

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТВЭЛОВ ПО АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ Хе ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1200 БЕЛОРУССКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

APPLICATION OF THE TECHNIQUE FOR DETECTION OF DAMAGE OF FUEL ELEMENTS BY RADIONUCLIDE ACTIVITY Xe DURING OPERATION OF THE VVER-1200 REACTOR OF THE BELARUSIAN NUCLEAR POWER PLANT

**Э. Б. Семиренко¹, Н. А. Долголевич¹,
А. А. Пунтус¹, А. И. Киевицкая^{2,3}, Т. В. Дашкевич^{2,3}
E. B. Semirenko¹, M. A. Dalhalevich¹, A. A. Puntus¹,
A. I. Kiyavitskaya^{2,3}, T. V. Dashkevich^{2,3}**

¹Республиканское унитарное предприятие «Белорусская атомная электростанция»
(Государственное предприятие «Белорусская АЭС»)
площадка строительства атомной электростанции, г. Островец, Республика Беларусь
dolgolevich.na@belaes.by, puntus.aa@belaes.by

²Белорусский государственный университет, БГУ, г. Минск, Республика Беларусь

³Учреждение образования «Международный государственный экологический институт
имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ
г. Минск, Республика Беларусь
nrs@iseu.by, hannakiev@gmail.com, dashkevich.tv@gmail.com

¹Republican Unitary Enterprise “Belarusian Nuclear Power Plant”, Belarusian NPP
nuclear power plant construction site, Ostrovets, Republic of Belarus

²Belarusian State University, BSU, Minsk, Republic of Belarus

³International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU
Minsk, Republic of Belarus

Правилами ядерной безопасности устанавливается предел безопасной эксплуатации по количеству негерметичных ТВЭлов. Не превышение данного предела обеспечивается путём контроля герметичности оболочек ТВЭлов на работающей и остановленной реакторной установке. В настоящее время в Российской Федерации ведутся работы по разработке и внедрению новых методов в дополнение к существующим методам контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов на работающей реакторной установке типа ВВЭР. Для своевременного выявления факта появления дефектного ТВЭла в топливной загрузке предлагается внедрение метода выявления разгерметизации ТВЭлов по соотношению активностей изотопов Хе в теплоносителе первого контура во время работы реакторной установки, предложенного АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (Российская Федерация).

It is known that the nuclear safety rules set the limit of safe operation in terms of the number of leaking fuel elements. Compliance with this limit is ensured by monitoring the tightness of fuel rod claddings at the operating and shutdown reactor plant. Currently, new methods are being developed and implemented in addition to the already generally accepted methods for monitoring the tightness of fuel element claddings at an operating VVER type reactor plant. For the most rapid detection of the fact of the appearance of a defective fuel element in the fuel load, it is proposed to introduce a “method for detecting depressurization of fuel elements by the activity of Xe radionuclides in the primary coolant during operation of the reactor plant” proposed by the Joint-Stock Company “State Scientific Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Thermonuclear Research”.

Ключевые слова: Белорусская АЭС, контроль герметичности оболочек, тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ), теплоноситель, активность, нормированная активность, приведенная активность.

Keywords: Belarusian NPP, cladding tightness control, fuel element (tvel), coolant, activity, normalized activity, reduced activity.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2023-2-195-198>

Применяемый на Белорусской АЭС метод контроля герметичности оболочек на работающей реакторной установке заключается в измерении удельной активности реперных радионуклидов йода $I^{131-135}$ в теплоносителе первого контура. Полученные значения удельной активности сопоставляются с эксплуатационными и безопасными пределами. Также проводится регистрация наличия (или отсутствия) «spike-эффекта» – рост удельной активности

I^{131} в 5 и более раз при изменении мощности на 20% и более. Регистрация «spike-эффекта» свидетельствует о наличии негерметичных твэлов в составе эксплуатируемой топливной загрузки. Дополнительно для определения разгерметизации в стационарном режиме работы реакторов ВВЭР используется соотношение нормированных активностей I^{131} и I^{134} . В случае если был зарегистрирован «spike-эффект» при переходных процессах и (или) соотношение нормированных активностей I_n^{131}/I_n^{134} более 5 при работе реактора в стационарном режиме, то в топливной загрузке присутствуют негерметичные твэлы.

Однако на основе величины активности изотопов йода не всегда можно однозначно определить факт разгерметизации. Такая ситуация может возникать при появлении микродефекта в оболочке твэла или при повышенном выгорании топлива, если дефект перекрывается поверхностью топливной таблетки. В этом случае основной вклад в фоновую активность изотопов йода могут вносить топливные отложения с поверхностей твэлов или конструкций активной зоны, и разгерметизацию сложно выявить [1].

