

УДК 621.311.25(06)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЭЛОВ С ПЛОТНЫМ ТОПЛИВОМ

А. Б. Круглов, В. Б. Круглов, П. Г. Стручалин, В. С. Харитонов

Описаны результаты разработки методик определения контактного термического сопротивления между топливом и оболочкой твэлов и теплопроводности топлива, ориентированные на применение в условиях защитной камеры. Приведена схема лабораторной установки, с помощью которой продемонстрирована работоспособность методик на макете твэла с имитаторами плотного топлива.

Ключевые слова: разработка методик неразрушающего контроля, теплофизические свойства твэлов, контактное термическое сопротивление, теплопроводность, плотное топливо.

Введение. В быстрых реакторах нового поколения предполагается использование плотных видов топлива, в частности – нитридного. Обоснование безопасности и экономичности работы активных зон реакторов требует надежных данных по теплофизическим свойствам, в частности по контактному термическому сопротивлению между топливом и оболочкой, по теплопроводности топлива и их изменению в ходе кампании.

Цель работы заключалась в разработке методик неразрушающего контроля контактного термического сопротивления между топливом и оболочкой (r_k) и теплопроводности топлива (λ_T) для твэлов с плотным топливом, ориентированных на проведение измерений в условиях защитной камеры.

Особенности проведения исследований теплофизических свойств твэлов в защитной камере. Измерения теплофизических свойств облученных твэлов в защитной камере должны быть неразрушающими и дистанционными. Разрушение твэла нарушает состав газовой среды под оболочкой твэла, изменяет давление, нарушается контакт между топливом и оболочкой, возможно разрушение целостности топливной таблетки.

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: pstruchalin@mail.ru.

Полагается, что проведение неразрушающих измерений позволит использовать твэл для дальнейшего использования в активной зоне реактора для достижения более высокого выгорания.

Теплофизические свойства твэлов определяются в измерениях с использованием импульсного нагрева поверхности оболочки. Регистрация температуры в этом случае должна осуществляться бесконтактным способом. Высокая электропроводность плотного топлива исключает применение нагрева оболочки импульсом тока [1]. Для этой цели удобно использовать лазер. Высокая активность облученного топлива предполагает создание специальных оптических вводов для лазера и пирометра, с целью предотвращения выхода аппаратуры из строя.

Разработка методик определения контактного термического сопротивления между топливом и оболочкой и теплопроводности топлива. Контактное термическое сопротивление в разработанной методике определяется по характерному времени уменьшения температуры оболочки твэла в точке нагрева до половины от максимальной величины подогрева $\tau_{1/2} = \tau_k$ после прекращения действия импульсного нагрева (рис. 1(а)).

Теплопроводность топливного сердечника определяется по термограмме тыльной стороны оболочки, в точке, противоположной центральной точке поверхности нагрева. В этом случае в качестве характерного времени также используется время $\tau_{1/2} = \tau_\lambda$ (рис. 1(б)).

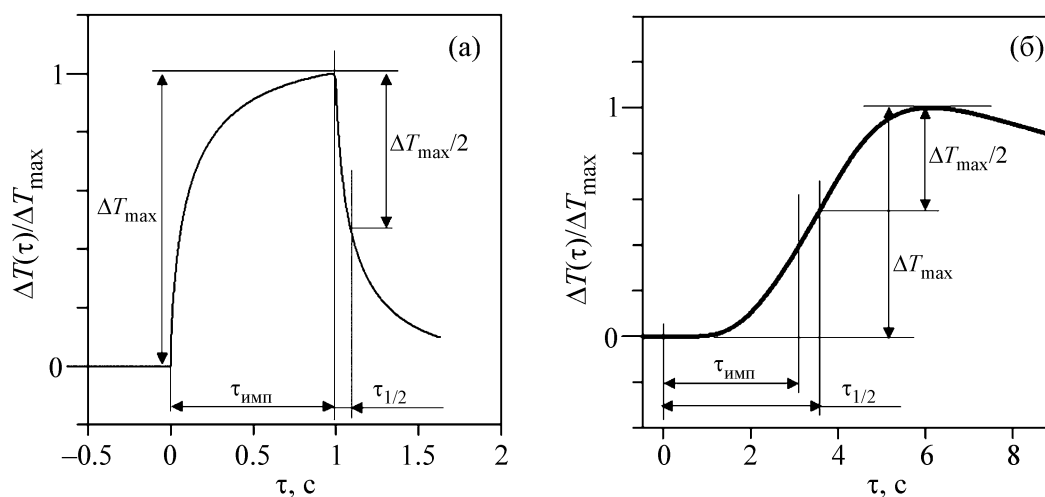


Рис. 1: Термограмма измерения: (а) при измерении контактного термического сопротивления; (б) при измерении теплопроводности топлива.

