

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА (ОЯТ)

В работе проведен анализ опыта разработки макета системы и применения детекторов. Это позволило сделать вывод о том, что система контроля состояния ОЯТ должна базироваться на CdZnTe-детекторах в которых реализованы условия однозарядового сбора. На основании полученных результатов предложена методика контроля выгорания ОЯТ в реальном времени при проведении ТТО.

Ключевые слова: CdZnTe-детекторы, транспортно-технологические операции.

Вступление. Методам определения выгорания на основе измерений характеристик собственного излучения ОЯТ посвящено большое количество работ, но в них, как правило, не отражается, что в эксплуатации используется ядерное топливо (ЯТ) с разным начальным обогащением, новые перспективные виды топлива. Кроме того, эти методы зачастую плохо вписываются в существующую технологию транспортно-технологических операций перегрузке ЯТ (ТТО) и не пригодны для оперативного контроля.

В качестве основного принципа построения системы контроля состояния ЯТ, в том числе, системы определения выгорания, выбрано измерение спектров собственного γ -излучения отработавшей ТВС. Оптимальным с точки зрения минимизации временных затрат является измерение γ -спектров отработавших ТВС непосредственно в процессе перегрузки ЯТ. Поскольку время перегрузки регламентировано достаточно жестко, операции по определению глубины выгорания ЯТ должны быть согласованы с временным графиком процесса перегрузки. Поэтому основным критерием при построении структуры системы определения глубины выгорания должна быть выбрана ее работоспособность в режиме реального времени.

В соответствии со сформулированными требованиями к системе построена ее структурная схема, приведенная на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема системы контроля состояния отработавшего ядерного топлива в реальном времени

Основная часть. Основным элементом системы, регистрирующим собственное γ -излучение ТВС, является набор детекторов γ -излучения. Детектор является определяющим элементом при построении системы в целом, так как он обуславливает выполнение таких требований как качество измерений, массогабаритные параметры, надежную эксплуатацию в реальных условиях на АЭС. Проведенный анализ опыта разработки макета системы и применения детекторов позволил сделать вывод о том, что система контроля состояния ОЯТ должна базироваться на CdZnTe-детекторах в которых реализованы условия однозарядового сбора.

Система из n детекторов, образующая блок детектирования, должна осуществить регистрацию собственного излучения ОЯТ в процессе проведения ТТО с ТВС и преобразовать его в электрические сигналы для последующей передачи на амплитудный анализатор. Многоканальный амплитудный анализатор осуществляет функции накопления, обработки и последующей передачи на вычислительную и управляющую ЭВМ информации о распределении импульсов счета от детекторов по амплитудам, т.е. первичного (необработанного) γ -спектра.

На основании полученных результатов предложена методика контроля выгорания ОЯТ в реальном времени при проведении ТТО. Особенность методики состоит в том, что для расчета выгорания не требуется предварительного знания начального обогащения и времени выдержки.

Методика состоит из последовательности операций по измерениям и обработке результатов, проводимых ниже:

- определение времени выдержки с использованием отношения измеренной интенсивности гамма-излучения ^{137}Cs к интегральной интенсивности гамма-излучения;
- оценочный расчет выгорания (BU) контролируемой ОТВС по ^{137}Cs , определение погрешности ΔBU полученной величины выгорания;
- определение отношения интенсивностей гамма-излучения изотопов ^{134}Cs , ^{137}Cs к моменту останова реактора на основании полученного значения времени выдержки;
- оценка начального обогащения ТВС, на основании данных оценочного расчета выгорания контролируемой ОТВС и значения отношения интенсивности гамма-излучения изотопов ^{134}Cs , ^{137}Cs ($I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})$) на момент останова реактора;
- определение выгорания контролируемой ОТВС с использованием отношения интенсивности гамма-излучения изотопов ^{134}Cs , ^{137}Cs и значения начального обогащения;
- определение погрешности ΔBU полученной величины выгорания контролируемой ОТВС.

На практике во всех известных методиках, в том числе и описываемой для определения выгорания используются эмпирические зависимости полученные на основании результатов измерений на АЭС, при этом часть ТВС принимается в качестве образцовых. А для построения градуировочной зависимости используются расчетные данные о глубине выгорания. Расчет выгорания может проводиться с применением более сложных программных средств, которые в практике эксплуатации АЭС не используются. Процедура проведения измерений для построения градуировочных зависимостей соответствует стандартной процедуре измерения ТВС.

