

УДК 539.1.03

ВРАЩАЮЩАЯСЯ ВОДООХЛАЖДАЕМАЯ БЕРИЛЛИЕВАЯ МИШЕНЬ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

© 2023 г. П. В. Швеца^{а, *}, П. А. Прокопович^а, Е. И. Фатьянов^а, Е. С. Клементьев^а,
А. Р. Мороз^б, Н. А. Коваленко^{б, с}, А. Ю. Гойхман^а

^а Научно-образовательный центр “Функциональные наноматериалы”,
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, 236041 Россия

^б НИЦ Курчатовский институт — Санкт-Петербургский институт ядерной физики,
Гатчина, 188300 Россия

^с НИЦ Курчатовский институт, Москва, 123182 Россия

*e-mail: pshvets@kantiana.ru

Поступила в редакцию 28.12.2022 г.

После доработки 17.02.2023 г.

Принята к публикации 17.02.2023 г.

При сокращающемся числе нейтронных источников в мире и выводе из эксплуатации исследовательских реакторов все большее внимание привлекают проекты по разработке компактных источников нейтронов. Проект DARIA предполагает использование пучка протонов, ускоренного до энергии 13 МэВ, который, попадая в бериллиевую мишень, создает пучок нейтронов посредством ядерной реакции (p, n). Выход реакции составляет три нейтрона на 1000 протонов, поэтому в этом процессе большая часть энергии протонного пучка выделяется в виде тепла в мишени. Интенсивный нагрев бериллиевой мишени в отсутствие достаточного теплоотвода может привести к ее разрушению. Разработана система для эффективного отвода тепла от бериллиевой мишени в процессе ее облучения протонным пучком. Она представляет собой вращающуюся бериллиевую мишень с водяным охлаждением и способна отводить большую тепловую мощность с внутренней (обращенной к воде) поверхности мишени. Для предложенной системы были проведены численные расчеты скорости и давления охлаждающей жидкости. Были рассчитаны предельное давление, приводящее к разрушению мишени, и потоки, соответствующие этому предельному давлению. Термодинамические расчеты позволили оценить, как среднюю температуру системы, так и пиковые локальные температуры из-за нагрева короткими высокоэнергетическими импульсами.

Ключевые слова: компактный источник нейтронов, DARIA, мишенная сборка, численное моделирование, термодинамические расчеты, бериллий, водоохлаждаемая вращающаяся мишень.

DOI: 10.31857/S1028096023070178, EDN: TDHCZT

ВВЕДЕНИЕ

Рождение нейтронной физики как физики элементарных частиц, изучающей свойства нейтрона и атомных ядер, произошло сразу же после открытия нейтрона в 1932 г. [1]. С середины 60-х гг. начали создавать ядерные реакторы, ориентированные непосредственно на эксперименты с пучками нейтронов [2], а в 70-х гг. началось производство нейтронов на больших мощных ускорителях протонов [3]. Высокая плотность мощности генерируемых этими способами пучков избыточна для многих исследовательских приложений, поэтому для производства нейтронов начали использовать процессы на основе ускорителей электронов, ионных пучков, циклотронов и линейных ускорителей низкой энергии. Такие компактные источники нейтронов могут быть предпочтительны по следующим причинам: отсутствие или

незначительный радиолиз, или повреждение, уменьшение экранирования и фона, пониженные уровни активации, пониженные требования к охлаждению, гибкость, доступность и простота обслуживания [4].

Мишени для производства нейтронов и реакции, лежащие в основе их работы, являются ключевыми компонентами системы компактного источника нейтронов. Одно из простейших решений — твердая мишень из лития или бериллия, в которой генерация нейтронов происходит путем реакции (p, n) [5–8]. Одна из проблем таких сборок заключается в том, что скопление водорода внутри толстых мишеней быстро (в течение часов) приводит к их механическим деформациям и поломке. Для решения этой проблемы можно использовать тонкий слой генерирующего нейтроны металла, который замедляет протонный пучок

