

# ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОНВЕРТОРА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИНТЕНСИВНОЙ НЕЙТРОННОЙ МИШЕНИ

М.С.Авилов, К.В.Губин, А.И.Корчагин, А.В.Лаврухин, П.В.Логачев, П.В.Мартышкин,  
С.Н.Морозов, С.Н.Фадеев, С.В.Шиянков, BINP, Novosibirsk, Russia,  
L.Tecchio, J.Esposito, LNL INFN, Legnaro, Italy

## Abstract.

В настоящее время в LNL-INFN (Италия) реализуется проект по получению и исследованию короткоживущих радиоактивных изотопов, для которого необходима высокоинтенсивная нейтронная мишень. В ИЯФ предложена схема высокотемпературной мишени, охлаждаемой излучением. В докладе описаны результаты предварительных испытаний материалов для ее конвертора – графита МПГ-6, графитового материала на основе  $^{13}\text{C}$ , карбида бора. Испытания заключались в распределенном объемном нагреве образцов электронным пучком до режимов, имитирующих рабочий режим конвертора (плотность мощности нагрева до  $1000\text{-}1300\text{ Вт/см}^2$ , температура до  $2000^\circ\text{C}$ , градиент температуры до  $100^\circ\text{C/мм}$ ). Графитовые материалы показали свою принципиальную применимость в этих условиях.

## ВВЕДЕНИЕ.

Предложенная схема мишени представляет собой [??] конвертор, набранный из пластин, закрепленных на вращающемся металлическом диске и охлаждаемый собственным тепловым излучением. Наиболее напряженной частью такой мишени является конвертор, который для эффективного охлаждения должен иметь температуру около  $1700\text{-}2000^\circ\text{C}$ . Кроме того, могут оказаться критичными высокие температурные градиенты – вплоть до  $100^\circ\text{C/мм}$  – которые приводят к высоким температурным напряжениям материала. Точный расчет рабочего режима конвертора весьма затруднен, т.к. для реальных материалов полный набор характеристик либо известен с недостаточной точностью, либо вообще неизвестен – как для графита из  $^{13}\text{C}$ . Основной целью настоящей работы являлись предварительные испытания материалов – кандидатов на роль конвертора мишени в условиях, максимально близко моделирующих прогнозируемые рабочие.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ.

Всего было протестировано 5 различных материалов:

- графит марки МПГ-6;
- стеклоглерод марки СУ-2000;
- плотный карбид бора производства компании “Pure tech” (с 01.01.03 - Williams Thin Film Products);

- плотный карбид бора производства компании “Good Fellow”;
- специально изготовленный графитоподобный материал из изотопа  $\text{C}^{13}$ .

Все материалы, кроме графита из  $^{13}\text{C}$  – промышленного изготовления. Образцы представляют собой диски различной толщины (2-3 мм) и диаметра (15-45 мм).

Графит из  $^{13}\text{C}$  был специально изготовлен в “НИИГрафит” из предоставленного сырья (порошковый  $\text{C}^{13}$ ). Поскольку, с одной стороны, материал приготовлен по поисковой технологии (специфицированного материала не производится), а с другой стороны сырья было недостаточно для полного цикла исследований и отработки технологии, то свойства материала были, в основном, неизвестны. Экспериментальные образцы представляли собой таблетки толщиной 2.5-3.5 мм, диаметром 14-14 мм, плотностью  $0.7\text{-}0.8\text{ г/см}^2$ , и содержанием изотопа  $^{13}\text{C}$  75-80 %.

## СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА.

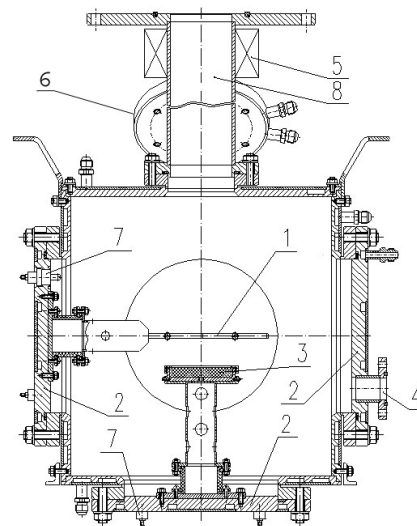


Рисунок 1: Experimental device. 1 – подставка под образец, 2 – фланцы, 3 – приемник пучка, 4 – откачной фланец, 5 – магнитные корректоры, 6 – оптические окна, 7 – токовводы, 8 – пучковый канал.

