

УДК 621.039.548, 621.039.577

## **Разработка методик для оперативного контроля герметичности оболочек твэлов в процессе испытаний ЯЭУ транспортного назначения**

*Р.В. Фоменков, А.В. Пискарев, А.С. Иванов, В.А. Нагишев, С.Г. Мысик*

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

### **Аннотация**

В статье представлен опыт разработки методов оперативного (при каждом останове реактора) контроля герметичности оболочек твэлов по результатам радиохимического анализа проб технологических сред в процессе испытаний активной зоны ядерной энергетической установки транспортного назначения.

Потребность в разработке методов оперативной оценки герметичности оболочек твэлов при проведении испытаний транспортной ЯЭУ была обусловлена нестационарностью режимов работы реактора, отсутствием возможности отбора проб технологических сред при работе реактора на мощности, а также наличием в контролируемых технологических средах высоко-активированных продуктов коррозии конструкционных материалов. В подобных условиях идентификация разгерметизации твэлов и определение стадий развития дефектов их оболочек требует определения активностей для целого ряда как короткоживущих, так и долгоживущих радионуклидов в объёме технологических сред сразу после останова реактора. В связи с этим, оперативно, уже в первые часы после останова реактора, проводился отбор проб контролируемых сред с их последующим лабораторным радиохимическим анализом. Для анализа и унификации результатов радиохимического контроля, полученных в процессе реализации различных по длительности и мощности режимов работы реактора, авторами предложено использовать «эффективные массы» топлива, в которых происходит такое же накопление продуктов деления и активации топлива, как и в объёме технологических сред при наличии негерметичности (т.е. дефектов) твэлов.

В работе приводится обновлённый регламент выполнения оперативного радиохимического контроля в процессе испытаний активной зоны ядерной энергетической установки транспортного назначения, включающий, в том числе, и вновь разработанные методики селективного выделения и концентрирования радионуклидов. Приводится алгоритм расчёта «эффективной массы» топлива.

**Ключевые слова:** активная зона, контроль, твэлы, герметичность, разгерметизация, реперные радионуклиды, «эффективная масса» топлива.

UDC 621.039.548, 621.039.577

## **Development of procedures for fuel clad failure monitoring during testing of naval nuclear propulsion reactors**

*R.V. Fomenkov, A.V. Piskaryov, A.S. Ivanov, V.A. Nagishev, S.G. Mysik*

FSUE “Alexandrov NITI”, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

### **Abstract**

The paper reports the authors' experience of developing rapid procedures for integrity monitoring of fuel cladding during tests of naval nuclear propulsion reactor cores. The clad integrity is assessed via radiochemical analysis of coolant water samples taken after each reactor shutdown.

Such monitoring procedures are required because of transient test conditions of reactor operation, impossibility of taking coolant samples when the reactor is at power, and presence of activated corrosion products in reactor coolant water. Under these conditions, clad failures and stages of their evolution can be identified from measurements of both short and long-lived activities present in cooling water immediately after reactor shutdown. In the practical test, coolant water samples were taken within the first hours after shutdown and then subjected to radiochemical laboratory analysis. The method developed by the authors uses measurements of the effective masses of fuel to analyze and unify radiochemical data obtained from tests with varied reactor power and operation times. This approach relies on the observation that the activity of fuel fission and activation products accumulated in fuel elements during the test is equal to the activity of the products released from failed fuel into the coolant water.

The paper presents an updated set of radiochemistry monitoring procedures for use in testing of naval nuclear reactor cores. This set includes new procedures for selective separation and concentrating of radionuclides. An algorithm for calculating the effective mass of fuel is described.

**Key words:** core, monitoring, fuel elements, clad integrity, clad failure, reference radionuclides, effective mass of fuel.

## Введение

Важным аспектом создания перспективных транспортных ядерных энергетических установок (ЯЭУ) является обоснование надёжности используемых активных зон (а.з.). Надёжность твэлов а.з. проверяется в ходе петлевых или стендовых испытаний, которые проводятся при многократной смене режимов работы реактора [1]. Контроль герметичности оболочек (КГО) твэлов в процессе испытаний основывается на измерении активности реперных радионуклидов путём отбора проб технологических сред с их последующим радиохимическим анализом в лабораторных условиях. После завершения испытаний а.з. негерметичные тепловыделяющие сборки (ТВС) направляются на материаловедческие исследования с целью выяснения причин разгерметизации твэлов [2, 3].

