

Вращающаяся углеродная мишень для высокоинтенсивного источника нейтронов

М.С. Авилов, А.В. Антошин, К.В. Губин, Н.Х. Кот, Н.Н. Лебедев, П.В. Логачев, П.В. Мартышкин,
С.Н. Морозов, И.Л. Пивоваров, А.А. Старостенко, С.В. Шиянков
Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

Представлен проект высокоинтенсивного источника нейтронов со средней производительностью до 10^{14} нейтронов в секунду. Источник представляет собой вращающуюся углеродную мишень, облучаемую пучком дейтронов с энергией 20 МэВ, средней мощностью до 100 кВт, средним током 5 мА и поперечным размером 1 см. Мишень охлаждается излучением. Проведенные испытания показали, что предложенные материалы способны работать при тепловых и механических режимах мишени долгое время (несколько тысяч часов).

Введение

Для проведения экспериментов с пучками радиоактивных нуклидов необходим высокоинтенсивный (до 10^{14} частиц в секунду) источник быстрых нейтронов с малым поперечным размером пучка (порядка 1 см). Такие источники могут базироваться на мишенях из легких материалов (Li, Be, C), облучаемых пучками протонов или дейтронов. Большая мощность пучка (100 кВт) накладывает существенные ограничения на выбор как материала, так и конструкции мишени. Во-первых, для увеличения эффективной площади мишени, принимающей и рассеивающей энергию пучка, необходима конструкция с движущейся рабочей зоной. Во-вторых, конструкция, в которой рабочая зона охлаждается излучением, делает мишень более надежной и безопасной, существенно упрощая и удешевляя ее.

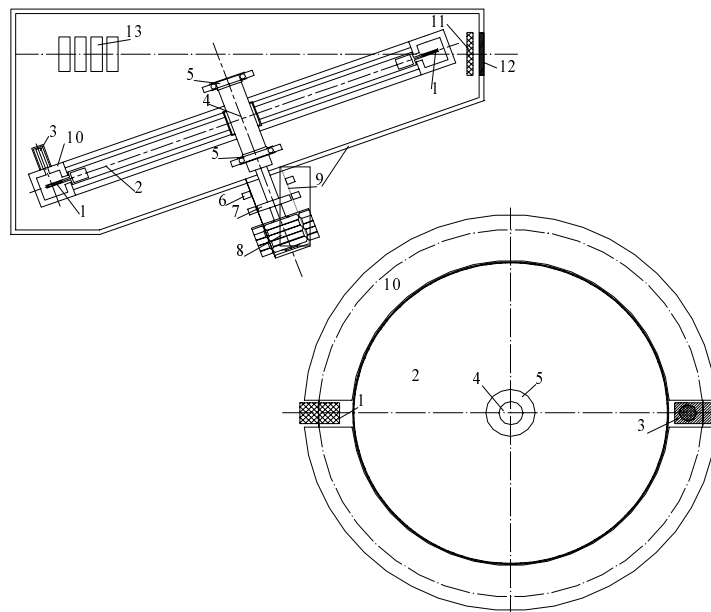


Рис. 1. Конструкция нейтронной мишени. 1 – графитовые пластины, 2 – титановый диск, 3 – болометр, 4 – вал, 5 – подшипники, 6 – вибродатчики, 7 – магнитный датчик вращения, 8 – ввод вращения, 9 – стенки вакуумной камеры, 10 – канал охлаждения, 11 – емкостной датчик, 12 – окно выхода нейтронного пучка, 13 – коллиматор.

При энергии дейтронов 10–20 МэВ основным каналом получения нейтронов является реакция "срыва". Спектр и угловое распределение нейтронов "срыва" можно оценить по схеме, предложенной Р. Сербером [1]. Результаты таких расчетов с учетом торможения дейтронов [2, 3] в толстой графитовой мишени полного поглощения хорошо согласуются с экспериментальными данными при различных энергиях дейтронов [4]. Из них следует, что при облучении толстой графитовой мишени пучком D^+ с энергией 20 МэВ и

средним током 5 мА возможно получение до 10^{14} нейтронов в секунду в направлении потока дейтронов с углом конуса направленности 40° – 50° . Максимум энергетического спектра находится в районе 6-7 МэВ, его ширина на полувысоте около 10 МэВ.