Для более оперативного определения фактов разгерметизации на реакторах типа PWR применяют метод, основанный на анализе активностей инертных радиоактивных газов (далее ИРГ). ИРГ имеют высокую миграционную способность из топливной матрицы, а также не взаимодействуют с внутренней оболочкой твэла в отличие от поверхностно активных изотопов йода. На рисунке 1 представлен график зависимости роста активности I^{131} и ^{133}Xe от коэффициента массообмена, который, в свою очередь, зависит от размера дефекта. Значительная часть радионуклидов йода адсорбируется на внутренней поверхности оболочки твэла, выход радионуклидов йода в теплоноситель при прочих равных условиях оказывается меньше выхода ИРГ. Выход ИРГ из твэла может быть значительным даже при микродефекте, при котором поступление теплоносителя (необходимого для растворения йодных отложений с внутренней поверхности оболочки и их массоперенос в область дефекта) под оболочку твэла ограничено [1].

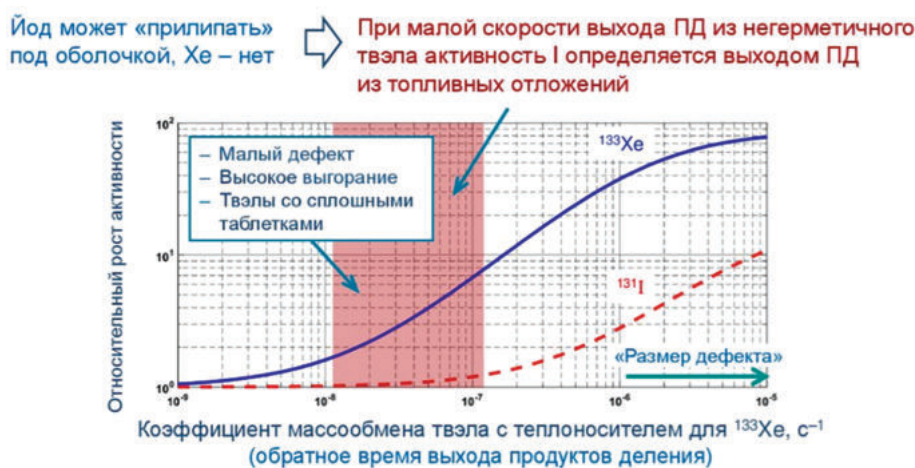


Рисунок 1 – График зависимости роста активности I^{131} и ^{133}Xe в теплоносителе от коэффициента массообмена [2]

Для эффективного выявления разгерметизации возможно использовать соотношение активностей ИРГ, обладающих следующими свойствами [1]:

- период полураспада ИРГ должен существенно различаться. В таком 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 в теплоносителе после разгерметизации;
- кумулятивные выходы ИРГ должны слабо зависеть от нуклидного состава топлива. Поскольку выгорание топлива в отложениях обычно неизвестно, использование радионуклидов с сильной зависимостью кумулятивного выхода от нуклидного состава топлива может приводить к большим неопределенностям. В частности, по этой причине $\text{Kr}^{85\text{m}}$ и Kr^{88} для анализа не подходят;
- выбранные радионуклиды 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 доступны для измерения на Белорусской АЭС, этим условиям удовлетворяет пара ^{133}Xe и ^{135}Xe .

Методику выявления фактов появления дефектных твэл можно сформулировать в следующем виде:

- 1) определение удельной активности $^{133,135}\text{Xe}$ в теплоносителе первого контура без учёта газовых потерь;
- 2) определение скорости очистки теплоносителя первого контура от ИРГ за счёт работы деаэратора (в случае если определить скорость очистки не удаётся, то предлагается использовать консервативное значение равное 0);
- 3) приведение измеренных удельных активностей $^{133,135}\text{Xe}$ к значению с учётом газоочистки первого контура;
- 4) сопоставление соотношения приведенных активностей $^{133}\text{Xe}/^{135}\text{Xe}$ с универсальным консервативным пороговым критерием для реакторов ВВЭР-1000,1200 равным 2,4...2,5 [2].

На Белорусской АЭС измерение удельной активности реперных радионуклидов $I^{131-135}$, а также ИРГ $Хе^{133,135}$ проводится лабораторией контроля герметичности оболочек отдела ядерной безопасности. Отбор проб теплоносителя производится из штатной системы отбора проб, газопотери не контролируются. Объём отбираемых проб равен 100...250 мл. После отбора пробы готовится счётный образец определенной геометрии (цилиндрический сосуд 500 мл) в который добавляется 470 мл химически обессоленной воды и 30 мл аликвоты пробы теплоносителя, заранее отфильтрованной через бумажный фильтр.

