

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.54
DOI 10.26583/gns-2023-03-06
EDN QENCPD



Применение метода вакуумного увода инертных радиоактивных газов для контроля герметичности оболочек ТВЭлов ТВС ядерных реакторов типа ВВЭР при работе на мощности

С.Н. Калмыков , С.Д. Полозков , А.И. Курина , Е.И. Голубев

*Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж,
Воронежская обл., Россия*

✉ KalmykovSN@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Аннотация. В настоящее время развивается комплексный подход по контролю герметичности оболочек ТВЭлов ТВС на реакторных установках типа ВВЭР. Одним из главных этапов является этап достоверной регистрации наличия негерметичного ТВЭла(ов) ТВС в составе активной зоны реактора при работе энергоблока на мощности. В представленной работе рассмотрены общие тенденции изменения активностей радионуклидов-продуктов деления в теплоносителе 1-го контура реакторных установок типа ВВЭР разных поколений и проектов. Рассмотрен опыт Нововоронежской АЭС по способу отбора и выделению инертных радиоактивных газов из теплоносителя первого контура. Проведено сравнение методов измерения инертных радиоактивных газов в теплоносителе первого контура: методом прямой спектрометрии, криогенным методом и методом вакуумного увода. Рассмотрен вопрос достоверной регистрации момента разгерметизации ТВЭла во время работы реакторной установки на мощности на примере энергоблока №5 Нововоронежской АЭС. Приведены сравнительные результаты анализа состояния активной зоны на герметичность ТВЭлов ТВС по основным реперным радионуклидам. Наиболее достоверные результаты, свидетельствующие о факте разгерметизации ТВЭла, были получены по результатам контроля удельных активностей и анализа изменения соотношения инертных радиоактивных газов, выполненного с применением метода вакуумного увода ИРГ. Контроль удельной активности инертных радиоактивных газов в теплоносителе первого контура позволяет с высокой достоверностью оценивать состояние физических барьеров. Предложенный метод отбора и выделения ИРГ, имеет высокую достоверность и сходимость результата, что является дополнительным инструментом при проведении контроля герметичности оболочек ТВЭлов при работе энергоблока на мощности. Имея представительные данные по удельным активностям инертных радиоактивных газов, можно достоверно говорить о состоянии ТВЭлов ТВС в активной зоне реактора.

Ключевые слова: инертные радиоактивные газы, радионуклиды, выделение инертных радиоактивных газов, разгерметизация ТВЭла, контроль герметичности оболочек ТВЭл, физические барьеры, ВВЭР, АЭС.

Для цитирования: Калмыков С.Н., Полозков С.Д., Курина А.И., Голубев Е.И. Применение метода вакуумного увода инертных радиоактивных газов для контроля герметичности оболочек ТВЭлов ТВС ядерных реакторов типа ВВЭР при работе на мощности. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):62–71. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-06>

Application of the method of vacuum withdrawal inert radioactive gases to control of fuel rods leaking of nuclear reactors WWER types while operation

Sergey N. Kalmykov , Sergey D. Polozkov , Anna I. Kurina ,
Evgeny I. Golubev

*Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh,
Voronezh region, Russia*

✉ KalmykovSN@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract. Currently, a comprehensive approach is being developed for the integrity control of fuel rod claddings in pressurized water reactor (PWR) nuclear power plants. One of the key stages is the reliable detection of leaking fuel rods within the reactor's active zone during power operation. This study examines the general trends in the activity of fission product radionuclides in the primary coolant of various generations and designs of PWRs. The experience of Novovoronezh Nuclear Power Plant is considered regarding the method of sampling and separation of inert radioactive gases from the primary coolant. A comparison is made between different methods of measuring inert radioactive gases in the primary coolant: direct spectrometry, cryogenic method, and vacuum extraction method. The issue of reliable detection of fuel rod leakage during reactor operation is discussed, using the example of Unit 5 at Novovoronezh Nuclear Power Plant. Comparative results are presented for the analysis of the integrity of fuel rod claddings based on key reference radionuclides. The most reliable results indicating fuel rod leakage were obtained through the control of specific activities and analysis of changes in the ratio of inert radioactive gases using the vacuum extraction method. Control of the specific activity of inert radioactive gases in the primary coolant enables a highly reliable assessment of the condition of physical barriers. The proposed method of sampling and separation of inert radioactive gases demonstrates high reliability and convergence of results, serving as an additional tool for integrity control of fuel rod claddings during power operation. Having representative data on the specific activities of inert radioactive gases allows for a reliable assessment of the condition of fuel rod claddings within the reactor core.

Keywords: inert radioactive gases, radionuclides, extraction of inert radioactive gases, fuel rod breaches, fuel assembly cladding integrity control, physical barriers, VVER, nuclear power plant.