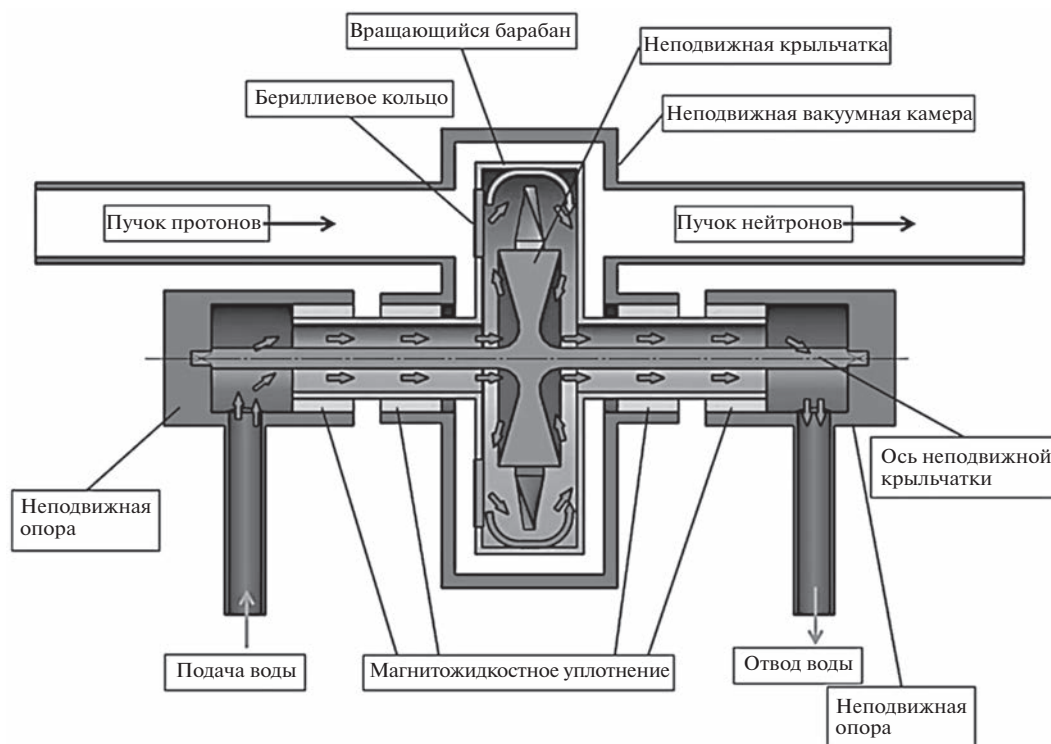


Рис. 1. Концепт мишенной сборки с водяным охлаждением. Продольный разрез.

до ~ 2 МэВ, и протоны будут накапливаться в следующих слоях с большой диффузией водорода: ванадия [6], палладия [9, 10] или вольфрама [11]. Другим подходом для получения нейтронов являются устройства, использующие реакции синтеза DD (дейтерий–дейтерий) и DT (дейтерий–триций). В этих устройствах мишенные сборки могут состоять из материалов с имплантированными атомами D или T, или быть целиком газовыми [12]. Пучки большой мощности, используемые в генераторах нейтронов, обладают большой плотностью энергии, быстро нагревают мишень и приводят к ее разрушению. Для уменьшения тепловой нагрузки можно применять вращающуюся мишень [13] или мишень из материала в жидком состоянии, обычно лития [14–16], однако изготовление таких узлов весьма нетривиально.

Несмотря на активное развитие компактных источников, на сегодняшний день не существует единого решения по поводу конструкции мишенной сборки. Одной из наиболее перспективных конструкций представляется система с вращающейся в воде мишенью во внешнем кожухе, расположенной в вакуумной камере. Именно такой концепт описан в настоящей работе, и проведены термодинамические расчеты для разрабатываемого устройства.

ОПИСАНИЕ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УСТРОЙСТВА

Принципиальная техническая схема

Для решения проблемы снятия и отвода тепла с поверхности бериллиевой мишени был разработан концепт мишенной сборки с водяным охлаждением задней поверхности мишени (рис. 1). В вакуумную камеру по трубам с одной стороны вводится пучок протонов, с другой стороны выводится пучок генерируемых нейтронов. Вакуумная камера имеет форму полого цилиндра, в центрах обеих торцевых поверхностей которого симметрично установлены магнитоэлектрические уплотнения [17] труб вращающегося барабана, изготовленного из алюминия. Эти уплотнения были выбраны, поскольку они обладают простотой конструкции, нулевой утечкой в широком диапазоне скоростей вращения, низким коэффициентом трения, низким износом и не требуют частого обслуживания [18, 19]. Магнитоэлектрические соединения обеспечивают вакуумную герметичность соединения стенок вакуумной камеры и труб барабана и позволяют барабану свободно вращаться вокруг своей оси.

В торцевой поверхности барабана, обращенной к пучку протонов, сделаны радиально расположенные сквозные проемы. В проемах установлены одинаковые сегменты, выполненные из бериллия, которые вместе образуют составное кольцо, являющееся мишенью для бомбардиров-

ки пучком протонов. Диаметр протонного пучка около 50 мм, поэтому и габаритный размер сегментов бериллиевой мишени должен быть не менее 50 мм. Их толщина составляет около 1.1 мм. Сегменты бериллиевой мишени соединяют с торцевой поверхностью цилиндра с помощью вакуумно-плотной сварки.

Внутри вращающегося барабана расположена неподвижная крыльчатка, жестко установленная на оси. Крыльчатка состоит из центральной части, неподвижно соединенной с осью, и лопастей, установленных на центральной части. Центральная часть крыльчатки сплошная и имеет особый пологий профиль, способствующий перенаправлению струи воды, выходящей из трубы полого барабана, на обращенную внутрь него поверхность бериллиевого сегмента.

Каждый конец оси неподвижной крыльчатки жестко заделан в стенку корпуса одной из двух неподвижных опор. Неподвижная опора представляет собой полую деталь, снабженную трубкой подачи/отвода воды. В неподвижной опоре смонтировано магнитожидкостное уплотнение, герметически соединяющее полость неподвижной опоры с полостью трубы вращающегося барабана.