Измерение удельной активности реперных радионуклидов осуществляется с помощью полупроводникового гамма-спектрометра с детектором из особо чистого германия Canberra GC1018 с относительной эффективностью 10% и ПШПВ для энергии 122 кэВ и 1,3 МэВ 0,825 и 1,8 кэВ соответственно. Эффективность регистрации для используемой геометрии измерения была рассчитана с помощью метрологического образцового радионуклидного раствора. Подготовленный счётный образец измеряется в течение 1 часа по живому времени, до начала измерения счётный образец выдерживается 30 минут. Также для расчёта удельной активности $Хе^{133,135}$ в программном обеспечении Genie-2000 применяется учёт цепочек распада «материнский-дочерний», так как для этих радионуклидов в теплоносителе всегда фиксируется материнские нуклиды $I^{133,135}$.

Расчет скорости очистки теплоносителя от изотопов $Хе^{133}$ и $Хе^{135}$ производится по формуле (1) [1].

$$\eta_{Хе} = \frac{Q}{M} \left(1 - \frac{A_{Хе}^2}{A_{Хе}^1} \right) \quad (1)$$

где Q – массовый расход воды на ионообменные фильтры и деаэратор (30 т/ч);

M – масса воды, циркулирующей в первом контуре (214 т);

$A_{Хе}^1, A_{Хе}^2$ – удельная активность радионуклида ксенона до и после деаэратора соответственно.

Полученное значение скорости очистки η на энергоблоке №1 Белорусской АЭС для $Хе^{133,135}$ составляет 0,139 ч⁻¹.

Расчёт приведенной удельной активности $Хе^{133,135}$ в теплоносителе первого контура производился по формулам [1]:

$$A_{133Хе}^* = A_{133Хе} \left(1 + \frac{\eta_{Хе}}{\lambda_{133Хе}} \right) \quad (2)$$

$$A_{135Хе}^* = A_{135Хе} \left(1 + \frac{\eta_{Хе}}{\lambda_{135Хе}} \right) \quad (3)$$

где $A_{133Хе}, A_{135Хе}$ – измеренная удельная активность $Хе^{133}, Хе^{135}$;

$A_{133Хе}^*, A_{135Хе}^*$ – приведенная удельная активность $Хе^{133}, Хе^{135}$.

На рисунках 2 и 3 представлена динамика удельной активности реперных радионуклидов $I^{131-135}$ и их суммарная активность во время работы реакторной установки энергоблока №1 Белорусской АЭС, а также мощность реакторной установки и соотношения нормированной активности $I_{н}^{131-133,135}$ к $I_{н}^{134}$ соответственно. На рисунке 4 представлена динамика соотношения приведенной удельной активности $Хе^{133}$ к $Хе^{135}$.

Исходя из рисунков 2-4 после выхода реакторной установки на МКУ и достижения номинального уровня мощности в течение 7 суток основной вклад в поступление радионуклидов в теплоноситель первого контура вносили топливные отложения с поверхностей активной зоны. Наибольшее значение удельной активности реперных радионуклидов формировалось изотопом I^{134} , а удельные активности $I^{131}, Хе^{133}$ были меньше или находились на уровне минимально детектируемой активности. Соотношения нормированных активностей I^{131} к I^{134} были менее 5, что также указывало на то, что остаточное топливное загрязнение на поверхностях конструкций активной зоны вносило основной вклад в загрязнение и соответственно отсутствовали негерметичные твэлы.

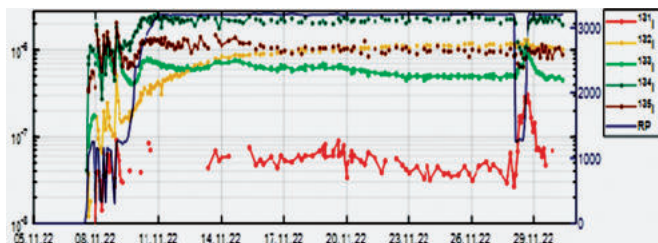


Рисунок 2 – Удельные активности (вертикальная ось слева, Ки/кг) радионуклидов йода в теплоносителе первого контура и тепловая мощность РУ (RP, вертикальная ось справа, МВт)