For citation: Kalmykov S.N., Polozkov S.D., Kurina A.I., Golubev E.I. Application of the method of vacuum withdrawal inert radioactive gases to control of fuel rods leaking of nuclear reactors WWER types while operation. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):62–71 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-06>

Имеющийся опыт эксплуатации в рамках контроля герметичности оболочек твэл Нововоронежской АЭС свидетельствует, что в некоторых случаях установление факта наличия в активной зоне РУ негерметичных твэлов по величине удельной активности радионуклидов йода в теплоносителе весьма затруднительно. В подобных случаях дополнительной, а иногда единственной информацией, делать однозначное заключение о наличии или отсутствии в активной зоне РУ негерметичных твэлов, может являться информация об удельной активности радионуклидов инертных радиоактивных газов (ИРГ) в теплоносителе 1-го контура [1].

Образующиеся в процессе деления ядерного топлива ИРГ являются наиболее динамичными продуктами деления и при этом инертны в химическом плане, что делает их источником ценной информации о состоянии физических барьеров на АЭС [2].

Использование данных по активности ИРГ в теплоносителе 1-го контура для оценки состояния твэлов в активной зоне РУ до недавнего времени сдерживалось отсутствием надежных методик подготовки счетных образцов (СОБ), обеспечивающих требуемое качество измерений.

Основные проблемы при контроле ИРГ связаны с большими потерями газа на промежутке от пробоотбора до выполнения измерений, а именно:

- с потерями ИРГ при пробоотборе открытой струей в пробоотборную емкость;
- с дегазацией во время доставки пробы в лабораторию;
- с потерями ИРГ при подготовке СОБ.

На Нововоронежской АЭС разработаны две методики, позволяющие осуществлять качественную подготовку СОБ для проведения гамма-спектрометрических измерений удельной активности радионуклидов ИРГ в технологических средах АЭС. Методики аттестованы и успешно применяются при контроле герметичности оболочек твэл на работающем реакторе, а также при решении других задач, возникающих в ходе эксплуатации энергоблоков. Методики различаются по физическим принципам, используемым в ходе подготовки СОБ из отобранной жидкой пробы:

- криогенный метод применяется с 2008 года;
- метод вакуумного увода применяется с 2010 года.

Достоверное измерение активности ИРГ в жидких средах возможно, если при пробоподготовке обеспечивается полный переход ИРГ (не менее 95%), растворенных в жидкой пробе СОБ, в котором присутствие при этом других радионуклидов минимизировано. В разработанных методиках МВК 7.2.13.(2) 22¹ требуемое качество подготовки СОБ реализуется следующим образом: для исключения потери ИРГ при проведении пробоотбора, жидкая проба контролируемой среды перемещается в герметичную пробоотборную емкость (ПЕ) (рис. 1) закрытой струей с разбрызгиванием (дегазацией жидкости при отборе пробы). Герметичная пробоотборная емкость представляет собой сосуд из нержавеющей стали с вваренными в верхнюю крышку запорными вентилями:

1 Вентиль «Б» – «Барботаж» предназначен для выравнивания давления в емкости и проведения дополнительного барботажа отобранной пробы. К вентилю «Б» приваривается нержавеющая трубка, оканчивающаяся на расстоянии 5 мм от дна герметичной пробоотборной емкости;

2 Вентиль «В» – «Впрыск» предназначен для подключения герметичной пробоотборной емкости к пробоотборной линии. К вентилю «В» крепится нержавеющая трубка с форсункой длиной $\frac{1}{2}$ высоты пробоотборной емкости;

3 Вентиль «С» – «Слив» используется для вакуумирования (создания разряжения) пробоотборной емкости, слива жидкой пробы и вентилизации пробоотборной емкости.

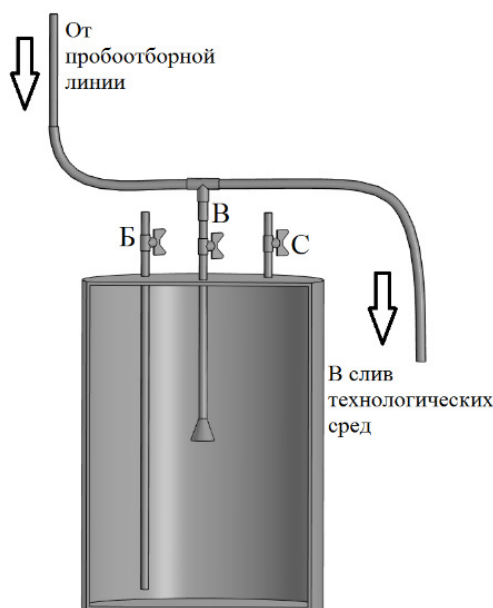


Рисунок 1. Пробоотборная емкость
Figure 1. Sampling capacity

Перед проведением пробоотбора, герметичная пробоотборная емкость предварительно вакуумируется до $\sim 0,85$ ати для создания разряжения.

