

# РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ФАКТОВ ВЫНОСА ТОПЛИВА ИЗ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ТВЭЛОВ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ РЕАКТОРОВ ВВЭР

И.А. Евдокимов\*, А.Г. Хромов\*, П.М. Калинин\*,  
В.В. Лиханский\*\*, А.А. Ковалишин\*\*, М.Н. Лалетин\*\*

\* АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

108840, Московская обл., Троицк, ул. Пушкиных, владение 12

\*\* НИЦ «Курчатовский Институт»

123182, Москва, пл. академика Курчатова, 1



При эксплуатации ядерного топлива на АЭС возможна разгерметизация оболочек твэлов. Одним из возможных и наиболее серьезных последствий разгерметизации является вымывание топливной композиции из негерметичного твэла в теплоноситель.

Надежно выявлять вынос топлива во время кампаний важно с точки зрения дальнейшего обращения с ТВС, в которых разгерметизировались твэлы. Выявление выноса топлива возможно в рамках контроля герметичности оболочек твэлов во время работы реактора. В реакторах ВВЭР для этой цели традиционно используется активность  $^{134}\text{I}$ . Однако на практике активность  $^{134}\text{I}$  может увеличиваться в ходе кампании даже в том случае, когда негерметичных твэлов нет, и единственным источником выхода продуктов деления являются топливные отложения в активной зоне.

Предложен критерий, позволяющий различать случаи, когда рост активности короткоживущих радионуклидов обусловлен выходом продуктов деления из топливных отложений или выносом топливной композиции из негерметичных твэлов во время работы реактора ВВЭР. Приведены примеры практического применения разработанного критерия на действующих АЭС.

**Ключевые слова:** ВВЭР, твэл, разгерметизация, продукты деления, методика, активность теплоносителя, радионуклиды йода, вымывание топлива.

## ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации ядерного топлива на АЭС возможна разгерметизация оболочек твэлов. Разгерметизации могут приводить к росту активности теплоносителя первого контура, повышению дозовых нагрузок на персонал, увеличению объема жидких радиоактивных отходов и необходимости проведения дополнительных операций для поиска и замены ТВС с негерметичными твэлами. Это сопровождается значительными финансовыми потерями.

Одним из возможных и наиболее серьезных последствий разгерметизации является

© И.А. Евдокимов, В.Г. Хромов, П.М. Калинин., В.В. Лиханский, А.А. Ковалишин, М.Н. Лалетин, 2020

вымывание топливной композиции из негерметичного твэла в теплоноситель. Радиационные последствия выноса топлива могут сохраняться на энергоблоке в виде высокой фоновой активности долгое время – до 10 лет [1].

Надежно выявлять факт выноса топлива во время кампаний важно с точки зрения дальнейшего обращения с ТВС, в которых разгерметизировались твэлы. Обращение с такими ТВС имеет ряд особенностей.

В некоторых странах допускается продолжение эксплуатации ТВС с «небольшими» дефектами в негерметичных твэлах, если не достигнуты критерии досрочной выгрузки ТВС из реактора [2]. При этом для оценки состояния негерметичного твэла используются косвенные факторы [3, 4]. Недостигнутый критерий досрочной выгрузки не всегда гарантирует малую степень повреждения оболочки негерметичного твэла. Если установлено, что во время эксплуатации из негерметичного твэла выносилось топливо, это можно использовать как приоритетный критерий досрочной выгрузки. В России к настоящему времени сложилась практика, согласно которой из реактора выгружаются все ТВС с негерметичными твэлами независимо от размера дефекта в оболочке. Тем не менее, действующие регламенты допускают при определенных условиях продолжать эксплуатацию ТВС с негерметичными твэлами. Такая возможность может быть использована, например, если возникают проблемы с заменой ТВС, в которой разгерметизировались твэлы.

Установленный факт выноса топлива ограничивает условия промежуточного хранения ТВС на атомной станции. Тепловыделяющие сборки, из поврежденных твэлов которых выносилось топливо, в обязательном порядке необходимо размещать в гермопеналах бассейна выдержки. Возможны дополнительные ограничения на вывоз этих ТВС с атомной станции на переработку или длительное хранение.

Ряд эксплуатирующих организаций за рубежом использует технологии ремонта, когда в условиях атомной станции негерметичный твэл извлекается из ТВС и заменяется трубкой-вытеснителем [5]. В настоящее время работы по развитию этой технологии ведутся и в России для АЭС с реакторами ВВЭР-1000/1200. Вынос топлива в ходе кампании можно использовать как ограничение на целесообразность ремонта ТВС. Существуют большие риски, что негерметичный твэл, из которого выносилось топливо, при извлечении из ТВС может быть разрушен.