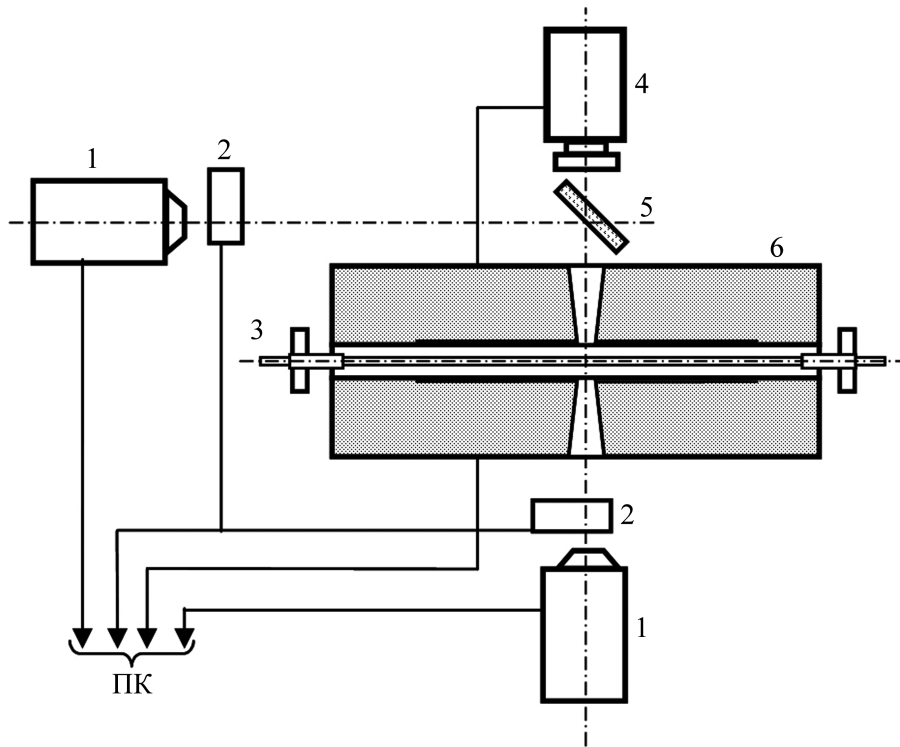


Рис. 2: Схема лабораторной установки: 1 – лазер; 2 – быстродействующий затвор; 3 – макет твэла; 4 – пирометр; 5 – селективное зеркало ($\lambda_{отг} = 0.532$ мкм или 1.062 мкм); 6 – печь.

Выражения для r_k и λ_T получаются как эмпирические формулы, описывающие результаты численного расчета.

$$r_k = r_0 e^{\tau_k - A(\lambda_T)/B(\lambda_T)}, \quad (1)$$

$$\lambda_T = \lambda_0 \left(\frac{\tau_\lambda}{C(r_k)} \right)^{1/D(r_k)}, \quad (2)$$

где $r_0 = 1$ (м²·К)/Вт; $\lambda_0 = 1$ Вт/(м·К); А, В, С, D – константы, зависящие от теплофизических свойств топлива и оболочки, определяемые тем же численным расчетом.

Так как характерные времена процессов τ_k и τ_λ зависят от определяемых в эксперименте теплопроводности топлива и контактного термического сопротивления, то при вычислении r_k и λ_T по экспериментальным термограммам используется итерационная схема.

Лабораторная установка. Для отработки методик была создана лабораторная установка (рис. 2).

