

Центральный научно-исследовательский институт
информации и технико-экономических исследований
по атомной науке и технике

**Н.М.Максимов, В.А.Солдатенко, В.И.Петровичев,
С.Е.Салимов, К.А.Александров, Д.А.Куров**

**РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО МЕТОДА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЭЛОВ**



**радиационное
материаловедение**

Москва-1985

УДК 621.039.533.3

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЭЛОВ: Препринт. НИИАР-15(661)/ Н.М.Максимов, В.А.Солдатенко, В.И.Петровичев, С.Е.Салимов, К.А.Александров, Д.А.Куров.- М.: ЦНИИАтоминформ, 1985.- 32 с.

Р е ф е р а т

Описаны основные системы и методы теплового контроля, их возможности и достоинства, фотоприемники теплового излучения. Обсуждены возможные области применения теплового контроля в ядерной энергетике. Приведены расчеты нестационарного температурного поля твэла в трехмерной геометрии при наличии дефекта типа отслоение топлива от оболочки. Описана разработанная методика и аппаратура теплового контроля твэлов. Приведены результаты предварительных экспериментов, которые согласуются с расчетными и показывают возможность обнаружения дефектов.

Рис. 13, табл. I, список лит. - 40 назв.

Научный редактор Н.П.Матвеев



Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИАтоминформ), 1985

Н.М.Максимов, В.А.Солдатенко,
В.И.Петровичев, С.Е.Салимов,
К.А.Александров, Д.А.Куров

НИИАР-15(661)
УДК 621.039.533.3

Расчетно-экспериментальное обоснование теплового метода
неразрушающего контроля твэлов

Описаны основные методы и системы теплового контроля, фотоприемники теплового излучения. Рассмотрены возможные области применения теплового контроля в ядерной энергетике. Описана разработанная методика, установка и аппаратура теплового контроля твэлов. Приведены расчеты нестационарного поля температур в твэле в трехмерной геометрии при наличии дефекта типа отслоение топлива от оболочки. Предварительные экспериментальные данные согласуются с расчетными.

Препринт, 1985

N.M.Maksimov, V.A.Soldatenko,
V.I.Petrovichev, S.E.Salimov,
K.A.Aleksandrov, D.A.Kurov

RIAR-15(661)
UDC 621.039.533.3

Calculated and Experimental Substantiation of the Thermal
Method for Non-Destructive Testing of Fuel Elements

The basic method and the thermal testing systems as well as the thermal irradiation infrared detectors are described. Possible fields of application of this thermal testing in the nuclear engineering are considered. The developed method, the unit and the equipment for the fuel element thermal testing are also described. The calculations are demonstrated which describe the non-stationary temperature field within the fuel element in the three-dimensional geometry with the presence of a defect such as fuel exfoliation from cladding. Preliminary experimental data is in agreement with that calculated.

Preprint, 1985

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объема послереакторных исследований тепловыделяющих элементов и возросшие требования к их входному контролю приводят к развитию новых методов неразрушающего контроля изделий, позволяющих автоматизировать обработку и вывод результатов.

Показана перспективность применения для неразрушающего контроля твэлов тепловых методов, которые в настоящее время широко используются в нашей стране во всех отраслях техники [1-6]. Такие методы могут применяться для решения следующих задач:

- . обнаружения дефектов типа отслоение топлива от оболочки;
- . определения толщины отложений на твэлах;
- . измерения контактного термического сопротивления топливо-оболочка;
- . определения давления газа в твэлах;
- . обнаружения мест контакта таблеток с оболочкой твэла;
- . выявления негерметичных твэлов, газосборник которых заполнен водой;
- . определения смещения топливного сердечника;
- . анализа распределения топлива по объему твэла;
- . определения глубины выгорания и распределения остаточного энерговыделения по твэлу и т.д.

Кроме того, тепловые методы контроля рекомендуются как экспрессные — для анализа состояния оболочки твэла.

В настоящей работе сформулирована задача обнаружения данным методом отслоений оболочки твэла от керамического топлива размером более 2x2 мм, как вариант наиболее тяжело разрешаемой задачи (по теплофизическим характеристикам топлива и размерам дефекта).

Поскольку данная работа носит постановочный характер, по её результатам предполагается оценить возможности тепловых методов для регистрации других типов дефектов в твэлах с различными теплофизическими характеристиками.

1. ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ

В связи с интенсивным развитием ядерной энергетики появилась задача дальнейшего повышения технико-экономических показателей АЭС. Одно из решений поставленной задачи связано с усовершенствованием конструкций тепловыделяющих элементов. Это привело к увеличению объема послереакторных исследований твэлов, а также к возрастанию требований к входному контролю твэлов и соответственно к развитию методов неразрушающего контроля (НК).

Известные методы неразрушающего контроля, согласно ГОСТ 18353-73 [6], в зависимости от физических свойств, положенных в их основу, подразделяются на следующие основные виды: акустический, капиллярный, оптический, радиационный, радиоволновой, тепловой, метод контроля теческательем, электрический, электромагнитный (вихревых токов).

Акустический, радиационный и электромагнитный методы контроля так же, как и контроль теческательем, получили широкое применение в послереакторных исследованиях твэлов. Дальнейшее развитие методов неразрушающего контроля также требует создания новых методов, позволяющих автоматизировать обработку и вывод результатов. Одним из таких новых методов может быть тепловой метод контроля.

Под тепловыми методами НК понимают совокупность методов, позволяющих получать информацию о внутреннем состоянии структуры, сплошности; о качестве материалов и готовых изделий на основе регистрации тепловых полей, температуры, теплового контраста, а также изменения плотности тепловых потоков в зависимости от тепловой активности и степени анизотропности материалов [7]. Температурные контрасты поверхности, связанные с дефектами (трещины, раковины и т.д.), возникают вследствие неравномерного распространения тепла в материале изделия.

В основе тепловых методов лежит тот факт, что дефект создает дополнительное сопротивление тепловому потоку, способное привести к фиксируемой разности температур соседних участков поверхности исследуемого образца. Оценить термическое сопротивление дефектной зоны до опыта невозможно из-за неопределенности структуры. Обычно дефектную зону рассматривают как газовую прослойку с дисперсной структурой [8].

Тепловые методы можно разделить на две большие группы по способу формирования температурного поля:

1) пассивные, применяются в условиях, когда изделия в рабочем состоянии имеют температуру, отличную от температуры окружающей среды, а температурные поля контрастно неизотермичны, поэтому в ходе теплового обмена их со средствами контроля открывается возможность выявления дефектов;

2) активные, используются в тех случаях, когда температура контролируемого изделия равна температуре окружающей среды, а само изделие изотермично.

При активном методе теплового контроля применяется одновременный нагрев всего изделия или последовательный (сканирующий) нагрев элементарных участков объекта. Контроль с одновременным нагревом ограничен трудностью создания однородного теплового поля по всему изделию. При сканирующем контроле воздействие на объект осуществляется локальным источ-

ником тепла, перемещающимся по объекту вдоль некоторой траектории; по этой же траектории (с некоторым сдвигом во времени) измеряется температура. Для нагрева изделия применяются специальные источники тепловой энергии, которые могут быть стационарными и импульсными. При кратковременном нагреве изделий используются высокоинтенсивные источники тепла [9-13]:

- . бомбардировка электронным пучком в вакууме;
- . плазменная струя;
- . фокусируемое инфракрасное или видимое излучение;
- . электромагнитное поле высокой частоты;
- . лазерное излучение;
- . горячие газы.

По способу регистрации температурного поля тепловые методы подразделяются на контактные (например, методы термомочувствительных красок, люминесцентные, жидкокристаллические и термоэлектрические) [8,14-18] и бесконтактные.

Последние наиболее важны, так как не вызывают искажений температурных полей и могут широко использоваться при неразрушающем контроле изделий. Преимущества бесконтактных методов теплового неразрушающего контроля перед контактными следующие:

- . высокое быстродействие, а следовательно, и высокая производительность при двух- и одностороннем доступе к изделию;
- . дистанционность;
- . высокое линейное разрешение;
- . возможность контроля практически любых материалов, если теплофизические свойства дефекта и изделия отличаются друг от друга;
- . возможность поточного контроля и создания АСУ;

. меньшая зависимость от неровностей поверхности по сравнению с рядом других методов контроля.

