

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТВЭЛОВ ПО АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ Хе ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ РЕАКТОРОВ ВВЭР

П.М. Калинин, И.А. Евдокимов, В.В. Лиханский

*АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12*



При эксплуатации ядерного топлива на АЭС возможна разгерметизация оболочек твэлов. Это может приводить к значительным финансовым потерям. Для снижения потерь важно своевременно выявлять факты разгерметизации твэлов во время работы реактора.

В настоящее время для выявления разгерметизации в стационарном режиме работы реакторов ВВЭР используют соотношение приведенных активностей ^{131}I и ^{134}I . Однако на основе активностей радионуклидов йода не всегда можно однозначно выявить факт разгерметизации. Такая ситуация может возникать при мелком дефекте в оболочке негерметичного твэла или при повышенном выгорании топлива, если дефект перекрывается поверхностью топливной таблетки. В этом случае основной вклад в активности радионуклидов йода могут вносить топливные отложения, и разгерметизация может быть незаметной на уровне фоновой активности.

В работе предложена методика для выявления разгерметизации твэлов по активности инертных радиоактивных газов в первом контуре реактора ВВЭР. Показано, что активности инертных радиоактивных газов могут быть более надежным индикатором разгерметизации, чем активности реперных радионуклидов йода. Предложенный критерий выявления разгерметизации основан на анализе соотношения активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe . Приведены примеры практического применения разработанной методики.

Ключевые слова: ВВЭР, твэл, разгерметизация, продукты деления, методика, активность теплоносителя, радионуклиды йода, инертные радиоактивные газы.

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации ядерного топлива на АЭС возможна разгерметизация оболочек твэлов. Это может приводить к значительным финансовым потерям. Для обеспечения радиационной безопасности энергоблоков и снижения негативных последствий разгерметизации твэлов проводят контроль герметичности оболочек (КГО) твэлов во время работы реактора [1 – 8]. Первичной задачей КГО является своевременное выявление фактов разгерметизации твэлов.

Согласно руководящему документу (РД) [9], при отсутствии спайк-эффекта по ре-

© П.М. Калинин, И.А. Евдокимов, В.В. Лиханский, 2018

перным радионуклидам для выявления разгерметизации следует использовать соотношение приведенных активностей ^{131}I и ^{134}I в стационарном режиме работы реактора. Однако на основе активностей радионуклидов йода не всегда можно однозначно выявить факт разгерметизации. Практика показывает, что это возможно при высоком гидравлическом сопротивлении негерметичного твэла. Высокое сопротивление реализуется при мелком дефекте в оболочке негерметичного твэла или при повышенном выгорании топлива, если дефект перекрывается поверхностью топливной таблетки. В этом случае основной вклад в активности радионуклидов йода могут вносить топливные отложения, и разгерметизация может быть незаметной на уровне фоновой активности.

Для более надежного выявления фактов разгерметизации за рубежом на реакторах PWR используют активности инертных радиоактивных газов (ИРГ). Инертные газы не взаимодействуют с оболочкой твэлов – в отличие от поверхностно активных радионуклидов йода. Если значительная часть йода адсорбируется на внутренней поверхности оболочки негерметичного твэла, выход радионуклидов йода в теплоноситель при прочих равных условиях оказывается меньше выхода ИРГ. Выход ИРГ из твэла может быть заметным даже при высоком гидравлическом сопротивлении негерметичного твэла.

Во Франции в качестве критерия разгерметизации во время стационарной работы реакторов PWR принимается выполнение одного из условий: 1) абсолютное значение активности ^{133}Xe выше 10^6 Бк/кг или 2) отношения активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe выше 0.9 при абсолютной активности ^{133}Xe более $1.854 \cdot 10^5$ Бк/кг [10].

Применение критерия [10] для реакторов ВВЭР в неизменном виде невозможно по следующим причинам. Во-первых, абсолютные значения и соотношения активностей ИРГ зависят от скорости выведения газов из теплоносителя (скорости газоочистки). Параметры очистки теплоносителя на реакторах PWR и ВВЭР различны. При этом скорость выведения ИРГ из теплоносителя может существенно меняться от одного энергоблока ВВЭР к другому. Во-вторых, на реакторах ВВЭР в настоящее время отсутствует возможность отбора проб теплоносителя при реакторном давлении, как на энергоблоках PWR. При существующих методиках пробоотбора часть газов теряется, и результаты измерения абсолютных активностей ИРГ могут быть непредставительны.

Предложена методика, позволяющая по активностям ИРГ выявлять разгерметизацию твэлов во время работы реакторов ВВЭР. Обсуждаются преимущества этой методики по сравнению с критерием [9] по активностям радионуклидов йода, приведены примеры практического применения.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИЙ ПО РАДИОНУКЛИДАМ ЙОДА

Критерий разгерметизации по радионуклидам йода, представленный в РД [9], основан на понятии приведенной активности A^* радионуклидов йода:

$$A^* = A(\lambda + \eta)/(\lambda Y), \quad (1)$$

где A – измеренная активность; λ – постоянная распада нуклида; η – скорость выведения радионуклидов из теплоносителя на фильтрах спецводоочистки (СВО); Y – кумулятивный выход радионуклида на деление, который складывается из собственного выхода u и кумулятивного выхода нуклида-предшественника Y_p .

Согласно РД [9], в стационарных условиях работы реактора вывод о разгерметизации твэла можно сделать в том случае, если соотношение приведенных активностей ^{131}I и ^{134}I начинает превышать пороговое значение. Для реакторов ВВЭР-1000 это значение равно пяти.