Принцип работы системы

Вакуумная камера, опоры и крыльчатка на оси остаются неподвижными. Внешний привод (электромотор) через ремень и шкив сообщает непрерывное вращательное движение барабану, в результате бериллиевые сегменты по очереди, сменяя друг друга, подвергаются воздействию протонного пучка.

Через вращающийся барабан внешний насос непрерывно интенсивно прокачивает воду или иной жидкий хладагент. Во время работы системы барабан целиком заполнен текущей водой. Она подается через одну из неподвижных опор, протекает по трубе вращающегося барабана, попадает в его внутренний объем. На выходе из трубы струи воды перенаправляются криволинейной поверхностью центральной части крыльчатки таким образом, что под скользящим углом омывают непосредственно бериллиевый сегмент, способствуя его охлаждению. Втекающий в барабан объем воды увлекается им в направлении вращения. Лопасти неподвижной крыльчатки способствуют интенсивному перемешиванию объема воды.

Функция лопастей неподвижной крыльчатки — препятствование вращению объема воды вместе с барабаном и эффективное направление потоков воды на заднюю поверхность бериллиевого сегмента. Обычно вращающиеся крыльчатки применяют в неподвижном корпусе. Здесь же крыльчатка неподвижна во вращающемся корпусе (барабане). Нагретая в результате взаимодействия с

бериллием вода отводится по второй трубе барабана через вторую неподвижную опору.

В результате взаимодействия пучка протонов некоторой интенсивности с неподвижной бериллиевой мишенью может выделяться больше тепла, чем способна унести вода или любой другой известный хладагент. Вращение барабана с некоторой скоростью позволяет избежать перегрева и, как следствие, разрушения бериллиевых сегментов, подвергая их воздействию протонного пучка ограниченное время. Увеличивая диаметр барабана (точнее, число бериллиевых сегментов) составного бериллиевого кольца, при постоянной интенсивности пучка протонов можно добиться поддержания приемлемой температуры каждого из бериллиевых сегментов, поскольку с увеличением числа бериллиевых сегментов-мишеней время остывания каждого отдельно взятого сегмента будет увеличиваться, до того, как сегмент снова пересечет протонный пучок.

Охлаждение бериллиевых сегментов осуществляет протекающая вода, а меру нагрева бериллия в результате воздействия протонного пучка можно регулировать, изменяя скорость вращения барабана и число бериллиевых сегментов. Время экспозиции бериллиевого сегмента под пучком протонов равно длительности импульса ускорителя.

Конструкция узла бериллиевой мишени

На рис. 2 показан общий вид узла бериллиевой мишени компактного нейтронного источника. Система включает в себя следующие элементы: неподвижную вакуумную камеру, вращающийся барабан, бериллиевые сегменты, расположенные радиально, неподвижную крыльчатку на оси, две неподвижные опоры. Материалы основных деталей: барабан и крыльчатка — АМгЗ-5, ступица и вакуумная камера — АІSІ304 (08Х18Н10).

Барабан (рис. 3) представляет собой цилиндр, ось которого расположена горизонтально, параллельно протонному пучку. Барабан заполнен непрерывно протекающей через него водой для прямого охлаждения бериллия со стороны, обращенной внутрь барабана. Основными частями барабана являются корпус и крышка. Крышку устанавливают на корпус при помощи болтов и кольцевого резинового уплотнения, представляющего собой круглое в сечении кольцо, изготовленное из вакуумно-совместимой фторсиликоновой резины. В крышке сделаны проемы, в которые установлены 10 неразъемных бериллиевых сегментов в оправе из нержавеющей стали. Оправы соединяют с крышкой при помощи вакуумно-плотной аргонно-дуговой сварки. На крышке вокруг проемов расположен бурт, оплавленный в процессе сварки оправ с ответным буртом крышки. Бурт имеет высоту около 5 мм. Существует