Выявление выноса топлива возможно в рамках контроля герметичности оболочек (КГО) твэлов во время работы реактора [6 – 10]. Для этого используют данные измерения активности продуктов деления в теплоносителе первого контура. В общем случае активность продуктов деления складывается из двух источников – выход радионуклидов из негерметичных твэлов и из топливных отложений. Топливные отложения формируются из урановой пыли, оседающей на твэлах при производстве, и (или) из топливной композиции, вымытой из негерметичных твэлов во время эксплуатации на АЭС.

В случае разгерметизации из-под оболочки негерметичного твэла выносятся преимущественно долгоживущие продукты деления. Радионуклиды с малым временем жизни распадаются под оболочкой, не успевая выйти в теплоноситель. В этом случае активность радионуклидов, связанная с выходом продуктов деления из негерметичного твэла, оказывается меньше фона, определяемого выходом радионуклидов из топливных отложений. Поэтому в качестве меры количества топливной композиции на поверхностях конструкций активной зоны обычно используют активности наиболее короткоживущих радионуклидов из доступных для измерения на АЭС [11]. В реакторах ВВЭР для этой цели традиционно используется активность  $^{134}\text{I}$  [10]. В реакторах PWR кроме  $^{134}\text{I}$  привлекаются данные по  $^{89}\text{Rb}$  [1].

Однако на практике активность продуктов деления (в том числе и короткоживущих) может увеличиваться в ходе кампании даже в том случае, когда негерметичных твэлов

нет, и единственным источником выхода продуктов деления являются топливные отложения. Это связано с двумя факторами.

Во-первых, в ходе облучения меняется нуклидный состав топливных отложений. В отложениях плутоний нарабатывается быстрее и до больших концентраций, чем в среднем по топливным таблеткам в твэлах. Такое поведение объясняется меньшим эффектом блокировки нейтронного сечения  $^{238}\text{U}$  в частицах топлива на наружной поверхности оболочки (эффект блокировки в топливных таблетках описан, например, в [12]). В силу интенсивной наработки плутония в отложениях – при заданной мощности твэла – нарастает скорость делений. Это может приводить к увеличению скорости выхода радионуклидов из отложений в теплоноситель во время кампании.

Во-вторых, эволюция нуклидного состава в отложениях приводит к изменению радиационных выходов (вероятности образования радионуклида при одном делении в топливе). Например, для  $^{131}\text{I}$  кумулятивный радиационный выход при делении  $^{239}\text{Pu}$  примерно на 30% больше, чем при делении  $^{235}\text{U}$ .

Для надежного выявления выноса топливной композиции при КГО на работающем реакторе необходимо различать случаи, когда рост активности короткоживущих продуктов деления обусловлен выносом топлива из негерметичных твэлов и когда он связан с эволюцией нуклидного состава топливных отложений.

Предложен критерий, позволяющий устанавливать факт выноса топлива во время работы реактора ВВЭР в случае разгерметизации твэлов. Приведены примеры практического применения разработанного критерия на действующих АЭС.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КРИТЕРИЯ

**Поведение короткоживущих продуктов деления в первом контуре.** Для описания активности продуктов деления в первом контуре используются балансные уравнения [13, 14]. Из балансных уравнений для  $^{134}\text{I}$  следует, что

$$A \propto R, \quad (1)$$

где  $A$  – активность  $^{134}\text{I}$ ;  $R$  – скорость выхода  $^{134}\text{I}$  в теплоноситель из топливных отложений.

В работе [14] были получены зависимости, описывающие скорость выхода продуктов деления из отложений. Для  $^{134}\text{I}$  скорость выхода из отложений имеет вид

$$R \propto YF, \quad (2)$$

где  $Y$  – кумулятивный выход  $^{134}\text{I}$  на деление;  $F$  – скорость делений (количество делений тяжелых ядер за единицу времени в единице объема топливных отложений в активной зоне).

Зависимость  $F$  от нуклидного состава топлива в отложениях можно приближенно представить в виде

$$F \approx \Phi (\sigma_{\text{Pu}} c_{\text{Pu}} + \sigma_{\text{U}} c_{\text{U}}), \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{Pu}}$ ,  $c_{\text{Pu}}$  – эффективное сечение деления и концентрация ядер  $^{239}\text{Pu}$  в отложениях;  $\sigma_{\text{U}}$ ,  $c_{\text{U}}$  – то же для  $^{235}\text{U}$ ;  $\Phi$  – плотность потока нейтронов.

Во время работы реактора в топливных отложениях уран выгорает, а плутоний накапливается. С учетом того, что  $\sigma_{\text{Pu}} > \sigma_{\text{U}}$ , при некоторых условиях накопление плутония в отложениях может приводить к росту скорости делений  $F$  и, как следует из (1) и (2), к росту фоновой активности.

**Особенности изменения нуклидного состава топлива в отложениях.** Нарботка плутония в топливе определяется резонансным захватом надтепловых нейтронов ядрами  $^{238}\text{U}$ . Для демонстрации различий между накоплением плутония в топливных отложениях и в топливных таблетках рассмотрим модельную задачу.