Ниже описаны основные представления, позволяющие получить критерий типа [9] по радионуклидам йода. После этого в тех же приближениях рассмотрено поведение в теплоносителе газовых продуктов деления (ПД).

Поведение радионуклидов йода в первом контуре. Для описания поведения ПД в теплоносителе первого контура используются балансные уравнения [11], которые для радионуклидов йода и их предшественников теллуридов можно записать в виде

$$\frac{dN_I}{dt} = R_I + \mathbf{R}_I - (\lambda_I + \eta_I)N_I + \lambda_{Te}N_{Te}, \quad (2)$$

$$\frac{dN_{Te}}{dt} = R_{Te} + \mathbf{R}_{Te} - \lambda_{Te}N_{Te}. \quad (3)$$

Здесь R и \mathbf{R} – скорость выхода ПД в теплоноситель из топливных отложений и негерметичных твэлов соответственно; N_I – число атомов радионуклидов йода в теплоносителе в первом контуре; N_{Te} – число атомов теллура в первом контуре. Теллур является более поверхностно активным, чем йод, поэтому в уравнениях (2), (3) полагается, что теллур адсорбируется на поверхностях конструкций в активной зоне реактора и не выводится из первого контура при прохождении теплоносителя через фильтры СВО.

Наличие теллура-предшественника важно учитывать для ^{132}I и ^{134}I . Для ^{131}I , ^{133}I и ^{135}I можно считать, что предшественник распадается практически мгновенно.

Если реактор работает в стационарном режиме, можно использовать стационарное решение уравнений (2), (3). В этих условиях приведенная активность (1) определяет интенсивность источника ПД в теплоносителе. Для каждого нуклида йода она равна скорости выхода в теплоноситель, деленной на вероятность образования (кумулятивный выход) этого радионуклида при одном делении тяжелого ядра.

Выход радионуклидов йода из топливных отложений. При отсутствии негерметичных твэлов в реакторе активность теплоносителя определяется выходом ПД из топливных отложений. Топливные отложения представляют собой урановую пыль, оседающую на твэлах при производстве, и (или) топливо, вымытое из негерметичных твэлов во время эксплуатации на АЭС.

Одним из основных механизмов выхода нуклидов из топливных отложений является прямой вылет осколков деления в теплоноситель. Другой механизм возникает, если топливные отложения включают в себя частицы размером больше пробега осколка деления в UO_2 . В этом случае осколки деления могут застревать в топливе и далее выходить в теплоноситель по механизму радиационного переноса. Для реперных радионуклидов йода этот механизм сводится к «радиационностимулированной» диффузии [12]. Скорость выхода ПД из отложений R складывается из прямого вылета осколков деления R_r и диффузионного выхода R_D :

$$R = R_r + R_D. \quad (4)$$

Частицы топливных отложений могут обладать развитой поверхностью (например, это возможно для фрагментов выгоревших таблеток, попавших в теплоноситель) [13, 14]. Будем полагать, что развитая поверхность обусловлена открытой пористостью. Часть осколков деления может выходить в открытые приповерхностные поры. В результате скорость выхода радионуклидов в теплоноситель увеличивается. Выражение для скорости выхода посредством прямого вылета осколков деления было получено в работе [15]. Модель диффузионного выхода нуклидов с короткоживущим предшественником описана в работе [12]. Значения коэффициентов радиационной диффузии для радионуклидов были определены в экспериментах [16, 17].

С учетом результатов [12, 15] выход ПД из отложений для нуклидов с короткоживущим предшественником, таких как ^{131}I , ^{133}I , и ^{135}I , можно представить в виде

$$R = YJf(h), \quad (5)$$

$$J = \epsilon r_f S_g F, \quad (6)$$

где r_f – пробег осколка деления в топливе; F – количество делений тяжелых ядер за единицу времени в единице объема топливных отложений в активной зоне; ϵ – эффективность выхода; S_g – «геометрическая» площадь поверхности топлива (без учета открытых пор). Величина ϵ определяется геометрией и лежит в диапазоне $0 < \epsilon \leq 0.5$ [15]. Функция f в выражении (5) имеет вид

$$f(h) = 1 + k_1 S_t d_c / (S_g R_c) + k_2 S_t h / (\epsilon S_g r_f). \quad (7)$$

Второй член в правой части (7) описывает увеличение скорости выхода за счет «застревания» осколков деления в открытых порах. Здесь S_t – полная площадь открытой поверхности топлива; d_c – средний диаметр пор в топливных отложениях; r_c – пробег осколка деления в среде, заполняющей поры; k_1 – коэффициент, учитывающий геометрию поры. Для сферической поры $k_1 = 2/3$. Величина r_c зависит от того, чем заполнена пора. Если пора заполнена водой при давлении 160 атмосфер и температуре порядка 600 К, пробег осколка деления составляет около $3 \cdot 10^{-5}$ м. Если пора заполнена газом, пробег осколков деления будет больше.

Последний член в правой части (7) описывает диффузионный выход из топливных отложений. Здесь k_2 – коэффициент порядка единицы, учитывающий геометрию топливных частиц; $h = (D/\lambda)^{1/2}$ – диффузионная длина; D – коэффициент диффузии. Согласно [16], диффузионная длина h реперных радионуклидов йода при температуре топлива ниже 600 К составляет менее 10^{-7} м. Пробег в топливе тяжелых осколков деления (в частности, йодов) r_f составляет около $5 \cdot 10^{-6}$ м [15], что много больше диффузионной длины h . Поэтому диффузионный член в уравнении (7) становится важен только при развитой поверхности частиц топлива в отложениях ($S_t \gg S_g$).

