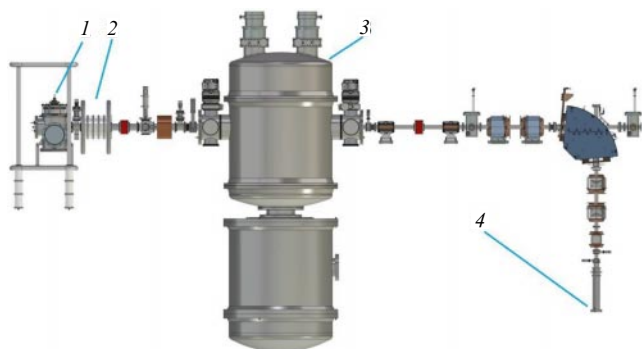


Рис. 12. Концепция генератора нейтронов для клинических испытаний БНЗТ. 1 — ионный источник, 2 — предускоритель, 3 — ускоритель, 4 — нейтроногенерирующая мишень.

нения протонного пучка может позволить направлять нейтроны к пациенту под углом, что делает терапию конкретной опухоли наиболее эффективной [116, 117]. Предложен способ получения пучка нейтронов исключительно эпитеплового диапазона энергий [118]. В пучке используются нейтроны, летящие под некоторым углом в заднюю полусферу при определённом выборе энергии протонов и толщины литиевого слоя [119].

4. Источник нейтронов для клинических испытаний бор-нейтронозахватной терапии

На основе опыта эксплуатации экспериментальной установки, описанной в разделе 3, была разработана концепция коммерческого нейтронного генератора нового поколения для проведения БНЗТ в клинических условиях, компоновка которого показана на рис. 12.

На основе данной концепции был сооружён и запущен нейтронный источник для проведения клинических испытаний БНЗТ. Его особенности, а также отдельные результаты, полученные на начальной стадии экспериментов с ним, обсуждаются ниже.

4.1. Источник ускоряющего напряжения

Источником ускоряющего напряжения ускорителя-тандема для БНЗТ служит модифицированный выпрямитель ускорителя электронов типа ЭЛВ [120]. В прототипе ускорителя, как обсуждалось в разделе 3.3, выпрямитель подключается к тандему посредством секционированного высоковольтного фидера. Напряжение выпрямителя равномерно распределяется по электродам фидера и тандема с помощью высокоомного делителя. Однако высыпание заряженных частиц при ускорении пучка на электроды тандема может нарушать равномерность распределения напряжения между электродами, что привело к пробоям.

В окончательной версии ускорителя электроды тандема непосредственно соединяются с секциями выпрямителя с помощью проходного изолятора. Одна его часть расположена внутри тандема, а другая — внутри колонны высоковольтного выпрямителя, что и обеспечивает соединение выпрямительных секций с промежуточными электродами тандема. Это изменение потребовало существенных изменений конструкции выпрямителя, вид которого показан на рис. 13.

Первичная обмотка, расположенная снаружи колонны выпрямительных секций, питается переменным на-



Рис. 13. (В цвете онлайн.) Высоковольтный выпрямитель.

пряжением частотой 1400 Гц. Снаружи первичной обмотки установлены магнитопроводы обратного потока. Первичная обмотка имеет увеличенный диаметр по сравнению с диаметром стандартного ЭЛВ-прототипа.

Колонна из 18 выпрямительных секций, смонтированная на текстолитовой пластине, с помощью изоляционных тяг крепится к нижнему магнитопроводу. Секции, выполненные по схеме с учетверением напряжения, соединяются последовательно. Максимальное выпрямленное напряжение секции составляет 80 кВ, ток нагрузки — до 20 мА. Конструкция выпрямительной секции аналогична стандартной секции ЭЛВ. В качестве изолирующего газа используется SF₆. Номинальное выходное напряжение выпрямителя 1,2 МВ.

Для измерения ускоряющего напряжения, не превышающего 1,5 МВ, в ЭЛВ используется делитель из высокоомных резисторов. При напряжении 2,5 МВ применяется роторный вольтметр. Электрическое поле вдоль колонны при такой компоновке выпрямителя примерно вдвое выше, чем в стандартном ЭЛВ, поэтому делитель из высокоомных резисторов не подтвердил требуемой надёжности. Замена делителя роторным вольтметром позволила решить проблемы с надёжностью.

Модификация высоковольтного источника позволяет уменьшить высоту ускорителя и соответственно требуемую высоту потолка для помещения, в котором он размещается. Кроме того, при подключении электродов непосредственно к секциям выпрямителя обеспечивается лучшая стабильность потенциалов промежуточных электродов по сравнению с таковой в схеме подключения с омическим делителем, использовавшейся на начальном этапе работы прототипа. Увеличение номинальной энергии пучка до 2,5 МэВ обусловлено быстрым возрастанием общего выхода нейтронов из мишени, когда при торможении пучка он проходит большой резонанс реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ с центром при энергии в 2,2 МэВ. При этом обеспечивается баланс между требуемым протонным током, временем проведения терапии и качеством пучка (с малой долей быстрых нейтронов).

Для обеспечения стабильности фокусировки и ускорения ионного пучка в модернизированной версии ускорителя-тандема потенциал промежуточных электродов задаётся не с помощью омического делителя, а непосредственно от секций выпрямителя [120]. Для этого был осуществлён поворот выпрямителя на 180° по отношению к его положению в первоначальной конструкции. Изменённая конструкция выпрямителя позволила подавать потенциал на промежуточные электроды ускорителя непосредственно от его соответствующих секций, что уменьшает влияние темновых токов и переходных процессов на стабильность ускоряющего напряжения.

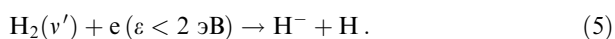
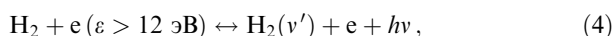
4.2. Источник отрицательных ионов

Несмотря на преимущества пеннинговского поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов, описанного в разделе 2, эксплуатация такого источника в клинических условиях затруднительна. В качестве альтернативы было предложено рассмотреть возможность использования источников с объёмным образованием отрицательных ионов. В частности, исследовалась возможность применения коммерческого источника, изготавливаемого фирмой D-Pace (Новая Зеландия). Конструкция этого источника разработана в лаборатории TRIUMF (Канада). Источник обеспечивает генерацию пучка отрицательных ионов с энергией 30 кэВ и номинальным током пучка 15 мА.

Источник ионов фирмы D-Pace показан на рис. 14. Плазма в нём генерируется дуговым разрядом между накаливаемыми вольфрамовыми катодами и стенкой камеры источника, служащей анодом. На стенке газоразрядной камеры имеется мультипольное магнитное поле, создаваемое установленными снаружи постоянными магнитами.

