

## РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ОТРАБОТАВШИХ РАБОЧИХ КАССЕТ РЕАКТОРОВ ВВЭР-440 ФАМОС-III\*

**С.А. Андрушечко\*, Б.Ю. Васильев\*, В.Ф. Украинцев\*\*,  
С.Н. Голощапов\*\*\***

*\* ЗАО Атомтехэкспорт, г. Москва*

*\*\* Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,  
г. Обнинск*

*\*\*\* Кольская АЭС, филиал концерна «Росэнергоатом».*



В связи с применением на АЭС с ВВЭР топлива с более высоким обогащением возникла необходимость в разработке и внедрении специального прибора и методики для измерения глубины выгорания отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в реальных условиях АЭС.

Прибор, реализующий эту методику измерения глубины выгорания ОЯТ ФАМОС-III, был создан на основе технических условий, разработанных на Кольской АЭС, а затем поставлен на нее.

Прибор ФАМОС-III представляет собой многофункциональный детектор, который позволяет проводить измерения прямо на штатном месте хранения – в бассейне выдержки. С этим прибором был проведен комплекс методических измерений, позволивших разработать процедуры вычитания фонов, создания градуировочных кривых для разных условий измерений и введения поправок в результаты измерений (на изменение эффективности отдельных каналов, фона, на концентрацию борной кислоты, на распад радионуклидов и т.д.). Были обоснованы как компоненты погрешностей измерений, так и суммарная погрешность (для доверительной вероятности 0,95 во всем допустимом диапазоне измерения характеристик ТВС).

Транспортировка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) как внутри станции, так и с отправкой ОЯТ с АЭС на завод регенерации должна осуществляться только при условии соблюдения правил ядерной безопасности [1-2]. Для транспортировки ОЯТ в контейнерах это означает не превышение эффективным коэффициентом размножения ( $K_{эф}$ ) транспортного упаковочного комплекта (ТУК) с ОЯТ значения 0.95 при всех исходных событиях проектных аварий [1,2,].

Существующие для транспортировки отработавших тепловыделяющих сборок (ТВС) реактора ВВЭР-440 транспортные упаковочные комплекты ТУК-6, включающие специальный железнодорожный вагон, контейнер ТК-6, чехол тип 12 и аппаратуру кон-

---

© С.А. Андрушечко, Б.Ю. Васильев, В.Ф. Украинцев, С.Н. Голощапов, 2004

\* Доклад с VIII Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (Обнинск, 6-8 октября 2003 г.)

троля параметров контейнера при транспортировке, рассчитывались для безопасной транспортировки отработавших ТВС с начальным обогащением до 3.6% (здесь и далее дано обогащение по изотопу U-235) включительно.

К настоящему времени на Кольской АЭС внедрены и промышленно используются ТВС начального обогащения 4.4%, а на блоке 4 – профилированные ТВС со средним обогащением 4.21 и 4.4%. Планируются к использованию на блоках профилированные ТВС со средним обогащением более 3.6%.

В результате проведенного обоснования возможности внутристанционной транспортировки указанных ТВС в штатном чехле «тип 12», входящего в комплект ТУК-6, и их отправки на завод регенерации было установлено, что  $K_{эф}$  не превысит значения 0.95 при загрузке в чехол и контейнер ТК-6 тридцати отработавших ТВС начального обогащения более 3.6% вплоть до 4.4% со средним значением выгорания не менее 25 МВт·сут/тU, при условии проведения перед загрузкой измерения этой величины для каждой загружаемой отработавшей ТВС.

Это ограничение обусловило необходимость разработки, изготовления и внедрения специального прибора и методики для измерения глубины выгорания отработавших ТВС в реальных условиях АЭС, т.е. прямо в бассейне выдержки отработавшего топлива.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

### Обоснование выбора методики измерений

подавляющее большинство используемых в настоящее время методов неразрушающего контроля отработавшего топлива, направленных на определение глубины выгорания топлива, можно разделить на две основные группы: метод гамма-спектрометрии продуктов деления и метод регистрации нейтронного излучения от отработавшего топлива (пассивный и активный).

Поскольку методика, основанная на гамма-спектрометрии продуктов деления, требует применения сложной измерительной системы и может быть реализована практически только в «горячих камерах» или при существенных конструктивных изменениях бассейнов выдержки, то для вновь создаваемого прибора было признано экономически более выгодным использовать метод, основанный на регистрации собственного нейтронного излучения отработавшего топлива – пассивный нейтронный метод. Этот метод получил широкое распространение как для измерения глубины выгорания топлива, так и для решения задач, связанных с контролем ОЯТ, содержащего трансурановые нуклиды. Как известно, изотопы трансурановых элементов в ОЯТ постоянно излучают нейтроны спонтанного деления вместе с нейтронами, возникающими в результате  $(\alpha, n)$ -реакций на легких элементах.