Приведенная активность йодов ^{131}I , ^{133}I и ^{135}I может быть представлена в виде

$$A^* = R/Y = Jf(h). \quad (8)$$

В случае «четных» радионуклидов йода временем жизни предшественника пренебречь нельзя и выход ^{132}Te и ^{134}Te необходимо рассматривать отдельно от выхода йода. Выход теллура при этом описывается выражением (5). Для ^{132}I и ^{134}I при описании прямого вылета вместо кумулятивного выхода Y используется собственный выход y , а скорость диффузионного выхода имеет вид

$$R_D = k_2 S_t F h (y + Y_p h / (h + h_p)). \quad (9)$$

В этом случае можно ввести функцию $g(h, h_p)$, аналогичную функции $f(h)$, и записать скорость поступления радионуклида в теплоноситель в виде

$$R = y J g(h, h_p), \quad (10)$$

$$g(h, h_p) = f(h) + k_2 h S_t Y_p h / (\epsilon r_f S_g y (h + h_p)). \quad (11)$$

Приведенная активность йода с учетом (2), (3) и (10) имеет вид

$$A^* = (R + R_p) / (y + Y_p) = Jf(h) + J Y_p k_2 S_t h_p^2 / (Y \epsilon S_g r_f (h + h_p)). \quad (12)$$

В случае «короткоживущего» предшественника ($h_p \rightarrow 0$) уравнение (12) переходит в (8). Если диффузионной длиной h_p нельзя пренебречь по сравнению с h , то, как видно из (12), вклад нуклида-предшественника может заметно увеличивать приведенную активность.

Если отложения состоят из частиц меньше длины пробега осколка деления, вы-

ход радионуклидов можно рассматривать в приближении «монослоя» [9]. В уравнениях (7) и (11) это соответствует формальному переходу $k_1 \rightarrow 0$ и $k_2 \rightarrow 0$, который дает $f = g = 1$. В этом случае расчетные отношения приведенных активностей радионуклидов йода должны быть равны единице (см. штриховую линию на рис. 1). На практике могут наблюдаться небольшие отклонения от этого значения. Это связано с тем, что величина Y зависит от нуклидного состава топлива в отложениях, который, вообще говоря, неизвестен. Расчет приведенных активностей по результатам радиационных измерений обычно проводят, постулируя некоторый состав отложений. Например, в [9] считается, что в отложениях делится только ^{235}U . Отличие предполагаемого нуклидного состава от фактического приводит к вариации отношений A^* для радионуклидов йода в пределах до 30%.

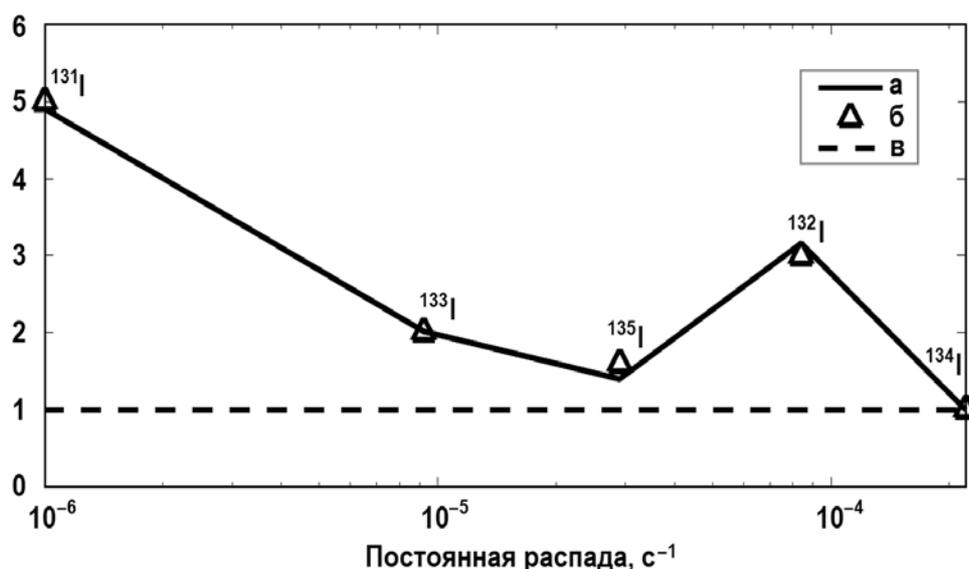


Рис. 1. Отношения приведенных активностей радионуклидов йода к приведенной активности ^{134}I : а) консервативный расчет по уравнениям (4) – (12); б) пороговые значения из РД [9]; в) расчет для случая «монослоя»

Если отложения состоят из крупных частиц, отношения приведенных активностей йодов (12) за счет диффузионного выхода могут заметно отклоняться от единицы. В РД [9] приведена экспертная оценка сверху на соответствующие отношения приведенных активностей (см. рис. 1).

Аналог зависимости из РД [9] для крупных частиц в отложениях может быть получен из уравнений (1) – (12). При проведении расчетов везде использованы значения собственных и кумулятивных выходов, а также констант распада из базы данных [18]. Наибольшие значения для отношения приведенных активностей ^{131}I и ^{134}I достигаются в случае преобладающего вклада диффузионного механизма в выход йода из отложений. Зависимость [9] можно получить, если в уравнениях (8) и (12) положить $F = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$, $S_t/S_g = 100$ и $S_t/S_g \cdot d_c \ll r_c$. Такие параметры могут достигаться, если отложения компактизировались в активной зоне в виде структуры с большим количеством открытых мелких пор. Результат соответствующего расчета показан на рис. 1.

