

SU8002705

ИАЭ-2946



Ордена Ленина

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

Бородин А. В., Вихров В. И., Корнеев В. Т.

**Применение методов гамма-сканирования
и нейтронной радиографии
для контроля состояния твэлов
после их испытания
в петлевых каналах реактора МР**

Москва 1978

ОФДЕЛА ЛЕНИНА
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И.В.КУРЧАТОВА

Бородин А.В., Вихров В.И., Корнеев В.Т.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГАММА-СКАНИРОВАНИЯ
И НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТВЭЛОВ
ПОСЛЕ ИХ ИСПЫТАНИЯ
В ПЕТЛЕВЫХ КАНАЛАХ РЕАКТОРА МР

Москва
1978

Ключевые слова: неразрушающий контроль, теплоделяющий элемент, метод гамма-сканирования, нейтронная радиография, топливо, дефектоскопия, экран-конвертор.

В работе описаны методы гамма-сканирования и нейтронной радиографии, применяемые для неразрушающего контроля тепловыделяющих элементов. Приведены некоторые результаты послереакторного исследования "горячих" твэлов типа ВВЭР и РБМК.

1. ВВЕДЕНИЕ

На исследовательском реакторе МР [1] выполняется широкая программа по петлевым испытаниям опытных тепловыделяющих сборок. При послереакторных исследованиях необходимо иметь наиболее полные сведения о поведении топлива в твэлах при облучении. Для исследования состояния топлива в твэлах применяют различные методы контроля как разрушающие, так и неразрушающие. Разрушающие методы требуют больших затрат на оборудование, аппаратуру, специальные лаборатории, цепочку "горячих" камер и, кроме этого, разрушающие методы позволяют получать информацию лишь о малых участках твэлов. Недостатком разрушающих методов является также сильное загрязнение исследовательской аппаратуры и оборудования радиоактивными продуктами при работе с облученными тепловыделяющими элементами. Достоинство неразрушающих методов контроля в том, что они позволяют:

- экспрессно производить контроль всего твэла. Причем дают возможность осуществлять промежуточный контроль твэлов в процессе испытаний;
- целенаправленно определять отдельные участки твэлов, представляющие интерес для детального изучения топлива более чувствительными методами разрушающего контроля;
- избежать загрязнения оборудования радиоактивными продуктами.

В настоящее время для исследования облученных твэлов применяется довольно большое количество неразрушающих методов, использующих различные типы проникающих излучений (ультразвук, электромагнитные методы, рентгеновское и "жесткое" гамма-излучение, нейтронное излучение и т.д.).

Широкое применение в послереакторных исследованиях облученных твэлов неразрушающими методами получил метод гамма-сканирования [2], как один из основных методов. В последнее время интенсивно развивается и все более важное значение для неразрушающего контроля твэлов приобретает метод нейтронной радиографии [3-5], который позволяет получать видимое нейтронное изображение твэла с имеющимися в нем дефектами на фотопленке или других детекторах. В настоящей работе приводится краткое изложение методов гамма-сканирования и нейтронной радиографии, которые используются в ИАЭ им. И.В.Курчатова для исследования облученных твэлов, рассматриваются аппаратура и техника экспериментов, приводятся некоторые результаты исследования твэлов указанными методами, обсуждаются области применения каждого метода.

2. МЕТОД ГАММА-СКАНИРОВАНИЯ

Гамма-сканирование облученных тепловыделяющих элементов производится на установке, схематическое устройство которой показано на рис. 1. Установка состоит из следующих блоков:

- устройства для перемещения твэлов;
- системы коллиматоров;

- полупроводникового детектора гамма-излучения ;
- комплекса электронных приборов.