Пусть имеется плоский слой топлива некоторой толщины, на который под прямым

углом падает поток  $\Phi$  надтепловых нейтронов. Оценим, как меняется скорость наработки плутония в топливе по глубине  $x$  (рис. 1).



Рис. 1. Схематическая иллюстрация к модельной задаче, описывающей захват нейтронов ядрами  $^{238}\text{U}$

При заданной энергии нейтронов вероятность  $dp$  захвата нейтрона на глубине  $x$  в слое  $dx$  [12]

$$dp = \sigma \cdot c \cdot \exp(-\sigma \cdot c \cdot x) dx, \quad (4)$$

где  $c$  – концентрация ядер  $^{238}\text{U}$ ;  $\sigma$  – сечение захвата нейтронов ядрами  $^{238}\text{U}$ .

В пересчете на единицу поверхности в единицу времени количество реакций резонансного захвата нейтронов  $dN(x)$  в интервале энергии  $dE$  на глубине  $x$  определяется выражением

$$dN = c \cdot \sigma \cdot \exp(-c \cdot \sigma \cdot x) dx [\varphi(E) dE], \quad (5)$$

где  $\varphi$  – энергетическая плотность падающего потока.

Высокое макроскопическое сечение захвата нейтронов ядрами  $^{238}\text{U}$  приводит к ослаблению потока околорезонансных нейтронов по толщине топливного слоя. При этом для расчета интенсивности взаимодействия нейтронного потока с топливом удобно ввести величину  $\sigma_{eff}(x)$  – «эфффективное» сечение нейтронного захвата:

$$\sigma_{eff}(x) = \frac{1}{\Phi} \int_{E_1}^{E_2} \sigma(E) e^{-c\sigma(E)x} \varphi(E) dE, \quad (6)$$

$$\Phi = \int_{E_1}^{E_2} \varphi(E) dE, \quad (7)$$

где  $E_1, E_2$  – границы диапазона энергий надтепловых нейтронов. При этом выражение (5) можно переписать в виде

$$dN = \Phi \cdot \sigma_{eff}(x) \cdot c \cdot dx. \quad (8)$$

Сечение поглощения  $\sigma(E)$  нейтронов ядрами  $^{238}\text{U}$  включает в себя ряд резонансных пиков в надтепловой области спектра. Наиболее значимым является первый пик при энергии  $E_r \approx 6.67$  эВ. Его вклад в интегральное резонансное сечение составляет около 40% [12].

В надтепловой области нейтронного спектра можно приближенно считать, что  $\varphi \propto 1/E$ . Подставив в выражение (6) зависимость сечения от энергии для одного резонансного пика, согласно формуле Брейта-Вигнера [12], для конфигурации на рис. 1 получим

$$\frac{\sigma_{eff}(x)}{\sigma_{eff}(0)} = \exp(-\sigma_0 c x / 2) I_0(-\sigma_0 c x / 2), \quad (9)$$

где  $I_0$  – модифицированная функция Бесселя первого порядка;  $\sigma_0 = \sigma(E_r)$  – амплитуда резонансного пика.

На внешней границе топливного слоя ( $x = 0$ ) правая часть соотношения равна единице. Следовательно, для плоской геометрии (см. рис. 1) величина  $\sigma_{eff}(0)$  в (9) должна соответствовать сечению «бесконечного разведения» (т.е. сечению в случае бесконечно малой концентрации  $^{238}\text{U}$  при заданном спектре нейтронов).

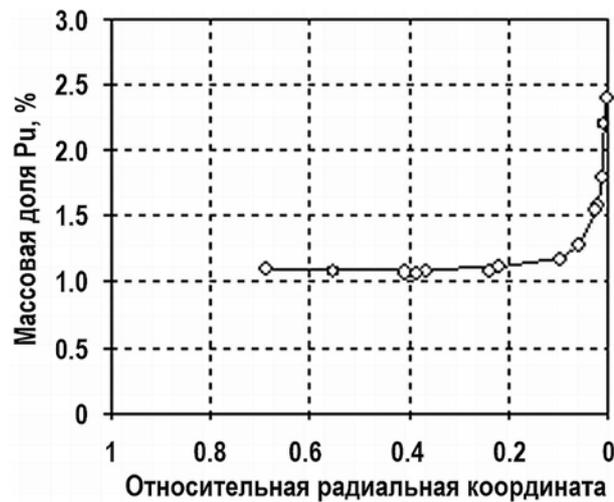


Рис. 2. Распределение массовой доли плутония в топливной таблетке из диоксида урана при выгорании ~ 59 МВт·сут/кгU [16]

При  $\sigma_0 c x \gg 1$  (для первого резонансного пика  $^{238}\text{U}$  и топлива из диоксида урана это соответствует  $x \gg 1 \cdot 10^{-5}$  м) правая часть (9) убывает как  $x^{-0.5}$ . Это означает, что на масштабах порядка нескольких миллиметров (размер топливной таблетки) среднее значение  $\sigma_{eff}$  будет в разы меньше, чем в приповерхностном слое. В результате интенсивность резонансного взаимодействия нейтронов с  $^{238}\text{U}$ , а значит, и концентрация плутония на периферии топливной таблетки должны быть заметно больше, чем в среднем по таблетке. Это подтверждается послереакторными исследованиями [15, 16] (рис. 2). Заметим, что фактический профиль накопления  $^{239}\text{Pu}$  по толщине топливного слоя отличается от зависимости  $x^{-0.5}$  за счет неблокированной части интегрального резонансного сечения [12].