Методика анализа приведенных активностей йодов и ее ограничения. Если в реакторе появляется негерметичный твэл, источник каждого радионуклида R_c можно записать в виде

$$R_c = R + \mathbf{R} = R + R_f \mu / (\lambda + \mu), \quad (13)$$

где R_f – скорость выхода радионуклида из топлива под оболочку твэла; μ – коэф-

коэффициент массообмена твэла с теплоносителем для данного радионуклида. Коэффициент массообмена связывает скорость выхода радионуклида из твэла с полным количеством этого радионуклида под оболочкой твэла [11]. Величина μ зависит от характеристик негерметичного твэла, постоянной распада и химических свойств радионуклида. Для поверхностно активных нуклидов (в частности, йода) μ может быть много меньше, чем для инертных газов в том же негерметичном твэле.

Подставляя выражение (13) в уравнения (2), (3) и (1), можно видеть, что в случае разгерметизации отношение приведенных активностей ^{131}I и ^{134}I может заметно увеличиваться. Это обстоятельство используется для выявления факта разгерметизации твэла в реакторе.

Согласно РД [9], область выше сплошной кривой на рис. 1 соответствует наличию негерметичного твэла в реакторе. В области между сплошной и штриховой кривыми активность радионуклидов йода может определяться выходом как из негерметичных твэлов, так и из топливных отложений. В этой области, исходя только из активностей радионуклидов йода, нельзя сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии негерметичного твэла в активной зоне [9].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОСТЕЙ ИРГ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ

Отличия в поведении ксенона и йода. Из уравнения (13) следует, что вклад негерметичного твэла в суммарный источник ПД в теплоносителе определяется соотношением между константой распада λ и коэффициентом массообмена μ . Константы распада ^{133}Xe и ^{131}I близки [18]. Если бы химические свойства ксенона и йода были одинаковы, заметное отклонение активности ^{133}Xe и ^{131}I от фона при разгерметизации топлива наблюдалось бы одновременно. Однако из-за адсорбции йода под оболочкой в некотором диапазоне характеристик негерметичного твэла возможна ситуация, когда активность ^{131}I еще определяется выходом из топливных отложений, а активность ^{133}Xe уже заметно превышает фоновый уровень. Ширина этого диапазона тем больше, чем интенсивнее адсорбируется йод под оболочкой негерметичного твэла (предполагается, что температура вблизи дефекта выше температуры кипения воды; если дефект находится в «холодной» зоне твэла и залит водой, йод может в ней растворяться и выноситься из негерметичного твэла достаточно интенсивно). Благодаря таким особенностям активности ИРГ могут быть более чувствительным индикатором разгерметизации, чем активности йодов.

Для эффективного выявления разгерметизации по соотношению активностей ИРГ желательно использовать пару газовых ПД, обладающую следующими свойствами.

– Время жизни выбранных ПД должно существенно различаться. В этом случае значительная часть более короткоживущего газа будет распадаться, не успевая выйти из негерметичного твэла, в то время как активность более долгоживущего газа будет заметно расти после разгерметизации.

– Радиационные выходы выбранных газов должны слабо зависеть от нуклидного состава топлива. Поскольку выгорание топлива в отложениях обычно неизвестно, использование радионуклидов с сильной зависимостью выхода от нуклидного состава топлива может приводить к большим неопределенностям. В частности, по этой причине $^{85\text{m}}\text{Kr}$ и ^{88}Kr для анализа не подходят.

– Используемые нуклиды должны быть изотопами одного химического элемента. В процессе пробоотбора часть газов, растворенных в теплоносителе, переходит в газовую фазу и теряется. Поскольку растворимости газов отличаются, газопотери при пробоотборе варьируются для изотопов разных химических элементов.

Среди ИРГ, активности которых, как правило, доступны для измерения на АЭС, этим условиям удовлетворяет пара ^{133}Xe и ^{135}Xe .

Выход радионуклидов ксенона из топливных отложений. Для описания активности ^{133}Xe и ^{135}Xe в первом контуре нужно учитывать поведение йодов-предшественников ^{133}I и ^{135}I соответственно. Балансное уравнение для радионуклидов ксенона в первом контуре имеет вид

$$\frac{dN_{\text{Xe}}}{dt} = R_{\text{Xe}} + \mathbf{R}_{\text{Xe}} - (\lambda_{\text{Xe}} + \eta_{\text{Xe}})N_{\text{Xe}} + (\lambda_{\text{I}} + B\eta_{\text{I}})N_{\text{I}}. \quad (14)$$

Здесь используются обозначения, как в уравнении (2); B – коэффициент, учитывающий попадание в активную зону ксенона, образовавшегося при распаде йода-предшественника на фильтрах СВО. Предполагается, что ионообменные фильтры и деаэрактор в системе СВО включены последовательно, и расход теплоносителя через них одинаков. Скорость очистки η_{Xe} можно записать в виде

$$\eta_{\text{Xe}} = Q\alpha/M, \quad (15)$$

где Q – массовый расход воды на ионообменные фильтры и деаэрактор; M – масса воды, циркулирующей в первом контуре; α – эффективность очистки, принимающая значения от нуля до единицы. Коэффициент B связан с эффективностью очистки α соотношением $B = 1 - \alpha$.