При контактных измерениях температуры следует учитывать погрешности, связанные с искажением температурного поля и со снижением температуры в контактной зоне. Например, при измерении локальных температур термоэлектрическими преобразователями (ТЭП) лучшие результаты дают методы со следящей компенсацией тепловода по термоэлектродам, соответственно компенсирующие систематические погрешности измерения, связанные с непостоянством термического сопротивления в зоне контакта [15]. Чаще всего ТЭП для методов неразрушающего контроля не применяются, так как для правильного показания температуры поверхности спай ТЭП должен быть помещен в материал на глубину до 0,5 мм [18].

Регистрация температурного поля термоиндикаторами [16] основана на использовании соединений, окраска которых изменяется при определенной температуре вследствие дифракции и интерференции света, либо на изменении своего цвета или оплавления при строго фиксированных температурах. По своим характеристикам жидкокристаллические материалы позволяют фиксировать температуру в интервале 230–560 К с постоянной времени измерения 0,2–10 с и погрешностью $\pm(1-2)K$.

Известен также тепловой метод контроля околоповерхностными термоприемниками, принцип работы которых заключается в размещении термочувствительного элемента преобразователя вблизи поверхности контролируемого изделия таким образом, чтобы между ними образовалась тонкая воздушная прослойка. В процессе измерения прослойка не изменяется. Причем в теплообмене между контролируемым изделием и чувствительным элементом кондуктивная составляющая теплового потока, характеризующая дефектность изделия, значительно превосходит радиационную составляющую. Этот способ имеет ряд достоинств: отсутствует хладагент и источник питания; чувствительность около $14 \text{ мВ} \cdot \text{м}^2 / \text{кВт}$ при температуре изделия, близкой к температуре окружающей среды; приемник не сложен в изготовлении и имеет высокую механическую проч-

ность [19]. В качестве чувствительных элементов околоповерхностных датчиков используются термоэлектrofизические батарейные приемники слоистого типа, представляющие собой систему большого числа ТЭП, соединенных последовательно по генерируемому сигналу и параллельно по измеряемому тепловому потоку [20].

Метод теплового контроля с использованием инфракрасных методов регистрации температурных полей – самый распространенный и наиболее изученный – предусматривает дистанционное исследование температурных полей по собственному тепловому излучению объектов в инфракрасном диапазоне длин волн.

Высокая чувствительность к температурным сигналам (от десятых до тысячных долей градуса), хорошее разрешение (1–10 мрад по мгновенному углу зрения, 5–50 мкм по обзриваемой площади), высокое быстродействие – характерные особенности этого метода [21–23].

Метод теплового изображения, предложенный Д.Грином [24], состоит в том, что на изделие наносят слой электропроводящего материала и слой диэлектрика, поверхность которого исследуется инфракрасной сканирующей системой. Изделие нагревается электрическим током, пропускаемым по проводящему слою. Особенности метода: дешевизна и высокая производительность; возможность визуализации и автоматизации; пригодность для образцов сложной формы; независимость от коэффициента излучения. Чувствительность метода по глубине внутренних дефектов составляет 0,5–1,0 диаметра дефекта для материалов со средней теплопроводностью и 0,125–0,250 диаметра – для материалов с высокой теплопроводностью. В работах [2,25] применение газового плазменного излучателя и метода двух временных задержек позволило контролировать образцы без черного покрытия.

Сравнение контактных и бесконтактных методов неразрушающего теплового контроля, приведенное в работах [8,14,21], показало, что лучшая выявляемость дефектов

у бесконтактного метода, за ним следует контактный – с помощью жидких кристаллов (фиксирует разность температур до 0,8 К) и затем – метод, использующий термоиндикаторы плавления и термокраски (разность температур выше 4 К). Дальнейший анализ методов теплового контроля будет посвящен методам регистрации инфракрасного излучения.

При активном методе теплового контроля с регистрацией инфракрасного излучения существуют различные варианты диагностики [26] в зависимости от взаимного расположения источника излучения и приемной головки при нагреве:

а) всей поверхности изделия с одновременной регистрацией температурного поля;

б) всей поверхности с одновременной регистрацией распределения температуры по ограниченной фиксированной линии;

в) вдоль ограниченной прямой с регистрацией температуры сканированием перпендикулярно прямой;

г) вдоль ограниченной прямой с регистрацией температуры в неподвижно малом пятне на поверхности изделия;

д) вдоль ограниченной прямой с регистрацией температуры в пятне со сканированием всей поверхности изделия.

Варианты а, б, д широко применяются в различных системах теплового контроля, в том числе и в системах с визуальным наблюдением температурного поля, к которым относятся радиометры, тепловизоры и тепловизионные микроскопы. Успехи в области создания приемников инфракрасного излучения в диапазоне 1,5–14 мкм позволили создать целый ряд термографических и тепловизионных систем, работающих в реальном масштабе времени. Всемирную известность приобрели системы фирмы AGA (Швеция) [4,27,28].

Тепловизоры с оптико-механическим сканированием нашли более широкое применение по сравнению с фотоэлектрическими системами. Характеристики таких современных тепловизоров приведены в работах [21,22,29]. Тепловые дефектоскопы с радиометрами состоят из сканирующей системы, аппа-

ратуры регистрации, источника тепла и приемной головки, в которую входит приемник теплового излучения (чаще всего малоинерционные фоторезисторы, охлаждаемые жидким азотом), механический модулятор для прерывания теплового потока и объектив. Фоторезисторы позволяют перекрывать значительную температурную область (270–1070 К) с разрешением 0,01–0,2 К в области спектральной чувствительности 0,5–0,8 мкм для германия, легированного золотом; 2–5,7 мкм для антимонида индия и 1,7–14 мкм для соединений $CdHgTe$. Подробные характеристики преобразователей приведены в работах [17, 29, 30].

Создание новых чувствительных приемников теплового излучения и тепловизионных систем привело к постановке и решению более сложных теоретических задач теплового контроля, хотя теоретическое исследование не представляет особого интереса для классической теплофизики. Однако с практической точки зрения все более очевидна необходимость теоретического анализа предполагаемых исследовательских работ.

В первую очередь задачами теории теплового контроля являются определение принципиальных возможностей метода, оценка параметров полезного сигнала и формулировка требований к параметрам аппаратуры.

Для определения принципиальных возможностей метода в качестве критерия выявляемости дефекта наиболее часто применяют безразмерный параметр

$$A = \left| \frac{T_d - T}{T} \right| ,$$

где T_d , T – температура поверхности образцов над центром дефекта и в бездефектной области соответственно.

На критерий выявляемости дефекта наибольшее влияние оказывают максимальная температура нагрева поверхности, степень её черноты, режим теплообмена, время нагрева и контроля, площадь, величина раскрытия и глубина залегания дефекта, соотношение теплофизических свойств дефекта и материала изделия.

Чувствительность тепловых методов неразрушающего контроля в значительной степени зависит от режима теплообмена. Анализ работ [26, 31, 32] показывает, что нестационарный режим контроля позволяет обнаруживать более мелкие дефекты. Это вполне объясняется регистрацией теплового состояния в начальный момент контроля (при нестационарном режиме). При этом в меньшей степени, чем при стационарном режиме, проявляется эффект "смазывания" температурного перепада в результате растекания теплоты по прилегающим слоям вокруг дефекта.

Основные помехи при тепловом контроле можно разделить на две группы [23]:

1) пропорциональные температуре объекта, вызванные флуктуациями собственного излучения, неоднородностями изделия и неравномерной скоростью нагрева в активном методе ;

2) не зависящие от температуры объекта, обусловленные шумом фотоприемника, вибрацией оптической головки и флуктуирующей посторонней засветкой приемника, могут быть уменьшены изменением уровня нагрева (до порога деструкции материала).

Наиболее существенны помехи первой группы. Влияние коэффициента излучения на результаты теплового контроля учитывается методами, которые также можно условно разделить на две группы [33]:

1) методы, требующие предварительных сведений об объекте или соответствующей подготовки его поверхности к контролю;

2) методы рациональной обработки данных о потоке излучения.