По ряду причин проведение внутри- или внереакторной дефектации ТВС с целью выявления негерметичности твэлов не всегда возможно реализовать сразу после завершения испытаний а.з. В этой связи важное значение имеет разработка методов оперативного КГО твэлов непосредственно в процессе проведения испытаний а.з. При этом, объективная сложность проведения данного контроля определяется следующими факторами.

**Во-первых**, испытания ЯЭУ, как правило, проводятся по специальному регламенту, включающему частое изменение мощности установки, а также неоднократные остановы [4–5]. Это исключает возможность использования методик КГО, разработанных и адаптированных для АЭС и судов с ЯЭУ, так как они основаны на равновесных значениях активности реперных радионуклидов в теплоносителе [6–9].

**Во-вторых**, в условиях частой смены мощности ЯЭУ определение состояния твэлов требует оперативного (после останова реактора) определения активностей целого ряда как короткоживущих, так и долгоживущих радионуклидов, поступивших в технологические среды за время работы ЯЭУ на мощности. Разработанные ранее способы КГО твэлов на остановленном реакторе основаны на анализе в технологических средах активностей только радионуклидов цезия ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) и йода ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ) [10–11] и поэтому требуют доработки и адаптации к условиям испытаний.

**В-третьих**, при проведении испытаний в пробах контролируемых технологических сред ЯЭУ были идентифицированы активированные продукты коррозии конструкционных материалов, существенно влияющие на качество определения активности радионуклидов йода на ос-

нове ранее используемых на практике методик радиохимического выделения радионуклидов йода [12].

Указанные выше факторы не позволили обеспечить проведение в ходе испытаний а.з. оперативного КГО твэлов на основании только результатов радиохимического анализа проб технологических сред и потребовали создания и отработки дополнительных методов КГО твэлов а.з., адаптированных для условий испытаний ЯЭУ транспортного назначения.

Целью работы являлась разработка расчётных моделей и методик радиохимического контроля для обеспечения оперативного (при каждом останове реактора) контроля герметичности твэлов и оценки состояния а.з. в процессе проведения испытаний ЯЭУ транспортного назначения. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

- разработать расчётные модели, описывающие закономерности накопления продуктов деления в топливе и технологических средах ЯЭУ и модели выхода продуктов деления топлива из твэлов на различных стадиях их разгерметизации;
- разработать алгоритмы и критерии идентификации стадий разгерметизации для твэлов различного типа;
- разработать радиохимические методики выделения реперных радионуклидов из проб технологических сред ЯЭУ в присутствии «мешающих» примесей;
- разработать Программу и методику радиохимического контроля для оперативного контроля КГО твэлов и идентификации типов их негерметичности.

### **Разработка комплекса расчётных моделей и алгоритмов контроля герметичности**

Анализ результатов радиохимического контроля, полученных в ходе испытаний транспортной ЯЭУ, свидетельствует, что использование стандартных методик КГО твэлов [13–14], основанных на решении балансовых уравнений накопления продуктов деления в теплоносителе с учётом постоянных коэффициентов выхода продуктов деления из топливной композиции, не в полной мере учитывает особенности формирования значений радиоактивности технологических сред, что осложняет проведение оперативного КГО твэлов. Следует также отметить, что и использование методик, учитывающих коэффициенты конвективного массообмена между топливом в области дефекта твэла и теплоносителем, а также коэффициенты объёмной диффузии нуклидов под оболочкой твэла в объёме топливной матрицы [15–16] учитывают не все особенности выхода продуктов деления из твэлов испытываемой а.з. В этих условиях для достоверной оценки состояния а.з. в процессе испытаний потребовалась корректировка существующих методик КГО твэлов в части учёта типа негерметичных твэлов, вида топливной композиции и текущей стадии развития дефектов.