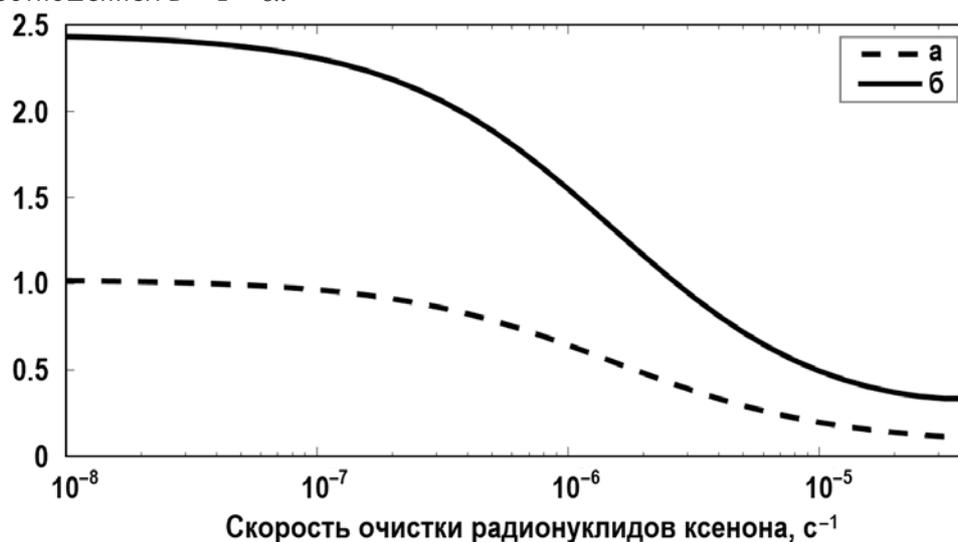


Рис. 2. Пороговое отношение фонных активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe для реакторов ВВЭР-1000: а) для отложений в виде «монослоя»; б) для отложений в виде крупных частиц топлива

Поведение йода-предшественника в (14) описывается уравнением (2). Если реактор работает в стационарном режиме, можно использовать стационарное решение уравнения (14).

Для радионуклидов ксенона, как и для йодов, скорость выхода из отложений можно описать с помощью функций f и g (см. выше). Из уравнения (14) следует, что при отсутствии негерметичных твэлов в реакторе отношение активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe имеет вид

$$\frac{A_{\text{Xe-133}}}{A_{\text{Xe-135}}} = \frac{y_{\text{Xe-133}}g(h_{\text{Xe-133}}, h_{\text{I-133}}) + \frac{\lambda_{\text{I-133}} + B\eta_{\text{I}}}{\lambda_{\text{I-133}} + \eta_{\text{I}}} y_{\text{I-133}} f(h_{\text{I-133}})}{y_{\text{Xe-135}}g(h_{\text{Xe-135}}, h_{\text{I-135}}) + \frac{\lambda_{\text{I-135}} + B\eta_{\text{I}}}{\lambda_{\text{I-135}} + \eta_{\text{I}}} y_{\text{I-135}} f(h_{\text{I-135}})} \times \left(1 + \frac{\eta_{\text{Xe}}}{\lambda_{\text{Xe-135}}}\right) \left(1 + \frac{\eta_{\text{Xe}}}{\lambda_{\text{Xe-133}}}\right)^{-1}. \quad (16)$$

Правую часть выражения (16) можно рассматривать как семейство кривых $G(\eta_{Xe})$, зависящих только от скорости очистки ксенона. Наибольшее значение функции G при фиксированном значении η_{Xe} достигается, если в функциях f и g «диффузионные» члены вносят преобладающий вклад. Параметры, при которых это условие выполняется, описаны выше. На рисунке 2 сплошной линией показана огибающая сверху для рассматриваемого семейства кривых $G(\eta_{Xe})$. Для ее построения при каждом значении скорости очистки ксенона варьировались следующие параметры: расход воды на фильтры, эффективность очистки йода и нуклидный состав топливных отложений.

Сплошную линию на рис. 2 можно рассматривать как ограничение сверху на величину возможного отношения активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe , если единственным источником ПД в первом контуре являются топливные отложения.

Определение скорости очистки ИРГ. Абсолютные значения и соотношения активностей газовых ПД зависят от скорости газоочистки.

Измерение параметров газоочистки не предусмотрено действующим регламентом ВВЭР. Параметры очистки можно определить, если измерить активности ИРГ до и после деаэратора. В этом случае эффективность очистки α в (15) рассчитывается по формуле

$$\alpha = A^2_{Xe}/A^1_{Xe}, \quad (17)$$

где A^1_{Xe} , A^2_{Xe} – активность ксенона до и после деаэратора соответственно.

Измерения активности ИРГ до и после деаэратора проводятся, например, на АЭС Темелин дважды в месяц.

Методика выявления разгерметизации по активности радионуклидов ксенона. На рисунке 2 показаны «пороговые» зависимости отношения активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe от скорости очистки газов. Пунктирная линия соответствует приближению «монослоя», сплошная – отложениям из крупных частиц топлива с развитой поверхностью. Если отношение измеренных активностей ксенонов оказывается выше сплошной линии, можно констатировать наличие негерметичного твэла в реакторе. Если результаты измерений активности соответствуют области ниже сплошной линии, то, исходя только из активностей радионуклидов Xe, однозначный ответ дать нельзя. В этом случае требуется анализировать другие факторы: отношения приведенных активностей радионуклидов йода, наличие спайк-эффекта, наличие всплесков активности или рост абсолютной активности реперных радионуклидов во время стационарной работы реактора.

Методику выявления разгерметизации можно сформулировать в следующем виде.