Периферийное магнитное поле служит для магнитного удержания плазмы, повышения её плотности, а также однородности плазменного разряда и повышения эффективности ионизации в источнике. Газообразный водород подаётся в источник для поддержания разряда и генерации отрицательных ионов. Пучок отрицательных ионов H^- с энергией 30 кэВ, генерируемый этим источником, может непрерывно меняться в пределах до 15 мА с эмиттансом менее 90 мм мрад.

Генерация отрицательных ионов в источнике происходит в результате двухступенчатого взаимодействия:



Основной реакцией, приводящей к образованию отрицательных ионов в объёме плазмы, является диссоциативное присоединение электрона к молекуле водорода (5). Скорость этой реакции представляет собой сложную функцию энергии электрона и начального состояния возбуждения электрона, характеризующегося колебательным квантовым числом v' . Максимальный выход реакции диссоциативного присоединения достигается в узком диапазоне квантовых чисел v' , что определяет специфические ограничения на энергии электронов для обеих стадий взаимодействия, (4) и (5). Распределение населённости колебательных уровней водорода и функция распределения энергии электронов могут контролироваться и настраиваться регулированием параметров плазменного разряда и изменением геометрии электродов источника ионов.

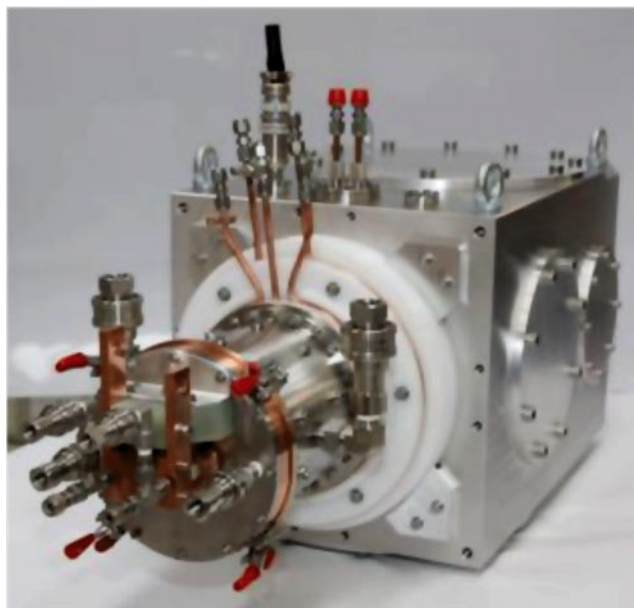


Рис. 14. (В цвете онлайн.) Источник ионов D-Pace.

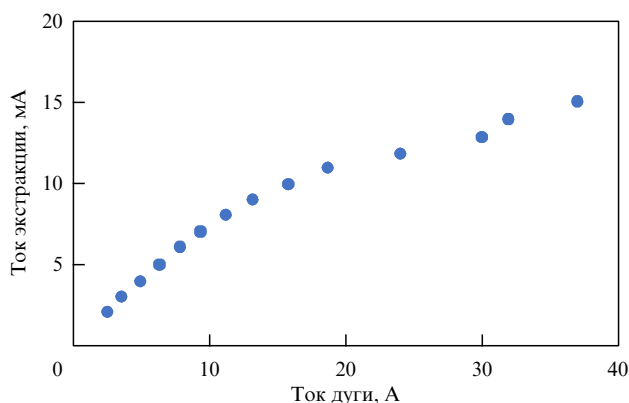


Рис. 15. Зависимость тока пучка, измеряемого цилиндром Фарадея, от тока дуги.

Генерация отрицательных ионов в объёме позволяет непрерывно извлекать их с границы плазмы. При извлечении отрицательных ионов из плазмы одновременно вытянутые из ионного пучка электроны отклоняются специальным магнитным фильтром. Далее пучок проходит через магнитные корректоры для его установки на ось ускорителя.

Ионный пучок затем транспортируется в камеру диагностики, где установлены цилиндр Фарадея с диаметром входного отверстия 25 мм для измерения тока пучка и сканер для измерения его эмиттанта. Ниже представлены результаты измерений параметров ионного источника при извлечении ионного пучка. Ток ионного пучка изменялся в диапазоне до 15 мА с шагом 1 мА.

При этом давление в пучковом тракте за источником поддерживалось на уровне $(1,2-4,6) \times 10^{-6}$ Торр. Напуск газа изменялся в пределах от 12 до 28 стандартных кубических сантиметров в минуту (standard cubic centimeters per minute — sccm) при максимальных значениях тока пучка. Газовая эффективность источника ионов при токе 10 мА составила $\sim 0,5\%$. Зависимость тока пучка, измеренного цилиндром Фарадея, от тока разряда показана на рис. 15.

Ток сопутствующих электронов для разных выходных отверстий превышает ток пучка в 2–5 раз при токе до 10 мА. При больших токах имеется тенденция к возрастанию относительного тока сопутствующих электронов.

4.3. Модернизация элементов нейтронного источника

Обдирочная мишень была модернизирована с учётом опыта эксплуатации на прототипе нейтронного генератора. Система охлаждения мишени была оптимизирована для лучшего теплосъёма на входе пучка, а также со стенок канала мишени. В трубопроводах для подвода теплоносителя к мишени уменьшились число стыков и их длина, что привело к увеличению проводимости трубопроводов и уменьшению перепадов давления в системе. Для лучшей откачки мишенного газа из высоковольтного электрода, в котором устанавливалась мишень, была изменена конструкция жалюзи в электродах тандема с целью увеличения их проводимости. Это позволило увеличить диаметр мишени до 16 мм при длине 423 мм и улучшить вакуум внутри электрода. Расчётный диаметр пучка в центре мишени ≤ 8 мм, что исключает прямое попадание частиц пучка на стенки мишени. Для подавления потока ионов аргона из мишени предусмотрены специальные электроды. Предусмотрена также возможность прецизионной юстировки мишени по отношению к ускорительному каналу.

Для поглощения пучка, ускоренного до большой энергии, был разработан специальный приёмник. Приёмник пучка может устанавливаться в высокоэнергичном тракте ускорителя после 90-градусного поворотного магнита либо магнита, который направляет пучок в помещение, где располагается мишень. Приёмник пучка, который может также устанавливаться непосредственно после ускорителя, например, на период запуска нейтронного источника рассчитан на следующие параметры пучка: энергия 2,5 МэВ, ток 10 мА, диаметр пучка ~ 1 см.

Непосредственным приёмником пучка служат медные пластины, охлаждаемые водой. Пластины наклонены под некоторым углом к оси пучка для снижения плотности мощности. В расчётах предполагалось, что допустимая плотность мощности с учётом наклона не должна превышать 2 кВт см^{-2} . Для снижения плотности мощности пучка протонов используется квадрупольная магнитная линза на постоянных магнитах, которая располагалась перед приёмными пластинами.