Устройство для размещения и перемещения исследуемых твэлов представляет собой тележку с уголковыми держателями, рассчитанными под твэлы разного диаметра. Тележка располагается в "горячей" технологической камере. С помощью тросовой тяги и электромотора тележка с исследуемым твэлом может перемещаться перед системой коллиматоров. Примененная линейная скорость перемещения (0,5 мм/сек) позволяет детально проследить за изменениями в концентрации различных продуктов деления по длине твэлов. Система свинцовых коллиматоров размещается в ступенчатой проходке в стене, разделяющей "горячую" камеру от операторского помещения. В зависимости от задач исследований геометрия коллиматоров может меняться посредством замены их со стороны операторского помещения. Используемая геометрия коллиматоров: щель 1x13 мм и круглые отверстия различного диаметра. В качестве детектора гамма-излучения применен германиевый коаксиальный кристалл $Ge(Li)$ типа ДТК с объемом чувствительной области 28,5 см³, размещаемый в криостате. Энергетическое разрешение детектора составляет ~ 1,5% по гамма-линии цезия-137 ($E_{\gamma} = 662$ кэВ). Для снижения фона детектор окружен защитой из свинца толщиной 50 мм. Блок-схема электронной части установки для гамма-сканирования приведена на рис. 2. Сигналы с детектора поступают на маломощное спектрометрическое устройство УМШ-2, далее сигналы поступают на анализаторную систему типа $NTA-1024$. Наличие в схеме анализатора устройства, позволяющего дискриминировать поступающие на его вход импульсы как по нижнему, так и по верхнему уровню, дает возможность экспериментатору, в зависимости от задач исследования записывать на ленту самописца как интенсивность полного гамма-спектра, так и интенсивность излучения отдельной гамма-линии (по фотопику определенной энергии), т.е. относительное распределение того или другого осколка деления по длине твэла. Системами регистрации информация служит самописец или цифropечатанное устройство.

Метод гамма-сканирования облученных элементов позволяет решать ряд важных задач радиационного материаловедения:

- определять распределение и находить достигнутую глубину выгорания топлива в облученных твэлах ;
- осуществлять дефектоскопию топливного сердечника. При сканировании твэлов по длине с применением достаточно узкого щелевого коллиматора можно проследить за целостностью топлива в пределах одной таблетки, находить возможные зазоры между таблетками и места дефектности ;
- изучать распределение продуктов деления по длине элементов. По характеру распределения осколков деления цезия-137 и рутенция-106 находить наиболее термически напряженные места в твэлах и зоны частичного расплавления сердечника ;
- оценивать относительную плотность заполнения топлива по длине и выявлять возможный массоперенос ;
- находить нечетметичные элементы ;
- оценивать накопление трансурановых элементов.

3. МЕТОД НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ

Нейтронное радиографирование облученных тепловыделяющих элементов, проходящих испытание на реакторе МР ИАЭ им. И.В.Курчатова, проводится на установке НР-11Р [6]. Принципиальная схема установки приведена на рис. 3, а общий вид этой установки, смонтированной в зале реактора МР, показан на рис. 4.

Установка состоит из следующих основных узлов:

- канала коллиматора ;

- радиграфической камеры ;
- транспортного и приемного контейнеров ;
- ловушки нейтронного и гамма-излучений ;
- снимочного устройства ;
- экранов конверторов ;
- фотоконтейнеров ;
- пульта управления установкой.