1. Определяется скорость очистки теплоносителя от ксенона η_{Xe} (см. выше). Если скорость очистки не измерена, используется консервативная оценка $\eta_{Xe} = 0$.

2. По графику на рис. 2 (сплошная линия) определяется пороговое значение отношения активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe , соответствующее величине h_{Xe} .

3. Полученное значение сравнивается с отношением измеренных активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe . Если отношение измеренных активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe оказывается больше порога, это говорит о наличии негерметичного твэла в активной зоне.

Ограничения методики. Отношение активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe после разгерметизации топлива немонотонно зависит от скорости массообмена твэла с теплоносителем μ . После разгерметизации данное отношение начинает расти, если увеличивается μ . Рост продолжается, пока из твэла преимущественно выходит относительно долгоживущий ^{133}Xe , а активность ^{135}Xe определяется фоном. По мере развития степени дефектности время «задержки» радионуклидов под оболочкой до выхода в теплоноситель начинает снижаться. Когда из негерметичного твэла в заметном количестве начинает выходить ^{135}Xe , отношение активностей

^{133}Xe и ^{135}Xe начинает убывать.

При значительных повреждениях (например, при образовании вторичных дефектов в оболочке негерметичного твэла) время «задержки» может стать меньше времени жизни ^{135}Xe . В предельном случае существенной деградации твэла ^{133}Xe и ^{135}Xe будут выходить из него так, как если бы оболочка отсутствовала и топливные таблетки непосредственно контактировали бы с теплоносителем. При этом выход ПД из негерметичного твэла с низкой мощностью будет неотличим от выхода ПД из большого количества топливных отложений. При повышенных мощностях, когда значительный вклад в выход ПД из топлива вносит диффузия, отношение активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe в теплоносителе также может попадать в «зону неопределенности» на рис. 2 (между сплошной и штриховой линиями). Тогда, пользуясь только отношением активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe в отдельных измерениях, невозможно выявить наличие негерметичного твэла в реакторе, и потребуются привлечение других признаков разгерметизации.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

В таблице 1 приведены средние значения отношения установившихся фоновых активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe для нескольких топливных кампаний без негерметичных твэлов на разных энергоблоках ВВЭР-1000. Видно, что все значения лежат ниже сплошной кривой на рис. 2. Так и должно быть при отсутствии негерметичных твэлов.

Таблица 1

Средние значения отношения активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe в топливных кампаниях без негерметичных твэлов на разных энергоблоках ВВЭР-1000

№ блока - № кампании	A-1	B-1	C-1	D-1
$A_{\text{Xe-133}} / A_{\text{Xe-135}}$	0.08	0.1	0.11	0.07

Таблица 2

Максимальные средненедельные значения отношения активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe в стационарном режиме работы реактора в топливных кампаниях с негерметичными твэлами на разных энергоблоках ВВЭР-1000

№ блока - № кампании	C-2	E-1	F-1	G-1
$A_{\text{Xe-133}} / A_{\text{Xe-135}}$	8	10	3.7	6.5

В таблице 2 приведены максимальные средненедельные отношения активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe в стационарном режиме работы реактора в топливных кампаниях, для которых по другим признакам была однозначно установлена разгерметизация топлива. Видно, что все значения лежат выше сплошной кривой. В целом, анализ топливных кампаний на АЭС с ВВЭР-1000 за последние 10 лет показывает, что в большинстве случаев, когда разгерметизация подтверждается по отношению приведенных активностей ^{131}I и ^{134}I , отношение активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe также оказывается выше пороговой зависимости на рис. 2.

Одним из примеров, иллюстрирующих повышенную чувствительность предложенной методики, является кампания Н-1. На рисунке 3 показано отношение приведенных активностей ^{131}I и ^{134}I , рассчитанное по данным радиационных измерений в номинальном режиме работы реактора. На этом рисунке также показано, как менялось отношение активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe на протяжении кампании. Поскольку скорость очистки теплоносителя от ксенона на данном блоке не контролировалась, при анализе использовалось консервативное пороговое значение отношения активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe , которое соответствует нулевому значению η_{Xe} .

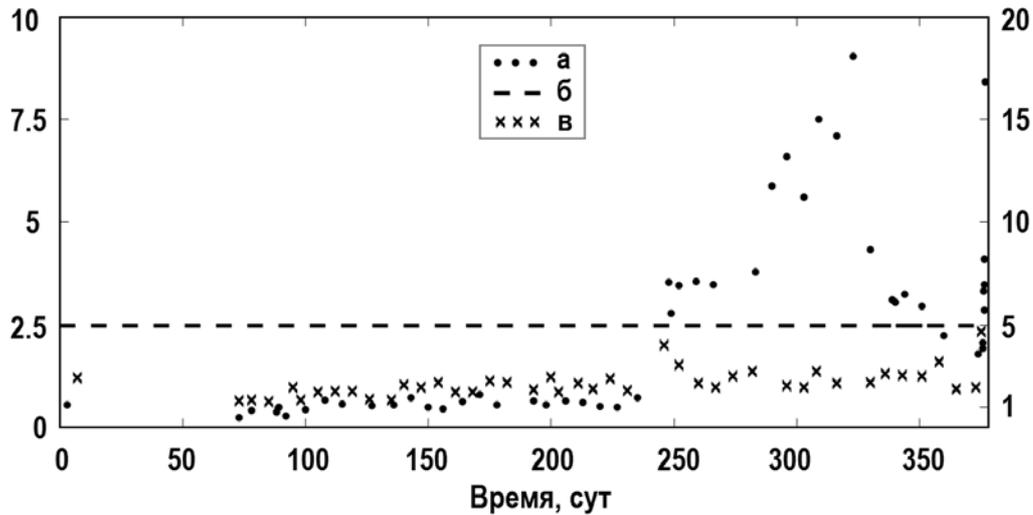


Рис. 3. а). Соотношение активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe (левая вертикальная ось) при работе реактора в стационарном режиме во время кампании Н-1. б). Пороговое значение, соответствующее критерию разгерметизации по ИРГ в приближении нулевой скорости очистки (левая вертикальная ось) и по радионуклидам йода (правая вертикальная ось). в). Соотношение приведенных активностей ^{131}I и ^{134}I