Конструкция мишени

Предлагаемая конструкция нейтронной мишени представляет собой (рис. 1) обод, набранный из графитовых пластин шириной 3 см и толщиной 2 мм, закрепленных на титановом диске диаметром 60 см и толщиной 1 см. Диск закреплен на валу диаметром 5 см и вращается с частотой 50 Гц. Поверхность рабочей зоны наклонена относительно направления пучка дейтронов под углом 20° . Ввод вращения в вакуумный объем осуществляется с помощью магнитной муфты. Прием излучения и отвод тепла производится водой, протекающей через жестко прикрепленные к вакуумной камере каналы теплосъема из алюминия – 2 полукольца, в разрывах которых расположены рабочая (пучок) и диагностическая (болометр) зоны. Перед мишенью расположен коллиматор, служащий одновременно для контроля положения пучка дейтронов. За рабочей зоной находится окно для выхода нейтронов, перед которым расположена графитовая пластина, служащая датчиком повреждения графита. Для контроля и защиты предусмотрены датчики вращения и вибрации мишени, а также расходомеры и манометры в гидросистеме.

Габариты и угол наклона мишени обусловлены максимально допустимой температурой рабочей зоны, которая не должна превышать 1900 – 2000°C . Минимальная скорость вращения определяется скачком температуры при прохождении пучком рабочей зоны. Такой скачок не должен превышать 15 – 20°C .

Тепловые и механические режимы работы мишени

Для определения теплового режима работы мишени с большим энерговыделением и оценки термомеханических нагрузок в ее наиболее напряженных элементах было проведено численное моделирование, при котором решалось нестационарное уравнение теплопроводности с учетом излучения тепла с поверхности мишени. Источниками тепла являлись поглощающие пучок элементы мишени. Важно отметить, что решение нестационарной задачи в данном случае нужно не только для нахождения стационарного решения, но и для определения тепловых и механических нагрузок, возникающих в элементах мишени в процессе её разогрева. Это связано с тем, что именно в процессе разогрева термомеханические напряжения достигают своего максимума.

Расчеты полей температуры в графитовой части мишени и в титановом диске проводились при согласовании потока тепла, передаваемого из графита в титан с учетом измеренной тепловой изоляции узла крепления графита. На рис. 2 приведены результаты расчета для одной из геометрий мишени с использованием графита марки МПГ-6.

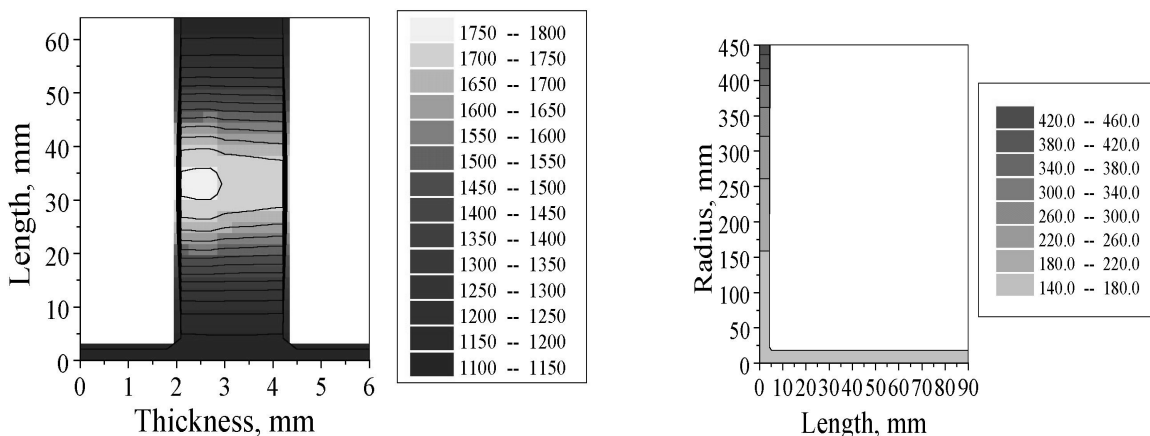


Рис. 2. Распределение температуры по сечению графитового обода (слева) и титанового диска с валом (справа) в $^{\circ}\text{C}$ для длины графита 64 мм, толщины диска 1 см. Длина для титана отсчитывается от плоскости симметрии, для графита – от обечайки титанового диска.