Для модернизации ускорителя тандема был разработан токовый датчик положения пучка. Для определения положения пучка используются четыре цилиндрических электрода с водяным охлаждением. При транспортировке пучка в тракте низкой и высокой энергии его размер меняется. Поэтому в случае необходимости можно перемещать электроды датчика по радиусу, подбирая нужную величину сигнала. Измерения с помощью датчика позволяют не только определять положение пучка, но и судить о его размерах.

Кроме того, используется оптическая диагностика для контроля положения, размеров и углового разброса пучка частиц в ускорителе-тандеме [121]. Вид и схема оптической диагностики показаны на рис. 16.

В данной диагностике для определения профиля и положения пучка ионов используется излучение, испускаемое частицами пучка или остаточного газа, возбуждаемого пучком внутри вакуумной камеры. Такие си-

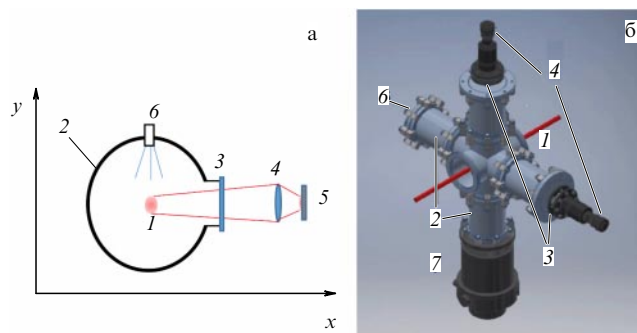


Рис. 16. (В цвете онлайн.) (а) Схема оптической диагностики положения и размеров пучка. (б) Вид устройства для диагностики: 1 — пучок, 2 — вакуумная камера с зачернёнными стенками, 3 — оптическое окно, 4 — линза, 5 — узел регистрации изображения, 6 — напуск газа, 7 — вакуумный насос.

стемы ранее применялись для диагностики мощных пучков частиц (см., например, [122–125]).

Свет, излучаемый из области пучка, собирается в оптическую систему через окно 3 (см. рис. 16). Для регистрации профиля луча используется КМОП-камера 5 (КМОП — комплементарная структура металл–оксид–полупроводник). Для увеличения светоизлучающей способности тяжёлые газы дополнительно напускаются в зону пучка через клапан 6. Каждый канал КМОП-матрицы собирает луч света вдоль хорды, пересекающей пучок. Величина сигнала на детекторном канале с координатой Y пропорциональна интегральной плотности пучка: $J(y) \propto \int n(x, y) dx$.

Наблюдение с двух разных углов позволяет определить положение центра луча и его профиль. Для регистрации использовались видеокамеры Basler AC1300NIR. Свет собирается с помощью линзы с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1,4. Настройка фокуса видеокамер осуществляется объективами, установленными на вертикальном и горизонтальном ракурсах наблюдения (см. рис. 16). Среднее размытие сегмента 10 мм вдоль обзорной хорды из-за конечной глубины резкости оценивается в 0,25 мм. Для уменьшения фонового рассеянного света в поле зрения линз за пучком помещались дополнительные объёмы 2 с затемнённой поверхностью. Расстояние от центральной оси луча до линз около 40 см. Насос 7 обеспечивает откачку напускаемого газа.

На рисунке 17 показаны результаты измерений для пучка с энергией 35 кэВ. Для увеличения яркости свечения пучка использовался напуск ксенона при давлении около 10^{-6} Торр, что приводило к ослаблению пучка вследствие обдирки на атомах ксенона на величину менее 1%. Полученное изображение позволяет определить положение центра пучка в зависимости от продольной координаты в поле зрения (кривая 1), его наклон относительно некоторой выбранной оси, границы пучка на полувысоте (кривые 2, 3). Линейная аппроксимация зависимости полуширины пучка от продольной координаты (рис. 17б) позволяет определить угол фокусировки/дефокусировки пучка. В данном случае, как видно, угол расходимости пучка $\sim 5,5$ мрад. Точность определения положения и ширины пучка с током 10 мА, энергией около 35 кэВ составляет 0,1 мм для наклона пучка относительно матрицы фотокамеры и для угла фокусировки пучка около 1 мрад.

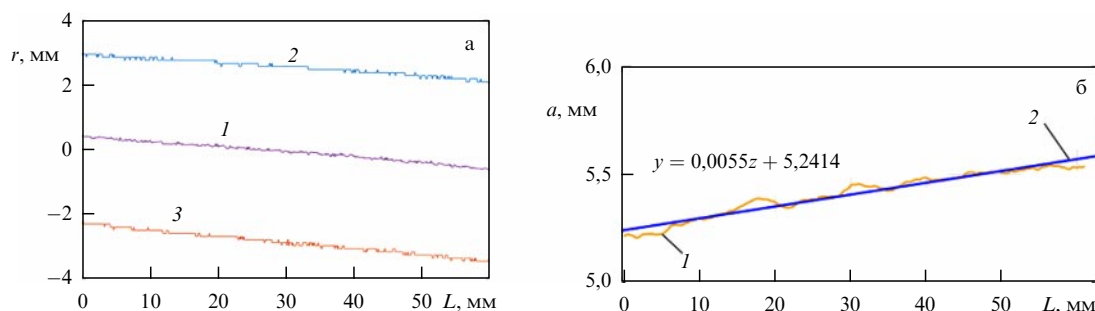


Рис. 17. (а) Положение центра тяжести пучка (кривая 1) и его границы на полувысоте (кривые 2, 3) вдоль транспортного канала. (б) Ширина пучка на полувысоте в зависимости от продольной координаты (кривая 1) и её линейная аппроксимация (кривая 2).

Измерялись также разброс энергии пучка и его угловая расходимость. Точность измерения разброса по энергии около 100 эВ, для угловой расходимости — 3 мрад. Экспозиция при этом составляла 50–100 мс. Приемлемая точность (1 мм) определения положения пучка получалась при относительно коротком воздействии, менее 10 мс, на пучок при импульсной подаче газа в пучковый тракт для увеличения интенсивности излучения. Добавление газа приводит к обдирке отрицательных ионов, поэтому необходима оптимизация количества напускаемого газа. В качестве наиболее эффективной была определена добавка ксенона, который обеспечивал увеличение интенсивности излучения в ~ 40 раз по сравнению с таковой в случае водорода и в $\sim 2,5$ раза в случае аргона при энергии пучка около 35 кэВ. Время экспозиции при такой энергии пучка составляло менее 10 мс, при этом было измерено его положение с точностью около 1 мм. Напуск ксенона приводил к потерям около 5 % пучка. Данная диагностика может быть использована для автоматического управления перемещением луча и его коррекции. Большая добавка газа требуется для оптической диагностики пучка положительных ионов в высокоэнергетическом тракте с энергией протонов ~ 2 МэВ. Однако в данном случае увеличение давления газа в пучковом тракте не приводит к значительным потерям протонного пучка.