В [12] предложен подход, позволяющий количественно оценить различия эффективного сечения на периферии топливной таблетки и среднего сечения  $\sigma_{eff}$  по таблетке. Из данного подхода следует, что доля поглощаемых резонансных нейтронов на периферии топливного сердечника для таблеток ВВЭР составляет приблизительно на порядок больше чем во всем блоке в среднем.

Условия на периферии топливной таблетки близки к условиям облучения топливных отложений на поверхности оболочки твэла. Рассмотренная модельная задача показывает, что за счет большего сечения  $\sigma_{eff}$  плутоний в отложениях нарабатывается быстрее и до больших концентраций, чем в среднем по таблетке. Это обстоятельство может приводить к заметному увеличению скорости деления тяжелых ядер  $F$  в отложениях во время работы реактора и, как следствие, к постепенному росту фоновой активности теплоносителя в ходе топливной кампании.

### КРИТЕРИЙ ВЫНОСА ТОПЛИВА

Для любой конфигурации активной зоны можно рассчитать максимально возможный прирост активности за кампанию при фиксированном количестве топливных от-

ложений. Если в ходе кампании произошла разгерметизация твэла и наблюдаемый рост активности  $^{134}\text{I}$  превышает расчетную пороговую величину, можно сделать вывод о наличии источника топливной композиции в активной зоне. На этом основан критерий выноса топлива из негерметичных твэлов.

Для нейтронного потока  $\Phi$  в выражении (3) справедливо приближенное соотношение

$$\Phi \propto LP / (\varepsilon_{Pu} \sigma_{Pu} n_{Pu} + \varepsilon_U \sigma_U n_U), \quad (10)$$

где  $n_{Pu}$ ,  $\varepsilon_{Pu}$  – концентрация в топливных таблетках и энергия деления для ядер  $^{239}\text{Pu}$ ;  $n_U$ ,  $\varepsilon_U$  – то же для  $^{235}\text{U}$ .

Из (10) следует, что нейтронный поток и концентрации  $c_{Pu}$  и  $c_U$  в отложениях определяются нуклидным составом (а значит, выгоранием и обогащением) топлива в твэле.

Тогда с учетом (2) и (3) выражение (1) для активности, связанной с выходом продуктов деления из отложений, можно приближенно записать как

$$A \propto F \propto LPf(Bu). \quad (11)$$

Функция  $f(Bu)$  имеет смысл относительного роста активности, обусловленной выходом продуктов деления из топливных отложений на твэле с заданным обогащением, по мере приращения выгорания  $Bu$  топлива в твэле.

Следует отметить, что наработка плутония в топливных таблетках зависит от спектра нейтронов, на который влияют, в частности, эволюция концентрации борной кислоты в теплоносителе, температура и плотность теплоносителя. Для исследования влияния этих параметров были проведены расчеты по аттестованному нейтронно-физическому коду SVL (Многогрупповая программа расчета ячеек и кассет реактора ВВЭР. Аттестационный паспорт № 248 от 18.12.2008). Расчетный анализ показал, что вариации указанных параметров относительно слабо влияют на вид функции  $f$ . Поэтому можно считать, что для заданного типа топлива с заданным обогащением функция  $f$  зависит только от выгорания  $Bu$ .

Примеры функции  $f$ , рассчитанной по коду SVL для двух разных обогащений, приведены на рис. 3.