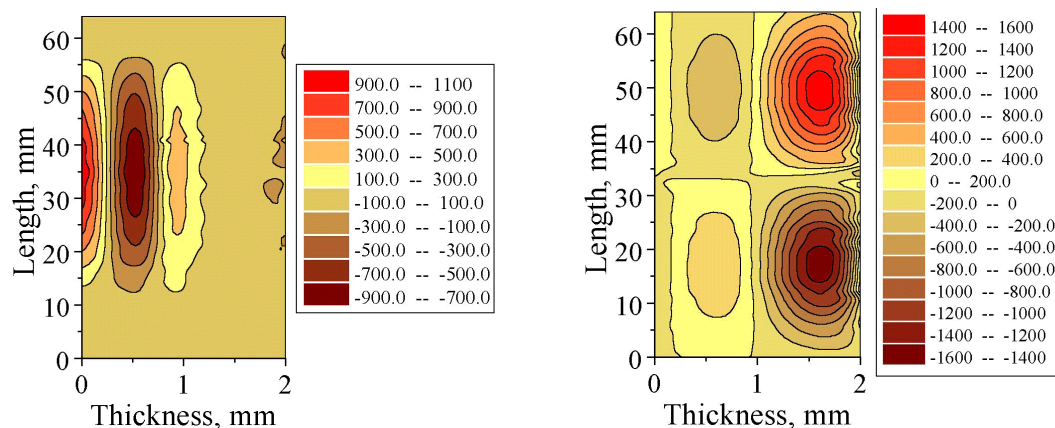


Рис. 3. Распределение продольного (слева) и касательного (справа) термического напряжения (кПа) по радиальному сечению графита в мишени для распределения температуры, приведенного на рис. 2.

При расчете полей напряжений в мишени решалось уравнение упругости с учетом вращения мишени и полей температуры для конкретной геометрии [5]. При этом выяснилось, что наиболее близки к пределу прочности возникающие в графитовой части напряжения (см. рис. 3), обусловленные в основном температурными полями.

Тепловые эксперименты

Для проверки надежности графитовой мишени при данных тепловых режимах был проведен ряд экспериментов с целью:

- определения максимально допустимого числа термоциклов быстрый нагрев до рабочей температуры и быстрое охлаждение до комнатной температуры;
- определения максимально допустимых градиентов температуры;
- определения влияния теплового удара;
- определения времени жизни мишени при температурах 2200 – 2500⁰С.