Из рисунка 3 видно, что отношение приведенных активностей ^{131}I и ^{134}I не превышало пяти. Следовательно, согласно РД [9], по активностям ^{131}I и ^{134}I до конца кампании нельзя было сделать однозначный вывод о наличии негерметичного твэла в активной зоне реактора. Однако примерно с 250-го дня отношение активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe начало расти и значимо превысило пороговое значение. Это однозначно говорит о том, что в активной зоне появился негерметичный твэл.

При КГО по завершении кампании Н-1 была найдена одна ТВС с негерметичным твэлом. Таким образом, анализ активностей ИРГ позволил своевременно выявить факт разгерметизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика для выявления разгерметизации твэлов на энергоблоках ВВЭР по активности инертных радиоактивных газов в первом контуре реактора. Показано, что активности инертных радиоактивных газов могут быть более надежным индикатором разгерметизации, чем активности радионуклидов йода. Предложенный критерий выявления разгерметизации основан на анализе соотношения активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe .

Методика малочувствительна к способу отбора проб теплоносителя первого контура и к степени дегазации проб при отборе, а также к фактическому нуклидному составу топливных отложений.

На примере нескольких топливных кампаний показано, что при отсутствии негерметичного топлива на АЭС с ВВЭР-1000 соотношение активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe принимает значения ниже границы, соответствующей полученному критерию. При наличии негерметичного топлива соотношение активностей ^{133}Xe и ^{135}Xe в большинстве случаев оказывается выше критериальной границы.

На примере топливной кампании на энергоблоке ВВЭР-1000 показано, что предложенный критерий может выявлять разгерметизацию при работе реактора в стационарном режиме, даже если активности ^{131}I и ^{134}I не позволяют сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии негерметичного твэла в активной зоне.

Авторы выражают благодарность Олегу Владимировичу Хоружему за ценное обсуждение результатов.

Литература

1. *Shumkova N. Yu., Bykov O. V., Belousova L. P.* Ukrainian WWER-type NPP units. Results of cladding tightness inspection. – IAEA-TECDOC-1345. – 2003. – PP. 77-86.
2. *Burman D. L.* Development of a coolant activity evaluation model & related application experience. Proc. Int. Top. Mtg «LWR Fuel Performance». – Paris, 1991. – Vol. 1. – P. 363.
3. *Beyer C. E.* An analytical model for estimating the number and size of defected fuel rods in an operating reactor. Proc. Int. Top. Mtg «LWR Fuel Performance». – Paris, 1991. – Vol. 2. – P. 437.
4. *Parrat D., Genin G. B., Musante Y., Petit C., Harrer J.* Failed rod diagnosis and primary circuit contamination level determination, thanks to the DIADEME code. – IAEA-TECDOC-1345. – 2003. – PP. 265-276.
5. *El-Jaby A. et al.* A General Model for Predicting Coolant Activity Behaviour for Fuel-failure Monitoring Analysis. // J. Nucl. Mater. – 2010. – Vol. 399. – PP. 87-100.
6. *Likhanskii V. 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.
7. *Oliver Lena et al.* Fission product analysis using the FPA code. Proc. Int. Westinghouse Electric Sweden AB. – 2017. – PP. 2-3.
8. *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.
9. 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. 28-34.
10. Review of fuel failures in water cooled reactors in 2006-2015. // The IAEA nuclear energy series. – 2018. – PP. 43-45.
11. *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.
12. *Wise C.* The transport of short-lived fission products close to the fuel surface. // J. Nucl. Mater. – 1988. – Vol. 152. – PP. 102-113.
13. *White R. J.* The fractal nature of the surface of uranium dioxide: a resolution of short-lived/stable gas release dichotomy. // J. Nucl. Mater. – 2001. – Vol. 295. – PP. 133-148.
14. *Olander D. R.* Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements. – Department of nuclear engineering University of California, Berkeley, 1976. – 624 p.
15. *Wise C.* Recoil release of fission products from nuclear fuel. // J. Nucl. Mater. – 1985. – Vol. 136. – PP. 30-47.
16. *Turnbull J. A. and Friskney C. A.* The diffusion coefficients of gaseous and volatile species during the irradiation of uranium dioxide. // J. Nucl. Mater. – 1982. – Vol. 107. – PP. 168-184.
17. *Rossiter G., White R.* The Fission Gas Diffusion Coefficient in Irradiated Oxide Fuel: An Analysis of Current Experimental Data. Proc. Enlarged Halden Programme Group Meeting, Storefjell, 2002.
18. *Tasaka K. et al.* JNDC nuclear data library of fission products; ver. 2. // JAERI. 1990. – No. 1320. – PP. 92-96.

Поступила в редакцию 11.01.2018 г.