Также в условиях манёвренных режимов испытаний транспортной ЯЭУ, использование в качестве показателей разгерметизации твэлов только значений активностей реперных радионуклидов в технологических средах, например, изотопов йода, цезия, криптона или ксенона, было нецелесообразно, поскольку радиоактивности относительно долгоживущих продуктов деления в процессе работы реактора не достигали равновесных значений, что существенно осложняло интерпретацию получаемых при КГО данных. В этом случае для унификации результатов контроля, получаемых для различных по длительности режимов работы реактора, вместо скорости выхода нуклида из негерметичного твэла, отнесённой к скорости его накопления в топливе (рассмотрена в работах [8–9, 16]), предложено использовать «эффективную массу» топлива,

в которой происходило такое же накопление продуктов деления (изотопов йода, цезия, стронция, бария, криптона и др.) и активации топлива (изотопы нептуния, плутония и др.), как и в объёме технологических сред при наличии негерметичности (т.е. дефектов) твэлов.

В качестве исходных данных для расчёта «эффективной массы» топлива использовались удельные (объёмные) активности радионуклидов йода, цезия, стронция, бария, криптона, а также продукты активации топлива, поступившие в технологические среды систем циркуляционного тракта теплоносителя за время проведения режима испытаний. На основании этих данных рассчитывалось суммарное поступление радионуклидов в технологический контур, которое сравнивалось с их накоплением в топливных элементах. Накопление продуктов деления и активации топлива в твэлах а.з. в ходе испытаний оценивалось путём математического моделирования нейтронно-физических процессов в реакторной установке с использованием комплекса программ САПФИР\_VBP95&RC [17–18].

Для «базового состояния» [19] а.з. (состояние а.з. при работе реактора с герметичными твэлами) определялось значение массы открытого топлива для каждого  $m_{откр}^i$   $i$ -го реперного радионуклида по уравнению:

$$m_{откр}^i = \frac{A_з^i}{A_T^i}, \text{ мг} \quad (1)$$

где

$A_з^i$  – суммарная активность  $i$ -го нуклида, поступившего в объём контролируемых технологических сред к заданному моменту времени, Бк;

$A_T^i$  – расчётное значение удельной активности  $i$ -го нуклида в топливе, накопленное к заданному моменту времени, Бк/мг.

Затем вычислялось среднее значение открытой массы (мг), соответствующее «базовому состоянию» а.з. [20]:

$$\overline{m_{откр}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{откр}^i, \quad (2)$$

где:

$m_{откр}^i$  – значение массы открытого топлива, рассчитанное при «базовом состоянии» изделия по  $i$ -му реперному радионуклиду, мг;

$n$  – число реперных радионуклидов.

Выборочное стандартное отклонение измеряемой величины  $\overline{m_{откр}}$  определяется по формуле [20]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{откр}^i - \overline{m_{откр}})^2}{n-1}} \quad (3)$$

Критическое значение массы открытого топлива ( $m_{откр}^{крит}$ ), в случае превышения которого можно судить о разгерметизации, вычисляется по формуле [20]:

$$m_{откр}^{крит} = \overline{m_{откр}} + t_{1-\alpha}(v) \cdot s \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + 1}, \quad (4)$$

где

$t_{1-\alpha}(v)$  – квантиль  $t$ -распределения Стьюдента при заданном числе степеней свободы и заданной доверительной вероятности;

$v$  – число степеней свободы:  $v = n - 1$ ;

$\alpha$  – вероятность событий, которая, согласно рекомендациям [20], принималась равной 0.05;

В случае выполнения условия:  $m_{откр}^i > m_{откр}^{крит}$ , по  $i$ -му радионуклиду вычислялась «эффективная масса» открытого топлива в области дефектов ( $m_{эфф}^i$ ) по формуле:

$$m_{эфф}^i = m_{откр}^i - m_{откр}^{крит}. \quad (5)$$

В противном случае значение  $m_{эфф}^i$  полагалось не значимым (равным нулю).