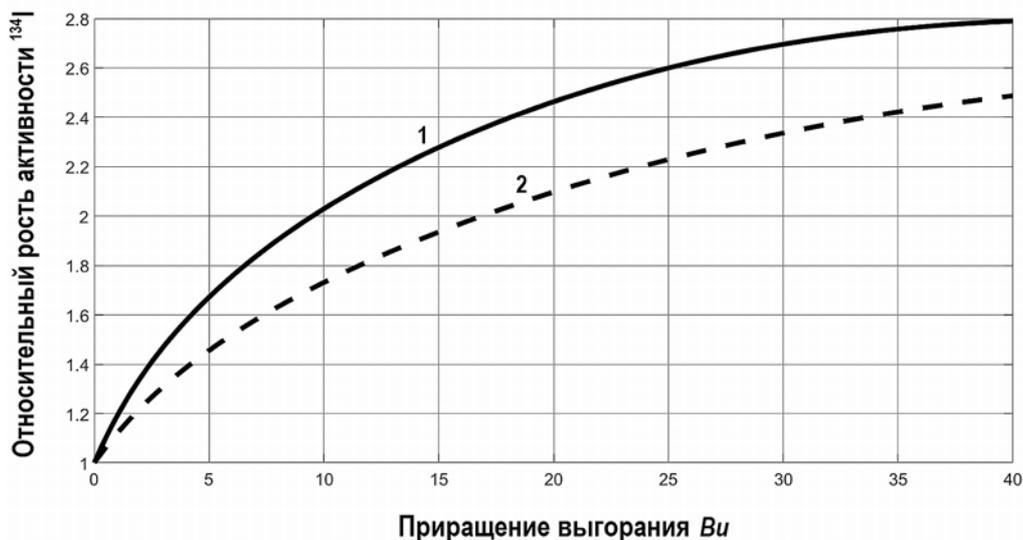


Рис. 3. Зависимости  $f$  относительного роста активности  $^{134}\text{I}$  от приращения выгорания: 1 – обогащение топлива 2.4%; 2 – обогащение топлива 3.6%

**Оценка сверху на скорость роста активности.** Будем считать, что основная часть топливных отложений расположена на поверхностях оболочек твэлов. Для построения критерия выноса топлива необходимо учесть, что в активной зоне присутствуют отложения на твэлах с разным выгоранием. С учетом вклада каждого  $i$ -го твэла рост активности  $A^*$  в ходе кампании можно описать, воспользовавшись соотношением (11):

$$A(t) \propto \sum_i m_i Kq_i(t) f_i(Bu_i(t_0) + \Delta Bu_i(t)), \quad (12)$$

где  $m_i$  – эффективная масса топливных отложений на  $i$ -м твэле (масса отложений в виде «монослоя», способных обеспечить такую же скорость выхода  $^{134}\text{I}$ );  $Kq_i(t)$  – относительное энерговыделение в  $i$ -м твэле (отношение текущей мощности твэла к текущему значению средней мощности твэлов в реакторе);  $Bu_i(t_0)$  – выгорание топлива в  $i$ -м твэле в начальный момент времени;  $\Delta Bu_i(t)$  – приращение выгорания топлива в  $i$ -м твэле от момента  $t_0$  до момента  $t$ .

При фиксированной массе топливных отложений выражение (12) можно переписать в виде

$$A(t) \leq A(t_0) \cdot k\varphi, \quad (13)$$

где произведение  $k\varphi$  описывает максимальный относительный рост активности на интервале  $[t_0, t]$ . При этом

$$\varphi = \max (f_i(Bu_i(t_0) + \Delta Bu_i(t)) / f_i(Bu_i(t_0))), \quad (14)$$

$$k = \max (Kq_i(t) / Kq_i(t_0)). \quad (15)$$

Неравенство (13) должно выполняться на любом интервале  $[t_0, t]$ , для которого вынос топлива в теплоноситель отсутствует.

Как показывает анализ кампаний на АЭС с ВВЭР, активность продуктов деления, связанная с выходом из топливных отложений, при отсутствии негерметичных твэлов в течение кампании хорошо приближается линейной функцией, если реактор работает при постоянной мощности:

$$A(t) \approx \alpha(t - t_0) + A(t_0), \quad (16)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейной аппроксимации, характеризующий скорость роста активности.

Пусть  $t_0 \leq t \leq t_1$  – интервал примерно линейного роста активности, тогда из (13) и (16) следует неравенство

$$\alpha \leq \alpha_{\text{кр}} = (k\varphi - 1) \cdot A(t_0) / (t_1 - t_0). \quad (17)$$

Проверку неравенства (17) можно использовать как критерий выноса топлива. Если условие (17) нарушается, то это свидетельствует о выносе топлива из негерметичного твэла в активную зону реактора.

Величину  $\varphi$  можно определить по данным нейтронно-физических расчетов для анализируемой кампании. Если реактор работает в стационарном топливном цикле, можно провести оценку, исходя из типичной загрузки реактора топливом и типичных историй нагружения ТВС.

**Методика применения критерия.** Алгоритм применения критерия состоит в следующем.

1. Выбираются участки кампании, на которых мощность реактора постоянна.
2. Данные измерения активности  $^{134}\text{I}$  на этом участке приближаются линейной зависимостью (16); с помощью метода наименьших квадратов определяется значение  $\alpha$ .
3. Полученное таким образом значение скорости роста активности  $\alpha$  сравнива-

ется с критериальным значением  $\alpha_{кр}$ , рассчитанным согласно правой части (17). Если  $\alpha/\alpha_{кр} > 1$ , то делается вывод о выносе топлива.

### ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Для демонстрации работоспособности предложенного критерия рассмотрим данные по нескольким кампаниям на российских АЭС как с наличием, так и с отсутствием негерметичных твэлов. Рассчитанные отношения фактической скорости роста активности  $^{134}\text{I}$   $\alpha$  к критической  $\alpha_{кр}$  для данных кампаний показаны на рис. 4.