### Основы методики измерений

Наиболее важным свойством, определившим практическую возможность использования пассивного нейтронного метода, является то, что для одинаковых типов ТВС величина собственного нейтронного излучения связана с величиной выгорания топлива простой степенной зависимостью:

$$N = c_n \cdot (W)^\alpha, \quad (1)$$

где  $N$  – нейтронная эмиссия, н/с;  $W$  – глубина выгорания, МВт·сут/кгU;  $c_n$  – нормировочная константа;  $\alpha$  – показатель степени.

Значение нормировочной константы при этом зависит только от начального обогащения топлива и конструкции ТВС. Этот результат нашел подтверждение в большом количестве работ и является общепризнанным.

Скорость счета нейтронов измерительной установкой ( $N_n$ ) пропорциональна регистрируемому нейтронному потоку, а значит уравнение (1) может быть приведено к виду:

$$W = c_N \cdot (N_n)^{\alpha_1}, \quad (2)$$

где  $c_N$  – нормировочная константа;  $N_n$  – скорость счета нейтронов,  $c^{-1}$ ;  $\alpha_1$  – показатель степени.

### Особенности методики

**Градуировка приборов.** По результатам измерений ряда ТВС с известными значениями глубины выгорания ядерного топлива и времени выдержки строится ряд градуировочных кривых, каждая из которых представляет собой зависимость скорости счета нейтронов от глубины выгорания ядерного топлива измеряемых ТВС. Собранные информация (в частности, полученные при градуировке значения величин  $c_N$  и  $\alpha_1$ ) для каждого значения начального обогащения отработавшей ТВС заносятся в массив градуировочных данных и используются при определении глубины выгорания топлива.

**Процесс измерений.** Измеряется нейтронная активность ТВС с неизвестной глубиной выгорания топлива. По результатам измерения с использованием градуировочных кривых определяется глубина выгорания.

**Особенности условий измерений.** Объектом измерения являются отработавшие ТВС реактора ВВЭР-440, основные технические и физические характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Основные параметры измеряемых кассет

Параметр	Значение
Геометрия ТВС	Шестигранные
Размер под ключ	$(144 \pm 1,0)$ мм
Общая длина	3217 мм
Длина активной зоны	2420 мм
Масса $UO_2$	$(120, 2 \pm 2,5)$ кг
* Глубина выгорания	$10 \div 60$ МВт·сут/кгU
* Начальное обогащение	$(1,6 \div 4,4)$ %
* Время выдержки	$(2,5 \div 10)$ лет

\* Три последние параметра в таблице накладывают достаточно серьезные ограничения на характеристики измеряемых ТВС, обусловленные следующими факторами.

*Глубина выгорания.* При значениях глубины выгорания менее 10 МВт·сут/кгU собственный нейтронный поток топлива слишком мал, чтобы при разумных временах измерения получить состоятельную оценку измеряемой величины (выгорания).

*Начальное обогащение.* В таблице указан диапазон, охватывающий все возможные варианты начального обогащения топлива реакторов ВВЭР-440.

*Время выдержки.* При времени охлаждения топлива менее 2,5 лет собственный нейтронный поток зависит от содержания в топливе нуклида  $Sm-242$  ( $T^{1/2}=162,8$  сут). Это может привести к большим систематическим погрешностям и существенно исказить результаты измерений.

### Условия измерений

Измерения осуществляются непосредственно в бассейне выдержки, при этом детектирующая часть установки располагается на стеллаже, предназначенном для хранения ТВС.

Некоторые параметры, характеризующие условия измерений могут изменяться, это температура воды, концентрация борной кислоты. Поэтому влияние изменения этих

параметров на конечные результаты измерений было дополнительно учтено при калибровках прибора.

### **КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА ФАМОС-III**

Прибор, реализующий этот метод измерения глубины выгорания ФАМОС-III (FAMOS-III) был разработан на основе технических условий, разработанных на Кольской АЭС, затем он был изготовлен и поставлен на эту АЭС фирмой NUKEM GmbH (ФРГ).

Прибор ФАМОС-III представляет собой многофункциональный детектор, состоящий из двух основных частей – собственно детектирующей части и регистрирующей электронной аппаратуры.

Детектирующее устройство смонтировано на несущей конструкции, которая окружает центральный канал. При этом измеряемая ТВС перемещается перегрузочной машиной внутри центрального канала детектирующего устройства. На несущей конструкции крепятся четыре нейтронных и один гамма-детектор. Три нейтронных детектора расположены симметрично относительно центральной оси рабочего канала в корпусах из дополнительного замедлителя (материал МАКРАЛОН). Четвертый нейтронный детектор смонтирован без корпуса из дополнительного замедлителя. Показания этого детектора используются для учета концентрации борной кислоты в воде бассейна выдержки.