4.4 Результаты моделирования ускорения и транспортировки пучка

Результаты выполненного на начальном этапе исследований численного моделирования движения пучка в прототипе ускорителя-тандема представлены в работе [126]. Моделирование проводилось с помощью программы ExtraSAM [127], позволяющей учитывать как поперечное, так и продольное поле объёмного заряда ионного пучка. С учётом объёмного заряда электростатическая фокусирующая линза на входе в ускоритель имеет фокусное расстояние, сравнимое с размером межэлектродного зазора. Согласованный ввод пучка в ускоритель с компенсацией фокусирующего действия входной электростатической линзы достигается посредством впуска в ускоритель сильно расходящегося ионного пучка с малым радиусом. Такой пучок получается его перефокусировкой с помощью магнитной линзы непосредственно перед входом в ускоритель. Моделирование проводилось при токе пучка отрицательных ионов до 40 мА. При этом токе наблюдалось заметное увеличение эмиттанса пучка на входе в ускоритель за счёт нелинейного действия сил объёмного заряда.

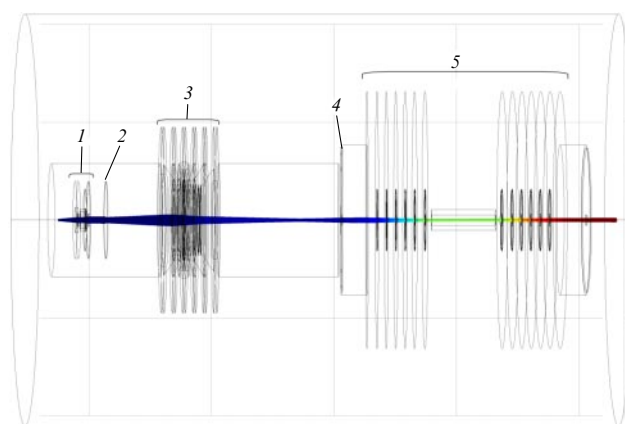


Рис. 18. (В цвете онлайн.) Траектории частиц пучка в ускорителе с ионным источником D-Race. 1 — ионный источник, 2 — выходной коллиматор источника, 3 — предускоритель, 4 — входной коллиматор ускорителя, 5 — ускоритель.

В дальнейшем численное моделирование проводилось в трёхмерной геометрии с помощью программы COMSOL Multiphysics 5.3 без учёта эффектов пространственного заряда, поскольку токи инжекции в тандем составляли менее 10 мА. Изучалось движение пучка в вариантах ускорителя с источником ионов, разработанным фирмой D-Race, и с разработанным в ИЯФ СО РАН пеннинговским источником, описанным выше. Расчёты производились только для тракта низкой энергии и ускорителя-тандема. При моделировании напряжение на высоковольтном электроде принималось равным 1 МВ. В этих вариантах для повышения энергии инжекции в тандем используется ускорительная трубка — предускоритель. Повышенная энергия инжекции улучшает транспортировку пучка на входе в тандем и одновременно позволяет повысить энергию протонного пучка на выходе из тандема. Траектории частиц пучка, полученные в результате моделирования, показаны на рис. 18. Гало пучка обрезается коллиматором на выходе ионного источника. Расчёты показали, что на этот коллиматор попадает ~ 20 % тока пучка, генерируемого источником отрицательных ионов.

4.5 Основные результаты испытаний прототипа ускорителя

На начальной фазе экспериментов был измерен эмиттанс пучка отрицательных ионов с помощью сканера, установленного в диагностическом объёме рядом с ионным источником. Результаты измерений представлены на

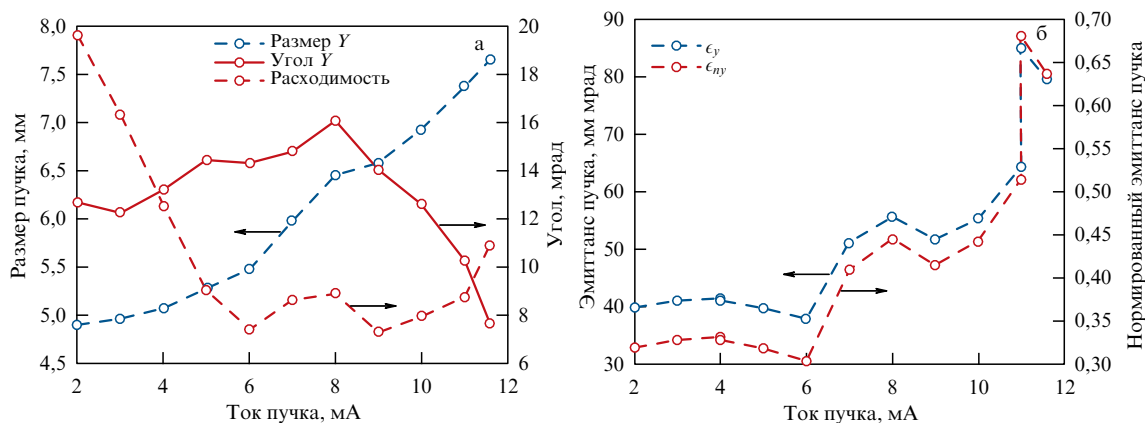


Рис. 19. (В цвете онлайн.) (а) Размер пучка, наклон и угловая расходимость пучка. (б) Эмиттанс пучка по различным координатам.

