

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДА ГАДОЛИНИЯ В ТВЭЛАХ

В.А. Баранов, В.В. Бразовский

Томский политехнический университет, г. Томск

E - mail: altaikompoz@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены и проанализированы методы применимые к контролю содержания оксида гадолия в собранных топливных элементах ядерного реактора АЭС и выбран вихретоковый метод. Разработаны теоретические основы и создан приборный комплекс контроля, способный достаточно точно отображать процентное содержание оксида гадолия, и неподверженный влиянию ферромагнитных примесей в топливном элементе и главным преимуществом созданного приборного комплекса является достаточно высокая скорость контроля, при обеспечении необходимой достоверности результатов.

Ключевые слова: атомный реактор, тепловыделяющий элемент, оксид гадолия

Введение

В настоящее время, по мере развития технического прогресса, в жизни людей все актуальнее становятся вопросы экологии и безопасности различных промышленных объектов. И как следствие этого необходимо предпринимать определенные действия, в частности создавать и реализовывать на практике новые методы и способы невозмущающего контроля, повышающие его точность, а так же ужесточение контроля выполнения технических условий при изготовлении ответственных деталей.

Одним из опаснейших объектов, требующих к себе повышенного внимания и, соответственно, многоступенчатого контроля являются АЭС и продукты их жизнедеятельности (топливо, отходы и т.д.).

Уран-гадолиниевое топливо в виде таблеток очень широко применяется в реакторах. В тепловыделяющих системах обычно устанавливают несколько тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) с такими таблетками. При этом число таблеток, содержание в них Gd_2O_3 могут варьироваться в широких пределах по высоте столба топлива. Поскольку содержание гадолия в активной зоне реактора влияет не только на его мощность, но и на выработку электрической энергии, то необходимо измерять достаточно точно как среднее содержание гадолия в активной зоне, так и его содержание в каждой таблетке $(U, Gd)O_2$. При снаряжении ТВЭЛов таблетками UO_2 и $(U, Gd)O_2$ их можно перепутать, так как они не отличаются ни по размеру, ни по цвету.

Исходные положения

Контроль местоположения таблеток $(U, Gd)O_2$ по длине ТВЭЛ и содержания в них гадолия может проводиться магнитным, электромагнитным, активационным, нейтронографическим и рентгенофлюоресцентным методами.

Магнитный метод основан на измерении изменения магнитных свойств твердого раствора и сопоставлении их с процентным содержанием оксида гадолия. Магнитные свойства U_2O_3 , Gd_2O_3 и твердого раствора $U_2O_3 - Gd_2O_3$. Парамагнитными ионами в твердом растворе $U_2O_3 - Gd_2O_3$ являются ионы Gd^{3+} , U^{4+} , U^{5+} . Среди них Gd^{3+} вносит основной вклад в молярную магнитную восприимчивость K_{mm} твердого раствора $U_2O_3 - Gd_2O_3$. Зависимость K_{mm} от температуры T вычисляется по формуле:

$$K_{mm} = C/(T - \theta) + K_{mm0} \quad (1)$$

где C – постоянная Кюри; i – постоянная Вейса; $K_{\text{mm}0}$ – не зависящая от температуры магнитная восприимчивость. Магнитная восприимчивость UO_2 достигает максимального значения при $T=32$ К.

Измерение K_{mm} образцов $(\text{U}_{1-x}\text{Gd}_x)\text{O}_2$ производится крутильным магнитометром при температуре от комнатной до температуры жидкого гелия в магнитных полях с индукцией 0,04—0,72 Тл.[1]

Максимальное значение K_{mm} твердого раствора $\text{U}_2\text{O}_3 - \text{Gd}_2\text{O}_3$ при содержании Gd_2O_3 до 2 % по массе достигается при той же температуре, что и U_2O_3 . С увеличением содержания в образцах значение K_{mm} монотонно увеличивается при снижении температуры, а при определенной температуре растет с увеличением содержания Gd_2O_3 . При концентрации Gd_2O_3 более 48 % по массе K_{mm} в диапазоне низкой температуры имеет тенденцию к насыщению и приближается к значению K_{mm} чистого Gd_2O_3 .

