

## ИСТОЧНИК БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ И ЛИТИЕВОЙ МИШЕНИ

© 2020 г. Д. А. Касатов<sup>a,b</sup>, А. М. Кошкарев<sup>a,b</sup>, А. Н. Макаров<sup>a,b</sup>,  
Г. М. Остринов<sup>a,b</sup>, С. Ю. Таскаев<sup>a,b,\*</sup>, И. М. Щудло<sup>a,b</sup>

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

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

<sup>b</sup> Новосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

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

Поступила в редакцию 10.03.2020 г.

После доработки 13.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Представлены результаты исследований по получению пучка дейтронов в ускорителе-тандале с вакуумной изоляцией и генерации быстрых нейтронов из литиевой мишени. Рассмотрена возможность применения источника быстрых нейтронов для радиационного тестирования материалов и терапии быстрыми нейтронами.

DOI: 10.31857/S0032816220050158

В Институте ядерной физики СО РАН функционирует ускорительный источник эпитепловых нейтронов [1, 2], созданный для развития перспективной методики лечения злокачественных опухолей – бор-нейтронозахватной терапии [3, 4]. Источник состоит из ускорителя-тандале с вакуумной изоляцией для получения пучка протонов и литиевой мишени для генерации нейтронов в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ . На источнике получен пучок эпитепловых нейтронов, пригодный для бор-нейтронозахватной терапии, и проведены успешные биологические исследования [5, 6]. Разработанный источник нейтронов стал прототипом установки, которая скоро будет запущена в эксплуатацию в Китае для лечения больных бор-нейтронозахватной терапией.

С использованием данного источника нейтронов также разработана методика оперативного обнаружения взрывчатых и наркотических веществ [7], измерено содержание опасных примесей в образцах карбида бора, созданных для ИТЭР [8], кроме того, источник планируется использовать для радиационного тестирования оптических волокон системы лазерной калибровки калориметра CMS при работе Большого адронного коллайдера (ЦЕРН) в режиме высокой светимости [9].

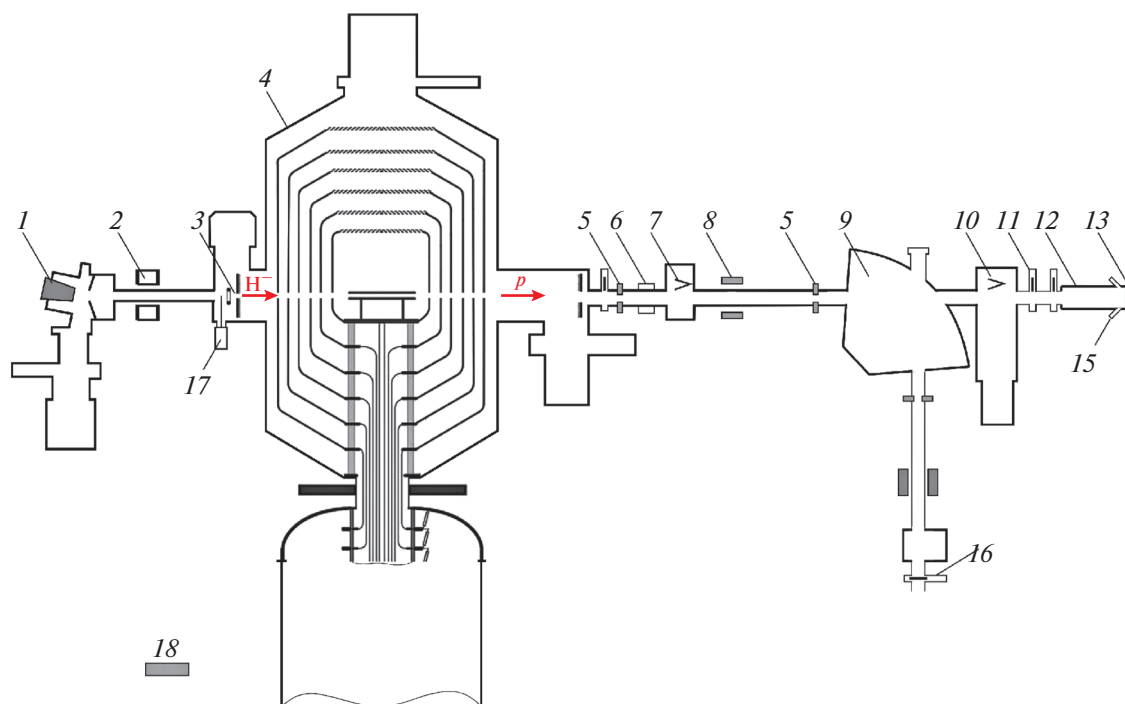
Цель данной работы состоит в том, чтобы на ускорителе-тандале с вакуумной изоляцией получить пучок дейтронов и из литиевой мишени