ПЕ при помощи силиконового или гибкого шланга через «тройник» подключается к штатной пробоотборной линии, расположенной в камере отбора проб (КОП). Настраивается расход и выполняется дренирование теплоносителя в КОП мимо пробоотборной емкости. После проведения дренирования пробоотборной линии для поступления теплоносителя в пробоотборную емкость необходимо открыть вентиль «В». При поступлении теплоносителя через вентиль «В» происходит его дегазация с переходом растворенных в пробе теплоносителя газов в свободный газовый объем

¹ Методика измерения удельной активности инертных радиоактивных газов в теплоносителе первого контура и воде пеналов СОДС на Нововоронежской АЭС. МВК 7.2.13.(2) 22. Нововоронежская АЭС, 2022.

пробоотборной емкости. За счет заранее созданного разряжения в пробоотборной емкости и форсунки расположенной на конце трубки вентиля «В» происходит более интенсивная дегазация теплоносителя.

Объем ПЕ составляет 0,6 л. Время отбора пробы подбирается индивидуально для каждого трубопровода, исходя из необходимой отобранной массы теплоносителя 100÷150 мл. После истечения пробоотбора вентиль «В» закрывают, обмывают пробоотборную емкость и извлекают из КОП.

Для подготовки СОБ используются две методики.

1. Методика с использованием вакуумного увода выделившегося газа.

Для подготовки счетного образца по методу вакуумного увода используется вакуумный газосборник (ГВ) (рис. 2).

ГВ представляет собой герметичную емкость из нержавеющей стали, выполненной по типу сосуда Маринелли, объемом в несколько раз большим, чем объем пробоотборной емкости с двумя вентилями:

- Вентиль «Вход» предназначен для подключения к пробоотборной емкости;
- Вентиль «Выход» предназначен для вентиляции «вакуумного газосборника».



Рисунок 2. Газосборник для выполнения измерений
Figure 2. Gas collector for measurements

Предварительно отвакуумированные до $\sim -0,85$ ати вакуумный газосборник и пробоотборная емкость с отобранной пробой соединяются между собой силиконовым шлангом. Перенос выделившихся газов из пробоотборной емкости в ГВ осуществляется поочередным кратковременным (3÷5 сек.) попеременным сообщением вакуумного газосборника с пробоотборной емкостью и атмосферой.

При закрытых вентилях «В» на пробоотборной емкости и «Выход» на ГВ поочередно открываются-закрываются вентили «С» и «Б». Использование вентиля «Б» для связи пробоотборной емкости с атмосферой исключает выход газа из пробоотборной емкости в помещение, а также обеспечивает дополнительное барботирование жидкой пробы. Опыт показывает, что при соотношении объемов пробоотборной емкости и ГВ как 1:5 после пяти таких переключений в вакуумный газосборник уводится более 99 % выделившихся в газовый объем пробоотборной емкости газообразных радионуклидов. Подготовленный СОБ (смесь газов в вакуумном газосборнике) передается на измерение.

2. Методика с использованием криогенной конденсации выделившегося газа.

Сконструированный на НВ АЭС криогенный газосборник представляет собой компактный герметичный теплообменник в виде тонкостенной металлической трубы (рис. 3), в которую входят две трубки с вентилями: «Вход» и «Выход». Трубка «Вход» проходит в нижнюю часть теплообменника; на ее конце установлен тепловой затвор –

массивный металлический цилиндр, при помощи которого обеспечивается автоматическое прекращение формирования СОБ при достижении фиксированного объема. Для визуального контроля за процессом формирования СОБ и отслеживания момента его прекращения на входе в криогенного газосборника установлен ротаметр.