Нейтронное радиграфирование облученных твэлов и получение нейтронных радиограмм выполняется следующим образом. Облученный тепловыделяющий элемент, подлежащий исследованию, в "горячей" камере загружается в специальный алюминиевый пенал, который затем дистанционно помещается в транспортный контейнер установки. С помощью захватного устройства приемного контейнера пенал с тепловыделяющим элементом перемещается из транспортного контейнера в радиграфическую камеру. Участок твэла, который подлежит нейтронному радиграфированию, устанавливается над вертикальным каналом-коллиматором, выходящим из отражателя активной зоны реактора МР. Длина участка твэла, который может быть просвечен за одну экспозицию, равна 200 мм. Для проведения просвечивания выбранного участка твэла производится открытие пучка нейтронов путем откачки воды из водяного затвора канала-коллиматора и открытия диафрагмы, выполненной из карбида бора, которые перекрывают пучок нейтронов в канале-коллиматоре. После открытия водяного затвора и диафрагмы коллимированный пучок нейтронов падает на исследуемый участок твэла. Падающие на твэл нейтроны частично поглощаются, частично рассеиваются ядрами, входящими в состав топлива и конструкционных материалов твэла. Прошедшие через твэл нейтроны, которые не испытали никакого взаимодействия с его ядрами, и несущие, таким образом, нейтронное изображение просвечиваемого участка твэла взаимодействуют с ядрами экрана-конвертора, установленного над просвечиваемым твэлом. В результате частичного или полного поглощения нейтронов, прошедших через твэл, ядрами экрана-конвертора в последнем образуются радиоактивные или возбужденные ядра, которые распределяются в экране-конверторе в соответствии с распределением нейтронов, прошедших через твэл, и законом поглощения нейтронов в экране-конверторе. Возникающие в экране-конверторе радиоактивные или возбужденные ядра излучают гамма-кванты, бета-частицы или электроны внутренней конверсии. Это вторичное излучение, наведенное нейтронами в экране-конверторе и являющееся носителем нейтронного изображения исследуемого твэла, регистрируется фотопленкой путем авторадииграфирования. Авторадииграфирование может производиться одновременно с экспозицией экрана-конвертора в пучке нейтронов (прямой метод) или после удаления экрана-конвертора из пучка (метод переноса). При просвечивании высокоактивных твэлов применяется метод переноса. В качестве экранов-конверторов при проведении исследований твэл использовались экраны-конверторы из гадолиния (при прямом методе) и экраны-конверторы из диспрозия (при методе переноса). Толщина экранов-конвертора из гадолиния и диспрозия была равна 0,1 мм. Время экспозиции (продолжительность просвечивания твэлов и регистрации нейтронов экраном-конвертором) зависит от величины потока нейтронов в пучке, типа твэла, обогащения топлива в твэле, типа используемого экрана-конвертора, а также типа фотопленки, применяемой для получения фотографического изображения просвечиваемых твэлов. При потоке тепловых нейтронов на выходе пучка $\sim 2 \cdot 10^{11}$ нейтронов/см²с время экспозиции при использовании экранов-конверторов из гадолиния и диспрозия при просвечивании твэлов типа ВВЭР и РБМК составляло $\sim 0,5-10$ мин. Фон гамма-излучения на выходе из пучка был равен ~ 250 Р/час. Время авторадииграфирования для получения изображения на фотопленке при использовании метода переноса равнялось обычно 1-4 периодам полураспада наведенной в экране-конверторе активности (для диспрозиевого экрана период полураспада равен 2,3 часа). Для получения нейтронных радиограмм применялась фототехническая пленка типа ФГ-32 и

ФТ-41, обработка которой после экспозиции проводилась в рекомендованном для этих пленок проявителе.

Метод нейтронной радиографии с успехом может применяться для получения сведений о следующих характеристиках твэлов и их изменении в процессе испытания в реакторе:

- о форме и размерах сердечника ;
- о радиальных и осевых зазорах между сердечником и оболочкой твэла ;
- о наличии пустот и внутренних отверстиях в твэлах ;
- о сколах, трещинах, разрушении топлива ;
- о степени обогащения топлива в твэлах ;
- о наличии отдельных дефектов в оболочке и сварных соединениях, приводящих к разгерметизации твэлов.

4. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ ГАММА-СКАНИРОВАНИЯ И НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТВЭЛОВ

В данном разделе рассматриваются результаты по совместному использованию методов гамма-сканирования и нейтронной радиографии применительно к некоторым облученным твэлам типа ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и РБМ-К.

На рис. 5 и 6 приведены фотографии нейтронного изображения и кривые гамма-сканирования для периферийного и центрального участков твэла ВВЭР-440. Из сравнения результатов сканирования и нейтронной радиографии следует, что для периферийного участка твэла, где линейная мощность при облучении не превышала 200 Вт/см, наблюдается четкое соответствие расположения зазоров между стержнями с узкими минимумами активности на кривых сканирования (рис. 5). Для средней части элемента, облучавшейся при линейной мощности 400 Вт/см (рис. 6), на кривой гамма-сканирования наблюдаются узкие максимумы активности, соответствующие месторасположению стыков стержней топлива. Гамма-спектральный анализ, выполненный в этих максимумах, показал, что они обусловлены активностью изотопов цезия-137 и цезия-134. Изотопы цезия при температурах топлива, превышающих 1400°C, мигрируют по объему таблеток и концентрируются на свободных поверхностях, в частности, на торцах таблеток. Из анализа радиограмм элементов следует, что количество трещин в топливных стержнях возрастает по мере продвижения от периферийных участков твэла к его середине. При этом наблюдается постепенное заполнение центрального отверстия двуокисью урана с ростом линейных тепловых нагрузок, а при нагрузках 400 Вт/см центральное отверстие заполняется двуокисью урана полностью.