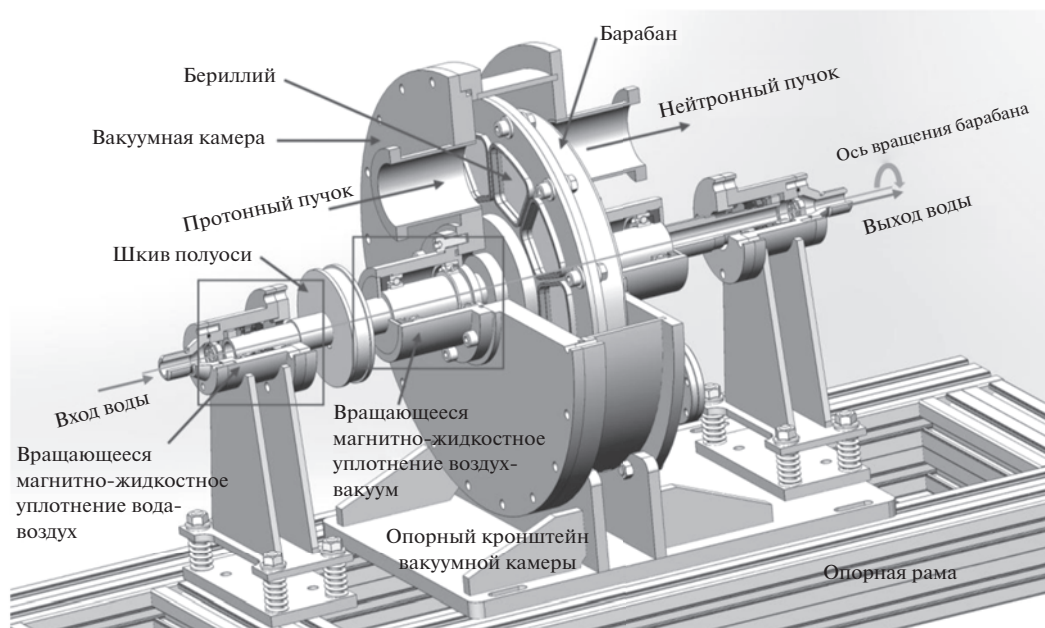


Рис. 2. Конструкция узла бериллиевой мишени компактного нейтронного источника, общий вид, сечение.

возможность замены вышедших из строя бериллиевых сегментов. Наличие бурта позволяет при необходимости осуществлять замену бериллиевых сегментов в оправе в случае его повреждения в ходе экспериментов путем срезания сварочного шва и вваривания нового сегмента. Количество возможных замен – три–пять. Для дальнейшей эксплуатации системы требуется замена крышки.

На крышке и корпусе барабана неподвижно установлены ступицы, в которых также неподвижно установлены полуоси. Герметичного соединения ступиц с крышкой и корпусом барабана достигают при помощи болтов и кольцевых резиновых уплотнений. Полуоси представляют собой полые трубы, по которым непрерывно протекает

вода, изливаясь в полость барабана (рис. 3). Полуоси установлены на подшипниковых опорах и вместе с барабаном способны вращаться вокруг своей оси.

Для изготовления бериллиевых сегментов используют бериллий марки ТГП (технический горячепрессованный). Бериллиевый сегмент имеет форму равнобедренной трапеции с закруглениями по углам. Его размеры таковы, что позволяют вписать в габарит окружность диаметром 50 мм. Таким образом, можно использовать протонный пучок до 50 мм в диаметре. Бериллиевый сегмент имеет толщину 1.1 мм с допуском ± 0.05 мм. Конструктивно бериллиевый сегмент в оправе представляет собой пластину, герметично впаянную в оправу из нержавеющей стали. Для осуществления вакуумно-плотного неразъемного соединения бериллия и нержавеющей стали использован припой ПСР-70 на основе серебра.

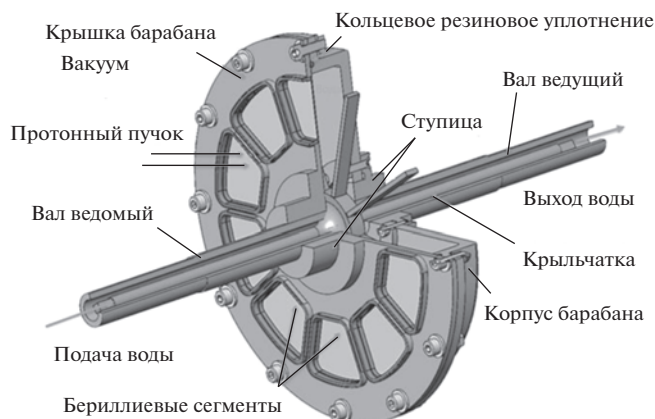


Рис. 3. Конструкция барабана.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для обоснования работоспособности разрабатываемой конструкции был проведен ряд численных расчетов. Все расчеты проводили методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics (версия 6.0). В ходе моделирования решали четыре отдельные задачи: расчет потоков воды внутри барабана, расчет равновесных температур при работе системы, расчет пиковых температур, прочностной расчет. Во всех случаях использовали сетки, созданные по умолчанию, с размером элементов Extra fine.