Изменение «эффективных масс» топлива ( $m_{эфф}^i$ ), а также их отношений, например,

$$\frac{m_{эфф}({}^{88}\text{Kr})}{m_{эфф}({}^{138}\text{Cs})} \quad \text{или} \quad \frac{m_{эфф}({}^{138}\text{Cs})}{m_{эфф}({}^{135}\text{I})},$$

рассчитанных по различным радионуклидам для различных режимов испытаний а.з., может использоваться для идентификации разгерметизации твэлов и оценки динамики развития их дефектов с течением времени. Поэтому анализ данных по изменению «эффективных масс» топлива, полученных в ходе испытаний а.з. транспортной ЯЭУ, послужил основой для разработки критериев идентификации этапов развития дефектов оболочек твэлов, а также расчётных моделей, описывающих закономерности накопления продуктов деления в технологических средах ЯЭУ, применительно к условиям испытаний и стадиям разгерметизации.

Математические модели и алгоритмы анализа экспериментальных данных, разработанные в процессе выполнения данной работы, позволили спрогнозировать изменение радиационной обстановки на объекте и обосновать возможность продолжения испытаний. Сделанные прогнозы изменения радиационной обстановки, а также состояния а.з., впоследствии, полностью подтвердились, что способствовало успешному завершению испытаний а.з. с соблюдением установленных сроков их проведения.

### Разработка комплекса программ и методик радиохимического контроля

По результатам радиохимического анализа проб технологических сред, отобранных в процессе проведения испытаний, было установлено, что основной вклад в суммарное значение радиоактивности проб вносили радионуклиды вольфрама, марганца, молибдена и серебра. При этом удельная активность  ${}^{187}\text{W}$  в пробах достигала значения  $7 \cdot 10^8$  Бк/кг,  ${}^{56}\text{Mn}$  –  $1 \cdot 10^8$  Бк/кг,  ${}^{99}\text{Mo}$  –  $4 \cdot 10^6$  Бк/кг, а  ${}^{110m}\text{Ag}$  – до  $4 \cdot 10^4$  Бк/кг. Присутствие в пробах перечисленных выше радионуклидов приводило к значительному росту минимально детектируемой активности радионуклидов-реперов.

В дополнение к этому, при проведении спектрометрического анализа обнаружено наложение гамма-линий «мешающих» радионуклидов ( $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{147}\text{Nd}$ ) и реперных изотопов йода ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$  и  $^{134}\text{I}$ ), что снижало достоверность анализа:

- изотопу  $^{131}\text{I}$  (основная гамма-линия: 365 кэВ) мешало гамма-излучение от нуклида  $^{99}\text{Mo}$  (гамма-линия 366 кэВ);
- радионуклиду  $^{134}\text{I}$  (основные гамма-линии которого: 847 кэВ и 884 кэВ) мешало гамма-излучение от нуклидов  $^{56}\text{Mn}$  (гамма-линия с энергией 847 кэВ) и  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  (гамма-линия с энергией 885 кэВ);
- нуклиду  $^{133}\text{I}$  (гамма-линия 530 кэВ) мешало гамма-излучение от нуклида  $^{147}\text{Nd}$  (гамма-линия с энергией 531 кэВ).

Использование радиохимических методик хроматографического разделения радионуклидов [12] позволяло выделять из пробы механические взвеси, анионные формы радионуклидов, нуклиды в форме одновалентных и двухвалентных катионов. В то же время, селективное отделение радионуклидов йода от изотопов вольфрама и молибдена было затруднено. После пробоподготовки данные нуклиды находились преимущественно в анионной форме и концентрировались на одном и том же сорбенте.

Для разделения изотопов йода, вольфрама и молибдена в пробах контролируемых сред была разработана методика перевода йода в газообразное состояние с последующей его продувкой через йодную мембрану. В процессе отработки данной методики с использованием проб водных технологических сред транспортной ЯЭУ были получены результаты, свидетельствующие о выделении на мембране не менее 95 % радионуклидов йода и не более 0.1 % радионуклидов вольфрама и молибдена [21].

Кроме того, была разработана и прошла экспериментальную проверку методика выделения и концентрирования изотопов урана и плутония, обеспечивающая не только идентификацию данных нуклидов в пробах технологически сред, но и измерение значений их удельных активностей с применением полупроводникового альфа-спектрометра [22–24].