На рис. 7 и 8 приведены фотографии нейтронного изображения и кривые гамма-сканирования для участков элемента типа ВВЭР-1000, облучавшихся соответственно при линейных мощностях 450 Вт/см и 300 Вт/см. Для участка твэла, облучавшегося при линейной мощности 450 Вт/см (рис. 7) отмечается уменьшение центрального отверстия в таблетках или почти его полное зашлюзование. В таблетках участков твэлов работающих при таких нагрузках отмечаются поперечные трещины, делящие таблетки на 2-3 части. Для участка твэла, облучавшегося при линейной мощности менее 300 Вт/см (рис. 8) центральное отверстие в таблетках не изменило свою форму. В этих таблетках помимо небольшого количества поперечных трещин имеются характерные продольные трещины. На рис. 9 показана верхняя часть этого элемента, где наблюдается сильное раскрошивание таблеток на блоки.

На основании данных гамма-сканирования и нейтронных радиограмм облученных твэлов возможно определять их негерметичность. В качестве иллюстрации на рис. 10 приведены кривые гамма-сканирования и нейтронные радиограммы опытных укороченных твэлов типа РБМ-К герметичного (рис. 10а) и негерметичного (рис. 10б). Как видно из рис. 10б разгерметиза-

ция элемента произошла в области сварки оболочки с торцовой трубкой. Этот дефект отчетливо виден по имеющимся на нейтронной радиограмме характерным "усикам", обусловленных возможным проникновением в имеющийся зазор между оболочкой и пробкой двуокиси урана и сильнопоглощающих осколков деления. Кривые распределения продукта деления цезия-137 по длине твэлов показывают, что для герметичного элемента имеет место типичное для нагрузок 400 Вт/см распределение изотопа цезия по топливному сердечнику с максимумами активности по торцам таблеток двуокиси урана. В случае негерметичного элемента максимумы активности цезия-137 на стыках таблеток отсутствуют в связи с выходом материнских продуктов цезия - изотопов ксенона и йода, а также возможно и цезия через дефект оболочки в теплоноситель.

На нейтронных радиограммах рис. 10а и 10б отчетливо видно возникновение внутреннего отверстия в брикетах топлива, которое отсутствовало в топливе в исходном состоянии.

Выводы

Сравнение возможностей дефектоскопии сердечников твэлов методом гамма-сканирования и нейтронной радиографии показывает, что метод гамма-сканирования может только указывать на наличие дефектов в сплошности сердечника твэла, но не идентифицировать вид дефекта (скол таблетки, блочное разрушение и т.п.). Кроме того, по кривым гамма-сканирования, ввиду недостаточной разрешающей способности невозможно установить форму и ориентацию трещин в топливе, изменение формы таблеток топлива. Однако метод гамма сканирования позволяет определять энерговыделение по длине твэлов, находить глубину выгорания топлива, исследовать явления миграции продуктов деления, что затруднительно или невозможно определить методом нейтронной радиографии.

Большое достоинство метода нейтронной радиографии состоит в наглядности получаемых результатов.

Таким образом, методы гамма-сканирования и нейтронной радиографии удачно дополняют друг друга и позволяют получать важные сведения о состоянии топлива в облученных твэлах.

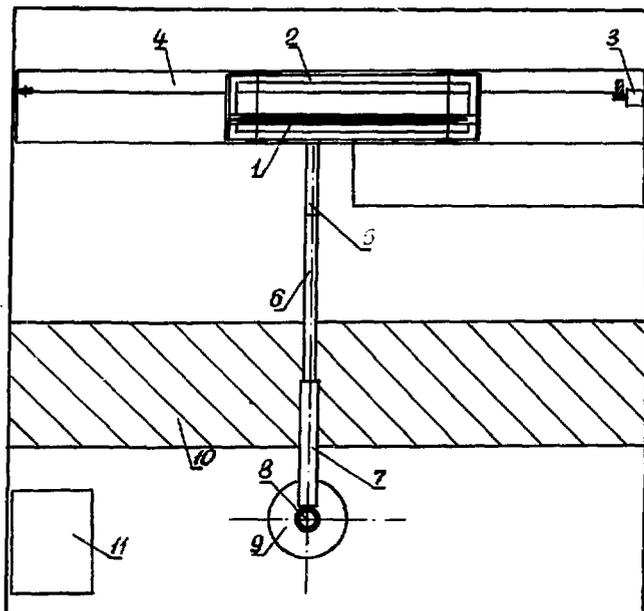


Рис. 1. Схематическое изображение установки гамма-сканирования: I - исследуемый твэл, 2 - тельне, 3 - электромотор, 4 - поддон, 5 - коллиматор IxI3 мм, 6 - коллиматор øI4, 7 - коллиматор ø7, 8 - детектор Be(Li), 9 - защита гамма-датчика, 10 - передняя стенка "горячей" камеры, 11 - измерительная аппаратура