В процессе эксперимента тестируемые образцы располагались в специально изготовленной вакуумной камере (см. рис.1) на термостойкой подставке 1. Подставка сконструирована таким образом, что образец свободно лежит на четырех

тонких вольфрамовых стержнях и центруется специальной танталовой обечайкой. Такая конструкция позволяет, во-первых, минимизировать тепловой контакт между образцом и подставкой, во-вторых, исключить неконтролируемые напряжения в образце при жестком его закреплении.

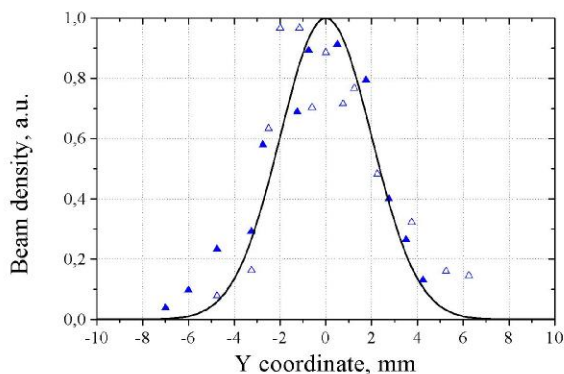


Рисунок 2: Распределение линейной плотности тока в пучке по Y координате. Треугольники – измеренные значения, линия – вписанное гауссово распределение.

Образец нагревается электронным пучком ускорителя ЭЛВ-6 [??] через пучковый канал 8, оборудованный магнитными корректорами 5. Корректоры позволили, кроме управления положением пучка, осуществить также его линейную развертку по одной из координат. Профиль плотности тока пучка поперек развертки показан на рис.2. К сожалению, при энергии пучка 660 кэВ, соответствующей по длине пробега толщине большинства образцов, профиль пучка имеет существенно неправильную форму и может лишь очень приблизительно быть описан гауссовым распределением с  $\sigma = 2$  мм и амплитудой  $P_0 = 2.1$  кВт/мА·см, отнормированной на полный ток пучка при длине развертки 40 мм.

В эксперименте измерялись

- баланс токов – тока ускорителя, тока с образца и тока со специального приемника пучка 3 – позволял точно контролировать мощность нагрева;
- энергия электронов в пучке;
- распределение температуры по поверхности образца поперек развертки пучка.

Температура образца измерялась оптически через специальные окна 6 из радиационно стойкого стекла. Метод измерения заключался в сравнении сигналов с одного и того же фотоприемника при использовании различных оптических фильтров. Такой метод требует допущения, что излучающая поверхность является серым телом, т.е. ее спектральный коэффициент теплового излучения не зависит от температуры поверхности и длины волны (спектр излучения подобен спектру черного тела). Для графитовых материалов с сильно развитой шероховатой поверхностью это условие можно считать выполненным. В таком случае отношение сигналов с

одного фотоприемника с разными фильтрами при прочих одинаковых условиях зависит только от температуры излучающей поверхности. Если известны спектральные характеристики оптических элементов и фотоприемников, то температура излучающей поверхности может быть восстановлена. Следует отметить особенности методики

- не нужно знание точного значения коэффициента теплового излучения, что во многих случаях затруднительно;
- так как измеряется отношение двух сигналов, то устраняется влияние их абсолютной величины – а значит и геометрических параметров системы, а также необходимость абсолютных калибровок.

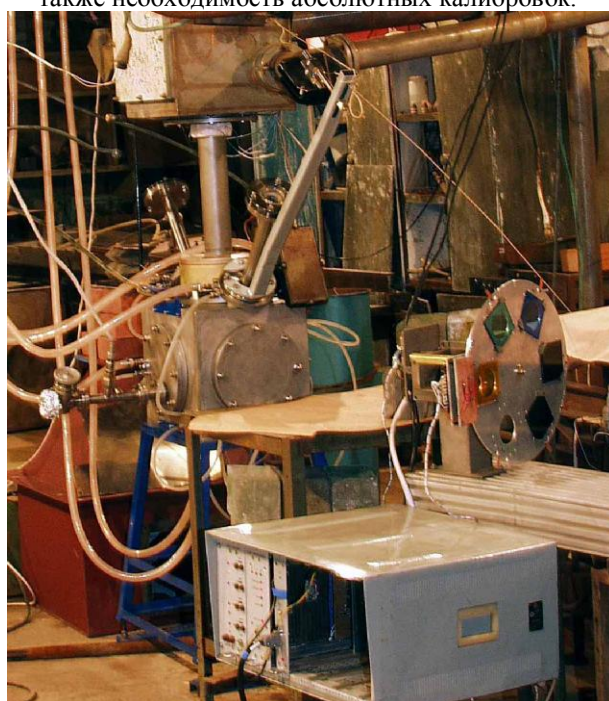


Рисунок 3: Экспериментальная установка в сборе.

