

12. Абагян Л.П. и др. Библиотека резонансных параметров LIPAR-5. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1995, вып. 1—2, с. 19—40.
13. Абагян Л.П. и др. Программа MCU-3 для расчета методом Монте-Карло нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. Т. 2. Константное обеспечение: Препринт РНЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-5777/5, 1994.
14. Гусейнов А.Г., Гусейнов М.А., Работнов Н.С. О влиянии энергетической зависимости $\nu(E)$ при E менее 1 эВ в групповых константах ^{239}Pu в нижних группах. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1988, вып. 4, с. 17—21.
15. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Бондаренко И.И., Николаев М.Н. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1964, с. 1—139.
16. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. М.: Энергоатомиздат, 1981, с. 1—231.
17. Гусейнов А.Г., Гусейнов М.А., Работнов Н.С. О возможном влиянии корреляций между ν и Γ_f на резонансную блокировку ν . — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1987, вып. 4, с. 38—43.

Поступила в Редакцию 19.12.01

УДК 539.1.07+621.039.516

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫГОРАНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ

*Олейник С.Г. (ВНИИАЭС), Максимов М.В., Маслов О.В.
(Одесский национальный политехнический ун-т)*

В соответствии с требованиями нормативного документа [1] перед помещением отработавших ТВС в контейнер сухого хранилища необходимо проконтролировать глубину выгорания топлива. При этом необходимо подтвердить, что в контейнер загружена именно заявленная ТВС с указанным выгоранием. Совмещение процедуры определения выгорания с транспортно-технологическими операциями по отгрузке является оптимальным вариантом с точки зрения сокращения временных затрат [2].

Как известно, измерение нейтронного или γ -излучения отработавшего топлива не позволяет получить непосредственно количественные характеристики ядерных материалов в ТВС. Для оценки количественных характеристик должны использоваться косвенные показатели, базирующиеся на характеристиках излучения продуктов деления или трансурановых элементов и применяющиеся для определения выгорания и времени выдержки ядерного топлива после выгрузки из реактора [3]. В настоящее время штатных систем для инструментального подтверждения расчетного выгорания ядерного топлива на АЭС нет.

На основании изложенного можно сделать вывод о необходимости создания системы для контроля выгорания отработавшего ядерного топлива. Такая система должна строиться на принципах неразрушающего контроля и хорошо согласовываться с действующими транспортно-технологическими операциями [2].

Определению выгорания на основе измерений характеристик собственного излучения отработавшего топлива посвящены, например, работы [3—8], однако в них для этого необходимо знать начальное обогащение и время выдержки. К тому же описываемые методы не согласуются с транспортно-технологическими операциями, по этой причине их применение снижает экономические показатели АЭС. Известны способы определения выгорания ядерного топлива на основании измерений суммарной скорости счета нейтронов [7, 8], однако специфика нейтронного излучения такова, что идентифицировать отдельные изотопы на основании измерения нейтронных полей вокруг ТВС невозможно. Альтернативным вариантом является измерение собственного γ -излучения ТВС [9, 10]. Набор зарегистрированных γ -квантов дает возможность идентифицировать излучающий изотоп. В работах [10—12] описан прототип системы, с помощью которой можно измерять выгорание при транспортно-технологических операциях.

Описываемая в настоящей статье методика определения глубины выгорания отработавшего топлива предусматривает следующую последовательность операций по измерению и обработке результатов.