В качестве нейтронных детекторов используются камеры деления типа CFUM11. Для защиты камер деления от воздействия гамма-излучения они окружаются свинцовой защитой толщиной 10 мм. Дополнительными измерениями доказано, что при этом обеспечивается устойчивая работа камер деления в возможном диапазоне гамма-загрузок от облученного топлива. Для регистрации гамма-излучения от ТВС используется счетчик Гейгера-Мюллера типа 3G10, окруженный свинцовой защитой толщиной 10 мм с цилиндрическим коллиматором, обеспечивающим “просмотр” ТВС с полушириной ~ 5 см по высоте кассеты. Положение всех детекторов – вертикальное, т.е. совпадающее с положением топливного столба твэлов при измерениях. Центральный рабочий канал детектирующего устройства предназначен для перемещения измеряемой ТВС на фиксированном расстоянии от детекторов для ее вертикального сканирования.

В состав детектирующего устройства также входит юстировочный элемент, предназначенный для позиционирования устройства при установке на стеллаж бассейна выдержки, а также для установки калибровочного нейтронного источника в фиксированное по отношению к детекторам нейтронов положение при проведении калибровки (проверки стабильности) прибора.

Все части детектирующего устройства герметичны. Соединение устройства с блоками электроники осуществляется с помощью кабелей, проведенных от детекторов по обеим сторонам основного корпуса и объединенных в кабельном распределителе.

Детектирующее устройство снабжено приспособлениями, обеспечивающими его транспортировку на стеллаж, находящийся вне бассейна выдержки, и закрепление на стеллаже.

В состав регистрирующей аппаратуры, располагаемой вне бассейна выдержки и соединенной с детектирующим устройством герметичным кабелем, входит набор электронных блоков и персональный компьютер. Все электронные блоки выполнены в едином корпусе.

Регистрирующая аппаратура выполняет питание детекторов, регистрацию измеряемых сигналов от детекторов, их усиление и дискриминацию. Каждый детектор имеет свой электронный тракт, что обеспечивает получение данных о скорости сче-

та для каждого детектора, а также накопление поступающей информации и передачи ее программе управления прибором и расчета выгорания на РС.

Программа управления прибором и расчета выгорания выполняет как функции управления собственно процессом измерения (она задает время отдельного измерения, запускает процесс измерения, определяет режим работы и анализирует поступающую информацию на предмет ошибок измерения), так и выполняет задачи, связанные с обработкой результатов измерения и их хранения в банке данных. Программа работает в диалоговом режиме, позволяющим оператору управлять процессом измерения и контролировать его ход.

### **ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ОТРАБОТАВШИХ ТВС**

*Процедура измерения с использованием прибора ФАМОС-III подразделяется на несколько этапов. Перед каждой серией измерений или в том случае, когда измерения одной серии имели значительный временной перерыв (данный параметр задается в виде константы в банк данных и может быть выбран оператором прибора; его рекомендованное значение равно одной неделе), проводится стандартная калибровка, которая включает в себя:*

- измерение фона в надводном положении;
- измерение скорости счета по отдельным каналам при помещении в детектирующую систему реперного источника Cf-252 (данное измерение проводится как в надводном, так и в рабочем положении детектирующего устройства);
- сравнение полученных результатов с результатами стандартной предыдущей калибровки и принятие решения о проведении измерений. Поправка на распад нейтронного источника Cf-252 осуществляется программой обработки данных автоматически.

Разрешение на проведение измерений дается программой лишь в том случае, когда результаты стандартной калибровки совпадают (в пределах статистических погрешностей измерений) с результатами предшествующей калибровки.

*Измерение фона проводится без источника нейтронов при расположении детектирующего устройства на рабочем месте (стеллаж) в воде бассейна выдержки. При этом должно выполняться условие проведения фоновых измерений – расстояние от ближайшей (не измеряемой) ТВС до детектирующего устройства должно быть не менее 2 м.*

В рабочей позиции нейтронный фон практически равен нулю. Поэтому при проведении процедуры «измерение фона» фактически проверяется работоспособность установки в подводном положении. В случае неработоспособности установки (пробои, дефекты усилительной и другой аппаратуры и т.п.) измерения прекращаются до устранения причин, вызвавших эти сбои.