осуществить генерацию быстрых нейтронов, приемлемых для радиационного тестирования оптических волокон, терапии быстрыми нейтронами и для других приложений.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследование проведено на ускорительном источнике эпитепловых нейтронов в ИЯФ СО РАН [2]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Пучок протонов с энергией 2 МэВ и током до 9 мА получают следующим образом. Из поверхностно-плазменного источника 1 вытягивают пучок отрицательных ионов водорода с энергией 20 кэВ. В магнитном поле источника ионов пучок поворачивают на угол 15°, после чего фокусируют магнитной линзой 2 на вход ускорителя 3 и ускоряют в нем до энергии 1 МэВ. В газовой обдирочной мишени, установленной внутри высоковольтного электрода ускорителя, отрицательные ионы водорода превращаются в протоны, которые тем же потенциалом 1 МВ ускоряют до энергии 2 МэВ. Далее пучок протонов транспортируют до литиевой мишени 13, которую обычно размещают в вертикальной части тракта транспортировки за шибером 16; в данном эксперименте мишень размещена в горизонтальной части за шибером 11.

Мишень представляет собой медный диск диаметром 144 мм и толщиной 8 мм. Со стороны



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. 1 – источник отрицательных ионов водорода; 2 – магнитная линза; 3 – входная охлаждаемая диафрагма ускорителя; 4 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией; 5 – охлаждаемая диафрагма с апертурой 26 мм; 6 – бесконтактный датчик тока; 7 – выдвижной цилиндр Фарадея в диагностическом баке на выходе из ускорителя; 8 – корректор; 9 – поворотный магнит; 10 – выдвижной цилиндр Фарадея в диагностическом баке за поворотным магнитом; 11, 16 – шиберы; 12 – вакуумная камера; 13 – литиевая мишень; 14 – дозиметр нейтронов; 15 – патрубки с окнами для наблюдения; 17 – проволочный сканер; 18 – детектор нейтронов.

протонного пучка на медный диск термическим способом напылен в виде круга диаметром 82 мм тонкий слой лития кристаллической плотности. С обратной стороны медного диска выполнены четыре двузаходных спиралевидных канала для охлаждения водой [10]. К обратной стороне медного диска прижат плоский алюминиевый диск с отверстием в центре для подачи охлаждающей воды и двумя отверстиями по периферии для отвода воды. При характерном расходе воды 15–17 л/мин в каналах охлаждения реализуется турбулентное течение воды со скоростью 3.5–4 м/с, обеспечивающее эффективный теплосъем [11].

Напыление лития на образец проводят на отдельном стенде по сценарию, аналогичному описанному в работе [12]. После напыления лития образец вместе с частью вакуумной камеры 12, закрытой шиберами для поддержания вакуума внутри, отсоединяют от стенда напыления лития, переносят на экспериментальную установку и подсоединяют к тракту транспортировки пучка протонов.

На выходе из ускорителя 4 поперечный размер пучка протонов составляет около 1 см [13]. Ток протонов измеряют и контролируют бесконтактным датчиком тока (6) NPCT (Bergoz Instrum., Франция), положение пучка – термомпарами, вставленными внутрь охлаждаемых диафрагм 5, положение пучка

и его ток – выдвижными цилиндрами Фарадея в диагностических камерах 7 и 10. Положение и размер пучка протонов на поверхности литиевой мишени 13 измеряют и контролируют восемь термомпарами, вставленными в отверстия медного диска мишени, просверленные с его боковой поверхности. In-situ состояние поверхности мишени контролируют видеокамерой Hikvision через один из патрубков 15 со стеклом из плавленого кварца.