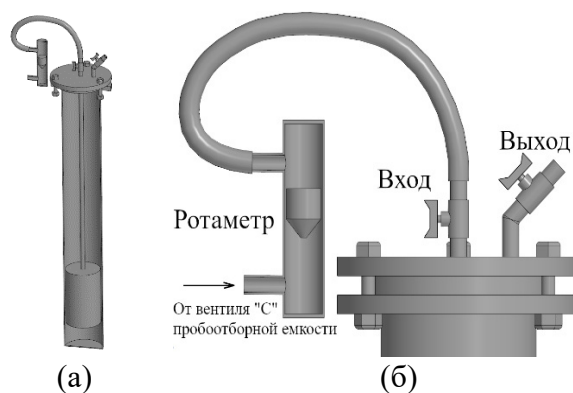


Рисунок 3. Криогенный газосборник
Figure 3. Cryogenic gas collector

Криогенный газосборник соединяется при помощи шланга с пробоотборной емкостью через вентиль «С» (рис. 4). Криогенный газосборник помещается в сосуд с жидким азотом, в качестве которого используется бытовой металлический термос. После остывания криогенного газосборника открывают вентиль «Вход» на криогенном газосборнике и вентили «Б» и «С» на пробоотборной емкости и начинается процесс перетока газо-воздушной смеси из пробоотборной емкости в криогенный газосборник и ее конденсация на внутренней поверхности криогенного газосборника при охлаждении до температуры жидкого азота. Для ускорения формирования СОБ процесс теплосъема от криогенного газосборника интенсифицирован за счет применения пористого покрытия на наружной поверхности нижней части криогенного газосборника (марля, ткань). Тепловой затвор функционирует следующим образом: при увеличении объема сжиженного воздуха до нижнего торца теплового затвора, который имеет температуру выше, чем температура сжижения, часть воздуха испаряется, повышая давление в криогенном газосборнике, и поступление газо-воздушной смеси прекращается. После завершения формирования СОБ вентиль «Вход» на криогенном газосборнике закрывается, и СОБ в газосборнике вместе с термосом передается для спектрометрических измерений.

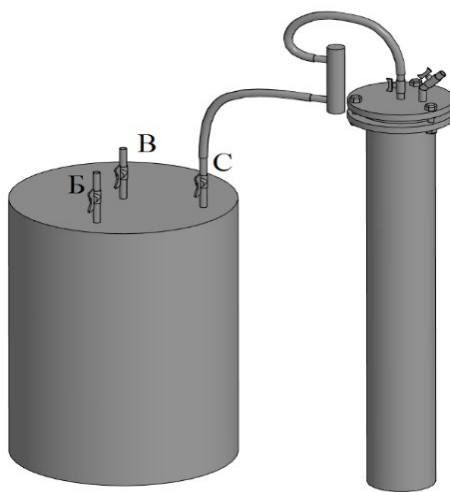


Рисунок 4. Схема подключения криогенного газосборника
Figure 4. Connection diagram of cryogenic gas collector

Сопоставляя достоинства и недостатки двух описанных выше методик формирования СОБ, можно сказать следующее:

- методика с вакуумным уводом ИРГ – очень проста и легко реализуема;
- формирование СОБ по этой методике вакуумного увода занимает не более 5 мин;
- к недостатку метода вакуумного увода можно отнести ограниченность использования (только при отборе газа из жидкой пробы с применением ПЕ).

Методика с использованием криогенной конденсации газа является более универсальной и позволяет контролировать содержание ИРГ как в жидких средах, так и воздушных объемах. Однако формирование СОБ по данной методике предполагает наличие специальных приспособлений (жидкий азот, термос, каркас для установки на детектор). Время на формирование СОБ с объемом $V=25 \text{ см}^3$ составляет ~ 25 мин.

Результаты использования методик измерения

В настоящее время контроль состояния оболочек твэлов во время работы энергоблоков с ВВЭР осуществляется в соответствии с РД ЭО 1.1.2.10.0522-2008 (ВВЭР-440², РД ЭО 1.1.2.10.0521-2008³ (ВВЭР-1000) и ТМТ 1.1.3.04.1769-2020 (ВВЭР-1200)⁴. Оценка наличия негерметичных твэлов в активной зоне проводится по удельной активности в теплоносителе 1-го контура РУ радионуклидов йода $^{131}\text{I} \div ^{135}\text{I}$. Рассчитываются нормированные значения удельной активности радионуклидов йода, пересчитанные к 100 % кумулятивному выходу нуклида на деление ядра ^{235}U и отсутствию выведения йода из теплоносителя первого контура за счет системы СВО.

При разгерметизации твэла в активной зоне реактора в первую очередь еще до заметного роста удельной активности радионуклидов йода в теплоносителе 1-го контура происходит рост активности ИРГ, при этом изменяются не только значения удельной активности радионуклидов, но и их соотношения. Особенно информативны отношения удельных активностей $A_{\text{yd}}(^{133}\text{Xe})/A_{\text{yd}}(^{135}\text{Xe})$.

Для решения задачи по проведению контроля герметичности на работающем реакторе по удельным активностям ИРГ в теплоносителе первого контура на Нововоронежской АЭС применяется методика вакуумного увода ИРГ.

Ввиду большой загруженности энергетического спектра и высокой неопределенности результатов измерений, отследить изменение удельных активностей ИРГ методом прямой спектрометрии невозможно, тогда как при подготовки счетного образца методом вакуумного увода четко прослеживается динамика изменения удельной активности ИРГ (рис. 5,6) и изменение соотношения $^{133/135}\text{Xe}$ (рис. 7), что позволяет однозначно зафиксировать факт разгерметизации твэла ТВС.

² Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07. 2007. <https://docs.cntd.ru/document/902083695#>

³ Сборки тепловыделяющие ядерных реакторов типа ВВЭР-1000. Типовая методика контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов. РД ЭО 1.1.2.10.0521-2009. Москва: Концерн «Росэнергоатом», 2009. file:///C:/Users/User/Downloads/РД_ЭО_1.1.2.10.0521-2009_С_изм.1_копия_копия.pdf

⁴ Сборки тепловыделяющие ядерных реакторов типа ВВЭР-440. Типовая методика контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов. РД ЭО 1.1.2.10.0522-2008. Москва: Концерн «Росэнергоатом», 2009. file:///C:/Users/User/Downloads/РД_ЭО_1.1.2.10.0522-2008_с_изм.1_2_копия_копия.pdf

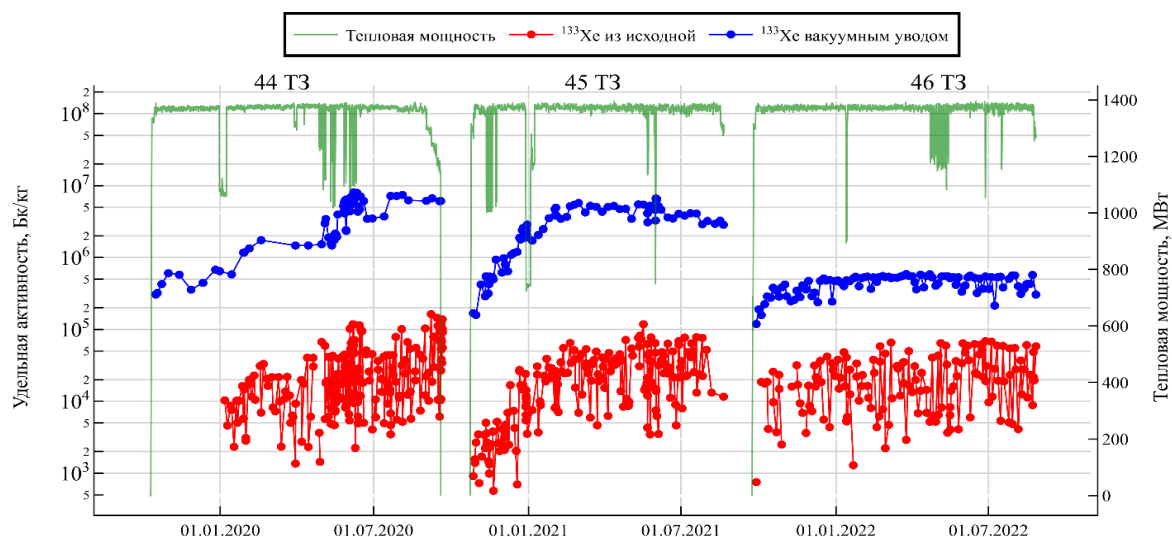


Рисунок 5. График измерений удельной активности ^{133}Xe методом прямой спектрометрии и методом вакуумного увода

Figure 5. Chart of specific activity measurements ^{133}Xe by direct spectrometry and vacuum recovery

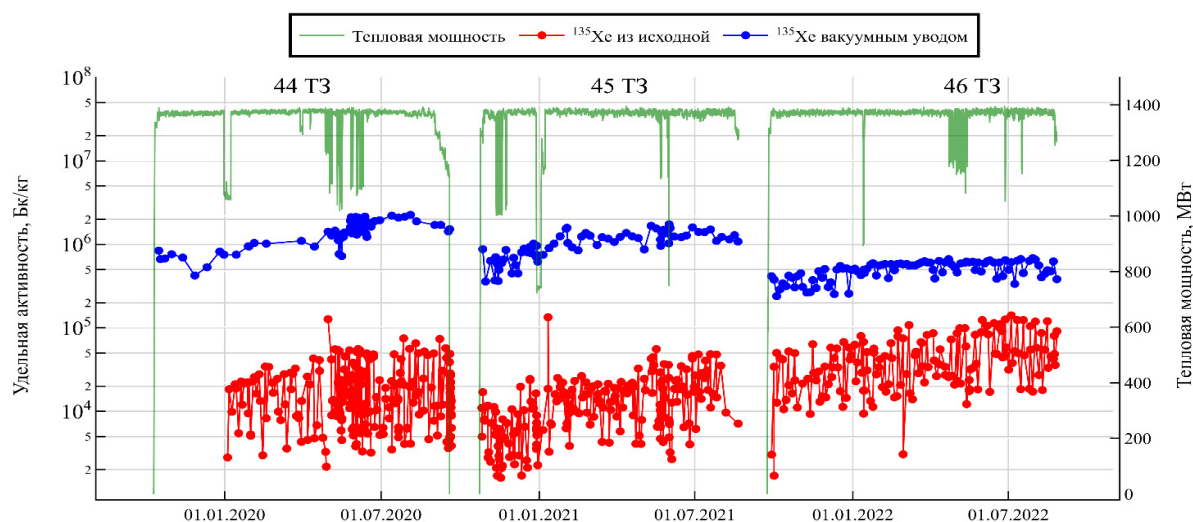


Рисунок 6. График измерений удельной активности ^{135}Xe методом прямой спектрометрии и методом вакуумного увода