Учитывая уникальность результатов радиохимического анализа проб технологических сред, получаемых в процессе испытаний а.з., а также радиоактивный распад реперных нуклидов в процессе пробоподготовки и измерения счётных образцов, требовалась строгая регламентация операций, выполняемых при радиохимическом контроле. Последовательность измерений определялась заранее и зависела от физико-химических форм существования радионуклидов, а также временем их жизни. Ниже в таблице приведён модифицированный регламент исследовательского радиохимического контроля, проводимого на стенде транспортной ЯЭУ [25].

Таблица\*

Регламент проведения исследовательского радиохимического контроля [25]

№ операции	Используемый счётный образец	Выполняемые операции
<b>Первая серия измерений (1–2 часа после отбора пробы)</b>		
1	Ёмкость для газовых проб	Изготовление счётного образца для прямых гамма-спектрометрических измерений
2	Ёмкость для водных проб	Изготовление счётного образца для прямых гамма-спектрометрических измерений
3	Мембрана для измерения альфа-активности	Изготовление счётного образца для определения суммарной удельной активности альфа-излучающих радионуклидов

Продолжение таблицы\*

№ операции	Используемый счётный образец	Выполняемые операции
4	Емкость для газовых проб	Определение активности газообразных радионуклидов, в том числе $^{133}\text{Xe}$ , $^{135}\text{Xe}$ , $^{41}\text{Ar}$ , $^{85\text{m}}\text{Kr}$ , $^{87}\text{Kr}$ и $^{88}\text{Kr}$
5	Емкость для водных проб	Определение активности короткоживущих радионуклидов, дающих основной вклад в активность пробы, например $^{132}\text{I}$ , $^{133}\text{I}$ , $^{134}\text{I}$ , $^{135}\text{I}$ , $^{138}\text{Cs}$ , $^{187}\text{W}$ , $^{56}\text{Mn}$ , $^{18}\text{F}$ и т.д.
6	Измерительная кювета	Изготовление счётного образца для определения объёмной активности радионуклидов, испускающих бета-излучение
7	Йодная мембрана	Изготовление счётного образца методом радиохимического выделения йода
8	Таблетки ФМА, ТОА, Д2Ф, МФ и Фильтрат пробы	Изготовление счётных образцов методом выделения на блочных сорбентах
9	Измерительная кювета	Определение суммарной объёмной активности проб по бета-излучению через 2 часа после отбора
10	Таблетка ФМА	Определение объёмной активности радионуклида $^{138}\text{Cs}$
11	Йодная мембрана	Определение объёмной активности короткоживущих радионуклидов йода ( $^{132}\text{I}$ , $^{134}\text{I}$ , $^{135}\text{I}$ )
12	Таблетка ТОА	Определение объёмной активности короткоживущих радионуклидов йода ( $^{132}\text{I}$ , $^{134}\text{I}$ , $^{135}\text{I}$ ) и изотопов вольфрама и молибдена
13	Таблетка Д2Ф	Определение объёмной активности радионуклидов марганца, стронция и бария
14	Таблетка МФ	Определение объёмной активности короткоживущих радионуклидов, присутствующих в теплоносителе в виде взвеси, в том числе нуклидов коррозионного происхождения
15	Фильтрат пробы	Контроль полноты выделения реперных радионуклидов на блочных сорбентах
16	Мембрана для измерения альфа-активности	Определение суммарной объёмной активности проб по альфа-излучению
17	Йодная мембрана	Определение суммарной объёмной активности радионуклидов йода через 2 часа после отбора пробы
<b>Вторая серия измерений (1–2 дня после отбора пробы)</b>		
18	Стальные диски	Изготовление счётного образца для выполнения измерений активности альфа-излучающих нуклидов
19	Емкость для водных проб	Определение активности радионуклидов, присутствующих в счётном образце, в том числе относительно долгоживущих изотопов йода и цезия, а также активированных продуктов коррозии
20	Таблетка ТОА	Определение активности радионуклидов йода ( $^{131}\text{I}$ и $^{133}\text{I}$ ), а также изотопов вольфрама ( $^{187}\text{W}$ ) и молибдена ( $^{99}\text{Mo}$ )
21	Таблетка Д2Ф	Определение активности относительно долгоживущих радионуклидов марганца, стронция, бария, а также нептуния.
22	Таблетка ФМА	Определение активности долгоживущих радионуклидов цезия ( $^{134}\text{Cs}$ , $^{137}\text{Cs}$ )
23	Таблетка МФ	Определение активности радионуклидов, присутствующих в теплоносителе в форме взвеси, в том числе долгоживущих активированных продуктов коррозии