Таким образом были получены следующие основные зависимости используемые в при контроле выгорания ОЯТ в реальном времени:

- зависимость отношения измеренной интенсивности гамма-излучения ^{137}Cs к интегральной интенсивности гамма-излучения и времени выдержки ТВС (рис. 2);
- набор однотипных зависимостей отношения интенсивности гамма-излучения изотопов ^{134}Cs , ^{137}Cs ($I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})$) на момент останова реактора от выгорания для каждого значения начального обогащения (2, 3, 4 %) (таблица 1);
- зависимость интенсивности гамма-излучения изотопа ^{137}Cs на момент останова реактора от выгорания для всех значений обогащения (рис. 3).

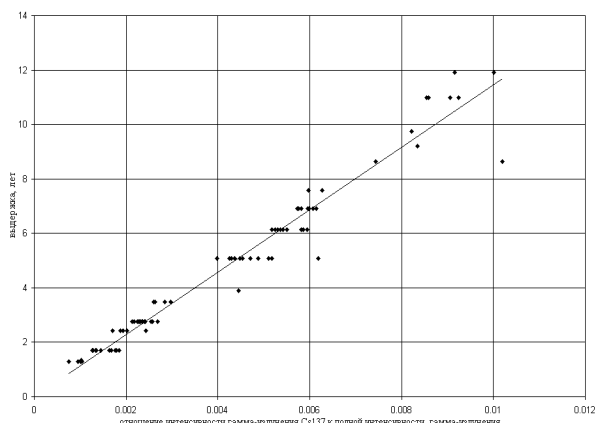


Рис. 2. Зависимость времени выдержки ОЯТ от отношения измеренной интенсивности γ -излучений ^{137}Cs к полной интенсивности собственного γ -излучения ОЯТ

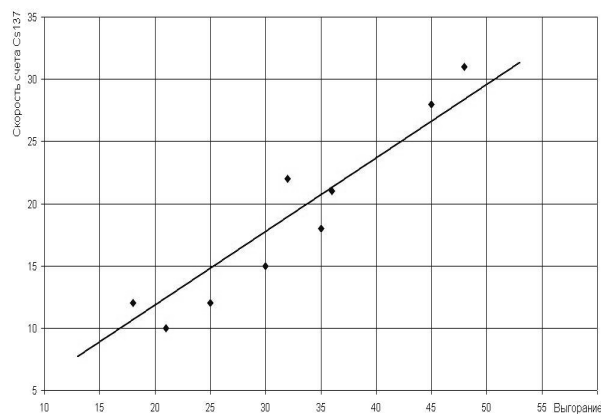


Рис. 3. Зависимость скорости счета в пике полного поглощения γ -излучений ^{137}Cs от выгорания ОЯТ

При таком подходе погрешность определения глубины выгорания определяется по совокупности оценок погрешностей, проведенных при градуировке системы в лаборатории, статистической погрешности измерений и погрешностей градуировочных зависимостей (оценка времени выдержки, обогащения и определение зависимости выгорания от интенсивности собственного гамма-излучения ^{137}Cs и отношения интенсивности гамма-излучения изотопов гамма-излучения $I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})$).

Погрешность градуировочных зависимостей определяется систематической погрешностью паспортной величины выгорания используемых в качестве контрольных ОТВС и погрешностью, обусловленной статистическими погрешностями измерений в процессе проведения градуировки. Погрешность градуировки – зависимости эффективности регистрации не должна превышать 8 %.

Таблица 1

Соотношения, описывающие зависимость измеренной интенсивности гамма-излучения изотопа или отношения интенсивностей гамма-излучения изотопов от выгорания

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

При этом суммарная погрешность (статистическая, градуировка) определения интенсивности в реальных условиях измерений на АЭС составила:

— для линии 661 кэВ ^{137}Cs в лучшем случае – 8,78%, в наиболее плохом случае она равна 17,3%, в большинстве случаев погрешность равна 9,2%.

— для линии 604 кэВ ^{134}Cs в лучшем случае – 10,6%, в худших 36%, обычно она равна 11,8%.