На рис.3 показана экспериментальная установка в сборе, смонтированная на ускорителе ЭЛВ-6. Видны вакуумная камера, выходная часть ускорителя, часть температурной диагностики со светофильтрами, блоки электронной аппаратуры.

До и после тестов проводилось взвешивание и микроскопия поверхности тестируемых образцов.

## ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ.

### Карбид бора "Pure tech".

Были испытаны два образца. На оба подавался пучок развернутый таким же образом, как и на предыдущих образцах. Оба образца лопнули при полном токе 220-250  $\mu\text{A}$  (не более 60 Вт/см<sup>2</sup>) – плотность мощности была намного ниже, чем предполагаемая рабочая. На такой низкой мощности измерить температуру не удалось. Фотографии образцов приведены на рис.4.

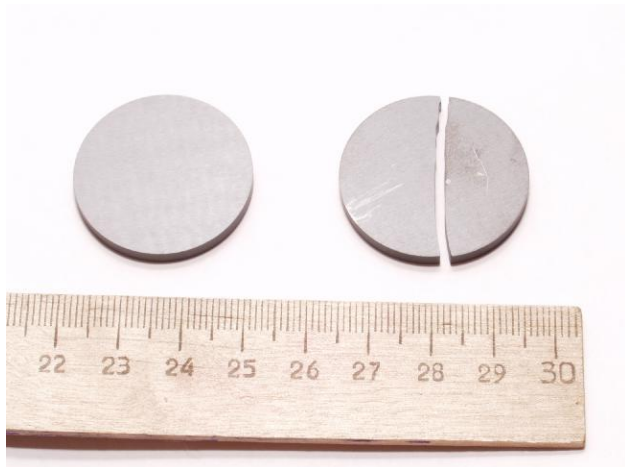


Рисунок 4: Фотография образцов из карбида бора “Pure tech”. Слева – контрольный образец, справа – протестированный.

#### Карбид бора “Good Fellow”.

Оба протестированных образца разрушились при попытке поднять ток пучка выше 1-1.2 мА (330-350 Вт/см<sup>2</sup>).

#### Стеклоуглерод SU-2000.

Было испытано два образца. Один разрушился при мощности нагрева менее 700 Вт/см<sup>2</sup>. Другой без разрушения выдержал нагрев до 900 Вт/см<sup>2</sup> и 28 термоциклов (мгновенная подача максимальной мощности с последующим мгновенным снятием). Однако и визуальный осмотр (см. рис. 5) и микроскопия показали, что произошло травление поверхности образца.

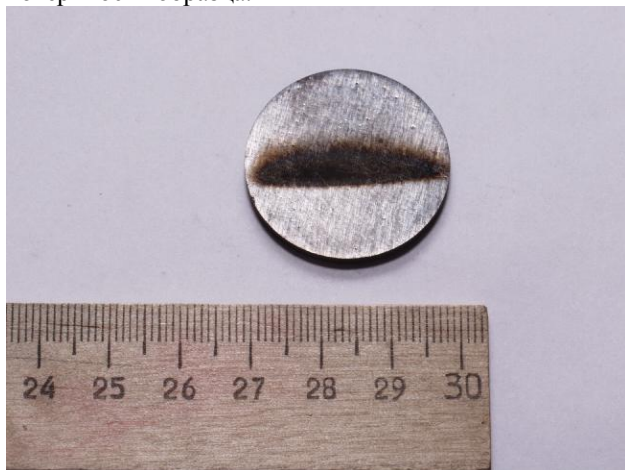


Рисунок 5: Фотография образца из стеклоуглерода.

#### Графит МПГ-6.

Была протестирована серия образцов как постоянным нагревом, так и термоциклированием. Никакой разницы между образцами с разными режимами не обнаружено. Мощность нагрева достигала 1300 Вт/см<sup>2</sup>, температура поверхности образца 2000 °С, градиент температуры 100 °С/мм. Из 12 протестированных образцов на двух появились трещины – по-видимому, связанные с внутренними

дефектами, поскольку режимы треснувших образцов не были самыми напряженными. На рис.6-7 приведены протокол теста и распределение температуры поверхности для одного из испытанных образцов.

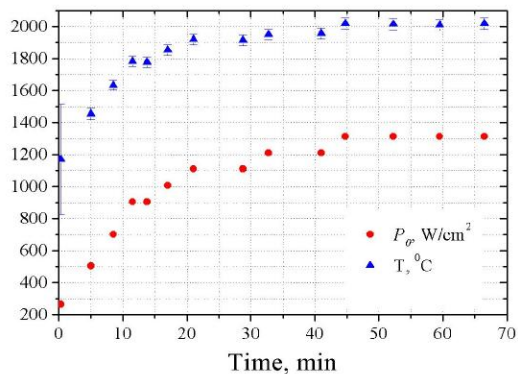


Рисунок 6: Временная диаграмма теста образца из графита МПГ-6. Температура – максимальная измеренная.