После выполнения двух предварительных этапов переходят непосредственно к *измерению глубины выгорания. Для этого*

- ТВС размещают в рабочем канале детектирующего устройства и располагают в первой позиции (121 мм от нижнего края топливного столба твэлов), после чего проводится первое измерение; время измерения в каждой точке выбирается автоматически и зависит от скорости счета нейтронов; при этом осуществляется проверка счетной статистики, которая должна подчиняться пуассоновскому закону распределения случайной величины (при обнаружении ошибок измерения прекращаются); в каждой точке измерения получают пять экспериментальных значений – это скорости счета по каждому из четырех нейтронных каналов и скорость счета гамма-канала;
- ТВС перемещается (опускается) в следующую позицию измерения; повторяется

процедура измерений в соответствии с первым шагом;

- указанные измерения проводятся последовательно в десяти, равноудаленных точках по высоте топливного столба твэлов;
- если измерение закончилось без сообщения об ошибках, процедура выполнения измерения заканчивается.

После этого ТВС помещается на штатное место хранения, или при отправке на завод регенерации загружается в транспортный контейнер.

По окончании всего цикла измерений детектирующее устройство извлекается из бассейна выдержки и установка ФАМОС-III транспортируется на штатное место хранения.

### **ПРОЦЕДУРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ**

После окончания серий измерений проводится автоматическая обработка результатов измерения и выводится протокол измерений с указанием полученных значений выгорания в десяти точках по высоте и среднего значения выгорания по кассете.

*Расчет глубины выгорания.* В процессе выполнения измерений в памяти компьютера накапливается массив экспериментальных данных по следующим характеристикам:

- скорости счета детекторов нейтронов типа 1 (окруженных замедлителем);
- скорости счета детектора нейтронов типа 2 (без замедлителя);
- скорости счета гамма-детектора.

После проведения сканирования программа переходит к обработке полученной информации. При этом должны быть заполнены все массивы параметров, необходимых для работы программы. Данные массивы заполняются как в процессе калибровки установки в лаборатории, так и при проведении градуировочных измерений в бассейне выдержки.

В процессе расчета выгорания производятся следующие операции.

*Вычитание фона.* Скорость счета фона, как уже упоминалось, определяется в день измерения перед началом измерительного процесса. Вычитание происходит для каждого измерительного канала.

*Введение поправки на изменение эффективности.* В процессе эксплуатации установки эффективность отдельного измерительного канала может измениться вследствие ряда факторов (например, замена вышедшей из строя камеры деления, изменения уровня дискриминации или коэффициента усиления и т.п.). В этом случае необходимо перенормировать скорость счета в данном канале с учетом нового значения эффективности. При возникновении указанных отклонений проводится процедура перекалибровки канала.

*Введение поправки на мертвое время.* При значительных интенсивностях регистрируемого сигнала за счет конечной длительности импульсов возможно их наложение, т.е. просчеты. Этот эффект воспринимается как изменение эффективности счетного канала. В случае гамма-измерения для кассет с большими значениями глубины выгорания и малыми временами выдержки этот эффект необходимо учитывать.

*Определение поправок на концентрацию борной кислоты.* Концентрация борной кислоты в бассейне выдержки может изменяться в значительном интервале (от 12 до 26 г борной кислоты на 1 кг воды). Являясь хорошим поглотителем тепловых нейтронов, бор тем самым меняет фактическую интенсивность нейтронного потока, падающего на нейтронные датчики. Для учета этого эффекта необходимо знать концентрацию борной кислоты на момент измерения. Для этого в детектирующем устройстве установки располагается детектор нейтронов (тип 2), не окруженный допол-

нительным замедлителем. Ясно, что скорость счета этого детектора будет зависеть от концентрации бора более существенно, чем для детекторов, окруженных дополнительным замедлителем (тип 1). Отношение скорости счета детекторов типа 1 к скорости счета детектора типа 2 является функцией концентрации борной кислоты.

Изменение концентрации борной кислоты приводит к изменению эффективности регистрации собственных нейтронов от измеряемой ТВС. Для определения поправки, учитывающей этот эффект были проведены лабораторные измерения и определен поправочный множитель.

*Введение поправки на аксиальный градиент выгорания.* При измерениях собственного нейтронного излучения от ТВС в фиксированной точке фактически измеряется усредненная величина нейтронного потока по длине сборки. Функция, усредняющая значение нейтронного потока, представляет собой зависимость эффективности регистрации системы «источник-детектор». При этом источник нейтронов распределен линейно вдоль кассеты.

Учет поправки на аксиальный градиент выгорания необходимо проводить в случае значимого изменения интенсивности нейтронного потока на «просматриваемой» области ТВС, а сама величина просматриваемой области зависит, в свою очередь, от геометрического разрешения установки. Для определения геометрического разрешения установки были проведены калибровочные измерения на имитаторе ТВС в условиях идентичных штатным. Учет аксиальной зависимости выгорания необходимо проводить только для периферийных областей кассеты (три точки снизу и три сверху топливного столба твэлов). Это объясняется малой зависимостью выгорания по длине сборки в ее центральной области (четыре центральные точки) и практически идентичным ходом зависимости этой величины для всех ТВС (включая и реперные). Таким образом, учет этой поправки в центральной области привел бы (за счет ошибок калибровки) лишь к увеличению общей погрешности измерений.