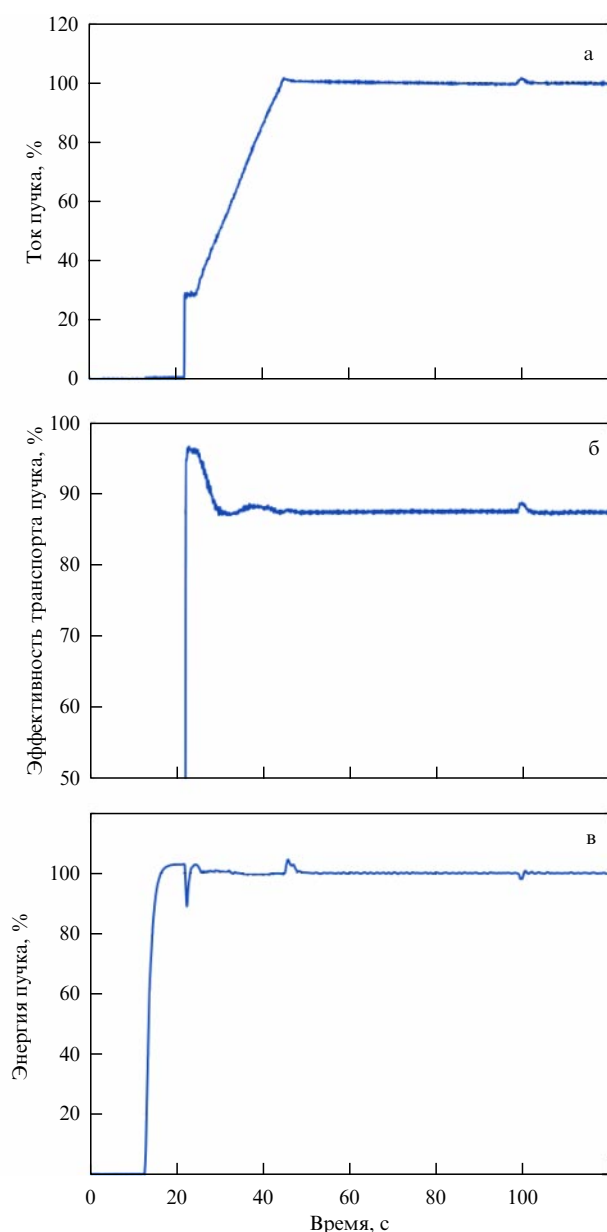


Рис. 20. Параметры ускорителя при быстром восстановлении пучка: (а) ток пучка на выходе из ускорителя; (б) эффективность проводки пучка через тандем — отношение токов пучка на выходе из тандема и на входе в него; (в) суммарное ускоряющее напряжение (энергия протонного пучка).

рис. 19 для исследованной версии ионного источника. Измеренный эмиттанс пучка при токах до 10 мА не превышал 60 мм мрад, что меньше акцептанса ускорителя с системой доускорения пучка.

При работе с модернизированной версией ускорителя-тандема были изучены алгоритмы плавного изменения тока пучка, что потребовало синхронных изменений параметров ионного источника и элементов пучкового тракта (рис. 20). Обращает на себя внимание некоторое снижение эффективности проводки пучка при повышении тока. При этом ток на входную диафрагму тандема и токи на электроды датчиков положения пучка изменяются примерно пропорционально входному току в ускоритель. Причина снижения эффективности проводки пучка при увеличении тока может быть связана с соответствующим увеличением эмиттанса пучка, что приводит к возрастанию потерь пучка на электродах ускорителя. По-видимому, свой вклад вносит также нагрев газа в обдирочной мишени, приводящий к убыванию плотности, а значит, и степени обдирки пучка.

5. Коммерческий источник нейтронов для клинических испытаний бор-нейтронозахватной терапии

На основе данных, полученных в экспериментах с прототипом нейтронного источника в ИЯФ СО РАН, компания TAE Life Sciences (Foothill Ranch, Калифорния, США) при поддержке ИЯФ СО РАН разработала коммерческую версию генератора нейтронов для проведения БНЗТ в клинических условиях. Отправной точкой для разработки коммерческого генератора нейтронов стала концепция, представленная на рис. 12. В этом генераторе используется более компактный по сравнению с прототипом высоковольтный источник, секции которого подключаются непосредственно к электродам тандема. Конструкция электродов тандема и обдирочной мишени была существенно переработана для снижения напряженности электрического поля в критических местах, повышения точности юстировки и более интенсивного охлаждения. Кроме того, вместо поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов был применен более простой в эксплуатации объемный источник с большим током пучка. Для лучшего согласования с оптикой тандемного ускорителя энергия пучка на входе в него существенно увеличена. По сравнению с прототипом заметно



Рис. 21. (В цвете онлайн.) Вид нейтронного генератора с трактом пучка низкой энергии, ускорителем-тандемом, трактом пучка высокой энергии и системой разводки пучка по каналам на нейтроногенерирующие мишени в помещениях для облучения пациентов.

расширены возможности систем диагностики и управления. Для обеспечения возможности проведения сеансов терапии в двух помещениях соответствующим образом изменена конструкция тракта пучка высокой энергии.

Коммерческая версия генератора нейтронов обеспечивает энергию протонного пучка до 2,5 МэВ с постоянным током 10 мА. Общий вид установки с разводкой пучка на два процедурных помещения показан на рис. 21. Генератор нейтронов включает в себя тракт низкой энергии, собственно ускоритель-тандем и тракт пучка высокой энергии, позволяющий перенаправлять пучок в несколько процедурных помещений.

Источник отрицательных ионов водорода размещён на высоковольтной платформе, соединённой с ускорительной трубкой, что даёт возможность увеличить энергию пучка, инжектируемого в тандем, до 120–180 кэВ. Подобное предускорение пучка отрицательных ионов позволяет осуществить более "мягкий" ввод пучка в ускоритель, что в свою очередь позволяет уменьшить влияние сильных поперечных электрических полей на входе в ускоритель на размеры пучка при его движении в электродной системе. Кроме того, снижается влияние пространственного заряда на транспортировку пучка. В прототипе ускорителя, описанного в разделе 4, ввод пучка низкой энергии в ускоритель приводил к сильной фокусировке. Для компенсации этого эффекта используется сильная перефокусировка пучка перед входом с помощью линзы-соленоида. Кроме того, увеличение энергии пучка на входе в ускоритель позволяет снизить ускоряющее напряжение на высоковольтном электроде ускорителя, что также существенно повышает надёжность его работы.

Тракт пучка высокой энергии включает в себя магнитные линзы и разветвитель для направления протонного пучка с энергией 2,5 МэВ от тандемного ускорителя к литиевым мишеням, расположенным в процедурных помещениях. Конструкция системы охлаждения используемой литиевой мишени позволяет снимать тепло с мишени под нагрузкой в несколько мегаватт на 1 м² без плавления литиевого слоя.

Для поддержания нужного вакуума в ускорителе во время работы источника ионов и обдирочной мишени используется набор турбомолекулярных насосов. Давление в тракте высокой энергии поддерживается на уровне $\sim 10^{-6}$ Торр (без напуска газа в системе оптической диагностики положения и размеров пучка).

Коммерческая версия генератора нейтронов оснащена системой автоматизации, обеспечивающей простоту

использования системы в клинических условиях. Многоуровневая система защиты обеспечивает безопасность пациента и медицинского персонала в случае неполадок в системе. Коммерческий генератор нейтронов построен с соблюдением международных норм и стандартов, принятых для установок радиационной терапии.

ТАЕ Life Sciences планирует разместить первую установку в новом центре БНЗТ в клинике Xiamen Humanity Hospital в Сямыне (Китай). Нейтронный генератор будет ключевым элементом комплекса, используемого для проведения терапии компанией Neuboron Medtech Ltd. (Нанкин, Китай), которая будет владеть и управлять всей системой в рамках центра БНЗТ.