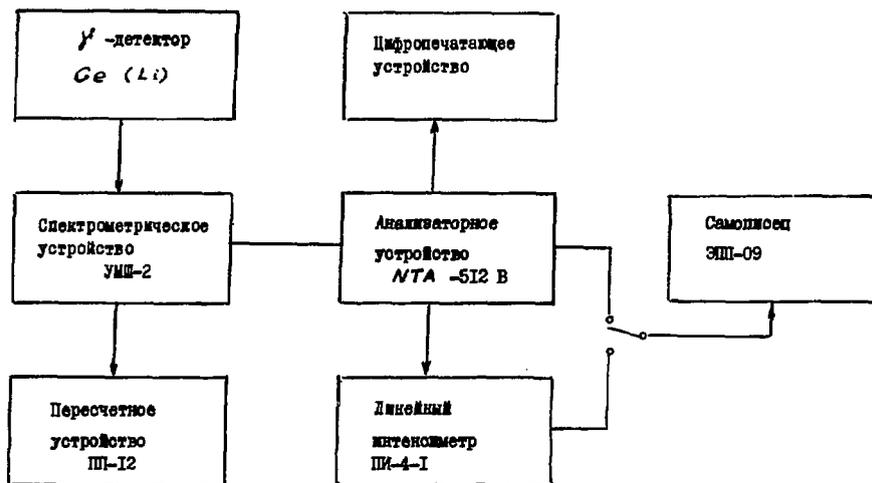


Рис. 2. Блок-схема электронной части установки гамма-сканирования

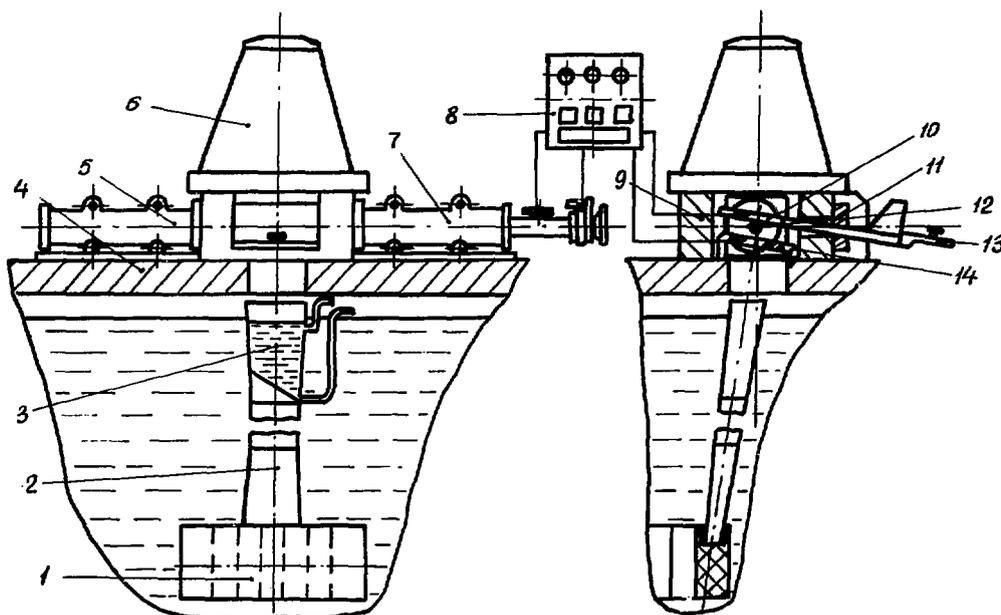


Рис. 3. Схема установки для нейтронного радиографирования телел:

1 - активная зона, 2 - канал-коллиматор, 3 - водяной затвор, 4 - защитная плита, 5 - контейнер транспортный, 6 - дозупка нейтронов, 7 - контейнер приемный, 8 - пульт управления, 9 - радиографическая камера, 10 - снимочное устройство, 11 - защитная штора, 12 - исследуемый телел, 13 - фотоконтейнер, 14 - диафрагма