Определение параметров пиков в γ -спектрах. Эти параметры связаны, главным образом, с характеристиками детектора, и их правильный выбор обеспечивает надежность обработки данных. Обычно параметры определяются при начальной калибровке детектора и сохраняются в памяти. Тем не менее они зависят и от условий, в которых проводятся измерения, в связи с этим могут уточняться для конкретных условий измерения. Для этого необходимо измерить спектры собственного γ -излучения отработавшего топлива с выдержкой 1, 2 и 3 года. Учет обогащения и выгорания не является обязательным. Однако в измеренных спектрах обязательно должны присутствовать четко идентифицируемые пики, пригодные для обработки. Необходимо провести автоматическую обработку спектров с параметрами, определенными на этапе начальной калибровки, и далее сравнить результаты обработки (модель пика) с измеренным спектром. Если установлено, что результаты автоматической обработки неудовлетворительны, в частности, обнаружено много пиков с энергетическим разрешением, отличным от реального, или комптоновский пик идентифицируется как пик полного поглощения, или высока статистическая оценка погрешности, параметры пиков следует изменить, а обработку повторить. Опыт измерений с прототипом системы на Запорожской АЭС показал, что с необходимостью повторного определения параметров поиска пиков сталкиваться обычно не приходится.

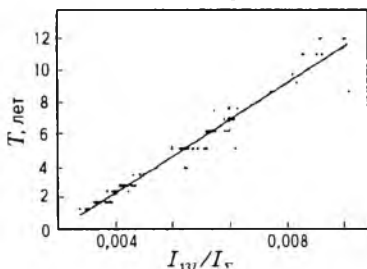
Определение коэффициентов эмпирических соотношений, связывающих измеренную интенсивность с глубиной выгорания. Данная операция выполняется один раз перед началом измерений с использованием отработавших ТВС, для которых известны расчетное выгорание и время выдержки. Необходимость выполнения этой операции обусловлена тем, что коэффициенты в данных соотношениях зависят от условий проведения измерений, т.е. относятся к конкретной измерительной установке. В последующем их следует уточнять по текущим результатам измерений. Коэффициенты эмпирических соотношений находят так. Предварительно отбирают не менее 15 ТВС с различным выгоранием, начальным обогащением и выдержкой от 2 до 5 лет. Затем измеряют γ -излучение данных ТВС и обрабатывают измеренные спектры. В случае низкой статистической достоверности измерения повторяют, для чего располагают измеряемую сборку таким образом, чтобы ее середина находилась на уровне детекторов между дистанционирующими решетками. Время накопления спектра контролируют визуально по параметрам пиков полного поглощения ^{134}Cs энергией выше 1 МэВ. Затем с помощью методов статистической обработки данных определяют коэффициенты эмпирических соотношений.

Определение выгорания по результатам измерений собственного γ -излучения. При этом главным критерием, определяющим способ оценки выгорания или времени выдержки топлива, является наличие четких и статистически подтвержденных пиков полного поглощения продуктов деления. Последовательность операций такова — измерение и обработка спектров собственного γ -излучения по каждому измерительному каналу, анализ на наличие четко выраженных пиков полного поглощения. В случае отсутствия четко идентифицируемых пиков анализируются интегральная загрузка измерительного тракта и мертвое время. Если интегральная загрузка высока, определяется наличие пика, образованного суммарным γ -излучением ^{134}Cs , ^{95}Zr и ^{95}Nb . В случае положительного результата, т.е. если подтверждается наличие ^{95}Zr и ^{95}Nb , делается вывод о недостаточной выдержке, не позволяющий определить выгорание ТВС. Время выдержки определяется на основании отношения измеренной интенсивности γ -излучения ^{137}Cs к интегральной. Соотношение представляет собой линейную зависимость времени выдержки (T) от отношения измеренной интенсивности

γ -излучения ^{137}Cs ($I_{\text{изм}}(^{137}\text{Cs})$) к интегральной ($I_{\text{изм}}^{\Sigma}$) для всех возможных значений начального обогащения и имеет вид

$$T = (1144,5 \pm 45,76) I_{\text{изм}}(^{137}\text{Cs}) / I_{\text{изм}}^{\Sigma} \quad (1)$$

При этом интегральная интенсивность γ -излучения определяется как отношение полной площади спектра собственного γ -излучения к времени измерения спектра с учетом поправки на мертвое время. Графически зависимость (1) представлена на рис. 1.