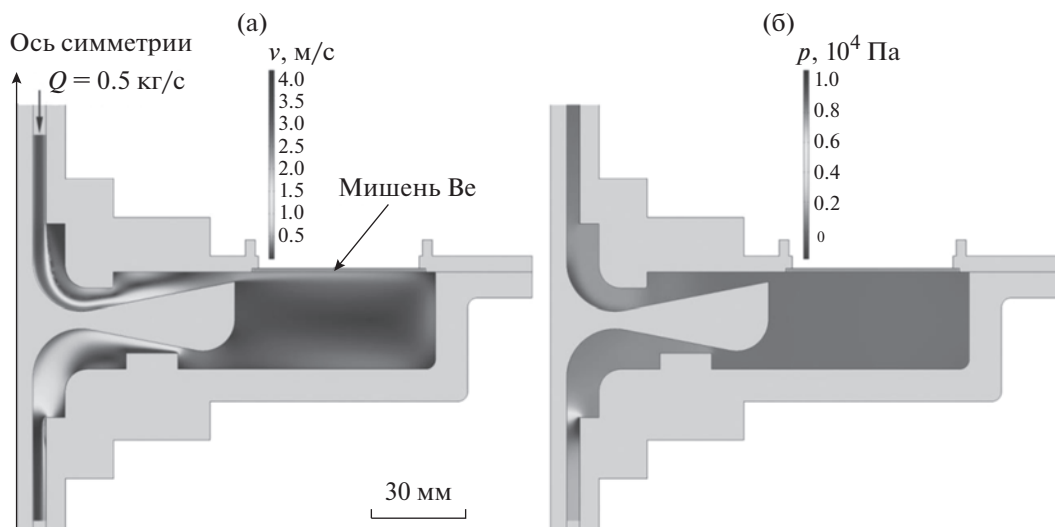


Рис. 4. Распределение скорости потока воды (а) и давления (б) в барабане.

Расчет потоков воды

Для эффективного охлаждения мишени требуется достаточно большой поток воды, поэтому движение жидкости становится турбулентным. Турбулентность описывали с помощью модели Realizable $k-\epsilon$. Конструкция мишени была незначительно упрощена, чтобы добиться осевой симметрии системы и тем самым существенно снизить сложность расчетов. В качестве единственного граничного условия использовали входящий поток воды Q , задаваемый в единицах расхода (кг/с). Для сходимости расчетов потребовалось провести несколько итераций с постепенно увеличивающимся значением Q . На рис. 4а приведено распределение скорости потока воды для $Q = 0.5$ кг/с (такой поток типичен для современных небольших чиллеров). Максимальная скорость течения составляет около 4 м/с при характерном сечении потока 5 мм, что позволяет оценить число Рейнольдса как $Re \approx 20000$, что существенно больше критического значения перехода к турбулентному режиму. Распределение давления воды в системе приведено на рис. 4б, и разница давлений на выходе и около бериллиевой мишени составляет 8.6 кПа.

Прочностной расчет конструкции бериллиевого сегмента

Для прочностного расчета конструкции бериллиевого сегмента, впаянного в стальную оправу, использовали модуль Solid mechanics. К бериллию прикладывали равномерную нагрузку p . Стальную оправу считали неподвижной. Нагрузку p увеличивали до тех пор, пока максимальное напряжение по Мизесу (σ) в конструкции не превысило предел прочности бериллия марки ТГП

(350 МПа). Было обнаружено, что этого можно достичь при критической нагрузке $p_{кр} = 0.42$ МПа (рис. 5а). Таким образом, при достижении $p_{кр}$ происходит механическое разрушение бериллия. Наибольшие напряжения концентрируются у краев бериллиевого сегмента, в местах соединения бериллия с оправой, выполненной из нержавеющей стали. Скругленные углы концентраторами напряжений не являются.

Проведенный расчет позволяет ответить на вопрос о предельно допустимом давлении охлаждающей воды внутри барабана, которое способен выдержать бериллиевый сегмент без разрушения. Давление, соответствующее $Q = 0.5$ кг/с, составляет 8.6 кПа, что приводит к нагрузке на мишень 0.11 МПа (к 8.6 кПа нужно добавить 1 атм. за счет вакуумизации системы) и к разрушению системы не приведет.

На рис. 5б приведено распределение деформаций (d), соответствующее полученному $p_{кр}$. Мак-

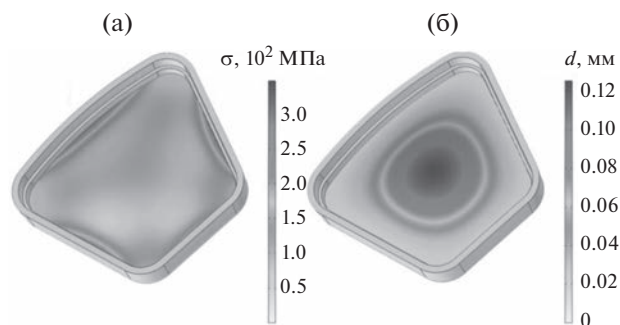


Рис. 5. Распределение напряжений по Мизесу (а) и деформаций (б) в бериллиевой мишени при приложении к ней давления $p_{кр} = 0.42$ МПа.