Среди методов первой группы часто применяют нанесение на контролируемую поверхность красок и сажевых эмульсий, что малопроизводительно, но надежно и потому наиболее распространено в тепловом контроле. Используют также

сравнение дефектных термограмм с контрольными, что позволяет автоматизировать контроль. Методы второй группы предусматривают оптимальный выбор спектрального диапазона и использование многоканальных систем.

По данным работы [23] при тепловом контроле большинства изотропных неметаллов помехи составляют 3-4 %, для незачерненных металлов это значение может изменяться от 5 до 100 % в зависимости от состояния поверхности. Нанесение черной краски, сажи снижает помехи до 2 %. Для реализации тепловых методов контроля сложных структур в промышленном масштабе необходима ЭВМ для обработки информации, получаемой в результате контроля. Вычислительная техника в системах теплового контроля позволит представить информацию в удобной для исследователя форме, сократить её избыточность, проводить изотермический анализ, компактное документирование и т.д. Примером использования ЭВМ для обработки данных служит комплекс тепловой дефектоскопии на основе тепловизионной аппаратуры с пироэлектрическим приемником излучения и ЭВМ М-6000 [34]. Обращаются данные эксперимента в реальном масштабе времени с помощью алгоритма, реализующего метод накопления, что позволяет значительно повысить достоверность распознавания дефектов.

Анализ литературных данных показывает, что объективно сравнить экспериментальные и теоретические результаты теплового контроля трудно, поскольку они носят, как правило, качественный характер. Количественные результаты имеются только в том случае, когда контроль ведется при сопоставлении искусственных дефектов, внесенных в объект исследования. Имеющиеся дефектоскопы не характеризуются по минимальным размерам выявляемых дефектов, так как отсутствуют контрольные образцы. Для установления истинной ситуации в дефектном месте после окончания эксперимента необходима деструкция образцов.

Для создания систем теплового контроля, способных решать поставленные задачи, необходимы:

. решение трехмерной нестационарной задачи с учетом излучения внутри дефекта и анизотропии теплофизических характеристик основного материала;

. обработка информации теплового контроля на ЭВМ, что позволит сократить её избыточность, уменьшит вероятность принятия ложных решений о наличии дефектов;

. метод распознавания дефектов, выбор критерия дефектности.

Описанные методы теплового контроля применяются практически во всех отраслях промышленности [4,6,22,29,35,36]. В ядерной энергетике известно незначительное количество работ по контролю узлов реакторов, реализующих данные методы.

В работе [2] описан метод теплового контроля имитаторов твалов, показывающий более высокую чувствительность и надежность по сравнению с рентгеновской и нейтронной радиографией. Метод позволяет классифицировать дефекты на основные группы:

- . понижение плотности нитрида бора;
- . смещение топливного сердечника;
- . повышение удельного энерговыделения сердечника;
- . изменение толщины наружного слоя оболочки.

Этот метод применялся лабораториями в Ханфорде и Ок Ридже после сравнительных оценок с другими методами.

Тепловой метод, описанный в работах [3,25], применяли при контроле расслоений между графитовыми блоками ядерных реакторов и покрытием из нитрида ниобия.

В работе [5] описан тепловой метод контроля для измерения давления газа внутри твала. Активные методы теплового контроля также можно использовать для обнаружения дефектов типа отслоение топлива от оболочки твалов, для определения толщины отложений на твалах, для контактного термического сопротивления топливо-оболочка, для обнаружения мест "приварки" таблеток к оболочке твала и

для выявления негерметичных твэлов, газосборник которых заполнен водой.

Остаточное энерговыделение в твэле дает возможность применять пассивные методы теплового контроля. Такие методы могут быть реализованы при анализе распределения топлива по объему твэла, при определении глубины выгорания и распределения энерговыделения по твэлу.

Контроль твэлов после испытания или после работы в ядерных реакторах наиболее важен для исследователей и разработчиков, однако он осложнен наличием радиационных полей. Поэтому к системам контроля предъявляются более жесткие требования, в частности радиационная стойкость.

Анализ теоретических и экспериментальных работ в области теплового контроля показывает, что тепловые методы получили широкое применение в промышленности. Достаточно полно изучены физические основы метода. Созданы различные тепловизионные системы, способные формировать контрастное и изотермическое изображение поверхности объекта. Методы теплового контроля, реализованные в системах дефектоскопии и в тепловизионных микроскопах, позволяют обнаруживать различные внутренние дефекты (раковины, отслоения, пустоты и т.д.).

Тепловой контроль в ядерной энергетике (например, при послереакторном исследовании твэлов) существенно затрудняется наличием радиоактивных излучений.

Дальнейшее исследование необходимо направить на внедрение аппаратуры теплового контроля в практику промышленных испытаний, на разработку оптимальных методик контроля в различных условиях, на развитие теории теплового контроля, использование ЭВМ для обработки результатов теплового контроля. В области ядерной энергетике необходимы радиационно-стойкие приемники инфракрасного излучения или системы вывода этого излучения из зоны действия радиоактивных излучений.

2. РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Проведенные предварительно аналитические оценки показывают принципиальную возможность практической реализации теплового метода контроля твэлов. Для определения оптимальных параметров режима проведения эксперимента (интенсивность и длительность обогрева, момент регистрации температур) и параметров измерительной системы необходимы расчеты нестационарных температурных полей в твэле при наличии дефекта.

Наиболее общая расчетная модель представляет собой трехмерное тело, состоящее из n слоев с неоднородностями произвольной формы. Учитывается теплообмен тела с окружающей средой. Соответствующая нестационарная задача теплопроводности с граничными условиями II, III и IV рода может быть решена различными методами [11, 12, 15, 37]. Анализ работ показывает, что в большинстве из них рассматриваются лишь линейные задачи, в основном одномерные (исключение составляют трехмерные задачи [14, 24, 38]). При этом пренебрегают теплопередачей через дефект, что существенно уменьшает область их применения; не учитывают теплообмена излучением, что приводит к ощутимым ошибкам, если температура поверхности нагрева превышает 370 К. Поскольку на практике трудно создать граничные условия, соответствующие аналогичным расчетам температурных полей образцов, наиболее предпочтительны относительные экспериментальные методы сравнения температурных полей исследуемого и контрольного образцов с одинаковыми геометрией и краевыми условиями [37, 39, 40].

2.1. Способ определения дефектов типа отслоение оболочки в стержневых твэлах

Способ обнаружения дефектов сводится к следующему. По оболочке стержневого твэла (с неэлектропроводящим сердечником) пропускается электрический ток, что приводит

к выделению тепла в оболочке, и бесконтактными датчиками измеряется температура её поверхности.

В местах, где существуют дефекты контакта оболочки с топливом типа отслоение, в нестационарном процессе температура оболочки более высокая из-за хорошего контактного термического сопротивления. По наличию на термограмме поверхности оболочки твэла участков с явными экстремумами температуры можно судить о местоположении дефектов и, возможно, о величине контактного сопротивления в месте дефекта.

2.2. Задача определения нестационарного температурного поля в твэлах

Рассмотрим цилиндрический твэл (рис. I), состоящий из сердечника и оболочки. В зоне контакта сердечника с оболочкой имеется дефект (размер $h \times \ell$) типа отслоение оболочки.

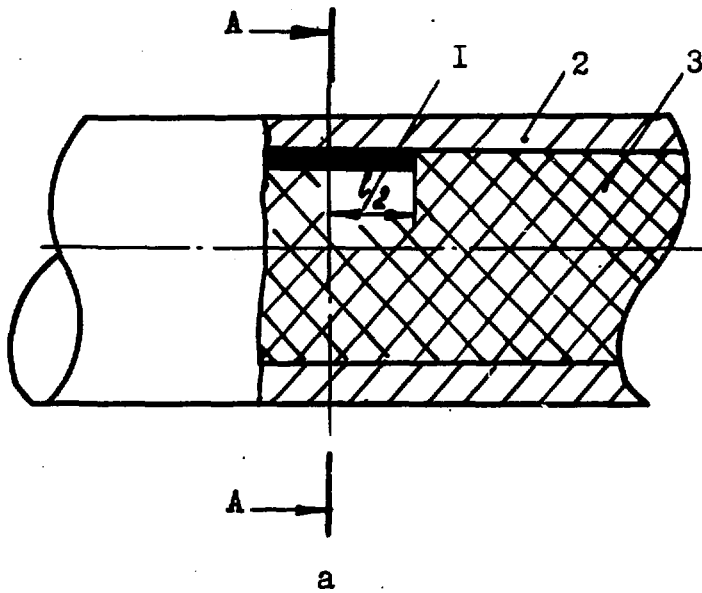
В оболочке с начала нагрева ($\tau = 0$) действуют источники тепловыделения с плотностью q_v . При расчете поля температур приняты следующие допущения:

- . отсутствие теплоотдачи с поверхности твэла;
- . постоянство теплофизических свойств оболочки и сердечника;
- . проводимость контакта в зоне дефекта $\alpha_k = 0$;
- . идеальность контакта топлива с оболочкой вне дефекта;
- . расчет для единичного дефекта в твэле.