Электромагнитный метод основан на измерении и сопоставлении с пропорциями твердого раствора такого параметра, как электропроводность у UO_2 и твердого раствора $\text{UO}_2-\text{Gd}_2\text{O}_3$. При спекании таблеток из смеси порошков UO_2 и Gd_2O_3 образуется твердый раствор – полупроводник с p -проводимостью. Его электропроводность равна 10^0-10^{-1} Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ при комнатной температуре, что на несколько порядков выше, чем у монокристалла UO_2 и в 10–100 раз выше, чем у керамики UO_2 .

При этом она растет с увеличением содержания Gd_2O_3 в таблетках. Электропроводность образцов измеряют прямым методом по 4-электродной схеме с использованием как контактных электродов из сплава «кенталь», так и вплавляемых электродов из платины. Постоянный ток 5–10 мА подводят к крайним электродам, а падение напряжения снимают со средних электродов. Удельное сопротивление таблетки вычисляется по формуле

$$Q = (2 \ln 2)S[C_i(d/S)/c_2(S/W)] U/I \quad (3)$$

где U – падение напряжения между электродами, В; I – ток, А; W и d — толщина и диаметр таблеток, см; S — расстояние между соседними электродами, Электропроводность, вычисленная по формуле 3, должна быть скорректирована с учетом объемной пористости P образца:

$$y_0 = 1/\tau[1+P/(1-P^{2/3})]. \quad (4)$$

К недостаткам этого метода можно отнести то, что это контактный метод, и существенную погрешность вносят процессы происходящие непосредственно в месте контакта.[1]

Еще для контроля содержания ^{235}U в столбе топлива готового твэла широко используют активационный метод, который основан на облучении таблеток UO_2 потоком тепловых нейтронов, вызывающим деление ядер U , с одновременным измерением потоков мгновенных нейтронов и мгновенных γ -квантов или с последующим измерением запаздывающих γ -квантов. Введение Gd_2O_3 в UO_2 приводит к поглощению им части потока тепловых нейтронов. При небольшой концентрации гадолиния (<2 % по массе) приемлемую точность определения содержания Gd_2O_3 в таблетках $(\text{U}, \text{Gd})\text{O}_2$ дает регистрация мгновенных нейтронов и γ -квантов методом совпадений. При более высоком содержании Gd_2O_3 возникает трудность в обеспечении достаточно малой фоновой скорости счета, обусловленной облучающими нейтронами, по сравнению со скоростью счета мгновенных нейтронов. В результате скорость счета практически не увеличивается с ростом содержания Gd_2O_3 . Более надежный результат получается при контроле методом регистрации запаздывающих γ -квантов. Так, по данным заявки при увеличении содержания Gd_2O_3 в таблетках $(\text{U}, \text{Gd})\text{O}_2$ с 4 до 6% по массе скорость счета запаздывающих γ -квантов снижается вдвое. Но при всех его достоинствах, процесс контроля параметров данным методом достаточно длительный, что бывает неприемлемо в условиях массового производства.

Существует еще нейтронографический метод, он основан также на использовании высокого поперечного сечения захвата гадолинием нейтронов. Линейный коэффициент поглощения таблеток $(\text{U}, \text{Gd})\text{O}_2$ больше, чем таблеток UO_2 , поскольку ядра гадолиния

имеют атомную массу меньше, чем ядра урана, и во много раз большее поперечное сечение захвата тепловых нейтронов. Но опять же основная его проблема с длительным временем контроля.[2]

Так же возможно применение рентгенофлуоресцентного метода. Суть его в том, что возбуждаемое в гадолинии характеристическое излучение энергией 50,229 кэВ может быть использовано для контроля содержания Gd_2O_3 в столбе топлива, однако из-за низкого уровня выхода и сильного поглощения оболочкой из циркония этот метод для контроля параметров в условиях производства практически не пригоден.