Р и с. 1. Зависимость времени выдержки отработанного ядерного топлива от отношения измеренной интенсивности γ -излучения к полной интенсивности γ -излучения

В данном случае начальное обогащение ТВС не учитывается, однако опыт показывает, что вызванная этим дополнительная погрешность не превышает статистическую погрешность при измерении только одного пика полного поглощения ^{137}Cs .

Оценочное выгорание ТВС рассчитывается с использованием первого выражения таблицы, а также определяется погрешность ΔBU . Полученное значение сравнивается с заявленным (расчетным), и проводится статистический анализ результатов на основании критерия Стьюдента.

Эмпирические соотношения, описывающие зависимость измеренного отношения интенсивности γ -излучения изотопов — продуктов деления от выгорания топлива

Изотоп	Выражение
^{137}Cs	$I_{\text{изм}} = (2,0917 \pm 0,167) BU$
$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, обогащение 1,6 и 2%	$I_{\text{изм}}(^{134}\text{Cs})/I_{\text{изм}}(^{137}\text{Cs}) = (0,0608 \pm 0,0116) BU$
$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, обогащение 3, 3,23 и 3,3%	$I_{\text{изм}}(^{134}\text{Cs})/I_{\text{изм}}(^{137}\text{Cs}) = (0,0479 \pm 0,002) BU$
$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, обогащение 4,23 и 4,4%	$I_{\text{изм}}(^{134}\text{Cs})/I_{\text{изм}}(^{137}\text{Cs}) = (0,0410 \pm 0,001) BU$

Расчет выгорания выполняется для каждого измерительного канала. Если расчет для разных измерительных каналов дает разные значения из-за неравномерности выгорания ТВС, оценивают среднеарифметическое выгорание для всех каналов. Средняя погрешность при этом оценивается как корень квадратный из суммы квадратов погрешностей выгорания для каждого канала.

Для уменьшения ошибки определения выгорания и времени выдержки предусмотрено использование более сложных зависимостей на основе отношения измеренных интенсивностей γ -излучения ^{154}Eu и ^{137}Cs . Выгорание и время выдержки предлагается определять на основании следующих выражений [13]:

$$BU = \left[\frac{I_{\text{Eu}}}{K} \left(\frac{k_1}{I_{\text{Cs}}} \right)^{\lambda_2/\lambda_1} \right]^{(k_2 - \lambda_2/\lambda_1)^{-1}}; \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{\lambda_2 - k_2 \lambda_1} \ln \left\{ \left(\frac{I_{\text{Cs}}}{k_1} \right)^{k_2} \frac{K}{I_{\text{Eu}}} \right\}, \quad (3)$$

где λ_1 , λ_2 — постоянная распада ^{137}Cs и ^{154}Eu ; I_{Cs} , I_{Eu} — интенсивность ^{137}Cs и ^{154}Eu , определяемая по пику полного поглощения в спектре собственного γ -излучения; K — эмпирический коэффициент $0,0149 \pm 0,0015$ (10 ± 2 [13]); k_1 , k_2 — эмпирический коэффициент $0,592 \pm 0,04$ и $1,135 \pm 0,11$ (501 ± 2 и $1,306 \pm 0,05$ [13]).

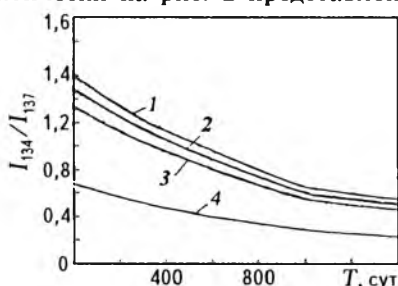
Уменьшение ошибки при использовании выражений (2) и (3) обусловлено снижением влияния факторов, определяющих систематическую погрешность измерений (например, самопоглощение γ -излучения внутри ТВС). Различие между полученными значениями коэффициентов K и k_1 и приведенными в работе [13] объясняется меньшими размерами используемых детекторов на основе CdZnTe и, следовательно, более низкой эффективностью регистрации.