№ операции	Используемый счётный образец	Выполняемые операции
24	Стальные диски	Идентификация альфа-излучающих нуклидов и определение их объёмной активности
25	Ёмкость для водных проб	Определение активности долгоживущих радионуклидов, присутствующих в счётном образце, например, изотопов цезия, церия, рутения, кобальта, циркония, неодима и т.д.
26	Таблетка ТОА	Определение активности долгоживущего радионуклида $^{131}\text{I}$
27	Таблетка Д2Ф	Определение активности долгоживущих радионуклидов, в том числе $^{54}\text{Mn}$ , $^{239}\text{Np}$ , $^{140}\text{Ba}$
28	Таблетка ФМА	Определение активности радионуклидов $^{134}\text{Cs}$ , $^{137}\text{Cs}$
29	Таблетка МФ	Определение активности радионуклидов, присутствующих в теплоносителе в форме взвеси, в том числе долгоживущих изотопов цезия, церия, рутения, кобальта, циркония, неодима

\* В таблице используются следующие сокращения:

- таблетка МФ: блочный сорбент, изготовленный в виде механического фильтра, предназначенный для сорбции радионуклидов в форме взвеси;
- таблетка ТОА: блочный сорбент, пропитанный триоксиламином, предназначенный для сорбции анионных форм радионуклидов, в том числе и радионуклидов йода;
- таблетка Д2Ф: блочный сорбент, пропитанный ди-2-этилгексилортофосфорной кислотой, предназначенный для сорбции двухвалентных катионов, в том числе радионуклидов стронция и бария;
- таблетка ФМА: блочный сорбент, пропитанный фосфомолибдатом аммония и предназначенный для селективного выделения одновалентных катионов, в том числе изотопов цезия;
- фильтрат пробы: аликвота пробы контролируемой среды, пропущенная через систему из четырёх блочных сорбентов.

В процессе выполнения контроля правильность выполнения радиохимического разделения нуклидов на блочных сорбентах определялась путём сопоставления между собой значений удельных активностей радионуклидов йода ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ), цезия ( $^{138}\text{Cs}$ ), стронция ( $^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Sr}$ ), бария ( $^{139}\text{Ba}$ ), выделенных и идентифицированных на таблетках ТОА, ФМА, Д2Ф, МФ и в фильтрате. Правильность изготовления йодных мембран проверялась путём сопоставления между собой данных по значениям удельных активностей радионуклидов йода ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ), измеренным на таблетке ТОА и на йодной мембране. Отличие друг от друга значений результатов контроля для различных счётных образцов, на величину, превышающую погрешность их определения, являлось свидетельством плохого качества изготовления одного или обоих счётных образцов.

Достоверность результатов гамма-спектрометрических измерений счётных образцов определялась путём сопоставления между собой значений удельных активностей:

- изотопов йода ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ), идентифицированных в ёмкости для водных проб, на таблетке ТОА и на йодной мембране;
- нуклида  $^{138}\text{Cs}$ , идентифицированного в ёмкости для водных проб и на таблетке ФМА;



- нуклидов стронция ( $^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Sr}$ ) и бария ( $^{139}\text{Ba}$ ), идентифицированных в ёмкости для водных проб и на таблетке Д2Ф;
- нуклидов марганца ( $^{56}\text{Mn}$ ) и вольфрама ( $^{187}\text{W}$ ), идентифицированных в ёмкости для водных проб, и их суммарной удельной активности, выделенной на таблетках Д2Ф и МФ.

В качестве опорных использовались значения активностей радионуклидов на таблетках ТОА, ФМА и Д2Ф, а также на йодной мембране.