Особенности использования метода контроля

Разработанные методы неразрушающего контроля содержания Gd_2O_3 в каждой таблетке $(U, Gd)O_2$ по высоте столба топлива твэла обеспечивают требуемую точность, но в условиях массового производства требуется достаточно высокая скорость контроля содержания оксида гадолиния и при этом не должны ухудшаться качественные характеристики.

Наиболее продуктивным можно считать электромагнитный (вихретоковый) метод контроля, высокую производительность по сравнению с другими методами контроля. Основным достоинством данного метода контроля можно считать бесконтактное проведение контроля и высокая скорость производительности, по сравнению с нейтронографическим методом, который не может обеспечить быструю скорость контроля, необходимую для осуществления проведения входного контроля. По сравнению с электромагнитным методом контроля, вихретоковый контроль выигрывает возможностью бесконтактного проведения контроля.

Одним из основных недостатков вихретокового метода контроля можно считать тот факт, что при проведении контроля необходимо выдерживать постоянное расстояние (как можно меньшее, не меняющееся во времени) между объектом контроля и датчиком прибор, осуществляющим контроль. Кроме того, на результаты контроля вихретоковым методом сильно влияют ферромагнитные примеси топливных элементов внося свою погрешность в измерения, и чтобы их влияние исключить, приходится прибегать к дополнительным мерам, таким как создание постоянного магнитного поля в месте контроля и т. д. Но, несмотря на недостатки, данный метод вполне пригоден для решения поставленной задачи, а именно контроля содержания оксида гадолиния в топливных элементах ядерного реактора АЭС. [3]

Выбор параметров вихретокового проходного преобразователя (далее ВТП) обуславливается объектом контроля, который имеет диаметр поперечного сечения 9мм, и длину около 2х метров. Главной частью создаваемого приборного комплекса являются вихретоковый датчик, представляющий собой двух обмоточный трансформатор, находящийся в постоянном магнитном поле, сердечник которого является объект контроля. Выбор геометрических параметров датчика производится конструктивно и обуславливается объектом контроля. Исходя из этого, конструктивно определяются параметры: диаметр катушки, длина намотки (первичной и вторичной), диаметр обмотки (первичной и вторичной),

Основным параметром на первом этапе расчета ВТП, является глубина проникновения электромагнитного поля в материал, которая обуславливается проводимостью материала, частотой поля и магнитной проницаемостью. Глубина скин-слоя определяется по формуле [3]

$$d = \sqrt{\frac{1}{\mu \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot \lambda f_2}} \quad (5)$$

где μ - магнитная проницаемость материала; μ_0 - магнитная постоянная; λ - удельная электрическая проводимость; $\omega=2\pi\nu$ - круговая частота переменного тока. Выражая эти единицы в СИ мы получим значение в метрах.

Таким образом, выводим формулу частоты переменного тока, который будет подаваться на возбуждающую обмотку датчика, получаем:

$$\omega = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0 \cdot d^2 \cdot \lambda l_2} \quad (6)$$

подставляем $\omega = 2\pi\nu$ в выражение 6. получаем исходную формулу

$$\omega = \frac{1}{2\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot d^2 \cdot \lambda l_2} \quad (7)$$

Таким образом, определяем необходимую частоту, на которой должен работать ВТП в соответствии с требуемой глубиной проникновения в материал.

Далее основываясь на частоту и индуктивность катушки, выбираем оптимальные параметры сопротивления и индуктивности возбуждающей обмотки ВТП. Сопротивление выбирается таким образом, чтобы оно было согласовано с сопротивлением выхода генератора, которым производится генерация сигнала на измерительную обмотку ВТП. Основным уравнением для расчета и согласования сопротивления, частоты и индуктивности является уравнение:

$$R = \omega \cdot L \quad (8)$$

где L - индуктивность; ω - частота.

Индуктивность измерительной обмотки ВТП рассчитывается и подбирается исходя из геометрических параметров и конструктивных особенностей датчика. Основными геометрическими параметрами являются длина и радиус обмотки, которые в свою очередь определяют число витков обмотки и сечение провода, которым производится намотка витков.