Отметим, что способ с использованием результатов измерения γ -излучения ^{154}Eu и ^{137}Cs является основным при выдержке топлива более 7 лет, но он требует значительных временных затрат на измерения с требуемой точностью. Зная оценочное выгорание контролируемой ТВС, можно рассчитать оценочное отношение интенсивности γ -излучения ^{134}Cs и ^{137}Cs для различного начального обогащения с помощью формул, приведенных в таблице. На основании полученного времени выдержки вычисляется отношение интенсивности γ -излучения ^{134}Cs , ^{137}Cs к моменту останова реактора. Сравнивая это отношение с оценочными отношениями для разного начального обогащения, можно определить начальное обогащение топлива. Далее выгорание ТВС рассчитывается с использованием формулы в таблице для соответствующего начального обогащения.

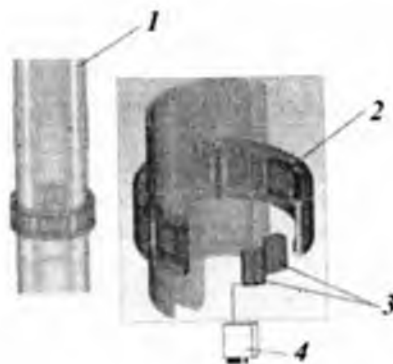
Уточнить расчет выгорания с учетом времени выдержки и начального обогащения позволяет график на рис. 2, где каждая кривая рассчитана для заданного начального обогащения и соответствующего ему выгорания. Фактически на рис. 2 представлен набор кривых, характеризующий весь интервал начального обогащения для ТВС ВВЭР-1000 при характерных значениях выгорания. Это позволяет путем интерполяции уточнять выгорание и оценивать погрешность. Полученное выгорание (экспериментальное) сравнивается с заявленным (расчетным) путем статистической обработки результатов по критерию Стьюдента.

Все данные, по которым проводился анализ и разрабатывалась изложенная методика, экспериментально проверяли с помощью прототипа измерительной γ -спектрометрической системы. Коэффициенты в формуле (1) и таблице получены экспериментально путем измерений 200 ТВС с известным расчетным выгоранием и временем выдержки. Приводимые эмпирические зависимости получены посредством обработки расчетного и экспериментального значения выгорания и времени выдержки на основе χ^2 , причем погрешность не превышает 10% при доверительной вероятности 0,95.

Прототип системы для измерения собственного γ -излучения отработавшего топлива содержит несколько измерительных каналов, каждый из которых включает в себя полупроводниковый детектор на основе CdZnTe и многоканальный амплитудный анализатор. Блоки детектирования размещаются в специальном устройстве, закрепляемом на наружной секции рабочей штанги перегрузочной машины (рис. 3). Установленное на рабочей штанге устройство обеспечивает также однозначное и четко воспроизводимое позиционирование детекторов относительно контролируемой ТВС при всех сериях измерений.



Р и с. 2. Зависимость отношения активности ^{134}Cs к активности ^{137}Cs от времени выдержки для начального обогащения 4,4 (1), 3,6 (2), 2,4 (3), 1,6% (4) и выгорания 40,48, 29,75, 27,90, 9,85 МВт·сут/кг соответственно



Р и с. 3. Размещение детекторов на рабочей штанге перегрузочной машины: 1 — рабочая штанга; 2 — кольцевой держатель; 3 — вольфрамовый вкладыш; 4 — детектор