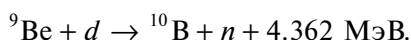
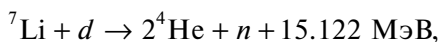
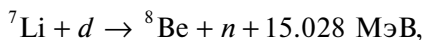
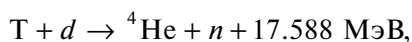
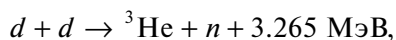
Мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения измеряют блоком детектирования БДМН-100-07 (ООО “Доза”, Россия) [14], состоящим из шарового замедлителя с размещенным в нем узлом детектирования УДМН-100. Блок детектирования 14 закреплен на стене радиационно-защищенного помещения на расстоянии 3.6 м от мишени под углом 34° к направлению пучка протонов. Погрешность измерения мощности дозы составляет 25%; в данных, представленных ниже, она не учтена.

Поток нейтронов контролируют детектором нейтронов 18 с литийсодержащим сцинтиллятором GS20 (The Saint-Gobain Crystals, США), смонтированным на фотоэлектронном умножителе Hamamatsu R6095 с высоковольтным источником питания MHV12-1.5K1300P (TRACO Electronics, Япония). Детектор размещен на расстоянии

7.3 м от мишени под углом  $146^\circ$  к направлению пучка протонов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей необходим пучок нейтронов эпитеплого диапазона энергий с минимальным количеством быстрых и тепловых нейтронов. Наилучшей реакцией для получения такого пучка нейтронов является пороговая реакция  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  из-за максимального выхода и минимальной энергии нейтронов, не превышающей 1 МэВ [15, 16]. Для тестирования на радиационную стойкость, наоборот, нужны нейтроны с энергией более 1 МэВ, получаемые в экзотермических реакциях:



Расчетный выход нейтронов в этих и ряде других реакций из толстых мишеней приведен в работах [4, 17]. Реакция  $\text{Li}(d, n)$  характеризуется наибольшим выходом нейтронов при энергии дейтронов более 0.8 МэВ. Так, при энергии ионов 2 МэВ выход нейтронов в реакции  $\text{Li}(d, n)$  равен  $13.5 \cdot 10^{11} \text{ мКл}^{-1}$ , в то время как в реакции  $\text{Be}(d, n) - 6 \cdot 10^{11} \text{ мКл}^{-1}$ , а в реакции  $\text{Li}(p, n) - 1.1 \cdot 10^{11} \text{ мКл}^{-1}$  [15].

Реакция  $\text{Li}(d, n)$  идет двумя путями:  ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$  и  ${}^7\text{Li}(d, n){}^2\text{He}$ . В первом случае, когда продуктами реакции являются две частицы, энергия нейтронов равна 13.36 МэВ, если пренебречь энергией дейтрона, и больше, если не пренебрегать. Во втором случае, когда образуются три частицы, спектр нейтронов не монохроматический, а более широкий, с меньшей энергией. В работе [18] измерен спектр нейтронов реакции  $\text{Li}(d, n)$  при энергии дейтронов 2.9 МэВ. В нем присутствуют две компоненты: первая – со средней энергией 13 МэВ, обусловленная первым путем генерации нейтронов, и вторая – 3 МэВ, обусловленная вторым путем. Средняя энергия нейтронов равна 5.68 МэВ. При энергии дейтронов 2 МэВ спектр генерируемых нейтронов не будет сильно отличаться, поскольку энергетический выход реакции значительно превышает энергию дейтронов.

Для генерации мощного потока быстрых нейтронов в реакции  $\text{Li}(d, n)$  предложено применить сильноточный ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, изначально не предусматривающий воз-

можность получения пучка дейтронов, и реализовать сценарий с инжекцией в ускоритель пучка отрицательных ионов дейтерия с энергией, в два раза меньшей энергии инжектируемых ионов водорода.

Пучок дейтронов в ускорителе получен следующим образом. В поверхностно-плазменном источнике 1 водород заменен на дейтерий и получен устойчивый разряд. Поскольку дейтерий в два раза тяжелее водорода, то из источника вытягивают пучок отрицательных ионов дейтерия с энергией 10 кэВ, что в два раза меньше, чем обычно при работе с водородом, с тем чтобы в собственном магнитном поле источника пучок ионов повернуть на тот же угол и направить вдоль оси ускорителя. Далее пучок отрицательных ионов дейтерия фокусируют магнитной линзой 2 на вход в ускоритель 3, контролируя положение и размер пучка проволочным сканером OWS-30 (D-Race, Канада) 17 [19]. Фокусное расстояние магнитной линзы пропорционально массе ионов фокусируемого пучка, но меньшая энергия ионов дейтерия позволяет практически тем же током катушек линзы сфокусировать пучок ионов на вход ускорителя. Несколько больший ток в линзу потребовался для компенсации большего действия пространственного заряда на траекторию ионов дейтерия из-за их меньшей скорости (обнаруженный эффект пространственного заряда на фокусировку пучка ионов водорода описан в работе [19]).