В итоге влияние «мешающих» факторов было существенно снижено, что позволило получить в ходе испытаний а.з. достоверные данные по активности в технологических средах продуктов деления и активации топлива. Полученные значения активностей радионуклидов, присутствующих в технологических средах, использовались для идентификации дефектов твэлов и анализа характера развития негерметичности их оболочки по алгоритмам, приведенным в предыдущем разделе.

### Заключение

1. В процессе проведения испытаний активной зоны ЯЭУ транспортного назначения для идентификации разгерметизации твэлов и определения стадий развития дефектов их оболочек разработаны методики КГО, основанные на оперативном (после останова реактора) отборе проб технологических сред с последующим радиохимическим анализом активностей присутствующих в пробах короткоживущих и долгоживущих радионуклидов.
2. Для унификации результатов контроля, получаемых для различных по длительности режимов работы реактора, предложено использовать «эффективную массу» топлива, в которой происходит такое же накопление продуктов деления (изотопов йода, цезия, стронция, бария, криптона и др.) и активации топлива (изотопы нептуния, плутония и др.), как и в объёме технологических сред при разгерметизации твэлов (т.е. при появлении дефектов в их оболочке).
3. Разработаны алгоритмы проведения радиохимического контроля, а также методики выделения изотопов йода, плутония и урана, адаптированные к условиям проведения испытаний транспортной ЯЭУ. Использование указанных методик и алгоритмов в условиях испытаний а.з. позволило устранить влияние «мешающих» примесей на идентификацию реперных радионуклидов в водных технологических средах ЯЭУ транспортного назначения, а также существенно повысить качество радиохимического контроля.
4. Проведено математическое моделирование накопления продуктов деления и активации топлива во всех твэлах а.з. транспортной ЯЭУ для всего ресурса её эксплуатации. Сопоставление полученных данных с результатами радиохимического контроля позволило провести вычисление «эффективных масс» топлива по реперным продуктам деления (радионуклидам йода, цезия, стронция, бария и криптона), а также продуктам активации топлива для различных режимов работы установки.
5. Верификация разработанных расчётных программ по моделированию процессов накопления и распространения радионуклидов в тепловыделяющих элементах и технологических средах может быть осуществлена по результатам внереакторных материаловедческих исследований отработавших узлов и элементов ЯЭУ.
6. Анализ изменения «эффективных масс» топлива в процессе испытаний активной зоны позволил изучить закономерности выхода радионуклидов из твэлов, а также разработать алгоритмы оценки состояния активной зоны.