Аналогичный учет поправочного множителя при регистрации гамма-излучения проводится также по результатам лабораторных калибровок.

Значения выгорания в периферийных областях ТВС рассчитываются по результатам гамма-сканирования, что обусловлено меньшей величиной геометрического разрешения гамма-детектора и большей скоростью счета гамма-излучения (по сравнению со скоростью счета нейтронов).

*Введение поправки на распад.* Настоящая поправка обусловлена тем, что результаты всех измерений (как градуировочных, так и штатных) должны быть по скорости счета приведены к одному и тому же времени охлаждения топлива. В противном случае в общую погрешность результатов измерений войдет не исключаемая систематическая погрешность.

В результате расчета определяются значения выгорания в 10 точках по высоте и среднее значение выгорания по ТВС. Пример обработки и выдачи результатов измерения приведен в табл.2.

*Процедура построения градуировочных кривых.* Для построения градуировочных кривых, представляющих собой зависимости глубины выгорания от скорости счета собственных нейтронов, проводятся градуировочные измерения в порядке, соответствующем стандартной процедуре измерения и с дополнениями, обеспечивающими наиболее оптимальный выбор градуировочных параметров.

Процедура получения градуировочных кривых состоит в следующем:

- проводится анализ паспортных данных ТВС, хранящихся в бассейне выдержки топлива, на основании которого отбирается партия кассет с параметрами (глубина выгорания, обогащение, время выдержки), охватывающими весь “рабочий” диапазон установки ФАМОС-III;

Таблица 2

**Результаты измерений**

№ ТВС -22242

Дата измерения дд.мм.гг.

№ точки	Позиция по высоте	Скорости счета детекторов, с <sup>-1</sup>					Выгорание (паспорт), МВт-сут/кгU	Выгорание (эксперим.), МВт-сут/кгU
		D1	D2	D3	D4	D5		
1	121	82.25	83.70	76.30	17.10	7327.1	32.87	35.99
2	363	195.45	192.65	179.00	43.20	8679.7	45.57	44.59
3	605	245.20	248.45	215.90	51.85	8963.1	47.51	47.18
4	847	249.65	255.45	217.90	55.45	9016.8	47.25	47.40
5	1089	249.05	242.85	216.15	54.25	9108.3	46.85	47.16
6	1331	233.35	229.20	203.00	48.75	9080.8	46.56	46.43
7	1573	194.60	194.35	176.45	44.55	8954.7	45.47	44.55
8	1815	142.85	149.00	136.95	28.55	8564.2	41.63	41.62
9	2057	70.75	74.15	72.25	16.95	7644.1	36.39	35.00
10	2299	14.55	16.60	15.55	3.40	5325.7	24.00	23.69
Ср.зн.		167.77	168.64	150.95	36.41	8266.4	41.47	41.36

Результаты измерений	Паспортные значения	Экспериментальные данные
Концентрация бора, г/кг бор.кисл.	16.7	16.5 ± 0.9
Время охлаждения, лет	4.2	3.9 ± 0.5
Глубина выгорания, МВт-сут/кгU	41.5	41.4 ± 5.9

- осуществляется стандартная калибровка и измерение фона;
- проводятся измерения отобранной партии;
- в процессе проведения калибровочных и основных измерений программно определяются поправки на фон и на изменение эффективности установки, определяется концентрация борной кислоты;

- результаты расчета по экспериментальным данным значений концентрации борной кислоты сравниваются с результатами химического анализа. В базовый массив поправочных множителей программно заносится соответствующий коэффициент;

- по результатам измерений для каждой величины начального обогащения строится зависимость скорости счета нейтронов от глубины выгорания топлива.

Зависимости, обратные полученным (т.е. зависимости глубины выгорания топлива от скорости счета собственных нейтронов), и будут искомыми градуировочными кривыми. Всего таких кривых четыре, каждая из которых соответствует одному из четырех начальных обогащений: 1.6, 2.4, 3.6 и 4,4%.

Погрешность градуировочной кривой определяется систематической погрешностью паспортной величины выгорания используемых ТВС и погрешностью, обусловленной статистическими погрешностями измерений скорости счета нейтронов в процессе проведения градуировки.