Рис. 4. Результаты вычислений по критерию для  $^{134}\text{I}$ . По вертикальной оси отложено отношение фактического наклона  $\alpha$  линейного тренда активности  $^{134}\text{I}$  к критическому наклону  $\alpha_{кр}$

На рисунке видно, что для всех кампаний, в ходе которых не было разгерметизации, соотношение  $\alpha/\alpha_{кр} < 1$ . Так и должно быть при неизменном количестве топливных отложений.

Для некоторых кампаний с негерметичными твэлами это соотношение также не превосходило единицы. Это соответствует представлениям, что не всякая разгерметизация сопровождается выносом топлива в теплоноситель.

В нескольких проанализированных кампаниях с негерметичными твэлами применение критерия показало наличие выноса топлива. На рисунке такие кампании обозначены ромбовидными маркерами. Овалами на рисунке обведены результаты по кампаниям, для которых наличие выноса топлива в теплоноситель можно считать экспериментально подтвержденным.

В случае топливной кампании «2» на блоке «С» в ходе КГО была выявлена одна негерметичная ТВС. Эта ТВС была исследована в горячих камерах ГНЦ НИИАР. В ходе исследований в ТВС был обнаружен один негерметичный элемент – твэг. В оболочке негерметичного твэга был обнаружен протяженный раскрытый дефект. Напротив дефекта топливная таблетка была сильно окислена по границам зерен, что приводило к выкрашиванию зерен. В этом месте отсутствовал значительный фрагмент таблетки. Это свидетельствует о вымывании топлива из твэга в теплоноситель.

В случае топливной кампании «3» на блоке «В» после останова РУ на ППР было обнаружено восемь негерметичных ТВС. При визуальном осмотре одной из них на одном из периферийных твэлов было обнаружено отсутствие фрагмента оболочки. Степень повреждения твэла допускала вымывание топлива в теплоноситель во время эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В реакторах ВВЭР для оценки количества топливных отложений традиционно используется активность  $^{134}\text{I}$ . В работе продемонстрировано, что активность  $^{134}\text{I}$  может расти в ходе кампании даже при неизменной массе топливных отложений и отсутствии негерметичных твэлов в реакторе. Это может происходить из-за высокой скорости наработки плутония в топливных отложениях. Получена зависимость, позволяющая оценить сверху соответствующую максимальную скорость роста активности  $^{134}\text{I}$ .

Предложен критерий, позволяющий различать случаи, когда рост активности  $^{134}\text{I}$  обусловлен выносом топлива, и когда он связан с эволюцией нуклидного состава топливных отложений.

Проведен сравнительный анализ нескольких кампаний на АЭС с ВВЭР-1000. Показано, что для кампаний, в которых не было разгерметизаций, скорость роста активности  $^{134}\text{I}$  оказывается меньше критериального порога. В кампаниях, для которых был экспериментально подтвержден вынос топлива, скорость роста активности  $^{134}\text{I}$  превышает значение, установленное критерием.

## Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90081.

## Литература

1. *Ingemansson T., Rudling P., Lundgren K.* Assessment Of Fuel Washout In LWRs – New Methodologies. / Proc. Int. Meet. on LWR Fuel Performance, Orlando, Florida, September 19-22. – 2004. – Paper 1002.
2. РД ЭО 1.1.2.10.0521-2009 Сборки тепловыделяющие ядерных реакторов типа ВВЭР-1000. Типовая методика контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов с Изм. №2. – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2016. – С. 61-63.
3. *Shestakov Yu.M., Semenovikh A.S.* Problems and perspectives of moving toward zero fuel failures and mitigation of fuel failure consequences at NPPs with WWER reactors in Russia. / Proc. of the XI<sup>th</sup> Int. Conf. «WWER fuel performance, modelling and experimental support» Bulgaria, Varna, September 26-October 03, 2015.
4. *Поваров В.П., Терещенко А.Б., Кравченко Ю.Н., Позычанюк И.В., Горобцов Л.И., Голубев Е.И., Быков В.И., Лиханский В.В., Евдокимов И.А., Зборовский В.Г., Сорокин А.А.* Развитие и применение современных методов контроля герметичности и оценки состояния топлива на Нововоронежской АЭС. // Теплоэнергетика. – 2014. – № 2. – С. 54-64.
5. *Alvarez L., Daniels T. et al.* Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors. // IAEA Nuclear Energy Series. No. NF-T-2.1. – IAEA, Vienna, 2010. – P. 157.
6. *Parrat D., Genin G.B., Musante Y., Petit C., Harrer M.* Failed rod diagnosis and primary circuit contamination level determination, thanks to the DIADEME code. // IAEA-TECDOC-1345. – 2003. – PP. 265-276.
7. *El-Jaby A., Lewis J. et al.* A General Model for Predicting Coolant Activity Behaviour for Fuel-failure Monitoring Analysis. // J. Nucl. Mater., – 2010. – Vol. 399. – PP. 87-100.
8. *Likhanskii V., Evdokimov I. et al.* Modelling of Fission Product Release from Defective Fuel under WWER Operation Conditions and in Leakage Tests during Refuelling. / Proc. Int. Top. Mtg LWR Fuel Performance, Florida. – 2004. – PP. 798-812.
9. *Oliver Lena, Svensson Peter et al.* Fission Product Analysis using the FPA Code. / Proc. Int. Westinghouse Electric Sweden AB. – 2017. – PP. 2-3.
10. *Slavyagin P., Lusanova L., Miglo V.* Fuel Failure Diagnostics in Normal Operation of Nuclear Power Plants with WWER-Type Reactors. // IAEA-TECDOC-1345. – 2003. – PP. 303-315.
11. *Lewis B.J., Chan P.K., El-Jaby A., Iglesias F.C., Fitchett A.* Fission Product Release Modelling for Application of Fuel-Failure Monitoring and Detection. An Overview. // Journal of Nuclear Materials. – 2017. – Vol. 489. – PP. 64-83.

