

УДК 621.039.548

ОБЛАСТИ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ГАММА- И БЕТА-МЕТОДОВ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ

Ямалов Б.Р., студент гр. А-1-23, III курс

Научный руководитель: Базин Д.А., ассистент

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

Обеспечение герметичности оболочек ТВЭЛОВ является ключевым условием безопасной эксплуатации ядерных реакторов. В практике эксплуатации реакторов ВВЭР исторически сложились два метода контроля: бета-метод (детекторы, регистрирующие бета-излучения), и гамма-метод (детекторы, регистрирующие гамма-кванты). Оба метода имеют различные физические основы и, как следствие, разные эксплуатационные характеристики. При этом анализ парка действующих энергоблоков показывает, что оба подхода продолжают применяться параллельно, что указывает на их взаимодополняющий характер, а не на наличие универсального метода. Существующие системы контроля, как правило, используют какой-либо один метод либо комбинируют их, однако четкое разделение функций между ними в литературе представлено недостаточно полно. Выбор метода определяет не только чувствительность и оперативность обнаружения дефектов, но и объем диагностической информации, доступной оператору. От правильного выбора или комбинации методов зависит как радиационная безопасность, так и экономическая эффективность эксплуатации топливных грузов. В связи с этим возникает необходимость в систематизации данных об областях эффективного применения каждого из методов. Целью настоящей работы является определение областей ответственности гамма- и бета-методов контроля герметичности оболочек ТВЭЛОВ.

Исследование выполнено методом анализа физических процессов выхода продуктов деления. При делении ядер урана образуются осколки деления - радиоактивные изотопы различных элементов. Для задач контроля герметичности оболочек ТВЭЛОВ наибольший интерес представляют благородные газы (Xe, Kr), испускающие β -излучение, а также изотопы йода и цезия, регистрация которых осуществляется по γ -излучению, поскольку их активность и поведение в теплоносителе обеспечивают возможность надёжной регистрации [1]. Бета-метод основан на регистрации изотопов криптона и ксенона. Принципиально важно, что выход газов возможен при отсутствии прямого контакта воды с топливом [2]. Активности инертных радиоактивных газов могут быть более надёжным индикатором разгерметизации, особенно при мелких дефектах, когда йодные сигналы могут быть незаметны на фоне топливных отложений. Гамма-метод регистрирует изотопы йода и цезия, выход которых в теплоноситель происходит только при прямом контакте воды с топливом, когда дефект достигает размера, обеспечивающего проникновение теплоносителя внутрь

твэла [2]. Мониторинг активности теплоносителя является основой для оценки целостности топлива.

Таблица 1

Области ответственности методов контроля

Параметр	Бета-метод	Гамма-метод
Регистрируемые нуклиды	Изотопы Kr и Xe	Изотопы I и Cs
Условие появления	Любое нарушение герметичности, включая микротрещины	Только прямой контакт воды с топливом
Стадия дефекта	Начальная (микротрещины)	Развитая (свищи, крупные трещины)
Минимальный обнаруживаемый дефект	порядка 10 мкм	порядка 40 мкм
Скорость обнаружения	высокая	ниже
Диагностическая информация	Факт разгерметизации	Размер дефекта (по I-131/I-133)

Критический анализ границ применимости методов показывает, что они работают в различных физических условиях. Поступление благородных газов в теплоноситель может наблюдаться уже при микродефектах порядка 10 мкм, тогда как регистрация изотопов йода становится возможной, как правило, при более развитых дефектах (порядка 40 мкм), обеспечивающих проникновение теплоносителя внутрь твэла [3]. Важной диагностической возможностью гамма-метода является оценка размера дефекта по соотношению активностей изотопов йода [1]. Периоды полураспада существенно различаются: для I-131 он составляет около 8 суток, а для I-133 — порядка 20,8 часа [4]. При прохождении через узкий канал короткоживущий I-133 частично распадается, поэтому отношение I-131/I-133 тем выше, чем уже канал.

Представленные в табл. 1 характеристики следует рассматривать как ориентировочные, поскольку реальные значения параметров обнаружения зависят от условий эксплуатации реакторной установки. Также величины минимально обнаруживаемых дефектов носят оценочный характер и могут изменяться в зависимости от чувствительности используемых детекторов и уровня фоновых помех. Поэтому сопоставление бета- и гамма-методов целесообразно проводить не по абсолютным значениям параметров, а с учётом их функционального назначения. Бета-метод ориентирован на оперативную фиксацию факта разгерметизации, тогда как гамма-метод обеспечивает получение дополнительной диагностической информации при развитии дефекта. Такое рассмотрение позволяет корректно интерпретировать различия между методами без привязки к конкретным условиям реализации измерений.

Как следует из представленных в табл. 1 данных, бета- и гамма-методы реализуют контроль на различных стадиях развития дефекта, что обусловлено различием механизмов выхода продуктов деления. Бета-метод обеспечивает

раннее обнаружение факта разгерметизации, поскольку выход благородных газов возможен при нарушении целостности оболочки без проникновения теплоносителя внутрь твэла. Его область ответственности – начальная стадия развития дефекта, когда целостность оболочки нарушена, но прямого контакта воды с топливом еще нет. В этих условиях гамма-метод физически не способен зарегистрировать дефект из-за отсутствия вымывания продуктов деления. Гамма-метод, напротив, реализует контроль на стадии развитого дефекта, когда обеспечивается проникновение теплоносителя внутрь твэла и начинается вымывание изотопов йода и цезия. Его область ответственности связана с моментом установления прямого контакта воды с топливом. Только гамма-метод способен оценить размер дефекта по соотношению I-131/I-133.

Таким образом, методы не конкурируют, а дополняют друг друга, формируя последовательную систему контроля: от ранней сигнализации до последующей диагностики. Их совместное использование позволяет одновременно обеспечить оперативность обнаружения и информативность оценки состояния топлива.

Полученные результаты показывают, что учёт различий в механизмах формирования сигналов является необходимым условием построения эффективных систем контроля. Перспективным направлением является совместная обработка данных бета- и гамма-каналов с учётом стадийности развития дефекта, что позволяет повысить достоверность интерпретации сигналов и снизить вероятность ложных срабатываний.

Список литературы

1. Szalóki I., Radócz G., Csongor Szarvas K., Gerényi A. Time-dependent leakage model for the identification of defective fuel assemblies of VVER-type nuclear reactors, part 1: Theory // *Annals of Nuclear Energy*. — 2024. — Vol. 199. — Article 110233. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110233>.
2. Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. — 178 p. — (IAEA Nuclear Energy Series; No. NF-T-2.1). — ISBN 978-92-0-102610-1. — URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1445_web.pdf (дата обращения: 02.03.2026).
3. Курский А. С., Калыгин В. В., Семидоцкий И. И. Методы контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов на корпусном кипящем реакторе ВК-50 // *Вестник ИГЭУ*. — 2014. — № 1. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-kontrolya-germetichnosti-obolochek-teplovydelyayuschih-elementov-na-korpusnom-kiptyaschem-reaktore-vk-50> (дата обращения: 03.03.2026).
4. NuDat 3 (Nuclear Structure and Decay Data) [Электронный ресурс] // National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. — URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/> (дата обращения: 02.03.2026).