Данные по времени охлаждения топлива и начальному обогащению берутся из паспортных данных. Данные по выгоранию в десяти точках по высоте ТВС и усредненные значения глубины выгорания для каждой из них рассчитываются по программе АЛЬБОМ-РС (обеспечивающей погрешность определения объемного энерговыделения не хуже 10%). Дополнительным подтверждением точности определения глубины выгорания по указанной программе служат результаты сравнения экспериментальных данных, полученных на сборах с начальным обогащением 4,4% по трем не-



разрушающим методикам (по измерению активностей  $Cs-137 - W_{137}$ ; отношению активностей  $Cs-134/Cs-137 - W_{134}$  и по собственным нейтронам –  $W_n$ ), с расчетными (паспортными) результатами по программе АЛЬБОМ-РС. Отклонение экспериментальных и расчетных значений не превысило 3% для всех измеренных ТВС, что значительно меньше принятой (оцененной) погрешности (в 10%). Таким образом, методическая погрешность расчетов может быть оценена примерно в 5%, тогда как максимальная оценена величиной 10%.

*Калибровка прибора ФАМОС-III по содержанию в бассейне выдержки борной кислоты.* Калибровка производится с целью построения градуировочной зависимости эффективности регистрации потока собственных нейтронов от концентрации борной кислоты и определения параметра корректировки. Калибровка осуществляется путем измерения нейтронного потока от одних и тех же выгоревших ТВС при разных концентрациях борной кислоты в бассейне выдержки. При калибровке прибора ФАМОС-III на Кольской АЭС концентрация борной кислоты менялась в пределах возможного диапазона (~ 14-26 г/кг воды). При калибровке в лаборатории диапазон был расширен (от 0 до 26 г/кг воды). Полученные результаты в рабочем диапазоне совпали в пределах статистических погрешностей (< 3% при  $P=0,95$ ).

При проведении измерений глубины выгорания концентрация борной кислоты в воде бассейна выдержки топлива определяется и учитывается автоматически. Значение концентрации борной кислоты в воде бассейна выдержки топлива определяется и в ходе химического анализа на АЭС. Экспериментальные данные и данные химического анализа должны совпадать в пределах погрешностей их измерения. В противном случае до проведения последующих измерений необходимо выяснить причины несовпадения указанных параметров, провести (при необходимости) работы по их устранению и осуществить повторную калибровку установки.

*Оценка погрешностей определения выгорания* производилась по совокупности оценок погрешностей, проведенных в калибровочных измерениях установки в лаборатории, статистической погрешности измерений и погрешностей калибровочных кривых (поправка на концентрацию борной кислоты и определение зависимости выгорания от собственного нейтронного потока от отработавшего топлива).

Результирующая систематическая погрешность глубины выгорания  $\Theta_W$  складывается из систематической погрешности

- паспортных данных глубины выгорания;
- градуировки по выгоранию;
- скорости счета, вызванной возможным отклонением ТВС от оси рабочего канала прибора;
- скорости счета по градуировке на концентрацию борной кислоты;
- скорости счета, обусловленной временным дрейфом электроники и погрешностей построения градуировочных кривых.

Окончательный результат для погрешности определения глубины выгорания получается при квадратичном сложении полученных систематической погрешности выгорания  $\Theta_W$  и статистической погрешности измерения скорости счета  $\Theta_{стат}$ :

$$\Theta_{сум} = \sqrt{\Theta_W^2 + \alpha_1^2 + \Theta_{стат}^2}, \quad (3)$$

где  $\Theta_{стат}$  – статистическая погрешность в скорости счета собственных нейтронов, усредненная по трем детекторам;  $\alpha_1$  – параметр (см. (2)).

*Результаты калибровочных и контрольных измерений.* С целью калибровки установки ФАМОС-III, проверки ее работоспособности при работе в реальных условиях в бассейне выдержки топлива и отработки методики измерения на Кольской АЭС по специальным программам были проведены калибровочные и контрольные измерения. Для измерений были выбраны отработавшие ТВС с различными глубинами

выгорания и начальными обогащениями. Для определения зависимости счетных характеристик установки от концентрации борной кислоты в воде бассейна выдержки, ее концентрация изменялась от 16 до 24 г/кг воды.

После окончания процедуры калибровки прибора ФАМОС-III были проведены две серии контрольных измерений отработавших ТВС с различными значениями глубины выгорания топлива, начального обогащения и времени выдержки топлива. При этом в качестве входного параметра задавалась только величина начального обогащения топлива. Значения выгорания топлива и времени выдержки предполагались неизвестными. Результаты данных измерений представлены в табл. 3, из которой видно, что отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает 5% для всех измеренных ТВС. Таким образом, результаты экспериментального определения глубины выгорания для всех измеренных ТВС совпали с паспортными значениями в пределах рассчитанных погрешностей.

Исходя из критериев, ограничивающих диапазон параметров измеряемых сборок (табл. 1), были отобраны 16 ТВС, которые приняты в качестве реперных для использования в процедуре поверки прибора ФАМОС-III, они были разбиты на 4 группы (по 4 штуки в каждом бассейне выдержки).