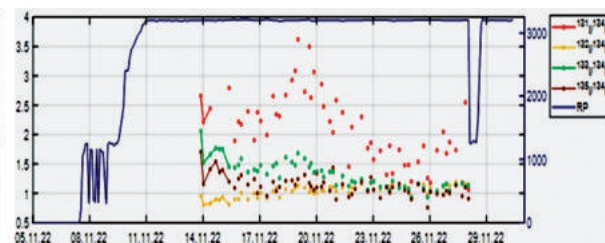


Рисунок 3 – Соотношение нормированных удельных активностей радионуклидов йода при стационарной работе РУ (вертикальная ось слева) и тепловая мощность РУ (RP, вертикальная ось справа, МВт)

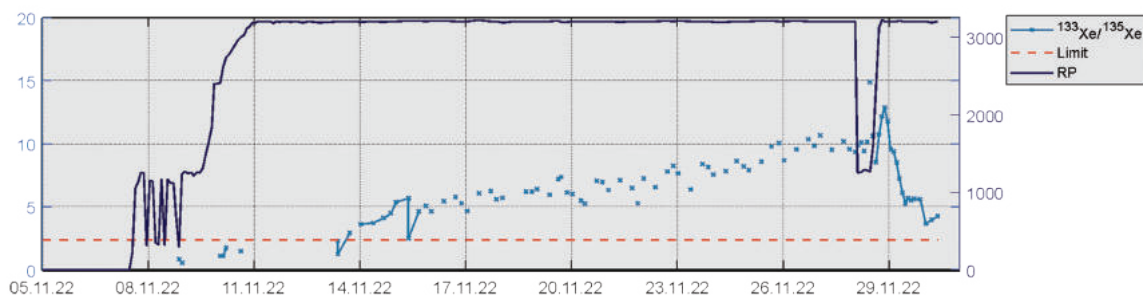


Рисунок 4 – Отношение приведенных удельных активностей Xe^{133} и Xe^{135} в теплоносителе 1-го контура (вертикальная ось слева) и тепловая мощность РУ (RP, вертикальная ось справа, МВт).
 — — — — — пороговое значение, превышение которого свидетельствует о наличии негерметичного твэла в реакторе

Через 4 суток работы реактора на номинальном уровне мощности в прямых пробах теплоносителя начал стабильно регистрироваться Xe^{133} , повысилась активность Xe^{135} , отношение приведенных активностей Xe^{133} и Xe^{135} при этом превысило пороговое значение 2.5 (рисунок 4). Превышение порога свидетельствует о наличии дополнительного источника продуктов деления в теплоносителе помимо топливных отложений. Анализ активности радионуклидов Xe^{133} и Xe^{135} позволил сделать предварительный вывод о наличии негерметичного твэла в составе эксплуатируемой топливной загрузки.

В то же время, не было зафиксировано каких-либо значительных изменений в активности изотопов йода, значение отношения нормированной активности I^{131} и I^{134} были меньше 5 (рисунок 3), что не позволяло делать вывод о факте разгерметизации твэла, в отличие от «газовой методики».

Через 17 суток после вывода реакторной установки на номинальный уровень мощности было зафиксировано снижение тепловой мощности со 100 % до 39 %. После сброса мощности был зарегистрирован «Spike-эффект» по активности I^{131} . Пиковая активность I^{131} составила $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ Ки/кг (рисунок 2). «Spike-эффект» является надежным показателем наличия негерметичного твэла в активной зоне. Таким образом, «йодная методика» подтвердила, что в топливной загрузке однозначно находится негерметичный твэл.

Исходя из полученных данных метод, основанный на измерении активности изотопов $Xe^{133,135}$ однозначно позволил выявить факт разгерметизации тепловыделяющего элемента на 14 суток раньше, чем основной «йодный метод». Методика выявления разгерметизации твэл по активности изотопов Хе в теплоносителе первого контура требует проведения дополнительных исследований, чтобы использоваться в качестве еще одного идентификационного метода обнаружения разгерметизации в дополнение к уже действующей «йодной методике» для своевременного выявления факта появления дефектного твэла в топливной загрузке реактора ВВЭР-1200.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.2.10>.
2. Евдокимов И.А. Комплексная методика и программное средство для оперативного выявления разгерметизации твэлов во время работы реактора [электронный ресурс] / И. А. Евдокимов, П. М. Калиничев, А. Г. Хромов, Е. Ю. Афанасьев, Л. А. Маслов, И. О. Горюшин, А. Ю. Бурцев, С. П. Золотарёв, С. В. Бабкин // Совещание в рамках проекта НУО: «Проведение КГО твэлов на работающем и остановленном реакторе». – 2022. – Режим доступа: <https://ppt-online.org/1261358>. – Дата доступа: 05.01.2023.