В данном случае распределение температуры в оболочке и топливе описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\partial \theta_0}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta_0}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial \Psi^2} + \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial Z^2} + 1, R_1 \leq R \leq 1; \quad (1)$$

$$\alpha \frac{\partial \theta_r}{\partial F_0} = \beta \left\{ \frac{\partial^2 \theta_r}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta_r}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \theta_r}{\partial \Psi^2} + \frac{\partial^2 \theta_r}{\partial Z^2} \right\}, 0 \leq R \leq R_1. \quad (2)$$



Начальные условия:

$$\theta_0(R, \varphi, Z, F_0 = 0) = 0; \quad (3)$$

$$\theta_T(R, \varphi, Z, F_0 = 0), \quad (4)$$

где F_0 - время;

R, Z - координаты.

Граничные условия и условия

сшивки:

$$\frac{\partial \theta_0}{\partial R} \Big|_{R=R_1} = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad 0 \leq Z \leq L; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta_0}{\partial R} \Big|_{R=R_1} = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \varphi_0, \quad 0 \leq Z \leq l/2r_2; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta_0}{\partial R} \Big|_{R=R_2} = \beta \frac{\partial \theta}{\partial R} \Big|_{R=R_2}; \quad (R=R_2);$$

$$\begin{cases} 0 \leq \varphi \leq \varphi_0, & l/2r_2 \leq Z \leq L; \\ \varphi_0 \leq \varphi \leq \pi, & 0 \leq Z \leq l/2r_2; \end{cases} \quad (7)$$

$$\theta_0 \Big|_{R_1} = \theta_T \Big|_{R_1}, \quad R=0, \quad \theta_T < \infty; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad 0 \leq R \leq 1; \quad (9)$$

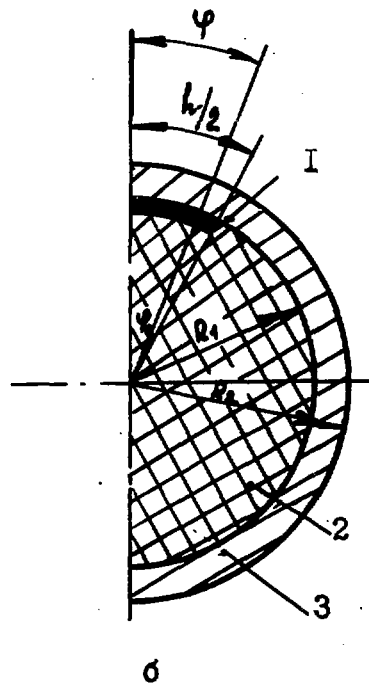


Рис.1. Продольное (а) и поперечное (б) сечения твэма:
1 - дефект; 2 - оболочка;
3 - сердечник

$$\left. \frac{\partial \theta_i}{\partial \psi} \right|_{\psi=0} = 0, \quad 0 \leq Z \leq L, \quad 0 \leq R \leq 1, \quad (10)$$

где

$$\theta_i = \frac{(t_i - t_H) \lambda_0}{q_v r_2^2} - \text{температура оболочки } (i = 0) \text{ либо топлива } (i = T);$$

t_H - начальная температура твэла;

R_1 - радиус сердечника;

$Z=L$ - координата сечения твэла, в котором наличие дефекта не влияет на распределение температуры (в расчете принимается $L = 10 \frac{r_2}{2}$);

$(\rho c)_T, (\rho c)_0$ - объемная теплоёмкость топлива и оболочки

$$\left(\frac{(\rho c)_T}{(\rho c)_0} = \alpha \right);$$

λ_T, λ_0 - теплопроводность топлива и оболочки
($\beta = \lambda_T / \lambda_0$).

Решение нестационарной трехмерной задачи теплопроводности (I)-(10) проводилось по программе, реализующей численный метод решения уравнения теплопроводности в декартовой, цилиндрической, сферической системах координат, на основе использования неявной конечно-разностной схемы представления дифференциальных уравнений. Система соответствующих конечно-разностных уравнений решалась итерационным методом.

2.3. Результаты расчета

Расчеты полей температур проводили для стержневых твэлов с керамическим топливом как для варианта наиболее тяжело разрешаемой задачи (по теплофизическим характеристикам топлива и размерам дефекта).

Диаметр твэла 6,9 мм ($r_2 = 3,45$ мм), толщина оболочки 0,45 мм ($r_1 = 3,00$ мм), $h = 2$ мм, $l = 2$ мм. Были приняты следующие теплофизические параметры:

Теплопроводность, Вт/(м·К):

оболочки ($T \approx 300$ К) 17
топлива ($T \approx 300$ К) 6

Объемная теплоемкость оболочки, Дж/(м³·К) .. 4,29 · 10⁶

В таблице приведены результаты расчетов (безразмерной) температуры поверхности оболочки θ_{FL} , где не сказывается влияние дефекта; температуры под центром дефекта, которая определяется из выражения

$$\theta_F^{\max} = \frac{t_o^{\max} - t_n}{q_v r_2^2} \lambda_o.$$

Расчет проводился для времени нагрева 0,5 с. Получено распределение температур по радиусу твэла для времени окончания нагрева ($\tau = 0,5$ с) (рис.2) и спустя 0,5 с (рис.3). Из рис.2 видно, что температура по толщине оболочки постоянна в области над дефектом и превышает температуру оболочки над границей дефекта ($\psi = 0,333$ рад). Очевидно, температура сердечника в зоне вне дефекта превышает температуру сердечника под дефектом, поскольку проводимость контакта в зоне дефекта равна нулю, а теплота поступает в эту область через соседние зоны, где проводимость контакта отлична от нуля. После отключения источника происходит процесс выравнивания температуры по сечению твэла (рис.4).

Зависимость от времени температуры оболочки над центром дефекта, в бездефектной зоне, а также температурного перепада показана на рис.4. Рост температуры поверхности в зоне дефекта и вне его при $\tau \approx 0,2$ с происходит приблизительно по линейному закону, а в дальнейшем несколько замедляется.

Температурный перепад достигает максимального значения в некоторый момент (не обязательно совпадающий с

**Значения температуры поверхности оболочки
твэла для различных значений числа Фурье**

F_0	θ_F^{\max}	θ_{FL}	$\Delta\theta = \theta_F^{\max} - \theta_{FL}$
$3,33 \cdot 10^{-2}$	$3,081 \cdot 10^{-2}$	$2,554 \cdot 10^{-2}$	$5,27 \cdot 10^{-3}$
$6,66 \cdot 10^{-2}$	$5,581 \cdot 10^{-2}$	$4,288 \cdot 10^{-2}$	$1,293 \cdot 10^{-2}$
$9,99 \cdot 10^{-2}$	$7,545 \cdot 10^{-2}$	$5,895 \cdot 10^{-2}$	$1,650 \cdot 10^{-2}$
$1,33 \cdot 10^{-1}$	$9,244 \cdot 10^{-2}$	$7,337 \cdot 10^{-2}$	$1,907 \cdot 10^{-2}$
$1,67 \cdot 10^{-1}$	$1,078 \cdot 10^{-1}$	$8,725 \cdot 10^{-2}$	$2,055 \cdot 10^{-2}$
$2,00 \cdot 10^{-1}$	$9,128 \cdot 10^{-2}$	$7,505 \cdot 10^{-2}$	$1,623 \cdot 10^{-2}$
$2,33 \cdot 10^{-1}$	$7,993 \cdot 10^{-2}$	$7,059 \cdot 10^{-2}$	$9,34 \cdot 10^{-3}$
$2,66 \cdot 10^{-1}$	$7,343 \cdot 10^{-2}$	$6,718 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-3}$
$3,00 \cdot 10^{-1}$	$6,922 \cdot 10^{-2}$	$6,508 \cdot 10^{-2}$	$4,14 \cdot 10^{-3}$
$3,33 \cdot 10^{-1}$	$6,638 \cdot 10^{-2}$	$6,343 \cdot 10^{-2}$	$2,95 \cdot 10^{-3}$
$4,00 \cdot 10^{-1}$	$6,282 \cdot 10^{-2}$	$6,114 \cdot 10^{-2}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$
$4,66 \cdot 10^{-1}$	$6,076 \cdot 10^{-2}$	$5,971 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$
$5,33 \cdot 10^{-1}$	$5,948 \cdot 10^{-2}$	$5,880 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$
$6,33 \cdot 10^{-1}$	$5,842 \cdot 10^{-2}$	$5,800 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$
$7,33 \cdot 10^{-1}$	$5,788 \cdot 10^{-2}$	$5,766 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
1,00	$5,742 \cdot 10^{-2}$	$5,734 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-4}$