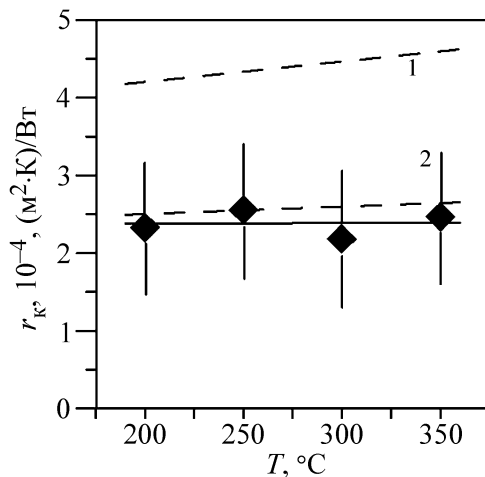


Рис. 3: Результаты измерения r_k , \blacklozenge – измерения; - - - - расчет r_k (1 – неокисленные поверхности, 2 – окисленные поверхности).

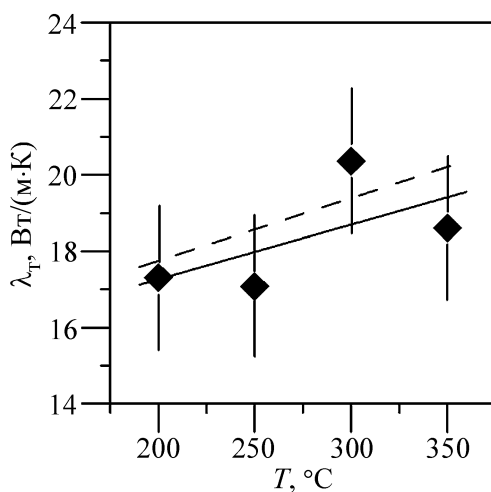


Рис. 4: Результаты измерения λ_T . \blacklozenge – измерения; - - - - данные [2].

Отработка методик осуществлялась на макете твэла, изготовленном из стали 12X18Н10Т в виде оболочки $\varnothing 8.1 \times 0.35$ мм, заполненной цилиндрическими имитаторами топливных таблеток из той же стали. Внутренняя часть твэла заполнялась гелием при давлении 2 атмосферы, зазор между оболочкой и имитаторами в месте измерений составлял 0.01–0.02 мм. Выбор стали 12X18Н10Т в качестве материала оболочки

и имитаторов топлива объясняется тем, что, во-первых, имеются надежные данные по ее теплофизическим свойствам [2] и, во-вторых, близостью этих свойств к свойствам топлива UN.

Тепловые импульсы создавались лазерами DTL-318 (0.35 Вт) и DTL-423 (2.5 Вт). Температура оболочки твэла регистрировалась пирометром Imрас 140 с рабочим диапазоном 50–400 °С. Амплитуды подогревов оболочки при измерении контактного сопротивления составляли 6–8 °С, при измерении теплопроводности – 2–3 °С. Температура твэла и печи перед импульсом контролировалась термопарами хромель-алюмель с точностью ± 0.02 °С.

Результаты измерений τ_k и λ_T на макете твэла. Измерения проводились в диапазоне температур 200–350 °С. Результаты измерений представлены на рис. 3, 4.

Полученные значения контактного термического сопротивления коррелируют с термическим сопротивлением газового зазора [3]. Экспериментальные значения теплопроводности имитаторов топлива сравнивались с данными для стали 12X18H10T [2]. Максимальные погрешности методик составили 30% для контактного термического сопротивления и 8% для теплопроводности имитаторов топлива. Основной вклад в погрешность вносит погрешность измерения характерных времен τ_k и τ_λ пирометром.

Заключение. В результате выполнения работы созданы методики неразрушающих измерений контактного термического сопротивления между топливом и оболочкой и теплопроводности топлива тепловыделяющих элементов.

Проведены предварительные эксперименты с использованием макета твэла, демонстрирующие работоспособность предложенных методик.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. Б. Круглов, А. Б. Круглов, И. Г. Поздеева и др., Известия вузов. Ядерная энергетика **1**, 146 (2010).
- [2] *Таблицы стандартных справочных данных. Сталь нержавеющая марки 12X18H10T. Теплопроводность при температурах 340–1100 К* (М., Издательство Стандартов, 1994).
- [3] Л. С. Кокорев, В. В. Харитонов, Вопросы теплофизики ядерных реакторов, выпуск IV, 17 (1974).

Печатается по материалам III Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”, Москва, МИФИ, апрель 2014 г.

Поступила в редакцию 7 мая 2014 г.