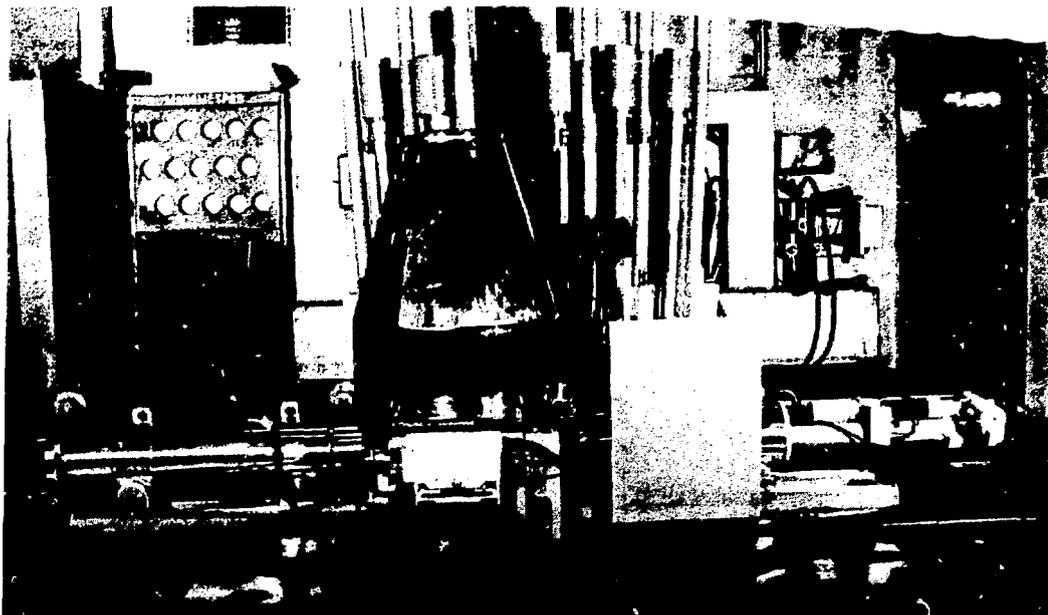


Рис. 4. Установка для нейтронной радиографии твэлов, смонтированная в зале реактора МР

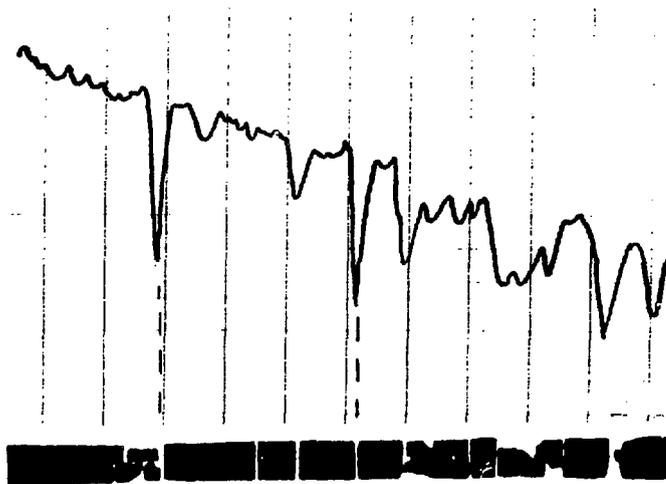


Рис. 5. Кривая гамма-сканирования и нейтронная радиограмма периферийного участка твэла типа ВВЭР-440 (линейная мощность 200Вт/см)

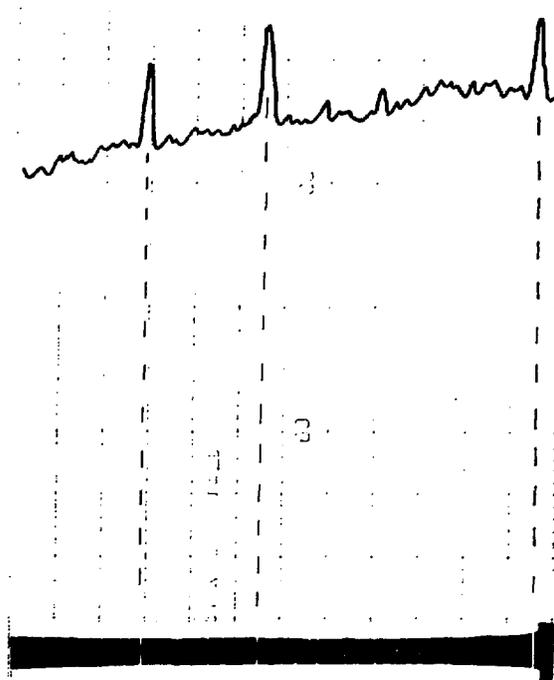


Рис. 6. Кривая гамма-сканирования и нейтронная радиограмма центрального участка твэла типа ВВЗР-440 (линейная мощность 400 Вт/см)