Зависимость индуктивности от количества витков определяется по формуле

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{S \cdot N^2}{l} \quad (9)$$

где S - площадь сечения соленоида; l - длина соленоида; N - полное число витков;

В свою очередь для использования ВТП рассчитываемого с помощью такой математической модели, которая будет использоваться для определения концентрации $(U, Gd)O_2$ необходимо учитывать особенности объекта контроля, в котором содержится цирконий, а так же прочие ферромагнитные включения, которые при проведения контроля будут вносить собственные наводки, влияющие на достоверность информативности сигнала. В свою очередь ферромагнитные включения в твэле исключаются путем намагничивания постоянными магнитами. Для того чтобы проводить контроль необходимо создать такую же напряженность поля, как у постоянных магнитов. Для выбора оптимальных параметров контроля необходимо учитывать связь между напряженностью поля и числом витков, которая описывается формулой:

$$H = N \cdot i / l \quad (10)$$

где N - полное число витков обмотки возбуждения; l - длина обмотки, i - ток пропускаемый по обмотке.

Таким образом, можно выбрать информативные параметры, которые будут регистрироваться во время измерения. Одними из таких параметров могут служить амплитуда и фаза сигнала на измерительной обмотке, такие как соотношение амплитуды и фазы входного и выходного сигнала [4,5].

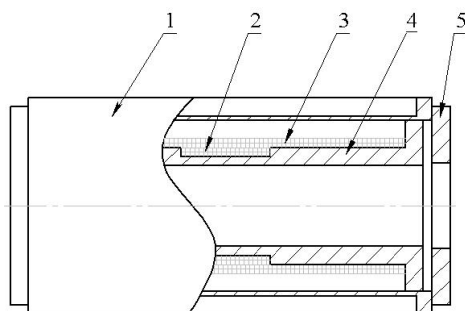


Рисунок 1 – Первичный вихретоковый преобразователь: 1) корпус преобразователя; 2) вторичная обмотка; 3) первичная обмотка; 4) каркас измерительных обмоток; 5) Крышка преобразователя.

Конструкция первичного вихретокового преобразователя

Первичный вихретоковый преобразователь (рисунок 1) состоит из корпуса с намотанными на него двумя обмотками: первичной (задающей) 2000 витков провод ПЭЛ-0,1 и вторичной (датчиком) 500 витков таким же проводом. Для исключения влияния ферромагнитных включений в твеле на показания приборов, в области контроля создается постоянное магнитное поле напряженностью 2000 кА/м (двумя постоянными магнитами марки: МПП-10-41,5-41,5 - через магнитопровод). На первичную обмотку с генератора сигналов (ТАВОР WW2571) подается синусоидальный сигнал частотой 1,1кГц и амплитудой 40 вольт. Она в свою очередь вихревое электромагнитное поле, которое с учетом магнитных параметров сердечника (в нашем случае им является контролируемый твэл) наводит ЭДС во вторичной обмотке (датчике). Именно за счет изменения параметров фазы и амплитуды на вторичной обмотке при изменении магнитных параметров твэла, можно определить процентное содержания оксида гадолия. Параметры сигнала со вторичной обмотки, через регистрирующий прибор (Wave Jet 322), совместно с сигналом от датчика положения твела относительно вторичной обмотки первичного вихретокового преобразователя поступает в ЭВМ для последующей обработки (рисунок 2).

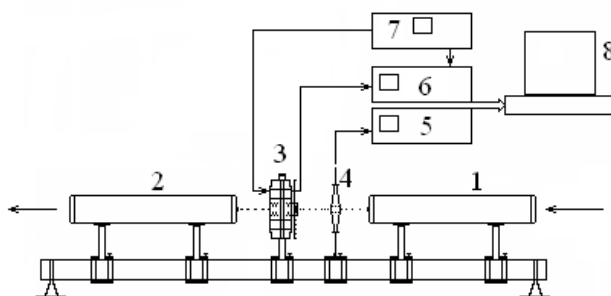


Рисунок 3 – Приборный комплекс контроля оксида гадолия в твэлах: 1, 2) механизм подачи и направления твэлов; 3) первичный вихретоковый преобразователь; 4) датчик положения твэла; 5) блок обработки сигналов; 6) регистрирующий прибор Wave Jet 322; 7) генератор сигналов ТАВОР WW2571; 8) ПЭВМ.

