РУКОВОДСТВА ПО БЕЗОПАСНОСТИ
в области использования атомной энергии



МЕТОДИКА НЕЙТРОННОГО КОНТРОЛЯ НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСОВ ВОДО-ВОДЯНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ АЭС

РБ-018-01

gost.e-ecolog.ru

ФБУ «НТЦ ЯРБ»

**Федеральный надзор России
по ядерной и радиационной безопасности
(Госатомнадзор России)**

РУКОВОДСТВА ПО БЕЗОПАСНОСТИ

Утверждена
постановлением
Госатомнадзора России
от 17 декабря 2001 г.
№ 14

МЕТОДИКА НЕЙТРОННОГО КОНТРОЛЯ НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСОВ ВОДО-ВОДЯНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ АЭС

РБ-018-01

Введена в действие
с 1 марта 2002 г.

Москва 2001

УДК 621.039

МЕТОДИКА НЕЙТРОННОГО КОНТРОЛЯ НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСОВ ВОДО-ВОДЯНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ АЭС. РБ-018-01

Госатомнадзор России
Москва, 2001

Руководство по безопасности "Методика нейтронного контроля на внешней поверхности корпусов водо-водяных энергетических реакторов АЭС" предназначено для экспериментальной проверки расчетных методов, используемых для определения прогнозных данных о флюенсе быстрых нейтронов в критических точках корпусов водо-водяных энергетических реакторов, и может быть использовано для обоснования радиационной нагрузки корпуса реактора ВВЭР в целях проверки обоснованности заявленного срока службы.

Настоящее руководство разработано с целью реализации требований Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86), Правил устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-008-89).

Документ выпускается впервые.

Документ разработан специалистами НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России Бородкиным Г.И., Хренниковым Н.Н., Столбуновым А.Ю., Фединой Л.Е. при участии специалиста ЦМИИ ГНМЦ "ВНИИФТРИ" Григорьева Е.И. и профессора МИФИ Трошина В.С.

Список сокращений и основных обозначений

АЭС - атомная электрическая станция
ВВЭР - водо-водяной энергетический реактор
МВИ - методика выполнения измерений
ППН - плотность потока нейтронов, нейтр./(см^2·с)
ППП - пик полного поглощения
ТВС - тепловыделяющая сборка
Φ - скорость накопления флюенса нейтронов, нейтр./(см^2·с)
A^i_{EOI} - активность в i-м нейтронно-активационном детекторе, приведенная на конец облучения и на одно ядро, Бк/ядро
E - энергия нейтронов, МэВ
F - интегральный по энергии флюенс нейтронов, нейтр./см^2
P - уровень доверительной вероятности

Термины и определения*

Детектор-монитор - нейтронно-активационный детектор, облучаемый совместно с другими детекторами или наборами детекторов, результаты измерений которого используются для приведения результатов измерений разных детекторов к одинаковым условиям облучения по пространственной переменной (например, для учета пространственной градиента поля быстрых нейтронов).

Детекторы флюенса нейтронов - нейтронно-активационные детекторы, которые облучаются длительное время (например, в течение кампании работы реактора) и период полураспада продукта реакции которых сравним с временем облучения.

История мощности реактора - фиксируемое во времени изменение полной тепловой мощности реактора относительно номинального значения.

Нейтронный контроль - определение отклика детекторов флюенса нейтронов на основе измерений их активности и последующая расчетно-экспериментальная оценка интегральных по времени характеристик поля нейтронов (флюенса, скорости накопления флюенса).

Отклик детектора - функционально зависимая от характеристик поля нейтронов характеристика облученного детектора (например, число реакций за время облучения или средняя за время облучения скорость реакции под действием нейтронов).

Скорость накопления флюенса быстрых нейтронов Φ - средняя за время накопления флюенса быстрых нейтронов (например, время кампании или облучения) ППН, приведенная к номинальному уровню тепловой мощности реактора.

---

* В разделе не приведены термины и определения, имеющие общетехническое значение и определенные в ГОСТах или в других нормативных документах.

1. Общие положения

1.1. Настоящее руководство по безопасности "Методика нейтронного контроля на внешней поверхности корпусов водо-водяных энергетических реакторов АЭС" (далее - РБ) разработано с целью реализации требований Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86), Правил устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-008-89).

1.2. РБ содержит методику нейтронного контроля, предназначенную для экспериментальной проверки расчетных методов, используемых для определения прогнозных данных о флюенсе быстрых нейтронов в критических точках корпусов реакторов типа ВВЭР.