В итоге исследований предложена методика определения выгорания ядерного топлива. Логическая цепь последовательных измерительных и вычислительных операций позволяет путем обработки спектров собственного излучения определить выгорание при различных значениях времени выдержки и начального обогащения, не требуя дополнительных сведений об этих параметрах. Эта особенность выгодно отличает данную методику от других известных. Данные на рис. 2 являются универсальными для ВВЭР-1000, тогда как соотношения (1)–(3), в таблице и на рис. 1 зависят от условий измерения, т.е. относятся к конкретной измерительной установке. Для сопоставления результатов, полученных при различных условиях измерений или другими исследователями, следует использовать данные, приведенные на рис. 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПНАЭ Г-14-029-91. Правила безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетики. М.: ЦНИИАтоминформ, 1992.
2. Маслов О.В., Олейник С.Г. Аппаратура и методика контроля высокорadioактивных материалов и топлива в технологии обращения с ОЯТ. — В кн.: Межд. конф. Укр. ЯО. Киев, 2000, с. 42–44.
3. Райли Д., Энсслин Н., Смит Х. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. Пер. с англ. М.: ЗАО «Издательство Бином», 2000.
4. Hsue S., Crane T., Talbert Jr W., Lee J. Nondestructive Assay Methods for Irradiated Nuclear Fuels. Report Los Alamos National Laboratory LA-6923-MS, 1978.
5. Ronald I., Bronowski D., Bosler G., Siebelist R. Measurements on Spent-Fuel Assemblies at Arkansas Nuclear one Using the Fork System. Report Sandia National Laboratory SAND-96-1364, 1997.
6. Пыткин Ю. Н., Андрушечко С.А., Васильев Б.Ю., Голощапов С.Н. Внедрение на Кольской АЭС прибора для измерения глубины выгорания отработавших тепловыделяющих сборок. — В кн.: Межд. конф. по учету, контролю и физ. защите ядерных материалов. Обнинск, 1997, с. 637–645.
7. Haggard D., Tanner J. Determination of Curie Content and $^{134}/^{137}$ Cesium Ratios by Gamma Spectroscopy of High Burnup Plutonium-Aluminum Fuel Assemblies. Report Pacific Northwest National Laboratory PNNL-11609, 1997.
8. Tiitta A., Dvoyeglazov A., Ilevlev S., Tarvainen M. VVER-1000 SFAT — Specification of an Industrial Prototype. Intern. Report on Task FIN A 1073 of the Finnish Support Programme to IAEA Safeguards, STUK-YTO-TR 161, Helsinki, 2000.
9. Маслов О.В., Максимов М.В., Олейник С.Г. Обоснование радиационных методов контроля состояния ядерного топлива в реальном времени при проведении перегрузки. — Труды Одес. политехн. ун-та, 2000, вып. 3 (12), с. 50–55.
10. Маслов О.В., Олейник С.Г. Автоматизированная система контроля распределения продуктов деления в ТВС ВВЭР-1000 при проведении перегрузки ядерного топлива. — В кн.: 2-я Межд. конф. «Учет, контроль и физ. защита ядерных материалов». Обнинск, 2000, с. 370–388.
11. Галченков О.Н., Маслов О.В., Олейник С.Г. Сравнение двух способов построения спектров в цифровом гамма-спектрометре. — Ядерная и радиационная безопасность, 2000, т. 3, вып. 3, с. 61–63.
12. Маслов О.В., Олейник С.Г., Кальнев Л.Л., Савельев С.А. Определение глубины выгорания ядерного топлива в реальном времени при проведении перегрузки. — Автоматика. Автоматизация. Электротехн. комплексы и системы, 2000, № 1 (6), с. 141–148.
13. Jansson P., Hekansson A., Backlin A. Gamma-Ray Measurements of Spent PWR Fuel and Determination of Residual Power. Report Dept. of Radiation Sciences, Uppsala University, ISV-7/97, 1997.

Поступила в Редакцию 18.01.02

УДК 621.039.524+536.5

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭТАЛОН ДЛЯ ВВЭР-440

Штанц С., Сланина М.

(ВУЙЕ, Трнава, а.о. — инженерно-проектная и исследовательская организация)

Тепловая мощность реактора и ее распределение в активной зоне поддерживаются на основании измерения температуры. Поэтому для каждого реактора устанавливаются предельные значения подогрева теплоносителя в реакторе и ТВС при стационарной