Ионно-оптическую систему ускорителя определяют электростатические линзы диафрагм, в наибольшей степени – входной диафрагмы, фокусные расстояния которых не зависят от массы ионов. Вместе с тем точка фокусировки инжектируемых ионов и их скорость значительно определяют дальнейшие траектории ионов. Все эти обстоятельства вместе с неопределенностью степени компенсации пространственного заряда не позволяли на основе расчетов достоверно утверждать о возможности получения пучка дейтронов в ускорителе без его повреждения, в частности без прожигания неохлаждаемых диафрагм ускоряющих электродов. Именно по этой причине основные усилия были сосредоточены на фокусировке ионов дейтерия на вход ускорителя в место, ранее определенное как оптимальное для получения пучка протонов. После выставки пучка и его фокусировки на вход ускорителя, контролируемой проволочным сканером, подают напряжение на ускоритель и получают на его выходе пучок дейтронов с энергией 2 МэВ и током 1.1 мА. Положение и размер пучка ионов контролируют с помощью видеокамер Hikvision, направленных на входную и выходную диафрагмы ускоряющего электрода и регистрирующих видимое излучение, вызванное ионизацией остаточного и обдирочного газа ионами [20]. Прохождение пучка ионов оптимизируют магнитной линзой 2 и корректором 8, добиваясь минимального и симметричного нагрева

охлаждаемых диафрагм 5 в тракте транспортировки пучка дейтронов.

Сначала пучок дейтронов был направлен на цилиндр Фарадея 7, расположенный рядом с выходом из ускорителя. Цилиндр Фарадея выполнен в форме медного охлаждаемого конуса с девятью термопарами для контроля положения пучка ионов и оснащен вводом движения. Детектором 18 и дозиметром 14 была зарегистрирована генерация нейтронов. Затем цилиндр Фарадея 7 был убран с оси, а пучок перенаправлен на такой же цилиндр Фарадея 10, установленный после поворотного магнита 9 (магнит был выключен). Детектором и дозиметром также была зарегистрирована генерация нейтронов. Мощность дозы нейтронов, измеренная дозиметром 14, находящимся на расстоянии 4.4 м от цилиндра Фарадея, составила  $9 \pm 0.3$  мЗв/ч. Затем пучок дейтронов был направлен на литиевую мишень 13. Дозиметр, находящийся на расстоянии 3.6 м от мишени, зашкалил, но имеется косвенное доказательство того, что он должен был показать в 100 раз большую мощность — на уровне 1 Зв/ч. Дело в том, что мощность дозы, измеряемая аналогичным дозиметром на наружной стене радиационно-защищенного зала, увеличилась в  $68 \pm 8$  раз, и еще увеличение в 1.5 раза должно дать более близкое расположение дозиметра — 3.6 м вместо 4.4 м.

После окончания генерации нейтронов измерения активация установки и обнаружена существенная активация цилиндров Фарадея. Спектрометром  $\gamma$ -излучения СЕГ-1КП-ИФТП на основе полупроводникового детектора, выполненного из особо чистого германия, измерен спектр наведенной активности и снята временная зависимость скорости счета выделенной линии. Установлено, что испускаемые  $\gamma$ -кванты имеют энергию 511 кэВ и период полураспада наработанного изотопа равен 10 мин. Такие параметры распада полностью соответствуют параметрам радиоактивного изотопа  $^{13}\text{N}$ , вероятнее всего, образовавшегося в результате реакции  $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$  из-за возможного покрытия поверхности медного конуса тонкой пленкой масла или углерода.

Оценим мощность дозы нейтронов, образовавшихся при взаимодействии дейтронов с энергией 2 МэВ с литием. Расчетный выход нейтронов в реакции  $^7\text{Li}(d, n)$  равен  $1.35 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$  при токе 1 мА [17]. На мишень напыляли слой природного лития, в котором концентрация нуклида  $^7\text{Li}$  составляла 92.5%. В этом случае при получаемом в эксперименте токе 1.1 мА выход нейтронов на природном литии будет равен  $1.4 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ .

Для перевода единичного флюенса нейтронов в AMBIENT эквивалент дозы воспользуемся рекомендациями для передне-заднего облучения, приведенными в работах [21, 22]. Переводной коэффициент равен:  $1 \text{ (мкЗв/ч)/(нейтронов/(см}^2 \cdot \text{с))}$

для нейтронов с энергией 1 МэВ,  $1.8 \text{ (мкЗв/ч)/(нейтронов/(см}^2 \cdot \text{с))}$  — для 10 МэВ и  $1.257 \text{ (мкЗв/ч)/(нейтронов/(см}^2 \cdot \text{с))}$  — для спектра нейтронов из работы [18]. Последнее значение будем использовать ниже при расчете дозы.

Умножив выход нейтронов  $1.4 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$  на переводной коэффициент  $1.257 \text{ (мкЗв/ч)/(нейтронов/(см}^2 \cdot \text{с))}$ , получим яркость источника, равную  $1.75 \cdot 10^6 \text{ (Зв/ч) м}^2$ . Приняв источник излучения точечным, а излучение изотропным, получим мощность дозы на расстоянии 10 см, равную 1.4 кЗв/ч, а на расстоянии 3.6 м, равном расстоянию от мишени до детектора, — 1.07 Зв/ч. Последняя величина хорошо согласуется с измеренной дозиметрами.

Для радиационного тестирования оптических волокон системы лазерной калибровки калориметра требуется набрать флюенс эквивалентных нейтронов до величины  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Для перевода потока нейтронов в поток эквивалентных нейтронов используем коэффициент ионизационных потерь, полученный коллаборацией CERN-RD48 [23]. Этот коэффициент равен 1 для нейтронов энергией 1 МэВ, от 1 до 2 — при энергии выше 1 МэВ, около 1 — в диапазоне энергий от 200 кэВ до 1 МэВ и много меньше 1 — при энергии ниже 200 кэВ. Приняв источник излучения точечным, излучение изотропным, а коэффициент ионизационных потерь равным единице, получим, что на расстоянии 10 см требуемый флюенс  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  будет набран за сутки генерации, что вполне реализуемо.

Другое применение источника нейтронов может быть связано с терапией быстрыми нейтронами. Достигнутый выход нейтронов  $1.4 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$  равен предельно достижимому выходу, получаемому на генераторе НГ-12И, длительное время используемом для терапии пациентов в Уральском центре нейтронной терапии [24], и может быть еще увеличен. В отличие от генератора НГ-12И, здесь не используют мишень с тритием, и потому месторасположение источника нейтронов можно не привязывать к ядерному центру с инфраструктурой производства трития.

Выход нейтронов может быть увеличен: во-первых, на 8% за счет напыления лития, обогащенного изотопом  $^7\text{Li}$ , который имеется в наличии; во-вторых, путем увеличения тока пучка дейтронов почти в 5 раз — до 5 мА. Однако в последнем случае работа с таким током требует проведения мероприятий по уменьшению дозы нейтронного излучения вне радиационно-защищенного зала и по защите оборудования, установленного внутри зала. В-третьих, плотность потока быстрых нейтронов через образец может быть увеличена размещением отражателя, изготовленного из материала с большим массовым числом, а плотность потока