6. Заключение

В Институте ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера с 2006 г. ведутся эксперименты на ускорительном нейтронном генераторе для проведения БНЗТ. Генерация нейтронов осуществляется при сбросе ускоренного протонного пучка с энергией ~ 2 МэВ и током до 9,6 мА на литиевую мишень. Для получения протонного пучка используется ускоритель-тандем оригинальной конструкции без ускорительных трубок. На нейтронном генераторе ведутся медико-биологические эксперименты по облучению клеточных структур и лабораторных животных. На основе прототипа нейтронного генератора компанией ТАЕ Life Sciences при поддержке ИЯФ СО РАН создана коммерческая версия компактного нейтронного генератора с энергией протонного пучка до 2,5 МэВ и током до 10 мА. Коммерческий генератор нейтронов будет использован для проведения клинических испытаний БНЗТ в ближайшее время.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников ИЯФ СО РАН А.Н. Драничникова, С.Г. Константинова, А.В. Бурдакова, С.В. Полосаткина, И.В. Шиховцева, Н.В. Ступишина, А.Д. Хильченко и др. за большой вклад в изучение физических процессов в нейтронном генераторе на разных этапах работы, а также за очень важные обсуждения различных аспектов физики нейтронного источника для БНЗТ. Авторы выражают глубокую благодарность С. Вдовичеву, К. Мартьянову, Ч. Ли (США), Т. Кабаяси (Япония), А. Крейнеру (Аргентина) за полезные обсуждения и интерес к работе. Сотрудникам Научно-конструкторского отдела ИЯФ СО РАН В.М. Долгушину, В.В. Мишагину, В.В. Кобецу, А.И. Горбовскому, В.Х. Амирову, А.В. Сорокину, В.П. Белову, А.И. Вилькину, Л.П. Рухляде, Н.Г. Васильевой и другим авторы благодарны за работу по проектированию нейтронного источника. Авторы также считают необходимым поблагодарить В.Н. Кононова и О.Е. Кононова (Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск), Г.Г. Смирнова, Г.Н. Малышкина, Е.А. Кашаеву, Я.З. Кандиева (Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск) за помощь; медиков: В.И. Брегадзе, А.Л. Кривошапкина, Н.В. Губанову, В.В. Каньгина и др. — за поддержку, интерес к работе и за проведение медико-биологических экспериментов на нейтронном источнике. Авторы благодарны А.Н. Скринскому и П.В. Логачеву за интерес, проявленный к данным исследованиям, и их поддержку. Работа

поддержана грантом Российского научного фонда (проекты 14-32-00006 и 19-72-30005), TAE Life Sciences, а также Международным научно-техническим центром, Министерством науки и образования Российской Федерации и рядом других организаций.