Комплекс экспериментально-расчетных работ и натурных измерений в реальных условиях хранения отработавших ТВС, проведенный в бассейне выдержки Кольской АЭС, позволил обосновать и подтвердить следующие положения:

- подтверждена правильность принятой методики измерений глубины выгорания отработавших ТВС на Кольской АЭС с использованием монитора топливных кассет ФАМОС-III, что позволяет проводить измерения непосредственно в бассейне выдержки топлива;
- подтверждена корректность алгоритма обработки экспериментальных данных, который обладает необходимой полнотой и учитывает практически все поправки, влияющие на результаты измерений (изменение эффективности отдельных каналов,

Таблица 3

### Результаты измерений глубины выгорания отработанных ТВС

Дата измерения	№ кассеты	Концентрация $\text{H}_3\text{BO}_4$ , г/кг воды	Обогащение, %	$T_{\text{охл.}}$ , лет	Выгорание, МВт·сут/кгУ		$\delta$ , %
					расчет	эксперимент	
19.10.x0	03595	16,7	1,6	9,97	20,47	19,54	4,54
19.10.x0	29044	16,7	2,4	6,4	12,11	12,4	-2,39
19.10.x0	29037	16,7	2,4	6,1	22,13	22,02	0,50
19.10.x0	27664	16,7	3,6	5,07	26,23	26,18	0,19
19.10.x0	16847	16,7	3,6	5,11	39,58	39,3	0,71
19.10.x0	22242	16,7	4,4	4,95	41,47	41,36	0,27
21.10.x0	30783	24,0	4,4	2,67	45,32	46,67	-0,09
21.10.x0	30792	24,0	4,4	2,67	45,32	45,64	0,30
21.10.x0	30794	24,0	4,4	2,67	45,32	45,64	-0,71
21.10.x0	30795	24,0	4,4	2,67	45,32	46,84	-3,35
21.10.x0	30830	24,0	4,4	2,67	45,32	43,34	4,37
21.10.x0	30831	24,0	4,4	2,67	45,24	46,22	-2,17
21.10.x0	22993	24,0	3,6	5,63	36,09	35,45	1,77
24.01.x1	12740	22,6	1,6	9,97	9,68	9,47	2,17
24.01. x1	29044	22,6	2,2	6,4	12,84	12,37	3,66
24.01. x1	34987	22,6	2,2	1,35	48,15	48,64	-1,02

фоновые измерения, учет поправки на концентрацию борной кислоты, итерационные вычисления с корректировкой на распад радионуклидов и т.д.);

- показано соответствие полученных градуировочных кривых экспериментальным и расчетным данным, полученным в других работах, посвященных изучению выгорания ТВС реакторов ВВЭР;

- обоснованы компоненты погрешностей, при этом суммарная погрешность измерения глубины выгорания лежит в пределах 11-14% при доверительной вероятности 0,95 во всем допустимом диапазоне измерения характеристик ТВС.

Особо отметим, что при проведении экспериментального контроля глубины выгорания ТВС ВВЭР-440 (4,4% по U-235), разрешение на их загрузку в транспортный контейнер дается в случае, если расчетная глубина выгорания топлива минус суммарная погрешность измерений превышает величину 25 МВт·сут/кгU, т.е.

$$W_{измер} - \Theta_{сум} > 25 \text{ МВт·сут/кгU.}$$

При этом измеренные и расчетные значения глубины выгорания и времени выдержки топлива должны совпадать в пределах полученных погрешностей:

$$\begin{aligned} |W_{измер} - W_{пасп}| &< \Theta_{сум} \\ |T_{визмер} - T_{впасп}| &< \Theta_{Tв}, \end{aligned}$$

где  $W_{измер}$  – измеренное значение выгорания, МВт·сут/кг U;  $W_{пасп}$  – паспортное (расчитанное) значение выгорания, МВт·сут/кг U;  $\Theta_{сум}$  – суммарная погрешность измерения глубины выгорания при доверительной вероятности  $P=0,95$ ;  $\Theta_{Tв}$  – суммарная погрешность определения времени выдержки.

Прибор ФАМОС-III был аттестован комиссией по методам и средствам контроля параметров ядерной безопасности Министерства по атомной энергии РФ и рекомендован к применению на Кольской АЭС. Методика выполнения измерений глубины выгорания отработавшего топлива реакторов ВВЭР-440 с помощью прибора ФАМОС-III аттестована в установленном порядке уполномоченным органом Госстандарта РФ. Таким образом, Кольская АЭС стала первой АЭС России, обладающей штатной системой экспериментального контроля глубины выгорания отработавшего топлива.

В результате проведенной работы предложена, обоснована и практически реализована методика измерений глубины выгорания отработанного топлива повышенного обогащения непосредственно в местах хранения и с использованием имеющихся штатных средств его транспортировки. Создан и внедрен прибор ФАМОС-III, реализующий эту методику. Прибор используется для проведения штатных измерений при обосновании безопасности хранения отработавшего топлива и может быть рекомендован для использования на других АЭС.