временем окончания нагрева оболочки), после чего начинается его медленный спад, вызванный замедлением роста температуры, а также распространением тепла по оболочке. Температурный перепад прямо пропорционален интенсивности нагрева (в течение 0,5 с) и составляет при плотности тепловыделения $q_v \approx 10^8 \text{ Вт/м}^3$ приблизительно 1,5 К - значение, которое можно зафиксировать бесконтактными средствами измерения температуры.

На рис.5 показано распределение температуры поверхности оболочки твала по периметру в сечении $\chi = 0$. Центру дефекта соответствует значение $\psi = 0$, а границам дефекта - заданный размер ($h = 2 \text{ мм}$). Наибольшее изменение температуры происходит в области дефекта. Сначала происходит распространение возмущения температуры из области дефекта в соседние зоны по периметру оболочки в результате перетечки тепла. При $\tau = 0,2 \text{ с}$ это возмущение достигает области, соответствующей $\psi = 0,333 \text{ рад}$,

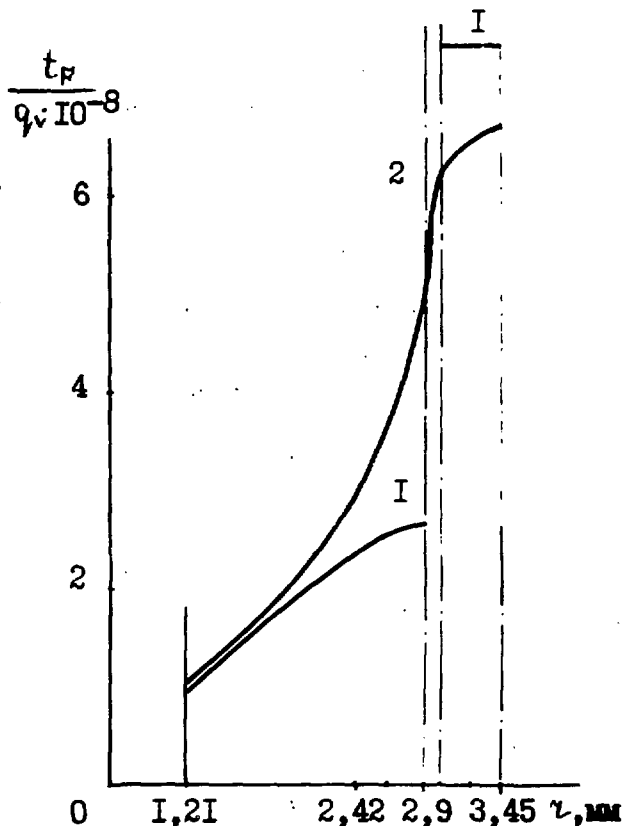


Рис.2. Распределение температуры по радиусу твала ($\tau = 0,5 \text{ с}$):
1 - $\psi = 0$; 2 - $\psi = 0,333 \text{ рад}$

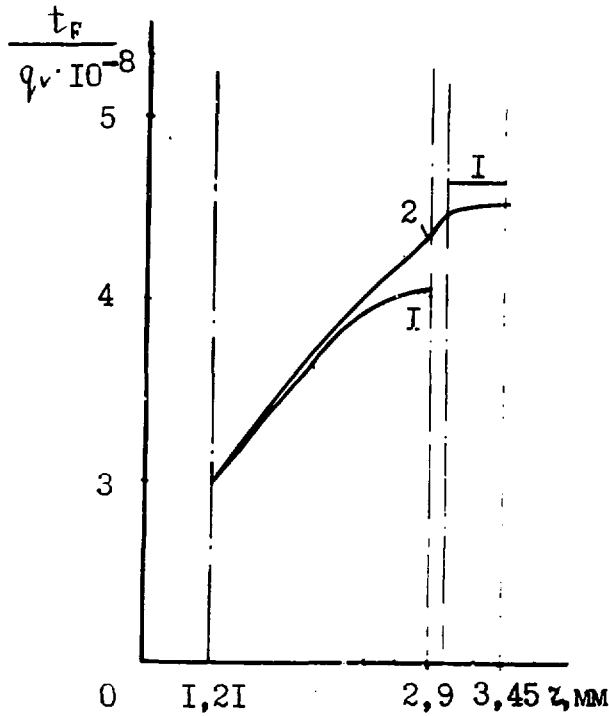


Рис.3. Распределе-
ние температуры по
радиусу твэла ($\tau =$
 $= 1,0$ с): 1 - $\psi =$
 $= 0$; 2 - $\psi =$
 $= 0,333$ рад

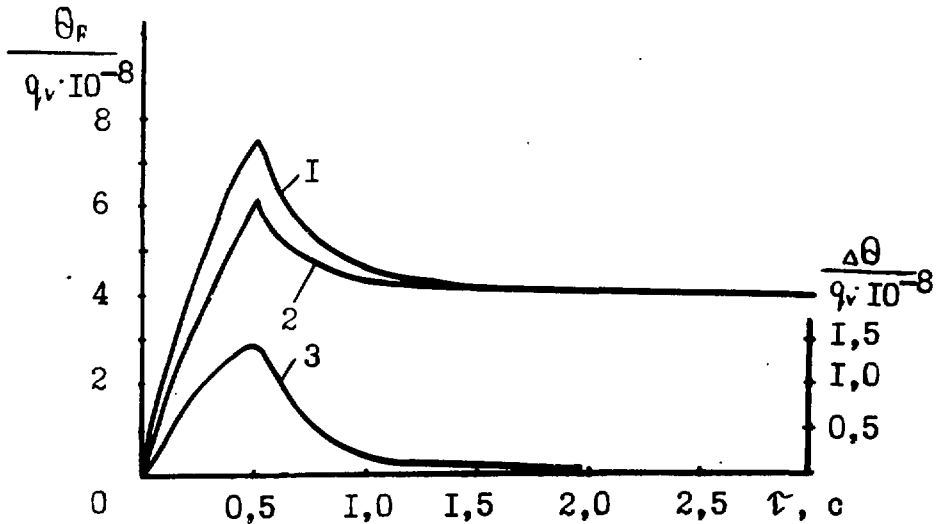


Рис.4. Изменение температуры поверхности твэла: в зоне
дефекта (1); в бездефектной зоне (2); $\Delta\theta = \theta_F - \theta_{FL}$ (3)
(время отключения источника 0,5 с)

а при дальнейшем нагреве образца область возмущения практически не увеличивается (см. рис.5).

При охлаждении образца (рис.6) в течение примерно 2 с происходит выравнивание поля температур по поверхности оболочки с одновременным снижением его уровня.

Основное изменение температуры поверхности оболочки по длине твэла происходит в области, равной примерно двум длинам дефекта (рис.7). За пределами этой зоны дефект практически не влияет на распределение температуры.

Из сказанного следует, что при нагреве образца в течение 1 с наличие дефекта типа отслоение приводит к увеличению температуры оболочки в области $2l \times 2 \frac{\pi}{4} r_2$. Это существенно превышает истинные размеры дефекта и затрудняет идентификацию его формы при тепловом контроле. Приведенные расчеты согласуются с экспериментальными в том, что при тепловых методах контроля фиксируются завышенные размеры дефекта.