Список литературы

- Barth R F et al. *Clinic. Cancer Res.* **11** 3987 (2005)
- Moss R L *Appl. Radiat. Isot.* **88** 2 (2014)
- Sauerwein W A G et al. (Eds) *Neutron Capture Therapy. Principles and Applications* (Heidelberg: Springer, 2012)
- Farr L E et al. *Am. J. Roeng. Ther. Nucl. Med.* **71** 279 (1954)
- Goldwin J T *Cancer* **8** 601 (1955)
- Slatkin D N *Brain* **114** 1609 (1991)
- Hawthorne M F, Shelly K, Wiersema R J (Eds) *Frontiers in Neutron Capture Therapy* Vol. 1 (New York: Springer-Verlag, 2001) <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1285-1>
- Soloway A H, Hatanaka H, Davis M A *J. Med. Chem.* **10** 714 (1967)
- Hatanaka H *Basic Life Sci.* **54** 15 (1990)
- Mishima Y et al. *Basic Life Sci.* **50** 251 (1989)
- Granada A D et al. *Neurosurgery* **44** 1182 (1999)
- Busse P M et al. *J. Neurooncol.* **62** 111 (2003)
- Sauerwein W, Zurlo A *Eur. J. Cancer* **38** (Suppl. 4) 31 (2002)
- Joensuu H et al. *J. Neurooncol.* **62** 123 (2003)
- Capala J et al. *J. Neurooncol.* **62** 135 (2003)
- Dbaly V et al. *Ces a slov Neurol. Neurochir.* **66–69** 60 (2002)
- Nakagawa Y et al. *J. Neurooncol.* **62** 87 (2003)
- González S J et al. *Appl. Radiat. Isot.* **61** 1101 (2004)
- Kato I et al. *Appl. Radiat. Isot.* **61** 1069 (2004)
- Kankaanranta L et al. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* **82** (1) E67 (2012)
- Tamura Y et al. *J. Neurosurg.* **105** 898 (2006)
- Suzuki M et al. *Radiotherapy Oncol.* **88** (2) 192 (2008)
- Suzuki M et al. *Jpn. J. Clin. Oncol.* **37** 376 (2007)
- Blue T, Yanch J *J. Neurooncol.* **62** 19 (2003)
- Kreiner A J et al. *Rep. Pract. Oncol. Radiotherapy* **21** 2 (2016)
- Tanaka H et al. *Appl. Radiat. Isot.* **67** S258 (2009)
- Tanaka H et al., in *Proc. of the 14th Intern. Congress on Neutron Capture Therapy, 14ICNCT, Buenos Aires, Argentina, 25–29 October 2010*, p. 447
- Beynon T, in *Research and Development in Neutron Capture Therapy* (Eds M W Sauerwein, R Moss, A Wittig) (Bologna: Monduzzi Editore, Intern. Proc. Division, 2002) p. 225
- Wangler T "Conceptual design of an RFQ accelerator-based neutron source for boron neutron capture therapy", LAUR89-912 (Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1989); *Particle Accelerator Conf., Chicago, IL, March 20–23, 1989*, p. 678
- McMichael G E, Yule T J, Zhou X-L *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **99** 847 (1995)
- Kreiner A J et al., in *Proc. of the 8th Intern. Topical Meeting on Nuclear Applications and Utilization of Accelerators, Pocatello, Idaho, 2007*, p. 373
- Kreiner A J et al. *Appl. Radiat. Isot.* **67** S266 (2009)
- Smick T et al., in *Book of Abstracts of the 16th Intern. Congress on Neutron Capture Therapy, Finland, Helsinki, 2014*, p. 138
- Tsuchida K et al., in *Book of Abstracts of the 16th Intern. Congress on Neutron Capture Therapy, Finland, Helsinki, 2014*, p. 206
- Forton E et al. *Appl. Radiat. Isot.* **67** S262 (2009)
- Bayanov B F et al. *Nucl. Instrum. Method. Phys. Res. A* **413** 397 (1998)
- Димов Г И и др. *Атомная энергия* **94** 155 (2003); Dimov G I et al. *Atom. Energy* **94** 116 (2003)
- Miyatake S et al. *J. Neurooncol.* **149** 1 (2020)
- Hirose K et al. *Int. J. Rad. Onc. Biol. Phys.* **105** E374 (2019)
- Barth R F, Mi P, Yang W *Cancer Commun.* **38** 35 (2018)
- Crossley E L et al. *Mini Rev. Medic. Chem.* **7** 303 (2007)
- Lesnikowski Z J et al. *Bioorg. Medic. Chem.* **13** 4168 (2005)
- Ahrens V M et al. *Chem. Med. Chem.* **10** 164 (2015)
- Yang W et al. *Clinic. Cancer Res.* **14** 883 (2008)
- Kueffer P J et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110** 6512 (2013)
- Yinghuai Z et al. *Curr. Chem. Biol.* **1** 141 (2007)
- Mi P et al. *J. Control. Release* **254** 1 (2017)
- Sivaev I B et al. *Eur. J. Inorg. Chem.* **11** 1433 (2009)
- Davydenko V I et al. *AIP Conf. Proc.* **763** 332 (2005)
- Алейник В И и др. *ИТЭ* (5) 5 (2013)
- Belchenko Yu I, Grigoryev E V *Rev. Sci. Instrum.* **73** 939 (2002)
- Belchenko Yu I, Savkin V Y *Rev. Sci. Instrum.* **75** 1704 (2004)
- Belchenko Yu I et al. *Rev. Sci. Instrum.* **79** 02A521 (2008)
- Бельченко Ю И и др. *УФН* **188** 595 (2018); Belchenko Yu I et al. *Phys. Usp.* **61** 531 (2018)
- Belchenko Yu I et al. *AIP Conf. Proc.* **2011** 050021 (2018)
- Sanin A L et al. *AIP Conf. Proc.* **2052** 050012 (2018)
- Vykov T et al. *AIP Conf. Proc.* **2052** 050013 (2018)
- Belchenko Yu I et al. *Rev. Sci. Instrum.* **77** 03A527 (2006)
- Belchenko Yu I, Sanin A L, Ivanov A A *AIP Conf. Proc.* **1097** 214 (2009)
- Belchenko Yu I et al. *AIP Conf. Proc.* **1515** 448 (2013)
- Belchenko Yu I et al. *Rev. Sci. Instrum.* **85** 02B108 (2014)
- Barnet C et al. "Atomic data for controlled fusion research", ORNL-5206 (Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 1977)
- Алейник В И и др. *Науч. вестн. Новосибирского гос. технического ун-та* **50** (1) 83 (2013)
- Jacob S A W, Suter M, Synal H-A *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **172** 235 (2000)
- Егорова В А и др. "Математическая модель взаимодействия протонов с веществом", Препринт № 138 (М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, 2017) <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-138>
- Баянов Б Ф, Белов В П, Таскаев С Ю "Нейтроногенирующая мишень ускорительного источника нейтронов для нейтронозахватной терапии", Препринт № 2005-4 (Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 2005)
- Вауанов В *Appl. Radiat. Isot.* **61** 817 (2004)
- Баянов Б Ф, Журов Е В, Таскаев С Ю *ИТЭ* (1) 160 (2008); Bayanov B F, Zhurov E V, Taskaev S Yu *Instrum. Exp. Tech.* **51** 147 (2008)
- Kasatov D *JINST* **15** P10006 (2020)
- Баянов Б Ф и др. *ИТЭ* (3) 119 (2008); Bayanov B F et al. *Instrum. Exp. Tech.* **51** 438 (2008)
- Kasatov D et al. *Appl. Radiat. Isot.* **106** 38 (2015)
- Vykov T et al. *Appl. Radiat. Isot.* **175** 109821 (2021)
- Касатов Д А "Исследования материалов нейтроногенирующей мишени для бор-нейтронозахватной терапии", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 2022)
- Batrutdinov A et al. *Metals* **7** (12) 558 (2017)
- Akhmetov T D et al. *Rev. Sci. Instrum.* **77** 03C106 (2006)
- Barker P H et al. *Metrologia* **39** 371 (2002)
- Biesiot W, Smith Ph B *Phys. Rev. C* **24** 2443 (1981)
- Vartsky D et al. *Nucl. Phys. A* **505** 328 (1989)
- Бурдаков А В и др. *ИТЭ* (4) 70 (2017); Burdakov A V et al. *Instrum. Exp. Tech.* **60** 522 (2017)
- Кузнецов А С и др. *Письма в ЖТФ* **35** (8) 1 (2009); Kuznetsov A S et al. *Tech. Phys. Lett.* **35** 346 (2009)
- Алейник В И *ИТЭ* (5) 5 (2013); Aleinik V I et al. *Instrum. Exp. Tech.* **56** 497 (2013)
- Vykov T et al., in *6th Intern. Symp. on Negative Ions, Beams and Sources, NIBS'18, September 3–7, 2018, Novosibirsk, Russia*
- Taskaev S Yu et al., in *Proc. of the 9th Intern. Particle Accelerator Conf., Vancouver, Canada, MOPML062, 2018*, <https://doi.org/10.18429/JASoW-IPAC2018-MOPML062>
- Aleynik V et al. *Appl. Radiat. Isot.* **69** 1639 (2011)
- Сорокин И Н "Высоковольтная прочность ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией", Дисс. ... канд. тех. наук (Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 2014)
- Сорокин И Н, Таскаев С Ю *ИТЭ* (4) 5 (2014); Sorokin I N, Taskaev S Yu *Instrum. Exp. Tech.* **57** 377 (2014)
- Быков Т А и др. *ИТЭ* (5) 90 (2018); Vykov T A et al. *Instrum. Exp. Techn.* **61** 713 (2018)
- Иванов А А и др. *Письма в ЖТФ* **42** (12) 1 (2016); Ivanov A A et al. *Tech. Phys. Lett.* **42** 608 (2016)
- Касатов Д А и др. *Письма в ЭЧАЯ* **13** 543 (2016); Kasatov D A et al. *Phys. Part. Nuclei Lett.* **13** 954 (2016)
- Hasselkamp D et al. *Nucl. Instrum. Meth.* **180** 349 (1981)