— для суммы линий 796 и 802 кэВ ^{134}Cs в лучшем случае – 9,2%, в худших 36%, обычно она равна 10,6 %.

Суммарная погрешность отношения интенсивности изотопов цезия без учета снижения погрешности за счет уменьшения влияния погрешности эффективности регистрации составит:

- в лучшем случае составит 13,24%,
- в худшем случае 29,0%
- основное значение 14,5 %.

Суммарная погрешность отношения интенсивности изотопов цезия при учете снижения погрешности за счет уменьшения влияния погрешности эффективности регистрации составит (компенсируются погрешности определения активности источника и времени):

- в лучшем случае составит 7,94%,
- в худшем случае 29,0%
- основное значение 9,91 %.

Однако полученные результаты не отвечают потребностям использования системы. Потому что простые отклонения очень малы и это создает ложное впечатление очень точных результатов.

Выводы. На основании результатов, изложенных в [1, 3] для статистической оценки гипотезы что совокупность экспериментальных данных незначительно отличается от той, которая может быть при некотором теоретическом законе может быть проведено испытание на соответствие при помощи параметра χ^2 . В методе χ^2 в качестве меры отклонения экспериментальных точек от ожидаемых значений принимается сумма квадратов отклонений от предполагаемой зависимости.

Процедура использования χ^2 такова:

1. Выдвигается предположение о зависимости, связывающей выгорание и отношение активностей для каждого обогащения.

2. Определяется значение χ^2 для каждой выборки (обогащение, статистическая погрешность, количество экспериментальных точек). При этом при расчете χ^2 используется разность между ожидаемым теоретическим значением выгорания и реальным

3. Сравнивается полученное значение χ^2 с нормируемым табличным значением для заданной доверительной вероятности. Обычно берут 0,95.

Если полученное значение χ^2 меньше нормируемого, то можно говорить, что при данном уровне доверительной вероятности принятая к качеству гипотезы зависимость описывает экспериментальные данные

4. Процедура может быть проведена повторно после удаления "промахов" (явных ошибок).

Определяется значение параметра χ^2 для различных значений обогащения и статистической погрешности измерения.

Типовая погрешность должна быть не хуже 10% (см. выше — 9,91%), поэтому и используется это значение в качестве основного. Реально достижимая погрешность составляет 8%. Поэтому проверка проведена и для этого значения. Более корректно провести расчет с подстановкой индивидуального экспериментального значения для каждого наблюдения. Но обычно при проверке гипотез берут какое-либо одно значение, как правило, задаваемое в нормативной документации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Determination of the burnup of spent nuclear fuel during reloading / S. G. Oleinik, M. V. Maksimov, O. V. Maslov // Atomic Energy.— 2002, Vol. 92, No. 4, — P. 296–300.
2. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука. Перевод с англ. — М. "Мир", 1978 — 418 с.
3. Хемометрика / М. Шараф, Д.Л. Иллман, Б.Р. Ковальски : Пер. с англ. — Л.: Химия, 1989. — 272 с.

Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В., начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

д.т.н., проф. Мокрицький В.А., д.т.н., доц. Маслов О.В., к.т.н. Банзак О.В.
МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ ВИГОРЯННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО
ЯДЕРНОГО ПАЛИВА (ВЯП)

У роботі проведений аналіз досвіду розробки макета системи й застосування детекторів. Це дозволило зробити висновок про те, що система контролю стану ВЯП повинна базуватися на CdZnTe-детекторах у які реалізовані умови однозарядового збору. На підставі отриманих результатів запропонована методика контролю вигорання ВЯП у реальному часі при проведенні ТТО.

Ключові слова: CdZnTe -детектори, транспортно-технологічні операції.

V. Mokritsky, O. Maslov, O. Banzak
METHOD OF DETERMINING BURNUP SPENT NUCLEAR FUEL (SNF)

In work the analysis of experience of development of a breadboard model of system and application of detectors is lead. It has allowed to draw a conclusion that the monitoring system of condition irradiated nuclear fuel should be based on CdZnTe-detectors in which conditions of one-charging gathering are realized. On the basis of the received results the technique of the control of burnup nuclear fuel in real time during reloading HME.

Keywords: CdZnTe-detectors, transport and manufacturing operations.