12. *Галанин А.Д.* Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 209-217.

13. *Slavyagin P., Lusanova L., Miglo V.* Regulation of the fission product activity in the primary coolant and assessment of defective fuel rod characteristics in steady state WWER-type reactor operation. // IAEA-TECDOC-1345. – 2003. – PP. 326-337.

14. *Калиничев П.М., Евдокимов И.А., Лиханский В.В.* Методика выявления разгерметизации твэлов по активности радионуклидов Хе во время работы реакторов ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 2. – С. 101-113; DOI: 10.26583/пре.2018.2.10.

15. *Никитин О.Н.* Закономерности изменения микроструктуры и распределения ксенона в  $UO_2$  при высокому выгоранию в условиях ВВЭР. / Дисс. на соиск. уч. степ. к.ф.-м.н. – Дмитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2010.

16. *Крюков Ф.Н.* Электронно-зондовый рентгеноспектральный микроанализ топливных композиций и оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. / Дисс. на соиск. уч. степ. д.ф.-м.н. – Дмитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2006.

Поступила в редакцию 30.01.2020 г.

#### Авторы

Евдокимов Игорь Анатольевич, начальник отдела

E-mail: i\_a\_evdokimov@rambler.ru

Хромов Андрей Григорьевич, научный сотрудник

E-mail: cprec@triniti.ru

Калиничев Пётр Михайлович, младший научный сотрудник

E-mail: kalinichevpm@gmail.com

Лиханский Владимир Валентинович, начальник отдела

E-mail: likhansk@mail.ru

Ковалишин Алексей Анатольевич, заместитель начальника отдела

E-mail: Kovalishin\_AA@nrcki.ru

Лалетин Михаил Николаевич, заведующий лабораторией

E-mail: Laletin\_MN@nrcki.ru

UDC 621.039.548

### **DEVELOPMENT OF A CRITERION TO RECORD THE FACTS OF FUEL CARRYOVER FROM LEAKING FUEL ELEMENTS DURING VVER REACTOR OPERATION**

Evdokimov I.A. \*, Khromov A.G. \*, Kalinichev P.M. \*,  
Likhanskii V.V. \*\*, Kovalishin A.A. \*\*, Laletin M.N. \*\*

\* State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research

Estate 12 Pushkovykh Str., 108840 Troitsk, Moscow Reg., Russia

\*\* National Research Center Kurchatov Institute

1 Academician Kurchatov Sq., 123182 Moscow, Russia

#### ABSTRACT

Operation of nuclear fuel at an NPP involves the potential of a fuel cladding failure. One of the possible and gravest consequences of a fuel failure is the fuel composition being washed out from the leaking fuel element and entering the coolant.

Reliable detection of the fuel carryover in the course of the fuel life is important

for the further handling of the failed fuel assembly. The fuel carryover can be detected as part of the fuel cladding integrity inspection during the reactor operation. For this purpose, activity of  $^{134}\text{I}$  is traditionally used in VVER reactors. In practice, however, the activity of  $^{134}\text{I}$  is capable to increase in the course of the fuel lifetime even in the event when there are no fuel failure and the only source of the fission product escape are fuel deposits in the core.

A criterion has been proposed which makes it possible to distinguish cases when the growth in the activity of short-lived radionuclides is the result of the fission product escape from fuel deposits or the fuel composition carryover from the failed fuel elements during VVER reactor operation. Examples are provided of the developed criterion practical application at effective NPPs.

The reported study was funded by RFBR, Project No. 20-38-90081.

**Key words:** VVER, fuel element, fuel failure, fission products, methodology, coolant activity, iodine radionuclides, fuel carryover.