91. Sternglass E J *Phys. Rev.* **108** 1 (1957)
92. Брусиловский Б А *Кинетическая ионно-электронная эмиссия* (М.: Энергоатомиздат, 1990)
93. Ivanov A A et al. *JINST* **11** P04018 (2016)
94. Кузнецов А С и др. "Первые эксперименты по регистрации нейтронов на ускорительном источнике для бор-нейтронозахватной терапии", Препринт ИЯФ 2008-27 (Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 2008)
95. Kasatov D et al. *J. Instrum.* **9** P12016 (2014)
96. Taskaev S Yu et al., in *Proc. of the 9th Intern. Particle Accelerator Conf., Canada, Vancouver, 2018*, MOPML063, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-MOPML063>
97. Batrudinov A et al. *Metals* **7** (12) 558 (2017)
98. Заиди Л и др. *ЯФ* **80** 63 (2017); Zaidi L et al. *Phys. Atom. Nucl.* **80** 60 (2017)
99. Zaidi L et al. *Appl. Radiat. Isot.* **139** 316 (2018)
100. Баянов Б Ф и др. *ИТЭ* (6) 117 (2010); Bayanov B F et al. *Instrum. Exp. Tech.* **53** 883 (2010)
101. Алейник В И и др. *ИТЭ* (4) 9 (2014); Aleinik V I et al. *Instrum. Exp. Tech.* **57** 381 (2014)
102. Porosev V, Savinov G *JINST* **14** P06003 (2019)
103. Вуков Т et al. *JINST* **14** P12002 (2019)
104. Gubanova N et al., in *Book of Abstracts of the 16th Intern. Congress on Neutron Capture Therapy, Finland, Helsinki, 2014*, p. 205
105. Таскаев С Ю, Каньгин В В *Бор-нейтронозахватная терапия* (Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016)
106. Каньгин В В и др. *J. Siberian Med. Sci.* (5с) 5 (2016)
107. Яруллина А И и др. *Тихоокеанский медицинский журн.* (4) 6 (2015)
108. Shoshin A et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **48** 1474 (2020)
109. Massironi A (CMS Collab.) "Precision electromagnetic calorimetry at the energy frontier: CMS ECAL at LHC Run 2", arXiv:1510.02745
110. Zhang Z *JINST* **13** C04013 (2018)
111. Касатов Д А и др. *ИТЭ* (5) 5 (2020); Kasatov D A et al. *Instrum. Exp. Tech.* **63** 611 (2020)
112. Kuznetsov A S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **606** 3 (2009)
113. Rostoker N, Qerushi A, Binderbauer M *J. Fusion Energy* **22** 83 (2003)
114. Farrell J et al., in *7th Intern. Workshop on Positron and Positronium Chemistry, Knoxville, USA, 2002*, p. 47
115. Sorokin I N, Taskaev S Yu *Appl. Radiat. Isot.* **106** 101 (2015)
116. Таскаев С Ю, Каньгин В В "Система формирования пучка нейтронов", Патент РФ № 2540124 от 16.12.2014
117. Aleynik V et al. *Appl. Radiat. Isot.* **88** 177 (2014)
118. Таскаев С Ю. "Способ получения пучка эпителловых нейтронов", Патент РФ № 2722965 от 05.06.2020
119. Lee C L, Zhou X-L *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **152** 1 (1999)
120. Домаров Е В и др. *ИТЭ* (1) 77 (2017); Domarov E V et al. *Instrum. Exp. Tech.* **60** 70 (2017)
121. Popov S S et al. *Rev. Sci. Instrum.* **91** 013311 (2020)
122. Fraser J S *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **28** 2137 (1981)
123. Chamberlin D D, Hollabaugh J S, Stump C J *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **30** 2201 (1983)
124. Pasqualotto R et al. *Fusion Eng. Des.* **88** 1253 (2013)
125. Delogu R S et al. in *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 1802 (2014)
126. Деревянкин Г Е и др. "Ионно-оптический тракт 2,5 МэВ 10 МА ускорителя-тандема", Препринт ИЯФ 2002-24 (Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 2002)
127. Tiunov M A, Kuznetsov G I, Batazova M A *AIP Conf. Proc.* **572** 155 (2001)

Accelerator-based neutron source for boron neutron capture therapy

A.A. Ivanov^(1,a), A.N. Smirnov^(2,3,b), S.Yu. Taskaev^(1,4,c), B.F. Bayanov^(1,d), Yu.I. Belchenko^(1,e), V.I. Davydenko^(1,f), A. Dunaevsky⁽³⁾, I.S. Emelev^(1,4,g), D.A. Kasatov^(1,4,h), A.N. Makarov^(1,4,i), M. Meekins⁽³⁾, N.K. Kuksanov^(1,j), S.S. Popov^(1,k), R.A. Salimov⁽¹⁾, A.L. Sanin^(1,l), I.N. Sorokin^(1,3,m), T.V. Sycheva^(1,4), I.M. Shudlo^(1,4,n), D.S. Vorob'ev^(1,o), V.G. Cherepkov^(1,p), S.N. Fadeev^(1,q)

⁽¹⁾ Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation

⁽²⁾ TAE Life Sciences, 19631 Pauling, Foothill Ranch, CA, 92610, USA

⁽³⁾ TAE Technologies, 19631 Pauling, Foothill Ranch, CA, 92610, USA

⁽⁴⁾ Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: ^(a) aivanov5353@mail.ru, ^(b) A.Smirnov@tae.com, ^(c) S.Yu.Taskaev@inp.nsk.su, ^(d) B.F.Bayanov@inp.nsk.su,

^(e) Yu.I.Belchenko@inp.nsk.su, ^(f) V.I.Davydenko@inp.nsk.su, ^(g) I.S.Emelev@inp.nsk.su, ^(h) D.A.Kasatov@inp.nsk.su,

⁽ⁱ⁾ A.N.Makarov@inp.nsk.su, ^(j) N.K.Kuksanov@inp.nsk.su, ^(k) S.S.Popov@inp.nsk.su, ^(l) A.L.Sanin@inp.nsk.su,

^(m) I.N.Sorokin@inp.nsk.su, ⁽ⁿ⁾ cshudlo.i.m@gmail.com, ^(o) D.S.Vorobev@inp.nsk.su, ^(p) V.G.Cherepkov@inp.nsk.su,

^(q) S.N.Fadeev@inp.nsk.su

An accelerator-based neutron source is being developed for boron neutron capture therapy (BNCT) of oncological diseases. In the source, neutrons are produced through interaction of a proton beam accelerated in an electrostatic tandem accelerator with a lithium target. The source generates an optimal neutron beam for BNCT treatment, and has several unique practical characteristics that make it ideally suited for clinical use. Namely, the tandem accelerator is compact (its design does not utilize accelerator tubes), reliable, simple and flexible in operation, and relatively inexpensive. The paper provides a comprehensive overview of studies of the neutron source prototype and preliminary test results of the first specialized neutron source for clinical trials of BNCT.

Keywords: accelerator-based neutron source, electrostatic accelerator, boron neutron capture therapy, negative hydrogen ion source

PACS numbers: **29.20.** – c, **29.25.** Dz, **87.19.** xj, **87.53.** – j, **87.55.** – x

Bibliography — 127 references

Received 30 March 2021, revised 7 April 2021

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **192** (8) 893–912 (2022)

Physics – Uspekhi **65** (8) (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.02.038940>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.02.038940>