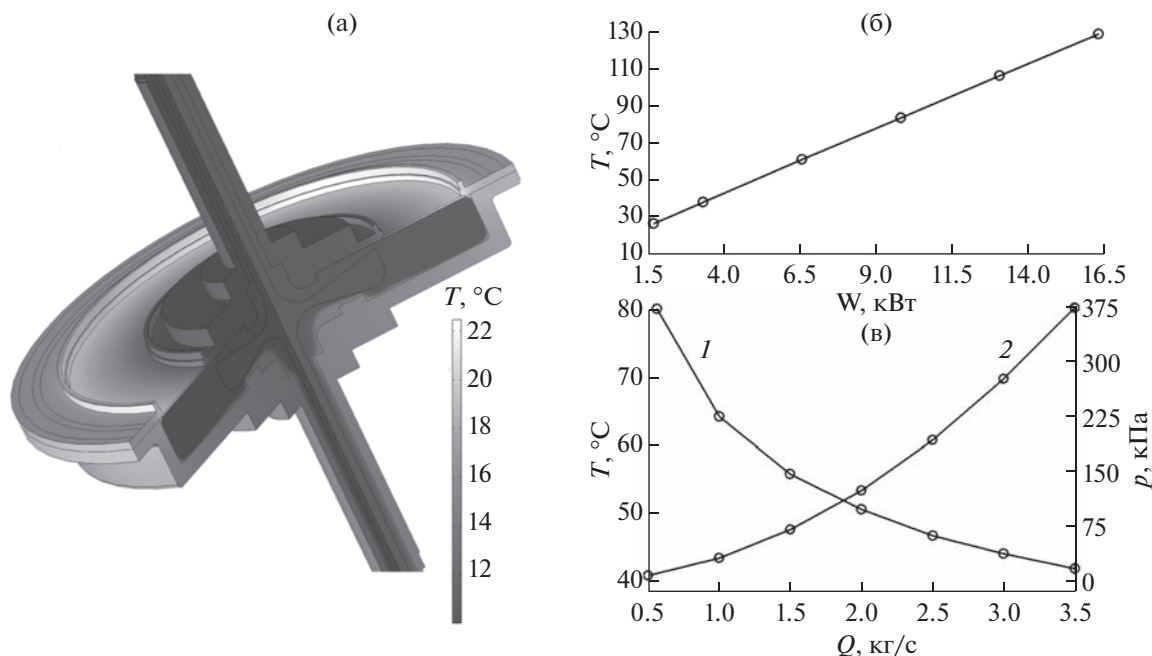


Рис. 6. Распределение температур в мишенной сборке при подводимой мощности $W = 1.625$ кВт и протоке воды $Q = 0.5$ кг/с (а). Зависимость максимальной температуры системы от W при $Q = 0.5$ кг/с (б). Зависимость максимальной температуры системы (1) и давления (2) около мишени от Q при $W = 9.75$ кВт (в).

симальный прогиб бериллиевого сегмента расположен на пересечении диагоналей трапеции и составляет 0.12 мм при давлении 0.42 МПа.

Расчет равновесных температур

Для тепловых расчетов конструкции использовали модуль Heat transfer in solids. Разрабатываемая мишенная сборка будет работать на компактном источнике нейтронов DARIA [20], поэтому для расчета тепловой нагрузки были взяты типичные значения параметров, на которых работает соответствующий ускоритель протонов: энергия пучка 13.4 МэВ, ток пучка 100 мА, длительность импульса 10 мкс, частота повторения импульсов 125 Гц. При таких параметрах в систему будет поступать 1.625 кВт тепла.

Для расчетов использовали ту же осесимметричную геометрию, что и для потоков воды. Температуру воды на входе считали равной 10 °C. Вся тепловая нагрузка равномерно распределялась по бериллиевой мишени. Скорости потока воды для конвективного теплопереноса брали из ранее найденного решения. Распределение температур, полученных в этих условиях, показано на рис. 6а. Максимальная температура в системе составляет 22.4 °C. Длительность и частота импульсов протонного ускорителя могут варьироваться, и, соответственно, будет меняться подаваемая на мишень мощность. Были проведены расчеты с различными мощностями и показано, что зависимость максимальной температуры от мощности описывается линейным законом (рис. 6б).

Кроме того, были проведены расчеты с различным потоком воды через систему. Рассчитывали максимальные равновесные температуры при входящей мощности 9.75 кВт, а также разницу давлений на выходе и около бериллиевой мишени (рис. 6в). При увеличении Q равновесная температура снижается, но существенно растет давление в системе. Уже при $Q = 3$ кг/с давление достигнет 0.38 МПа (с учетом дополнительного усилия 1 атм за счет вакуумизации), что вплотную подходит к пределу для разрушения бериллия.

Расчет пиковых температур

За время одного короткого импульса в систему поступает значительное количество тепла, что может привести к сильному кратковременному перегреву. Для оценки этого эффекта был рассмотрен небольшой участок системы около бериллиевого сегмента (рис. 7а). Зависимость тепловыделения от координаты рассчитывали аналогично [20] (рис. 7б). Процессы теплопередачи происходят значительно медленнее, чем длится импульс, поэтому распределение температуры по глубине (рис. 7в) в целом повторяет форму кривой на рис. 7б. Максимальная температура достижения в районе пика Брэгга для протонов, который соответствует расстоянию 0.17 мм от бериллия, и для импульса длительностью 100 мкс она составляет 38.8 °C (+18.8 °C относительно равновесной, которую считали равной 20 °C). При увеличении длительности импульса пропорционально увеличится разрыв между пиковой и равновес-