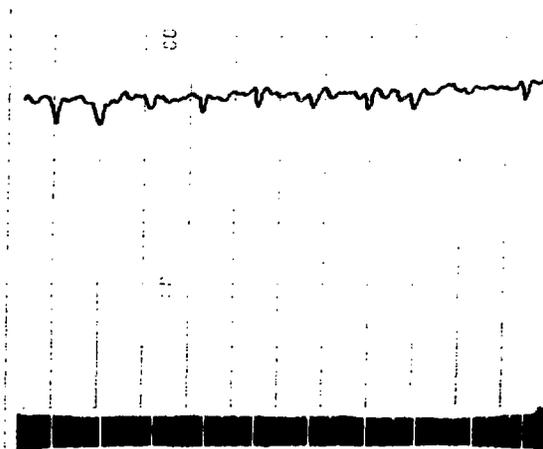


Рис. 7. Кривая гамма-сканирования и нейтронная радиограмма участка твэла типа ВВЗР-1000 (линейная мощность 450 Вт/см)

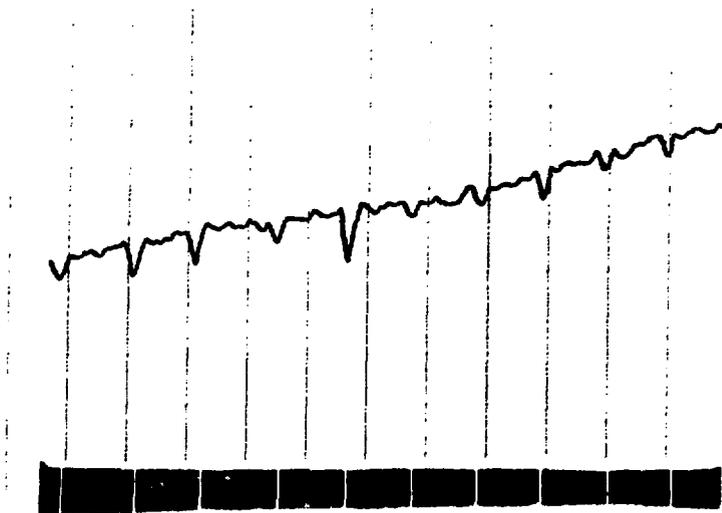


Рис. 8. Кривая гамма-сканирования и нейтронная радиограмма участка твэла типа ВВЭР-1000 (линейная мощность 300 Вт/см)

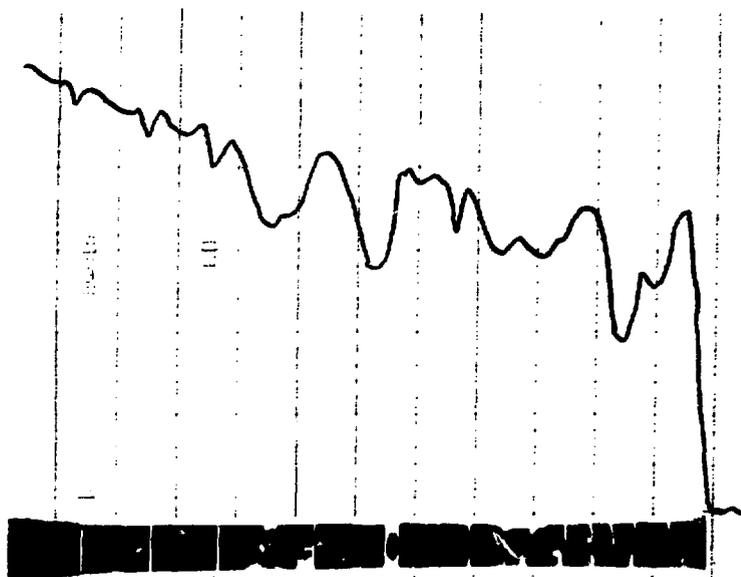


Рис. 9. Кривая гамма-сканирования и нейтронная радиограмма верхнего участка твэла типа ВВЭР, где наблюдается сильное расхождение таблеток топлива