#### REFERENCES

1. Ingemansson T., Rudling P., Lundgren K. Assessment Of Fuel Washout In LWRs – New Methodologies. *Proc. Int. Meet. on LWR Fuel Performance, Orlando, Florida, September 19-22. 2004*, paper 1002.
2. RD EO 1.1.2.10.0521-2009 *Fuel Assemblies of VVER-1000 Nuclear Reactors. Typical Cladding Failure Control Methods* (as amended №2). Moscow. Kontsern Rosenergoatom Publ., 2016, pp. 61-63 (in Russian).
3. Shestakov Yu. M., Semenovych A.S. Problems and Perspectives of Moving Toward Zero Fuel Failures and Mitigation of Fuel Failure Consequences at NPPs with VVER Reactors in Russia. *The XI<sup>th</sup> Int. Conf. «WWER Fuel Performance, Modeling and Experimental Support». Bulgaria, Varna, September 26 – October 03, 2015*.
4. Povarov V.P., Tereshchenko A.B., Kravchenko Yu.N., Pozychanyuk I.V., Gorobtsov L.I., Golubev Ye.I., Bykov V.I., Likhansky V.V., Yevdokimov I.A., Zborovsky V.G., Sorokin A.A. Development and application of modern methods to inspect the integrity and assess the state of fuel at Novovoronezh NPP. *Teplotenergetika*. 2014, no.2, pp. 54-64 (in Russian).
5. Alvarez L., Daniels T. et al. Review of fuel failures in water cooled reactors. *IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-2.1*. IAEA, Vienna, 2010, p. 157.
6. Parrat D., Genin G.B., Musante Y, Petit C., Harrer M. Failed rod diagnosis and primary circuit contamination level determination, thanks to the DIADEME code. *IAEA-TECDOC-1345*, 2003, pp. 265-276.
7. El-Jaby A., Lewis J. et al. A General Model for Predicting Coolant Activity Behaviour for Fuel-failure Monitoring Analysis. *J. Nucl. Mater.*, 2010, v. 399, pp. 87-100.
8. Likhanskii V., Evdokimov I. et al. Modelling of Fission Product Release from Defective Fuel under WWER Operation Conditions and in Leakage Tests During Refuelling. *Proc. Int. Top. Mtg LWR Fuel Performance, Florida, 2004.*, pp. 798-812.
9. Oliver Lena, Svensson Peter et al. Fission Product Analysis using the FPA Code. *Proc. Int. Westinghouse Electric Sweden AB*. 2017, pp. 2-3.
10. Slavyagin P., Lusanova L., Miglo V. Fuel Failure Diagnostics in Normal Operation of Nuclear Power Plants with WWER-type Reactors. *IAEA-TECDOC-1345*, 2003, pp. 303-315.
11. Lewis B.J., Chan P.K., El-Jaby A., Iglesias F.C., Fitchett A. Fission Product Release Modeling for Application of Fuel-failure Monitoring and Detection – An Overview. *Journal of Nuclear Materials*. 2017, v. 489, pp. 64-83.
12. Galanin A.D. *Introduction to the Theory of Thermal-Neutron Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989, pp. 209-217 (in Russian).
13. Slavyagin P., Lusanova L., Miglo V. Regulation of the Fission Product Activity in the Primary Coolant and Assessment of Defective Fuel Rod Characteristics in Steady State WWER-type Reactor Operation. *IAEA-TECDOC-1345*, 2003, pp. 326-337.

14. Kalinichev P.M., Evdokimov I.A., Likhanskii V.V. Methodology for Identifying Fuel Failures by the Activity of Xe Radionuclides During VVER Reactor Operation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no.2, pp. 10-113; DOI: 10.26583/npe.2018.2.10 (in Russian).

15. Nikitin O.N. *Regularities in changes of the microstructure and the xenon distribution in  $UO_2$  with a high burn-up in the VVER reactor conditions*. Cand. Sci. (Phys.-Math.) Diss. Dimitrovgrad. OAO «GNC NIAR» Publ., 2010 (in Russian).

16. Kryukov F.N. *Electron-probe X-ray spectral microanalysis of fuel compositions and fuel claddings in nuclear reactors*. Dr. Sci. (Phys.-Math.) Diss. Dimitrovgrad. OAO «GNC NIAR» Publ., 2006 (in Russian).

#### **Authors**

Evdokimov Igor Anatolievich, Head of Department

E-mail: i\_a\_evdokimov@rambler.ru

Khromov Andrey Grigorievich, Researcher

E-mail: cprec@triniti.ru

Kalinichev Petr Mikhailovich, Junior Researcher

E-mail: kalinichevpm@gmail.com

Likhanskii Vladimir Valentinovich, Head of Department

E-mail: likhansk@mail.ru

Kovalishin Aleksey Anatolievich, Deputy Head of Department

E-mail: Kovalishin\_AA@nrcki.ru

Laletin Mikhail Nikolayevich, Head of Laboratory

E-mail: Laletin\_MN@nrcki.ru