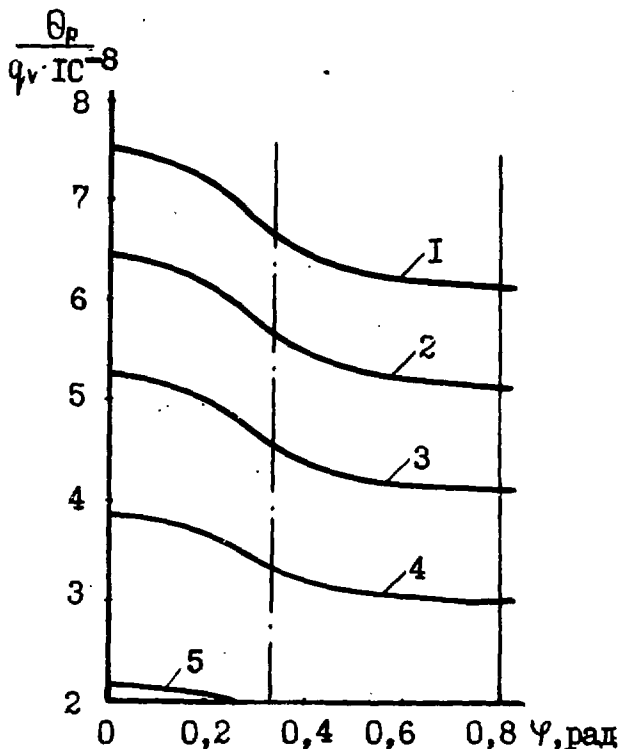


Рис.5. Зависимость температуры поверхности твэла по периметру от времени: 1 - 0,5 с; 2 - 0,4 с; 3 - 0,3 с; 4 - 0,2 с; 5 - 0,1 с (— — — граница дефекта)

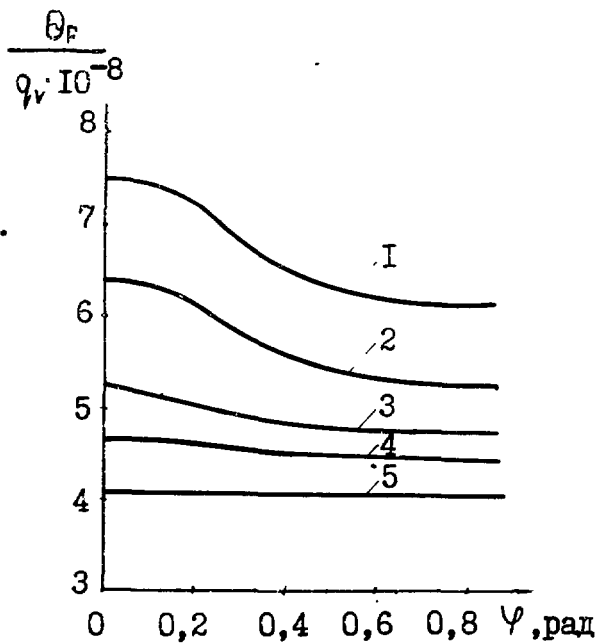


Рис.6. Зависимость температуры поверхности твала по периметру от времени: 1 - 0,5 с; 2 - 0,6 с; 3 - 0,8 с; 4 - 1,0 с; 5 - 2,0 с

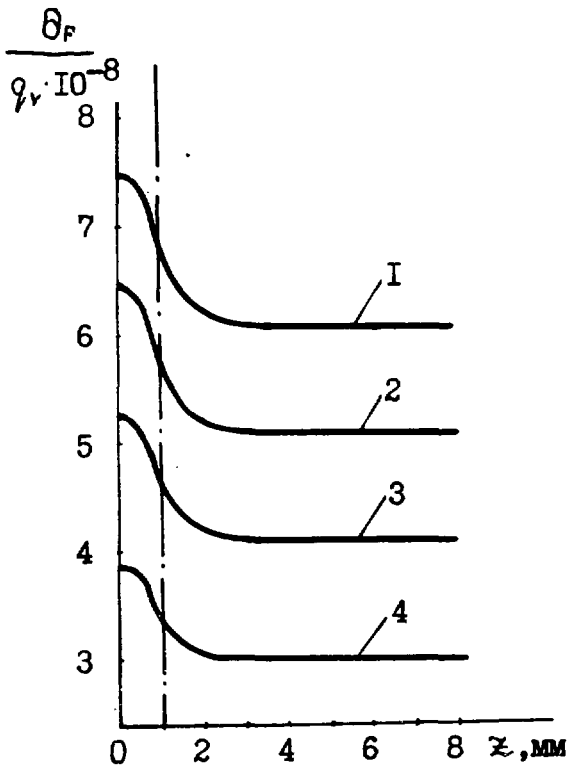


Рис.7. Зависимость температуры поверхности твала по длине от времени: 1 - 0,2 с; 2 - 0,3 с; 3 - 0,4 с; 4 - 0,5 с (--- граница дефекта)

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА

3.1. Экспериментальная установка

Как отмечалось в разд. I, среди тепловых методов неразрушающего контроля твзлов наиболее подходящими являются бесконтактные; широкое распространение получили инфракрасные методы регистрации температурных полей.

Тепловой контроль с использованием инфракрасных методов регистрации температуры предусматривает дистанционное исследование температурных полей по собственному тепловому излучению объектов в инфракрасном диапазоне. Его особенности:

- . высокая чувствительность к температурным сигналам (от десятых до тысячных долей градуса в зависимости от оптической системы и фотоприемника);

- . высокое быстродействие и, следовательно, высокая производительность контроля;

- . зависимость выходного сигнала от свойств контролируемой поверхности и канала передачи инфракрасного (ИК) излучения.

Сочетание высокой чувствительности и быстродействия позволяет рекомендовать этот метод для создания системы бесконтактного измерения температуры поверхности твзда.

Чувствительность инфракрасных приемников, используемых в установке, и систем бесконтактного измерения температуры составляет около $0,1-0,3$ К. Поэтому, как следует из расчетов, для создания достаточной для регистрации разности температур поверхности образца над дефектом и вне его необходимо обеспечить плотность тепловыделения в оболочке примерно 10^7-10^8 Вт/м³. При контроле твзлов нагрев оболочки, соответствующий таким значениям q_v , можно осуществить, воздействуя на неё:

- . лазерным излучением;

- высокочастотным электромагнитным полем;
- разрядом батареи конденсаторов;
- импульсом переменного тока.

Наиболее надежен и прост в эксплуатации для условий защитных камер нагрев импульсом переменного тока.

Согласно проведенным расчетам для обеспечения требуемого превышения температуры оболочки в месте дефекта длительность импульса электрического тока должна быть около 0,5 с при $q_v \approx 10^8$ Вт/м³. При меньших значениях q_v длительность импульса нужно увеличивать. Однако значительное его увеличение ограничивается "смазыванием" температурного перепада над дефектом вследствие растекания теплоты по прилегающим слоям, что приводит к значительному увеличению температуры оболочки и искажению реальной картины (появление термических напряжений в оболочке, увеличение термического сопротивления между топливом и оболочкой и т.п.).

Для проверки работоспособности методики по обнаружению дефектов типа отслоение был изготовлен имитатор твэла (рис.8).

Оболочка твэла цилиндрического типа (ϕ 6,9x0,35 мм) из стали 12Х18Н10Т. Засыпка представляет собой перемешанную и виброуплотненную смесь порошков:

Средняя теплопроводность смеси, Вт/(м·К)..... 7

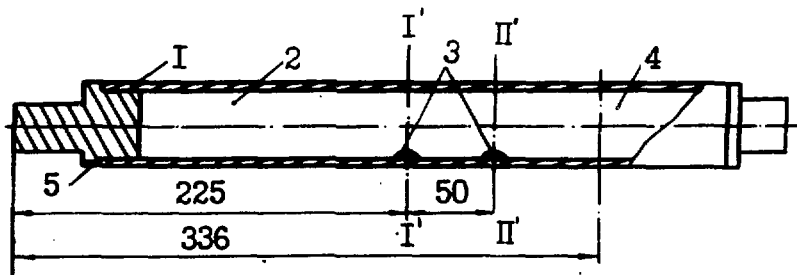


Рис.8. Имитатор твэла: I - оболочка; 2 - засыпка; 3 - дефекты; 4 - воздух; 5 - риска (I'-I', II-II'-сечения, в которых расположены дефекты)

Теплопроводность кремнеорганического лака, использованного в качестве искусственных дефектов и нанесенного на внутреннюю поверхность трубки, Вт/(м·К) 0,2-0,4

Сопротивление оболочки имитатора, Ом $6,85 \cdot 10^{-2}$

Чтобы обеспечить $q_v \approx 10^8$ Вт/м³, необходимо через оболочку в течение t с пропускать ток силой 81 А.