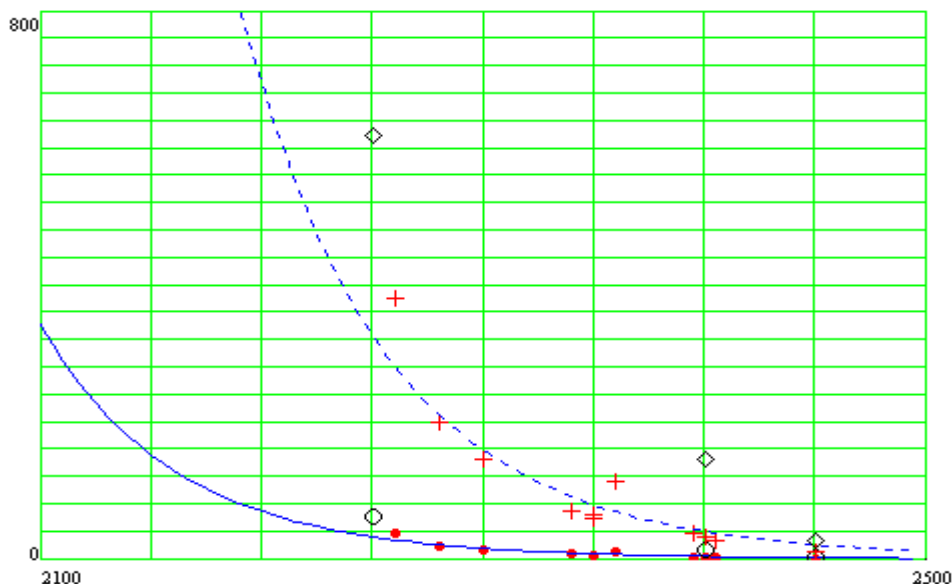


Рис. 4. Зависимость времени жизни образцов (ч) от температуры (⁰С). • и O – измеренные значения, + и \diamond – те же значения, умноженные на 10, сплошная линия – аппроксимация, пунктир – то же, умноженное на 10.

В ходе экспериментов графитовые образцы с сечением 1.5 x 1.5 мм и длиной 15–20 мм нагревались в вакуумном объеме импульсным током в форме полусинусоиды с длительностью импульса 96 мкс и частотой повторения 50 Гц. Такой режим соответствует рабочему режиму мишени, вращающейся с частотой 50 Гц. В ходе экспериментов измерялись ток и напряжение на образце, по которым рассчитывались излучаемая мощность, средняя температура и тепловой удар на образце. Контроль распределения температуры по поверхности образца осуществлялся с помощью оптического пирометра через окно в вакуумном объеме. Микроструктура образцов до и после испытаний исследовалась с помощью электронного микроскопа.

Определение допустимого числа термоциклов проводилось следующим образом: на образец подавались нагревающие импульсы тока в течение 30 сек, в результате чего он разогревался до температуры 2000⁰ С. После этого нагрев прекращался на 30 сек, и образец остывал почти до начальной температуры. При испытаниях образец выдержал без разрушения более 500 термоциклов. Следует отметить, что за первые 200 циклов сопротивление образца возросло примерно на 7% и затем стабилизировалось на новом уровне. На срезе образца отмечено изменение топологии и характера поверхности пор по сравнению с негретым материалом. Эти данные свидетельствуют о том, что после частичного разрушения структура материала образца стабилизируется в новом состоянии и успешно выдерживает подобные тепловые нагрузки. Таким образом, перед облучением мишени пучком дейтронов ее не надо специально разогревать.

Измерения распределения температуры по поверхности образца, находящегося при квазистационарной температуре около 2000⁰ С, с помощью оптического пирометра дали следующие результаты: максимальная температура наблюдалась в середине образца длиной 16 мм, на краях образца температура была на 80⁰ С меньше. Это означает, что графит устойчиво выдерживает градиенты температуры по крайней мере до 100⁰ С/см.

Для определения времени жизни мишени была проведена серия экспериментов, в которой образец выдерживался при постоянной средней температуре в диапазоне 2200–2500⁰ С. Об изменении физических свойств графита свидетельствовало изменение со временем сопротивления образца. С течением времени сопротивление образца увеличивалось с нарастающей скоростью, и при его росте на 20–25% происходило разрушение. По экспериментальным данным построена кривая для определения времени жизни образца (рис. 4). Время от момента выхода на рабочую температуру до разрушения принимается за время жизни образца. Определенное таким образом время жизни при 2100⁰ С составит 300–400 часов, при 2000⁰ С – около 2000 часов.

Заключение

Основным результатом настоящей работы является демонстрация возможности создания высокоинтенсивного источника нейтронов, рассчитанного на большую мощность первичного пучка дейтронов, на базе углеродной мишени, охлаждаемой излучением. Подготовлен физический проект такого источника.

Литература

- [1] R. Serber. Phys. Review 72, 1948.
- [2] Физические величины. Справочник под редакцией И.С. Григорьева и Е.З. Мелихова. – М. Энергоатомиздат, 1991.
- [3] J. B. Marion, F. C. Young. Nuclear Reaction Analysis. North-Holland publishing company. Amsterdam 1968.
- [4] S. Menard et. al. Fast Neutron Forward Distribution from C, Be and U Thick Targets Bombarded by Deuterons.
- [5]. B. A. Boley, J. H. Weiner. Theory of Thermal Stresses. New York – London, John Willes and sons, INS, 1960.