нейтронов на пациента – размещением коллиматора, совмещающего функции защиты и отражателя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью расширения возможных приложений функционирующего в Институте ядерной физики СО РАН источника тепловых нейтронов предложено получить в ускорителе пучок дейтронов. В результате проведенного исследования с применением разнообразного набора диагностических методик реализован режим инжекции в ускоритель пучка отрицательных ионов дейтерия с энергией, в два раза меньшей энергии инжектируемых ионов водорода, и получен стационарный пучок дейтронов с энергией 2 МэВ, током 1.1 мА. При сбросе пучка дейтронов на литиевую мишень осуществлена генерация быстрых нейтронов. Выход нейтронов составил  $1.4 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ . Режим работы с пучком дейтронов привлекателен для радиационного тестирования материалов, терапии быстрыми нейтронами и других приложений.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005) при поддержке Института ядерной физики СО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bayanov B., Belov V., Bender E., Bokhovko M., Dimov G., Kononov V., Kononov O., Kuksanov N., Palchikov V., Pivovarov V., Salimov R., Silvestrov G., Skrinsky A., Taskaev S. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. A413. P. 397. doi 9002(98)00425-2  
<https://doi.org/10.1016/S0168>
2. Taskaev S.Yu. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. № 6. С. 1770.  
<https://doi.org/10.1134/S1063779615060064>
3. Neutron Capture Therapy: Principles and Applications / Eds. W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa. NY., Dordrecht London: Springer, 2012.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-31334-9>
4. Taskaev S.Yu., Kanygin B.V. Бор-нейтронозахватная терапия. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016.
5. Sato E., Zaboronok A., Yamamoto T., Nakai K., Taskaev S., Volkova O., Mechetina L., Taranin A., Kanygin V., Isobe T., Mathis B., Matsumura A. // J. Radiat. Res. 2018. V. 59. P. 101.  
<https://doi.org/10.1093/jrr/rgx071>
6. Taskaev S.Yu. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2019. Т. 50. № 5. С. 657.  
<https://doi.org/10.1134/S1063779619050228>
7. Kuznetsov A.S., Belchenko Yu.I., Burdakov A.V., Davydenko V.I., Donin A.S., Ivanov A.A., Konstantinov S.G., Krivenko A.S., Kudryavtsev A.M., Mekler K.I., Sanin A.L., Sorokin I.N., Sulyaev Yu.S., Taskaev S.Yu., Shirokov V.V., Eidelman Yu.I. // Nucl. Instrum. and Methods. 2009. V. A606. P. 238.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.04.030>
8. Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Klimenko M., Semenov A., Taskaev S., Kasatov D., Shchudlo I., Makarov A., Davydov N. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2019.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2937605>
9. Zhang Z. // Journal of Instrumentation. 2018. V. 13. C04013.  
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/04/C04013>
10. Bayanov B., Belov V., Taskaev S. // J. Phys.: Conf. Series. 2006. V. 41. P. 460.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/41/1/051>
11. Bayanov B., Belov V., Kindyuk V., Oparin E., Taskaev S. // Applied Radiation and Isotopes. 2004. V. 61. P. 817.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.05.032>
12. Баянов Б.Ф., Журов Е.В., Таскаев С.Ю. // ПТЭ. 2008. № 1. С. 160.  
<https://doi.org/10.1134/S002044120801020X>
13. Badrutdinov A., Bykov T., Gromilov S., Higashi Y., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Miyazawa T., Shchudlo I., Sokolova E., Sugawara H., Taskaev S. // Metals. 2017. V. 7. Issue 12. P. 558.  
<https://doi.org/10.3390/met7120558>
14. [http://www.doza.ru/docs/radiation\\_control/udmn\\_100.pdf](http://www.doza.ru/docs/radiation_control/udmn_100.pdf)
15. Lee C.L., Zhou X.-L. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section B. 1999. V. 152. Issue 1. P. 1.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00026-9)
16. Kreiner A. // Neutron Capture Therapy: Principles and Applications. / Eds. W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa. NY., Dordrecht London: Springer, 2012. P. 14.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-31334-9>
17. Kononov V., Bokhovko M., Kononov O. // Proc. Intern. Symp. Boron Neutron Capture Therapy / Ed. S. Taskaev. Novosibirsk, Russia. July 4–7, 2004. P. 62.
18. Mitrofanov K., Piksaikin V., Zolotarev K., Egorov A., Gremyachkinet D. // EPJ Web of Conf. 2017. V. 146. P. 11041.  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201714611041>
19. Бьков Т.А., Касатов Д.А., Колесников Я.А., Кошкарев А.М., Макаров А.Н., Остринов Ю.М., Соколова Е.О., Сорочкин И.Н., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. // ПТЭ. 2018. № 5. С. 90.  
<https://doi.org/10.1134/S003281621805018X>
20. Taskaev S., Kasatov D., Makarov A., Ostreinov Yu., Shchudlo I., Sorokin I., Bykov T., Kolesnikov I., Koshkarev A., Sokolova E. // Proc. of the 9<sup>th</sup> Intern. Particle Accelerator Conf. April 29–May 4, 2018. Vancouver, Canada: MOPML062.  
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-MOP-ML062>
21. ICRP Publication 74. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation // Intern. Commission on Radiol. Protection. 1997.
22. Гусева С.В., Лесовая Е.Н., Тимошенко Г.Н. // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12. № 1 (192). С. 256.  
<https://doi.org/10.1134/S1547477115010124>
23. Lindstrom G. // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. A512. P. 30.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01874-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01874-6)
24. Реализованные проекты ядерной медицины на Южном Урале / Под ред. А.В. Важенниной, Г.Н. Рыкованова. Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2015.