Для этой цели была изготовлена установка (рис.9), в которой осуществляется вращение имитатора со скоростью до 600 мин⁻¹. Для нагрева образца через него пропускается электрический ток силой 50 А, что соответствует $q_v = 4 \times 10^7$ Вт/м³.

Регистрация теплового потока с поверхности образца осуществлялась фоторезистором ФСТ-22-3А2 (охлаждается жидким азотом), имеющим следующие характеристики:

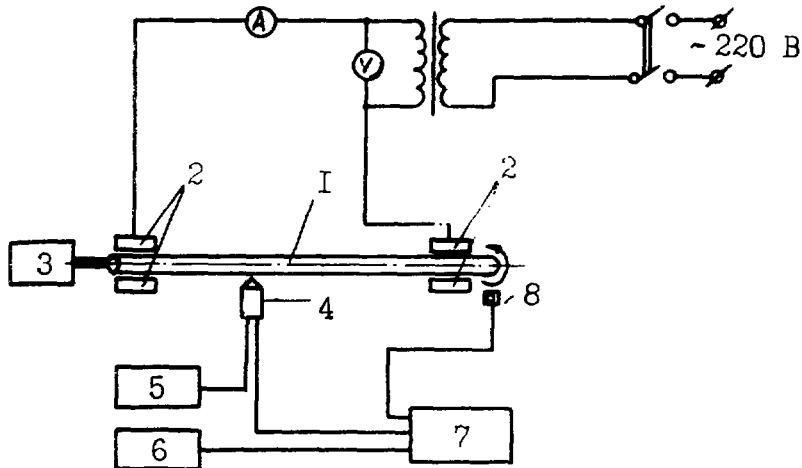


Рис.9. Схема экспериментальной установки: I - исследуемый образец; 2 - графитовые токоподводы; 3 - реверсивный двигатель РД-0,9; 4 - преобразователь ИК излучения (фоторезистор ФСТ-22, охлаждаемый жидким азотом); 5 - блок питания преобразователя; 6 - устройство установки "нуля" осциллографа; 7 - запоминающий осциллограф; 8 - блок синхронизации

Область спектральной чувствительности, мкм ..	1,8-10,0
Чувствительность, В/Вт	500
Постоянная времени, с	$5 \cdot 10^{-8}$
Размер чувствительной площадки, мм	3x3
Темновое сопротивление, МОм	0,3

Приемник инфракрасного излучения "считывает" температуру поверхности образца по периметру. Сигнал от него поступает на запоминающий осциллограф. Для согласования периода вращения образца с длительностью развертки осциллографа служит блок синхронизации, который позволяет регистрировать на экране осциллографа один период вращения образца.

3.2. Результаты измерений

При интерпретации результатов теплового неразрушающего контроля изделий возникают сложности, связанные с изменением излучательной способности поверхности образца. Даже при равномерном нагреве оболочки наличие на поверхности различного рода царапин, шероховатостей и других аналогичных дефектов приводит к появлению на термограмме изображений областей, которые могут быть ошибочно отнесены к дефектным.

Как правило, поверхности твэлов при идентичной технологии изготовления и обработки до установки в реактор имеют одинаковую излучательную способность. Поэтому помехи, вызванные неоднородностью поверхности, незначительны и определяются в основном шумом фотоприемника, флуктуацией собственного излучения и вибрацией образца при вращении.

На созданной установке были сняты термограммы имитатора твэла в сечениях с имеющимися дефектами. На рис.10,11 показаны термограммы имитатора в сечениях I'-I' и II'-II' без нагрева. Как видно, температура на поверхности имитатора одинакова, а её флуктуации объясняются помехами. При нагреве имитатора на термограммах (рис.12,13) появляются

явно выраженные экстремумы в центральной части, соответствующие координатам дефектов, расположенных в сечениях. Приведенные результаты оценочных измерений на имитаторе твэлов показывают возможность обнаружения дефектов типа отслоение топлива от оболочки по описанной методике.

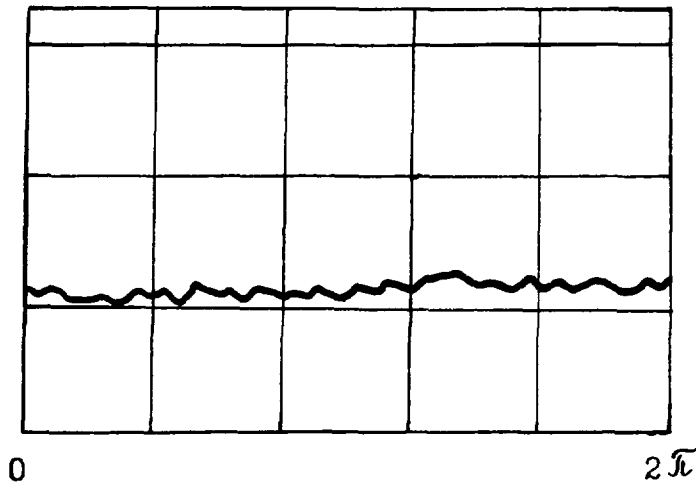


Рис. IО. Термограмма имитатора твэла с дефектом в сечении I'-I' без нагрева

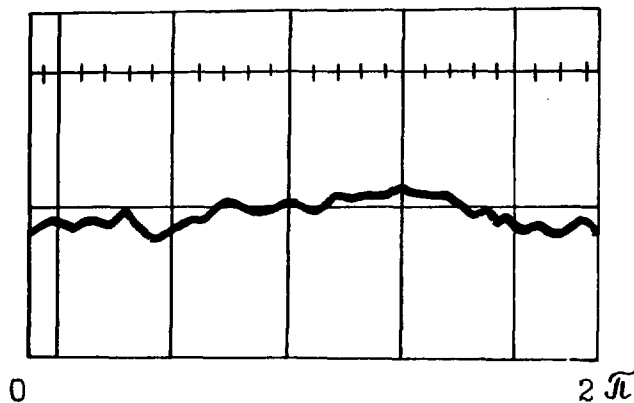


Рис. II. Термограмма имитатора твэла с дефектом в сечении II'-II' без нагрева

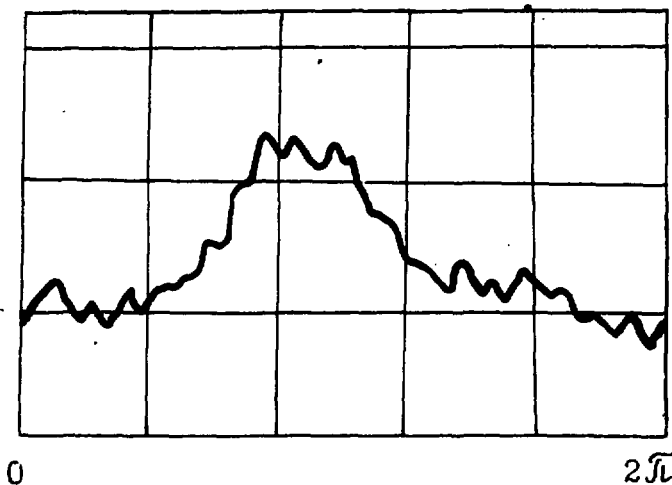


Рис.12. Термо-
грамма имитато-
ра твэла с де-
фектом в сече-
нии I'-I' с на-
гревом

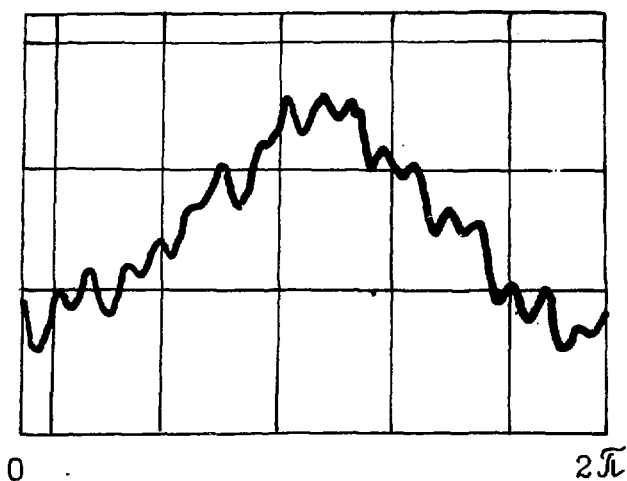


Рис.13. Термо-
грамма имитато-
ра твэла с де-
фектом в сече-
нии II'-II' с на-
гревом

ВЫВОДЫ

1. Показана целесообразность развития тепловых методов неразрушающего контроля твэлов.