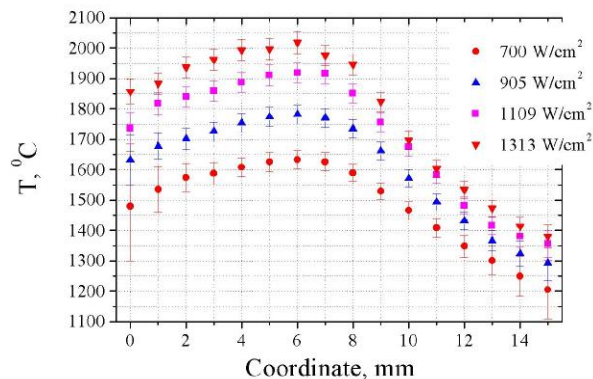


Рисунок 7: Распределение температуры по поверхности образца из графита МПГ-6 при различной мощности нагрева.

#### Графит на основе изотопа <sup>13</sup>C.

Образцы тестировались по той же схеме, что и образцы из МПГ-6. Мощность нагрева достигала 1000 Вт/см<sup>2</sup>, температура поверхности образца 2000 °С, градиент температуры 100 °С/мм. Разницы между образцами с разными режимами нагрева не обнаружено. Все образцы (6 шт.) выдержали тест без разрушения.

### СРАВНЕНИЕ ГРАФИТОВ МПГ-6 И <sup>13</sup>C.

На рис.8-9 приведены зависимости максимальной измеренной температуры от мощности нагрева для графитов из <sup>13</sup>C и МПГ-6. Образцы МПГ-6 имели одинаковые размеры и вырезаны из одной и той же заготовки материала. Неудивительно, что для них все измеренные значения ложатся на одну кривую.

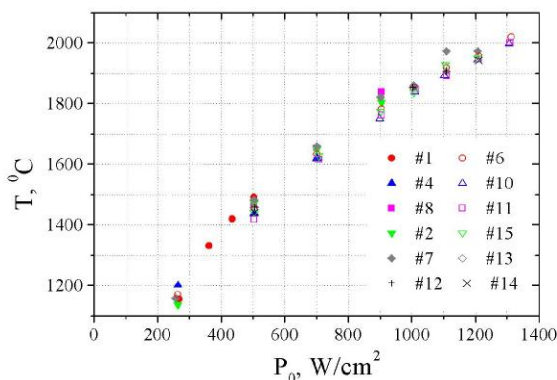


Рисунок 8: Максимальная температура образцов из графита МПГ-6 в зависимости от пиковой плотности мощности нагрева.

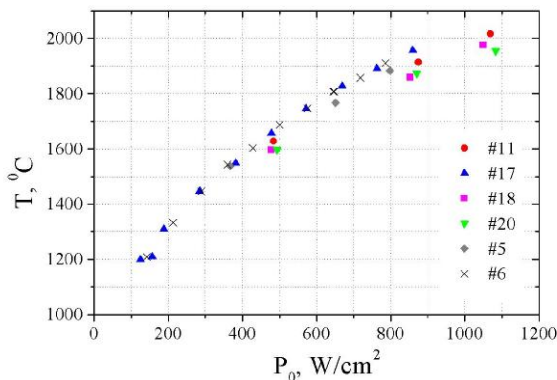


Рисунок 9: Максимальная температура образцов из графита С<sup>13</sup> в зависимости от пиковой плотности мощности нагрева.

Для <sup>13</sup>C каждый образец изготавливался отдельно по несколько различной технологии – образцы изготовлены в процессе поисковой работы в условиях недостатка исходного сырья. Однако и для них измеренные значения также находятся на одной кривой. Таким образом, можно считать, что испытанные образцы продемонстрировали сходство свойств и представляют собой практически один и тот же материал.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Основными результатами являются

- карбиды бора и стеклоуглерод неперспективны для изготовления конвертора горячей нейтронной мишени – они либо разрушаются при тепловой нагрузке значительно меньшей, чем предполагаемая рабочая, либо проявляют склонность к высокой тепловой эрозии;
- графитовые материалы – как МПГ-6, так и графит из <sup>13</sup>C – показали свою работоспособность в предложенных условиях;

- несмотря на то, что графит из <sup>13</sup>C не является специфицированным материалом, а технология изготовления каждого образца несколько отлична от других, все испытанные образцы показали сходство своих свойств.

Полученные результаты предварительных тестов позволяют продолжить работы по созданию горячей нейтронной мишени, базируясь на графитовые материалы в качестве нейтронного конвертора.

### REFERENCES