Figure 6. Chart of specific activity measurements ^{135}Xe by direct spectrometry and vacuum recovery

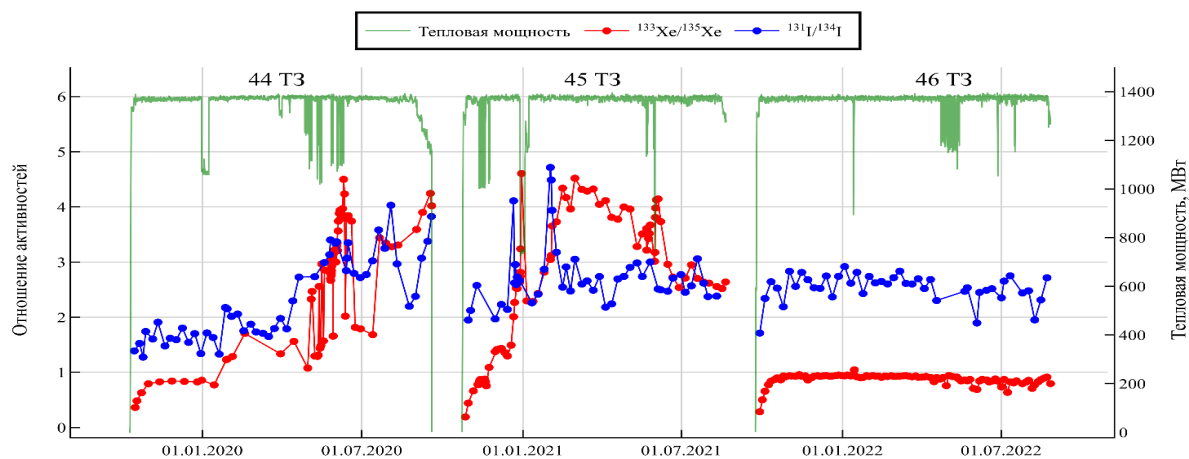


Рисунок 7. График изменения соотношений удельных активностей

Figure 7. Chart of changes in the ratios of specific activities

В 29 ТЗ энергоблока № 5 в момент разгерметизации было зафиксировано максимальное значение отношения нормированных активностей ^{131}I к ^{134}I , составляющие 3,65 (рис. 8). На протяжении всей кампании, анализируя соотношения нормированных активностей йодов в соответствии с Типовой методикой контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов РД ЭО 1.1.2.10.0521-2009 ($^{131}\text{I}_{\text{норм}}/^{134}\text{I}_{\text{норм}} > 5$ для негерметичной ТВС) и удельную активность радионуклидов йода (рис. 9) (в частности по отсутствию spike-эффекта при разгрузке энергоблока на 50 % от номинальной мощности), невозможно сделать однозначный вывод о наличии негерметичных ТВЭЛов в составе топливной загрузки.

Дополнительным инструментом контроля при регистрации негерметичного ТВЭЛ являлся анализ изменения отношения удельных активностей ИРГ ($^{133}\text{Xe}/^{135}\text{Xe}$) в теплоносителе 1-го контура.

По увеличению активности ^{133}Xe и изменению отношения активностей $^{133}\text{Xe}/^{135}\text{Xe}$, которое изменилось и находилось на высоком уровне на протяжении всей дальнейшей кампании, можно сделать однозначный вывод о появлении негерметичного ТВЭЛ в активной зоне.

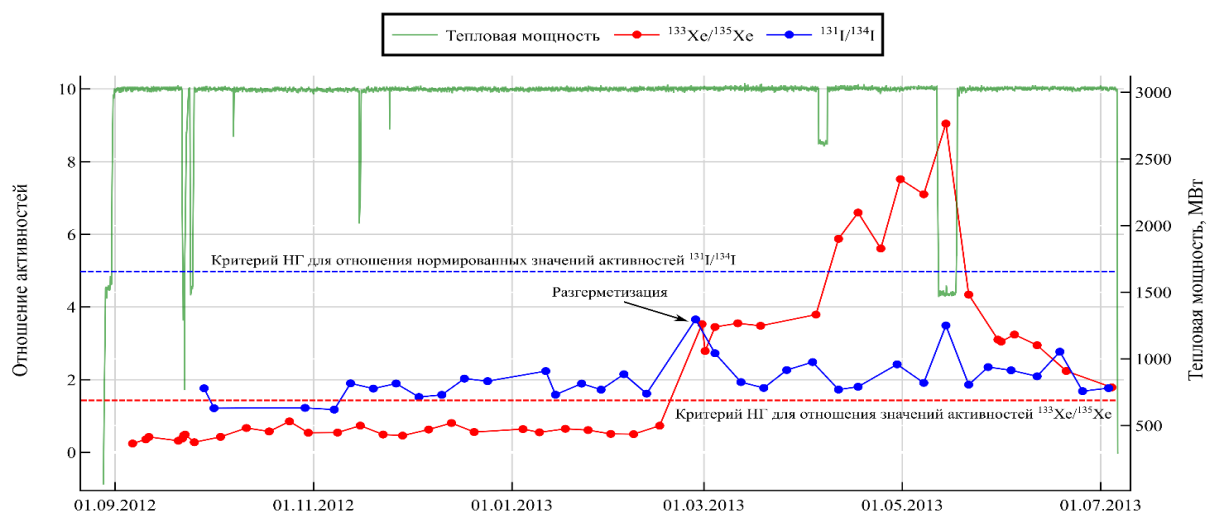


Рисунок 8. График изменения соотношений удельных активностей
Figure 8. Chart of changes in the ratios of long-term activities