### Литература

- Основные правила безопасности и физической защиты при перевозке ядерных материалов, ОПБЗ-83. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1984.
- Правила безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетики, ПНАЭ Г 14-029-91. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1992.
- Коломцев Ю.В., Омельчук В.В., Пыткин Ю.Н., Андрушечко С.А., Голощапов С.Н., Попов Н.И., Адеев В.А. Повышение эффективности топливоиспользования и совершенствование систем обращения с ядерным топливом на АЭС с ВВЭР-440. – СПб.: Интермедика, 2000.
- Пыткин Ю.Н., Андрушечко С.А., Васильев Б.Ю., Голощапов С.Н. Внедрение на Кольской АЭС прибора для измерения глубины выгорания отработавших тепловыделяющих сборок/ Труды Российской международной конф. по учету, контролю и физической защите ядерных материалов (Обнинск, 9-14 марта, 1997).

Поступила в редакцию 2.03.2004

Calculation research has been done to substantiate accumulation of  $^{242m}\text{Am}$  from  $^{241}\text{Am}$  target in BN-600 reactor

Experience of breeding the isotopes (such as  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ) with the special irradiating channels has been stored at BN-600 reactor. The channels with different moderators –  $\text{ZrH}_2$ , Be,  $^{11}\text{B}_4\text{C}$  and with different filters – Cd, Gd,  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{157}\text{Gd}$  have been considered in the noted research. It is demonstrated that the special designed irradiating channels allow to increase amount of  $^{242m}\text{Am}$  in irradiated sample up to 14 % for irradiation period less than two years. Under irradiation in neutron spectrum at the fast reactor with no irradiating channel it is possible to obtain  $^{242m}\text{Am}$  in amount not more than 6 % for approximately 12 years.

#### **УДК 621.039.564**

*Development and Implementation of the Device for Measurement of Spent Fuel Assemblies Burn-up For the VVER-400 Reactor (FAMOS-III) \S.A. Andrushechko, S.N. Goloshapov, V.F. Ukraintsev, B.Yu. Vasiliev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 11 pages, 3 tables. – References 4 titles.*

Because of use of a new NPP fuel with higher enrichment, there was a necessity in development of a special device and technique for a measurement of burn-up of spent fuel in a real NPP conditions.

The device, which realized this technique of burn-up measurement, is FAMOS-III. It was developed under technical requirements, developed on the Kola NPP, and then was established on it.

The FAMOS-III represents the multifunctional detector, it allows to carry out measurements directly on a nominal place of fuel storage – in the spent fuel pool. The complex of methodical measurements was carried out to develop the procedures of a background subtraction, creation of calibration curves for different measurement conditions and for result corrections (on a modification of separate channels effectiveness, background measurements, correction on miscounts, boron acid concentration etc.). The components of measurement errors and resulting error were analyzed and adjusted.

As a result, the FAMOS-III device was certificated by the commission of methods and tools of nuclear safety parameter control of the Atomic Ministry of Russian Federation. It is recommended for application on the Kola NPP. The technique of measurements a VVER-440 spent fuel burn-up by FAMOS -III is certificated by State Standards Committee of Russian Federation.

#### **УДК 621.039.54**

*MCNP-based Nuclear Fuel Burn-up Calculations \M.Yu. Volkov, V.V. Kolesov, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 13 pages, 7 illustration, 6 tables. – References 5 titles.*

The program system for nuclear fuel burn-up calculations is described. This program system is based on the MCNP-code for neutron transport calculations. Also some results of applying this system to existing benchmark calculations of high conversion light water reactor cell with tighter pitch lattice are presented.

#### **УДК 621.039.586: 536.42**

*Calculation analysis of relocation and freezing of uranium dioxide melt in the ring channel in conditions of experiment TRAN/G.N. Vlasichev, G.B. Usynin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 7 titles.*

The numerical model of relocation and freezing of molten fuel in channels for pass of coolant in axial blanket of BN reactor at heavy accident with core meltdown is used for the calculation analysis of experiment TRAN-B1 with pure uranium dioxide ejected upwards in the ring channel. The developed numerical model is a combination of models of conduction and volumetric freezing – takes into account narrowing the channel and increase of driven melt viscosity. The results of the techniques received on the calculation scheme with limited amount of melt, will satisfactorily be coordinated to the experiment data. The calculation data will be coordinated with experimental on character of process, in which the part of a material freezes in frozen crusts on ring section walls, and other material, not blocking completely through passage section, is carried away in the waste tank. Thus the calculated values of frozen crusts thickness equal maximum 0,23 mm and 0,24 mm on convex and concave accordingly walls of the channel, coincide with experimental data. The basic amount of the