## Литература

1. Опыт и перспективы разработки материалов и твэлов для транспортных реакторов и атомных станций малой мощности / Г.В. Кулаков, А.В. Ватулин, С.А. Ершов, А.А. Косауров, Ю.В. Морозов [и др.] // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119, вып. 5. – С. 243–249.
2. Метод оперативного контроля герметичности оболочек твэлов при выгрузке ледокольной активной зоны / М.М. Кашка, А.Н. Пастухов, О.Б. Самойлов, Б.И. Коломиец, С.П. Довбуш // Атомная энергия. – 2016. – Т.121, вып.5. – С. 290–293.
3. *Малыгин В.Б.* Топливный цикл энергетических реакторов и проблемы увеличения ресурса топливных элементов: учебное пособие. – М.: МИФИ, 2001. – 84 с.
4. *Деев В.И.* Основы расчёта судовых ТЭУ: Учебное пособие / В.И. Деев, Н.В. Щукин, А.Л. Черезов; под ред. В.И. Деева. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 256 с.
5. Методическое обоснование моделирования работоспособности тепловыделяющих элементов / Г.В. Кулаков, Ю.В. Коновалов, А.А. Косауров, А.В. Ватулин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2015. – Вып. 6. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/nre/1408.html>.
6. РД ЭО 1.1.2.10.0521-2009. Сборки тепловыделяющих ядерных реакторов ВВЭР-1000. Типовая методика контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов с изм. № 2. – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2016. – С. 28–34.
7. ОСТ.95 10002-95. Нормы качества воды первого и третьего контуров реакторной установки судов департамента морского транспорта Российской Федерации с водоводяными реакторами типа КЛТ-40. Технические требования к качеству воды, его контроль и способы обеспечения. – М.: РНЦ «Курчатовский институт», 1995. – 17 с.
8. *Калиничев П.М.* Методика выявления разгерметизации твэлов по активности радионуклидов Хе во время работы реакторов ВВЭР / П.М. Калиничев, И.А. Евдокимов, В.В. Лиханский. – Ядерная энергетика. Безопасность, надёжность и диагностика ТЭУ. – 2018. – № 2. – С. 101–111.
9. *Курский А.С.* Методы контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов на корпусном кипящем реакторе ВК-50 / А.С. Курский, В.В. Калыгин, И.И. Семидоцкий. – Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. № 1. – С. 16–20.
10. Способ обнаружения единичного дефекта твэла: пат. 2169955 Рос. Федерация, МПК G21C17/04 / И.С. Орленков и др.; заявитель и правообладатель ГП НИТИ им. А.П. Александрова, Министерство Российской Федерации по атомной энергии. – № 99113762/06; заявл. 22.06.1999; опубл. 27.06.2001, Бюл. № 18.
11. *Орлёнков И.С.* Радиохимический контроль при ресурсных испытаниях твэлов новых активных зон / И.С. Орлёнков, Л.Н. Москвин. – М.: Радиохимия, 2010. – Т. 52, № 6. – С. 483–486.
12. Химические проблемы атомной энергетики: Т. 2: Радиохимический анализ и радиохимические технологии; Часть 1: Радиохимический контроль на объектах атомной энергетики и методы радиохимического анализа / Л.Н. Москвин, Б.А. Гусев, В.Н. Епимахов, Г.Г. Леонтьев, И.В. Мирошниченко, И.С. Орленков; под ред. Л.Н. Москвина. – СПб.: Изд-во «ВВМ», 2013. – 320 с.
13. *Козн П.* Технология воды энергетических реакторов: перевод с англ. – М.: Атомиздат, 1973. – 328 с.

14. *Ластман Б.* Радиационные явления в двуокиси урана: перевод с англ. – М.: Атомиздат, 1964. – 288 с.
15. *Лузанова Л.С.* Методика расчёта осколочной активности воды в первом контуре водо-водяного энергетического реактора: препринт ИАЭ-1968 / Л.С. Лузанова, Б.Г. Пологих. – М.: ИАЭ, 1970. – 22 с.
16. *Павленко В.И.* Методика расчёта выхода продуктов деления из негерметичных твэлов с топливом на основе  $UO_2$ . М.: препринт ИАЭ-5137/11 / В.И. Павленко, В.М. Маркушев, В.В. Тимашев. – М.: ИАЭ, 1990. – 52 с.
17. Комплекс программ САПФИР\_ВВР95-РС с библиотекой констант БНАБ-78/С-95: аттестационный паспорт ПС № 261. – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 23.09.2009.
18. Программа САПФИР\_ВВР95 с библиотекой констант БНАБ-78/С-95: аттестационный паспорт ПС № 260. – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 23.09.2009.
19. ГОСТ Р ИСО 11843-1:2007. Статистические методы. Способность обнаружения. Часть 1. Термины и определения.
20. ГОСТ ИСО 11843-3:2005. Статистические методы. Способность обнаружения. Методология определения критического значения отклика без использования данных калибровки.
21. Методика выделения радионуклидов йода из проб технологических сред: инструкция; инв. №13954/И. – Сосновый Бор: НИТИ. – 2019.
22. Методика выделения и концентрирования альфа-излучающих нуклидов из проб технологических сред: инструкция; инв. № 13952/И. – Сосновый Бор: НИТИ. – 2019.
23. Методика измерения активности трансурановых элементов в пробах технологических сред ТЭУ: инв. №14559/и. – Сосновый Бор: НИТИ.
24. Исследование метрологических характеристик методики выполнения измерений объёмной активности изотопов плутония в пробах водных технологических сред ТЭУ с использованием альфа-спектрометра на базе полупроводникового детектора: инв. №14561/и. – Сосновый Бор: НИТИ.
25. Программа и методика радиохимического контроля для обеспечения проведения испытаний: инв. № 14111/и. – Сосновый Бор: НИТИ, 2019. – 58 с.