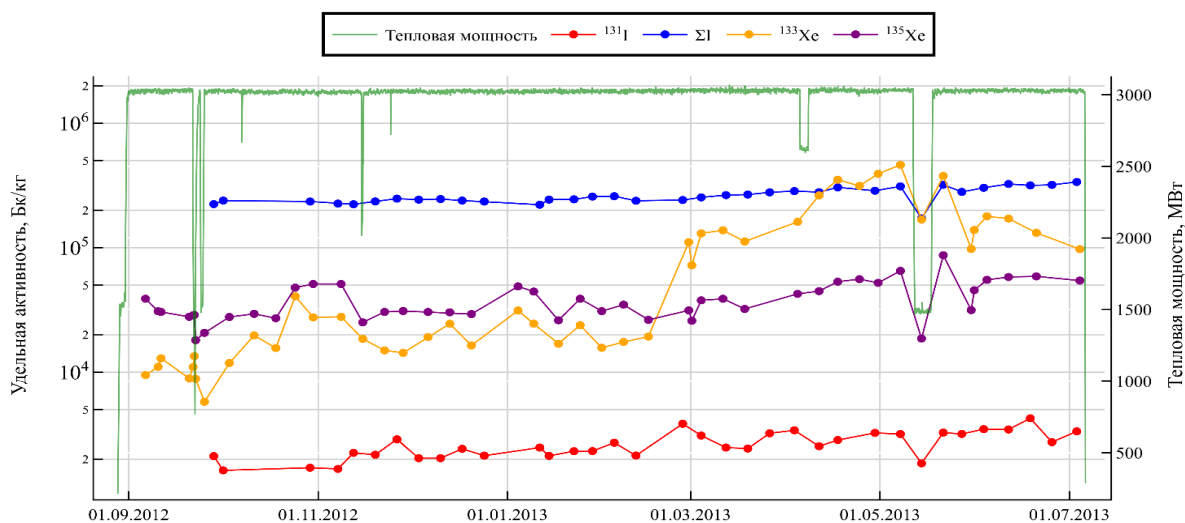


Рисунок 9. График удельных активностей
Figure 9. Chart of specific activities

После окончания топливной загрузки во время перегрузки АЗ реактора был проведен КГО всех твэлов ТВС в системе обнаружения дефектных сборок (СОДС). По результатам КГО СОДС была выявлена одна негерметичная ТВС.

При отсутствии негерметичных твэлов в составе активной зоны, удельные активности йодов и ИРГ, а также их соотношения находятся на стабильном уровне на протяжении всей топливной загрузки (рис. 10).