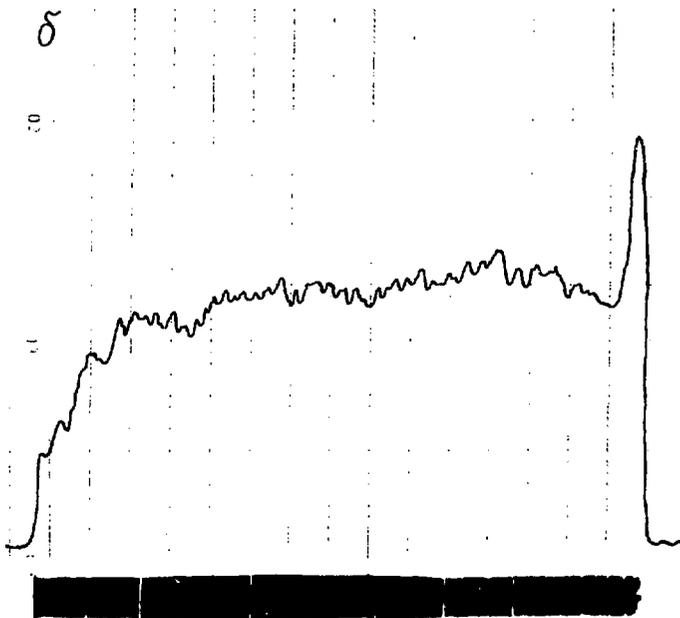
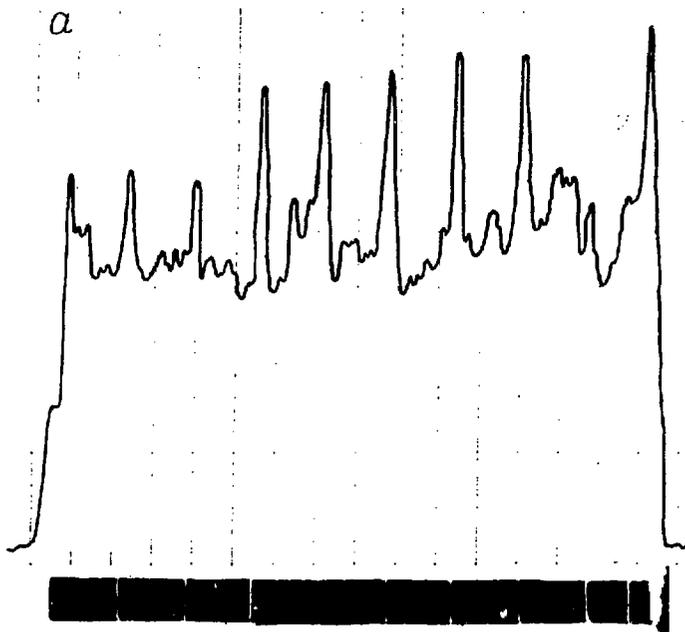


Рис. 10. Кривые гамма-сканирования и нейтронные радиограммы облученных герметичного (а) и негерметичного (б) опытных укороченных ТВЭЛов

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гончаров В.В. и др. Создание исследовательского реактора МР для испытаний теплового-ядерных элементов и материалов. Доклад 28/P-323, представленный на III Международную конференцию по использованию атомной энергии в мирных целях, Лозанна, 1965.
2. Правдик Н.Ф. и др. - "Атомная энергия", 1966, т. 21, вып. 2, с. 92.
3. Berger H. *Neutron Radiography Methods Capabilities and Applications*, Elsevier, Amsterdam, 1965.
4. Корнеев В.Т. Нейтронная радиография и ее применение для контроля и исследований теплового-ядерных элементов ядерных реакторов. Препринт ИАЗ-2408, М., 1974.
5. Тудяков Н.Д., Штань А.С. Основы нейтронной радиографии. М., Атомиздат, 1975.
6. Установка для нейтронной радиографии НР-11Р. ВИАИ. Информационный листок № 74-1709.



Технический редактор Е.Д.Маркова.

Т-20906. 22.II.77 г. формат 60x90/8. Уч.-изд.л 0,98.
Тираж 150. Заказ 1708. Цена 10 коп. ОНТИ. ИАЗ.

10 коп.