Авторы

Калиничев Пётр Михайлович, инженер

E-mail: kalinichev@triniti.ru

Евдокимов Игорь Анатольевич, заместитель директора отделения

E-mail: evdokimov@triniti.ru

Лиханский Владимир Валентинович, директор отделения

E-mail: likhansk@triniti.ru

A TECHNIQUE FOR DETECTION OF FUEL FAILURES BY THE ACTIVITY OF Xe RADIONUCLIDES DURING WWER REACTOR OPERATION

Kalinichev P.M., Evdokimov I. A., Likhanskii V.V.

State Research Center of Russian Federation
«Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research»
bld. 12 Pushkovykh st., Troitsk, Moscow reg., Russia 108840

ABSTRACT

Fuel failures during operation of Nuclear Power Plants (NPPs) may lead to substantial economic losses. Negative effects of reactor operation with leaking fuel in the core may be reduced if fuel failures are detected in timely manner.

Currently, the value of the ratio of normalized release rates for ^{131}I and ^{134}I is used for detecting fuel failures during steady state operation of WWER reactors. However, unequivocally establishing fuel failure based on the activity of iodine radionuclides is not possible in all possible cases. Such situation may occur in the case of small defects of fuel cladding of the leaking fuel rod or under high fuel burnup if the defect is overlapped by the surface of the fuel pellet. If such case fuel hold-ups can make the dominant contribution in iodine radionuclide activity, and the fuel cladding failure may be indistinguishable against the background activity level.

The technique for detection of fuel failures at WWER reactors by activity of radioactive noble gases in the primary coolant is suggested in the present paper. It is shown that radioactive noble gases may serve as the indicator of fuel failures more sensitive than the activity of reference iodine radionuclides. The suggested criterion for detection of fuel failures is based on monitoring the ratio between ^{133}Xe and ^{135}Xe activities. Some examples of practical applications of the developed methodology are given.

Key words: WWER, fuel rod, fuel failure, fission product, technique, coolant activity, iodine radionuclide, radioactive noble gases.

REFERENCES

1. Shumkova N. Yu., Bykov O.V., Belousova L.P. Ukrainian WWER-type NPP units. Results of cladding tightness inspection. IAEA-TECDOC-1345, 2003, pp. 77-86.
2. Burman D.L. Development of a coolant activity evaluation model & related application experience. Proc. Int. Top. Mtg «LWR Fuel Performance». Paris, 1991, v. 1, p. 363.
3. Beyer C.E. An analytical model for estimating the number and size of defected fuel rods in an operating reactor. Proc. Int. Top. Mtg «LWR Fuel Performance». Paris, 1991, v. 2, p. 437.
4. Parrat D., Genin G.B., Musante Y., Petit C., Harrer J. Failed rod diagnosis and primary circuit contamination level determination, thanks to the DIADEME code. IAEA-TECDOC-1345, 2003, pp. 265-276.
5. El-Jaby A., Lewis B.J., Thompson W.T., Iglesias F. and Ip M. A General Model for Predicting Coolant Activity Behaviour for Fuel-failure Monitoring Analysis. *J. Nucl. Mater.*, 2010, v. 399, pp. 87-100.
6. Likhanski V., Evdokimov I., Khoruzhii O., Sorokin A., Novikov V. 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.
7. Oliver Lena, Svensson Peter, Bishop Kendal, Westinghouse O.P. Fission product analysis using the FPA code. Proc. Int. Westinghouse Electric Sweden AB, 2017, pp. 2-3.

8. 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.
9. RD JeO 1.1.2.10.0521-2009 «Sborki teplovydeljajushhie jadernyh reaktorov tipa VVJeR-1000. Tipovaja metodika kontrolya germetichnosti obolochek teplovydelyayushhih elementov» s Izm. №2. Moscow. AO «Koncern Rosjenergoatom» Publ., 2016, pp. 28-34 (in Russian).
10. Review of fuel failures in water cooled reactors in 2006-2015. *The IAEA nuclear energy series*, 2018, pp. 43-45.
11. 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.
12. Wise C. The transport of short-lived fission products close to the fuel surface. *J. Nucl. Mater.* 1988, v. 152, pp. 102-113.
13. White R.J. The fractal nature of the surface of uranium dioxide: a resolution of short-lived/stable 1. gas release dichotomy. *J. Nucl. Mater.* 2001, v. 295, pp. 133-148.
14. Olander D.R. *Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements*. Berkeley. Department of nuclear engineering University of California, 1976, 624 p.
15. Wise C. Recoil release of fission products from nuclear fuel. *J. Nucl. Mater.* 1985, v. 136, pp. 30-47.
16. Turnbull J.A. and Friskney C.A. The diffusion coefficients of gaseous and volatile species during the irradiation of uranium dioxide. *J. Nucl. Mater.* 1982, v. 107, pp. 168-184.
17. Rossiter G., White R. The Fission Gas Diffusion Coefficient in Irradiated Oxide Fuel: An Analysis of Current Experimental Data. *Proc. Enlarged Halden Programme Group Meeting*, Storefjell, 2002.
18. *Tasaka Kanj, Katakura Junichi, Ihara Hitosh, Yoshida Tadashi, Iijima Shungo, Nakashima Ryuzo, Nakagawa Tsuneo, Takano Hideki* JNDC nuclear data library of fission products; version 2. *JAERI*. 1990, no. 1320, pp. 92-96.

Authors

Kalinichev Peter Mikhajlovich, Engineer

E-mail: kalinichev@triniti.ru

Evdokimov Igor Anatolievich, Deputy Director of Department

E-mail: evdokimov@triniti.ru

Likhanskij Vladimir Valentinovich, Director of Department

E-mail: likhansk@triniti.ru