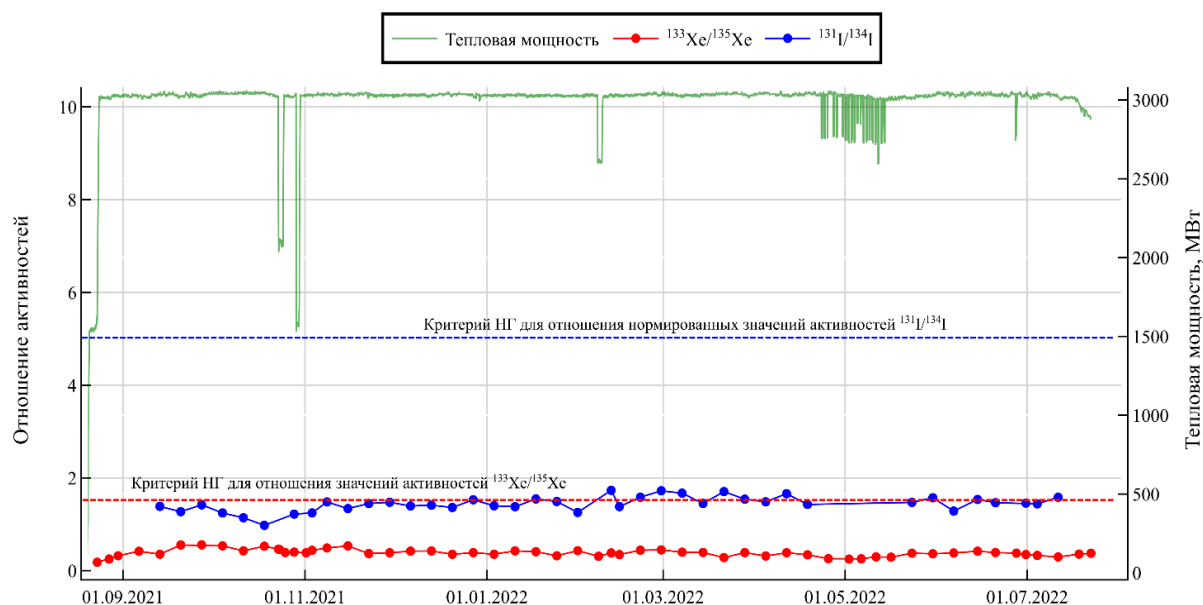


Рисунок 10. График удельных активностей
Figure 10. Chart of specific activities

Выводы

Появление в активной зоне РУ негерметичных твэлов всегда сопровождается ростом активности ИРГ в «стационарных» условиях.

В «герметичной» активной зоне появление негерметичных твэлов меняет отношение активностей радионуклидов ИРГ в сторону увеличения доли долгоживущих.

Для выполнения задач по контролю ИРГ в теплоносителе 1-го контура на Нововоронежской АЭС применяется метод вакуумного увода. Предложенная и применяемая методика измерений ИРГ в теплоносителе 1-го контура позволяет достоверно определять удельные активности ИРГ в теплоносителе 1-го контура, что достигается за счет минимизации потери газа при пробоотборе, транспортировании и пробоподготовке.

Контроль удельной активности ИРГ позволяет с высокой достоверностью регистрировать момент разгерметизации.

В ряде случаев, именно информация по удельным активностям ИРГ в 1-м контуре позволяет достоверно говорить о наличии негерметичных твэлов ТВС.

Регистрация факта наличия негерметичного твэла в составе активной зоны во время работы на мощности дает возможность своевременно предоставить информацию для планирования работ по перегрузке АЗ по время проведения ППР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Быков В.И., Горобцов Л.И., Калмыков С.Н. Опыт Нововоронежской АЭС по использованию данных по активности ИРГ в теплоносителе 1-го контура при контроле состояния 2 го физического барьера при работе энергоблоков на мощности. *Полувековое обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР в России и за рубежом*. Сборник тезисов Международной научно-технической конференции. Нововоронеж: Нововоронежская АЭС, 2014. С. 3710.

2. Поваров В.П., Терещенко А.Б., Кравченко Ю.Н. и др. Развитие и применение современных методов контроля герметичности и оценки состояния топлива на НВ АЭС. *Теплоэнергетика*. 2014;2:54–58. <https://doi.org/10.1134/s004036361402009x>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Калмыков С.Н. – концепция исследования, организация экспериментов, написание текста статьи;

Полозков С.Д. – проведение экспериментов, составление графиков, подготовка технического задания;

Курина А.И. – проведение исследования, анализа данных, проведение аналитики полученных результатов, проведение статистического анализа;

Голубев Е.И. – изучение, ресурсное обеспечение экспериментов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Без дополнительного финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Николаевич Калмыков, начальник лаборатории спектрометрии и КГО отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0352-768X>

e-mail: KalmykovSN@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Сергей Дмитриевич Полозков, инженер лаборатории спектрометрии и КГО отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7938-4208>

e-mail: PolozkovSD@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Анна Игоревна Курина, инженер 1 категории лаборатории спектрометрии и КГО отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2841-8394>

e-mail: KurinaAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Евгений Иванович Голубев, начальник отдела ядерной безопасности и надежности, Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3886-5126>

e-mail: GolubevEI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kalmykov S.N. – research concept, organization of experiments, writing the text of the article;

Polozkov S.D. – conducting experiments, drawing up schedules, terms of reference preparation;

Kurina A.I. – conducting research, analyzing data, analyzing the results, conducting statistical analysis;

Golubev E.I. – study, resource support of experiments

FUNDING:

No additional funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey N. Kalmykov, Head of the Laboratory of Spectrometry and FFD of the Department of Nuclear Safety and Reliability, Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0352-768X>

e-mail: KalmykovSN@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Sergey D. Polozkov, Engineer, Laboratory of Spectrometry and FFD of the Department of Nuclear Safety and Reliability, Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7938-4208>

e-mail: PolozkovSD@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Anna I. Kurina, Engineer (Category 1), Laboratory of Spectrometry and FFD of the Department of Nuclear Safety and Reliability, Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2841-8394>

e-mail: KurinaAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Evgeny I. Golubev, Head of the Department of Nuclear Safety and Reliability, Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3886-5126>

e-mail: GolubevEI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию 05.06.2023

После доработки 01.08.2023

Принята к публикации 10.08.2023

Received 05.06.2023

Revision 01.08.2023

Accepted 10.08.2023