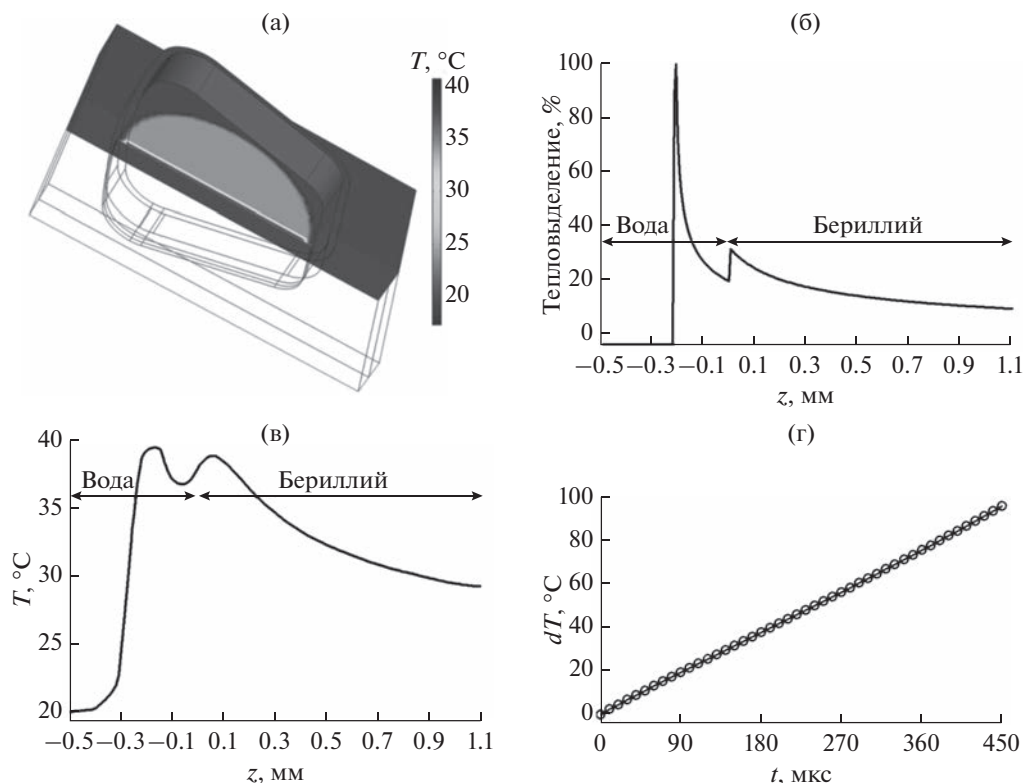


Рис. 7. Распределение температуры системы после облучения импульсом длительностью 100 мкс (а). Зависимость тепловыделения в мишени от глубины (б). Распределение температуры вдоль оси, проходящей через центр мишени, после импульса длительностью 100 мкс (в). Максимальное отклонение температуры системы от равновесной в зависимости от длительности импульса (г).

ной температурами (рис. 7г). Температура воды для нормальной работы не должна превышать 100°C, поэтому использование в разрабатываемой мишенной сборке длительности импульса более 400 мкс будет невозможно ни при каких потоках и частотах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с закрытием устаревших источников нейтронов на исследовательских реакторах, техническими ограничениями их мощности и высокой стоимостью мегаваттных источников расщепления в последние годы возрастает интерес к компактным источникам нейтронов.

Одной из наиболее сложных проблем в деле создания компактных источников нейтронов представляется задача разработки надежного узла мишени, который будет способен к генерации (при необходимости) достаточно мощного и высокоэнергетического пучка нейтронов продолжительное время, без разрушения вследствие перегрева ионным пучком или блистеринга. В работе предложен концепт высокоэффективного жидкостного охлаждения вращающейся бериллиевой мишени как наиболее перспективного типа конструкции. Произведенные термодинамические расчеты показывают, что такая конструкция мо-

жет эффективно работать в широком диапазоне параметров протонного пучка ускорителя.

В случае успешных испытаний образцов разрабатываемых изделий будет решена проблема перегрева и разрушения мишенных сборок, используемых в составе компактных нейтронных источников, снижено влияние блистеринга на структуру бериллиевой мишени, что позволит увеличить время ее работы. Это сократит время обслуживания компактных нейтронных источников и увеличит время работы между сеансами обслуживания. Успешное решение задачи приведет к более широкому использованию компактных нейтронных источников и росту числа проводимых на них исследований.

В будущем, когда технические трудности будут преодолены и надежные и эффективные компактные источники нейтронов будут созданы, к использованию такого чрезвычайно мощного инструмента, как нейтронные пучки, получит доступ широкий круг исследователей, что приведет к росту числа работ и прогрессу в соответствующих областях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской

Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Amaldi E.* // Phys. Rep. 1984. V. 111. № 1–4. P. 1. [https://www.doi.org/10.1016/0370-573\(84\)90214-X](https://www.doi.org/10.1016/0370-573(84)90214-X)
2. *Аксенов В.Л.* // Природа. 1996. № 2. С. 3.
3. *Vetter J.E.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1981. V. 28. № 3. P. 3455. <https://www.doi.org/10.1109/TNS.1981.4332134>
4. *Carpenter J.M.* // EPJ Web Conf. 2020. V. 231. P. 01001. <https://www.doi.org/10.1051/epjconf/202023101001>
5. *Jeon B., Kim J., Lee E., Moon M., Cho S., Cho G.* // Nucl. Engin. Technol. 2020. V. 52. № 3. P. 633. <https://www.doi.org/10.1016/j.net.2019.08.019>
6. *Yamagata Y., Hirota K., Ju J., Wang S., Morita S., Kato J., Otake Y., Taketani A., Seki Y., Yamada M., Ota H., Bautista U., Jia Q.* // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2015. V. 305. P. 787. <https://www.doi.org/10.1007/s10967-015-4059-8>
7. *Inada T., Kawachi K., Hiramoto T.* // J. Nucl. Sci. Technol. 1968. V. 5. № 1. P. 22. <https://www.doi.org/10.1080/18811248.1968.9732391>
8. Патент № 2640396 С2 (РФ). Мишень для генерации нейтронов / Кэнсэр Интеллидженс КЭА Системс, ИНК. Сиода Сигео, Накамура Масару // 2018.
9. Патент № 2610301 С1 (РФ). Нейтроногенерирующая мишень / Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН). Таскаев С.Ю., Баянов Б.Ф. // 2017.
10. *Willis C., Lenz J., Swenson D.* // Proc. LINAC08. 2009. P. 223.
11. *Bayanov B., Belov V., Taskaev S.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2006. V. 41. P. 460. <https://www.doi.org/10.1088/1742-6596/41/1/051>
12. Neutron Generators for Analytical Purposes. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012. P. 145.
13. *Sordo F., Fernandez-Alonso F., Terrón S., Magán M., Ghiglini A., Martinez F., Bermejo F.J., Perlado J.M.* // Phys. Proced. 2014. V. 60. P. 125. <https://www.doi.org/10.1016/j.phpro.2014.11.019>
14. *Paul M., Tessler M., Friedman M., Halfon S., Palchan T., Weissman L., Arenshtam A., Berkovits D., Eisen Y., Eli-ahu I., Feinberg G., Kijel D., Kreisel A., Mardor I., Shimel G., Shor A., Silverman I.* // Eur. Phys. J. A. 2019. V. 55. P. 44. <https://www.doi.org/10.1140/epja/i2019-12723-5>
15. *Reed C.B., Nolen J.A., Specht J.R., Novick V.J., Plotkin P.* // Nucl. Phys. A. 2004. V. 746. P. 161. <https://www.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.09.127>
16. *Nakamura H., Agostini P., Ara K. et al.* // Fusion Engin. Design. 2008. V. 83. № 7–9. P. 1007. <https://www.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.06.014>
17. *Sekine K., Mitamura Y., Murabayashi S., Nishimura I., Yozu R., Kim D.-W.* // Artificial Organs. 2003. V. 27. № 10. P. 892. <https://www.doi.org/10.1046/j.1525-1594.2003.00035.x>
18. *Szydlo Z., Ochoński W., Zachara B.* // Tribotest. 2005. V. 11. № 4. P. 345. <https://www.doi.org/10.1002/tt.3020110406>
19. *Nakatsuka K.* // J. Magn. Magn. Mater. 1993. V. 122. № 1–3. P. 387. [https://www.doi.org/10.1016/0304-8853\(93\)91116-O](https://www.doi.org/10.1016/0304-8853(93)91116-O)
20. *Subbotina V.V., Pavlov K.A., Kovalenko N.A., Konik P.I., Voronin V.V., Grigoriev S.V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2021. V. 1008. P. 165462. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2021.165462>

Rotating Water-Cooled Beryllium Target for a Compact Neutron Source

P. V. Shvets^{1, *}, P. A. Prokopovich¹, E. I. Fatyanov¹, E. S. Clementyev¹, A. R. Moroz²,
N. A. Kovalenko^{2, 3}, A. Yu. Goihman¹

¹Research and Educational Center “Functional Nanomaterials”, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041 Russia

²NRC “Kurchatov Institute” – PNPI, Gatchina, 188300 Russia

³NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: pshvets@kantiana.ru

With the declining number of neutron sources in the world and the decommissioning of research reactors, projects to develop compact neutron sources are attracting more and more attention. The DARIA project suggests the use of a proton beam accelerated to an energy of 13 MeV, which, hitting a beryllium target, creates a neutron beam through the nuclear reaction (p, n). The reaction yield is three neutrons per 1000 protons, so in this process most of the proton beam energy is released as heat in the target. Intense heating of a beryllium target in the absence of sufficient heat removal can lead to its destruction. A system has been developed for efficient heat removal from a beryllium target during its irradiation with a proton beam. It is a rotating water-cooled beryllium target and is capable of removing a large thermal power from the inner (water-side) surface of the target. For the proposed system, numerical simulations of the speed and pressure of the coolant were carried out. The limiting pressure leading to the destruction of the target and the flows corresponding to this limiting pressure were calculated. Thermodynamical simulations allowed us to evaluate both the average temperature of the system and the peak local (caused by short high-energy pulses) temperatures.

Keywords: compact neutron source, DARIA, target assembly, numerical simulation, thermodynamical simulations, beryllium, water-cooled rotating target.