Обработка результатов

Обработка параметров контроля сводится к двум этапам: 1. поэлементное вычитание влияния урана, циркония и примесей без оксида гадолия на получаемый фиксируемый сигнал. Для реализации этого применен способ, когда фиксировались параметры, снимаемые с датчика, при нахождении в нем (в качестве сердечника) твела с нулевым содержанием оксида гадолия. 2. Затем эти значения фиксируются программой. И при контроле твелов с оксидом гадолия экспериментальным путем устанавливаем

зависимость показаний приборов от содержания оксида гадолиния. Данная процедура позволит исключить различные вредные явления, например «краевой эффект» и др. Это производилось следующим образом: прибор тарировался твелями с таблетками имеющими различное содержания оксида гадолиния (устанавливалось другими методами). По результатам тарирования строились графики, данные которых заносились в программу. В результате определение содержания оксида гадолиния в твеле сводится к сравнению параметров и пересчету на процентное содержание (рисунок 3), которое в свою очередь сравнивалось со значением допустимого содержанием согласно ТУ.[5,6]

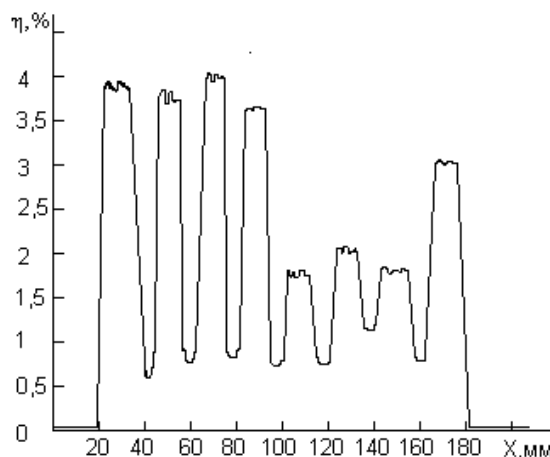


Рисунок 3 – Диаграмма записи содержания оксида гадолиния по длине части твела.

Выводы и обсуждения

Для контроля содержания оксида гадолиния в собранных топливных элементах ядерного реактора АЭС применен вихретоковый метод контроля и создан приборный комплекс, способный достаточно точно отображать процентное содержание оксида гадолиния, и неподверженный влиянию ферромагнитных примесей в топливном элементе.

Главным преимуществом созданного приборного комплекса является достаточно высокая скорость контроля, при обеспечении необходимой достоверности результатов.

Следует учитывать, что для проверки работоспособности прибора контроля, изредка необходимо подавать на контроль заведомо бракованный твэл. Таким образом, метод контроля застрахован от сбоев, а это в свою очередь уменьшает вероятность аварии на реакторе АЭС, на которой используется данное топливо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горский В.В. Неразрушающий контроль содержания делящихся материалов и гадолиния в ТВЭЛАХ LWR// Атомная техника за рубежом. – 1983. – № 9. – с. 3-9.
2. Адати М. Способ и установка для измерения содержания в ТВЭЛАХ. Патент № 61-38432 (Япония). Оpubл. 29.08.86. – G 21. – С 17-06.
3. Ключев В.В., Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль и диагностика, 2 том, справочник. – М.: Машиностроение, 2005 г.
4. Горский В.В. Применение гадолиния в легководных реакторах// Атомная техника за рубежом. – 1987. – №3. – с. 25-27.
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Электричество и магнетизм, том 2. – М: Высшая школа, 1977.
6. Лисдат Р., Плундер М., Рике Г. Первая топливная загрузка АЭС «Брокдорф»// Атомная техника за рубежом. – 1987. – №3. – с. 25-27.