2. Разработанные авторами методика и устройство позволяют производить неразрушающий контроль тепловыми методами и при соответствующей доработке могут быть использованы в защитных камерах.

3. Проведенные расчеты нестационарного температурного поля в твэле показали точную оценку температурного перепада над дефектом в зависимости от различных режимных параметров.

4. Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с расчетными и показывают возможность обнаружения дефектов типа отслоение топлива от оболочки размером более 2x2 мм.

5. Для внедрения методики в защитных камерах целесообразно провести более широкий объем расчетных исследований со значительной вариацией параметров для определения степени применимости этих методов контроля к различным типам твэлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. New methods non-destructive testing. Atom, England, 1983, № 319, p.108.
2. Green D., Collingham R., Fisher R. Infrared NDT of Electrical Fuel Pin Simulators Used in LMFBR Thermal Hydraulic Tests.- Mater. Evaluations, 1973, December, p.247-252.
3. Day C. Infrared Testing of Bonds on Niobium Carbide Coated Graphite Support Blocks: Rep. BNWL-787. Richland, Washington, USA, 1968.
4. Левитин И.Б. Применение инфракрасной техники в народном хозяйстве. Энергоиздат: Ленинградское отделение, 1981.- 263 с.
5. Бекешко Н.А. Термография и её применение для неразрушающих методов исследований. М.: Машиностроение, 1969.
6. Баранов В.М. Неразрушающий контроль элементов конструкций физико-энергетических установок. М.: Атомиздат, 1982.- 86 с.

7. Варганов И.С., Лебедев Г.Т., Коннов В.В. Современное состояние и основные проблемы тепловых методов неразрушающего контроля.- Измерение, контроль, автоматизация, 1983, № 3, с.80-93.
8. Пак В., Воронцов Б.И. Тепловые методы неразрушающего контроля с использованием контактных средств исследования температурных полей.- Дефектоскопия, 1974, № 2, с.90-96.
9. Попов Ю.А. Некоторые особенности применения активного теплового метода контроля при одностороннем расположении источника тепла и приемной части теплового дефектоскопа.- Там же, 1975, № 2, с.55-63.
10. Рыкалин Н.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975.- 296 с.
11. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. М.-Л.: Энергия, 1965.- 551 с.
12. Вологдин В.В. Трансформаторы для высокочастотного нагрева. М.-Л.: Машиностроение, 1965.- 366 с.
13. Arutunian G., Renius O. Application of Scan Laser Heating for Thermal Imagery Non-destructive Testing.- Techn. Rep. AD-771052.- Army Tank Automotive Command, Warren. USA: Michigan, 1973, October.
14. Бекешко Н.Ф. Сравнение контактных и бесконтактных методов теплового контроля.- Дефектоскопия, 1978, № 8, с.96-100.
15. Пак В. Новые контактные методы измерения температуры поверхности твердых тел со следящей компенсацией тепловода. М.: Стандарты, 1972.
16. Абрамович Б.Г., Картавец В.Я. Цветовые индикаторы температуры. М.: Энергия, 1978.- 342 с.
17. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. Киев: Наукова думка, 1979.- 768 с.

18. Геращенко О.А., Федоров В.Г. Тепловые и температурные измерения. Киев: Наукова думка.- 304 с.
19. Гавинский Ю.В., Ворожцов Б.И., Немиров Ю.В. Использование околоповерхностных термоэлектрических приемников при тепловом контроле слоистых конструкций.- Дефектоскопия, 1976, № 4, с.40-47.
20. Марков М.Н. Приемники инфракрасного излучения. М.: Наука, 1968.
21. Бекешко Н.А. Методы и аппаратура ТНК качества изделий и материалов.- Дефектоскопия, 1972, № 46, с.107-114.
22. Бекешко Н.А. ТМНК изделий и элементов радиоэлектроники.- Измерение, контроль, автоматизация, 1979, № 5, с.13-24.
23. Вавилов В.П., Горбунов В.И. Тепловые методы неразрушающего контроля многослойных структур.- Дефектоскопия, 1981, № 4, с.5-22.
24. Green D. High Speed Thermal Image Transducer for Practical NDT Applications.- Mater. Evaluations, 1970, № 5, p.97-103.
25. Green D. Principles and Applications of Emittans Independent Infrared NDT.- Appl. Optics, 1968, 7, № 9, p.1779-1788.
26. Попов Ю.А., Карпельсон А.Е., Цейтлин С.Д. Сравнительная оценка выявляемости типа несплошностей при различных режимах и способах активного контроля.- Дефектоскопия, 1978, № 9, с.44-53.
27. The Infrared Observer. Sweden, 1980, № 2.
28. The Infrared Observer. -Ibid, 1981, № 5-8.
29. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978.- 400 с.
30. Геращенко О.А., Блюх А.Г. Радиометр: А.с.723392 (СССР).- Б.И., 1980, № II.

31. Рапопорт Д.А., Потапов А.И. Тепловой контроль полимерных материалов односторонним методом.- Дефектоскопия, 1978, № 6, с.85-97.
32. Попов Ю.А., Карпельсон А.Е. Режим теплового контроля с максимальными температурными перепадами над дефектом.- Там же, 1977, № 1, с.59-64.
33. Вавилов В.П., Горбунов В.И. О влиянии коэффициента излучения на результаты измерения температурных полей при тепловом методе контроля.- Там же, № 1, с.65-71.
34. Шищов В.С., Рапопорт Д.А., Будадин О.Н. Автоматизированный комплекс дефектоскопии с обработкой результатов на ЭВМ.- Там же, 1982, № 3, с.72-75.
35. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. М.: Мир, 1978.- 415 с.
36. Карпельсон А.Е., Попов Ю.А., Упадышев А.Б. Определение оптимального режима активного теплового контроля изделий с нарушением плотности.- Дефектоскопия, 1975, № 2, с.47-55.
37. Вавилов В.П., Такасейчук С.Ю. Анализ трехмерной задачи теплового контроля.- Там же, 1981, № 2, с.47-56.
38. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.- 599 с.
39. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. М.: Высшая школа, 1978.- 328 с.
40. Карслоу Х.С., Егер Д.К. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.- 478 с.

Рукопись поступила в ОПИНТИ
15.01.84, обработана 25.04.84.
Окончательно подготовлена
авторами 16.07.84.

Николай Михайлович Максимов
Валерий Анатольевич Солдатенко
Виктор Иванович Петровичев
Сервер Ерфанович Салимов
Константин Александрович Александров
Дмитрий Александрович Куров

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО
МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЭЛОВ**

Редактор Д.В.Волкова

Корректор Т.В.Левина

Подписано в печать 29.03.85. Т-09303. Формат 60x90 1/16.
Печать офсетная. Печ.л.2,3. Уч.-изд.л. 2. Тираж 170 экз.
Зак.тип. № 721. Цена 30 коп. Индекс 3624.

**Отпечатано в Научно-исследовательском институте
атомных реакторов им. В.И.Ленина
433510, Дмитровград-10, НИИАР**

30 коп.

Индекс 3624

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ТЕПЛОВОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ ТВЭЛОВ

Препринт. НИИАР-15(661), 1985, 1-32