1.3. РБ определяет порядок и методические условия проведения измерений активности и отклика детекторов флюенса нейтронов, а также методические условия для расчетно-экспериментальной оценки флюенса, скорости накопления флюенса и спектральных характеристик поля нейтронов с использованием нейтронно-активационных детекторов, устанавливаемых на внешней поверхности корпусов ВВЭР действующих АЭС. Контролируемый энергетический диапазон нейтронов определяется его значимостью с точки зрения радиационного повреждения стали корпуса реактора и сравнения с расчетными результатами.

1.4. РБ применимо к действующим реакторам АЭС типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

1.5. РБ может быть использовано для обоснования радиационной нагрузки корпуса реактора ВВЭР в целях проверки обоснованности заявленного срока службы.

2. Основные принципы организации облучения детекторов флюенса нейтронов на внешней поверхности корпусов ВВЭР

2.1. Принципы размещения детекторов у корпуса реактора и их облучения

Для размещения детекторов на внешней поверхности корпуса используется специальное облучательное устройство. Его устанавливают в свободном от штатного измерительного оборудования пространстве воздушного зазора. Размеры зазора позволяют разместить устройство с детекторами так, чтобы исключалось их влияние на работу оборудования и систем реактора во время эксплуатации. Поскольку РБ рекомендует проведение разовых измерений (за время одной кампании работы реактора), облучательное устройство не создает помех при проведении регламентных профилактических работ в зазоре, так как должна предусматриваться легкая установка и снятие его во время открытия доступа к зазору.

Рекомендуемые способы, порядок установки и снятия устройства, размещения детекторов на устройстве описаны в приложении 1 (рекомендуемом). Пространственный диапазон размещения детекторов определяется конкретной задачей на конкретном реакторе.

3. Метод нейтронного контроля и основные объекты метрологического обеспечения нейтронно-активационных измерений на корпусах ВВЭР

3.1. Экспериментальный метод, заложенный в основу нейтронного контроля, - метод нейтронно-активационных измерений. Согласно этому методу, нейтронно-активационные детекторы (или детекторы флюенса нейтронов) облучаются в поле нейтронов. В детекторах происходит реакция активации или деления под действием нейтронов.

После окончания облучения измеряют наведенную активность в детекторе. По результатам измерений определяют отклик детектора - число реакций за время облучения или средняя за время облучения скорость реакции. Значения отклика детекторов являются первичной величиной для сравнения с расчетными данными.

Значения числа реакций или скоростей реакций могут использоваться для расчетно-экспериментальной оценки характеристик поля нейтронов - флюенса и скорости накопления флюенса нейтронов. Методом такой оценки применительно к нейтронному контролю за корпусом ВВЭР может быть метод эффективных пороговых сечений, метод восстановления спектра нейтронов или метод сравнения с расчетными скоростями реакций.

3.2. Особенности нейтронного контроля за корпусами ВВЭР, которые должны учитываться при выборе детекторов и обработке результатов измерений:

- облучение детекторов длится, как правило, в течение всей кампании работы реактора (около 300 сут.);
- активность детекторов измеряют через некоторое время после окончания облучения (примерно через неделю или более);
- температура среды во время облучения до 300 °С;
- значительный гамма-фон во время облучения;
- история мощности реактора может иметь сложный непрогнозируемый вид, зависимый от эксплуатационного режима;
- с использованием реакторных данных существует возможность расчета многогрупповых спектров нейтронов и гамма-квантов в любой точке корпуса и околокорпусного пространства.

3.3. Применяемые в данном методе нейтронного контроля средства измерений и методики должны быть метрологически обеспечены. В соответствии с особенностями метода нейтронно-

активационных измерений выделены три вида объектов метрологического обеспечения:

- регламентированный набор нейтронно-активационных детекторов и облучательное устройство;
- специализированная радиометрическая установка на основе гамма-спектрометра с методикой выполнения измерений активности облученных детекторов;
- типовая методика определения отклика детекторов и контролируемых характеристик нейтронного поля по измеренной активности детекторов.

В разделах 4, 5 и 6 рассматриваются требования к указанным объектам.

4. Требования к нейтронно-активационным средствам измерений

4.1. Нейтронно-активационные средства измерений, применяемые при нейтронном контроле за корпусами ВВЭР, включают:

- регламентированный набор нейтронно-активационных детекторов с измерительной оснасткой;
- облучательное устройство.

4.2. Допускается использование стандартизованных нейтронно-активационных детекторов. Детекторы могут представлять собой диски с предпочтительным диаметром 3 или 10 мм.

Аттестованные характеристики детекторов – число ядер нуклида-мишени, масса (или массовая толщина) детектора; массовая толщина по нуклиду-мишени для детекторов по реакции (n,γ). Детекторы должны быть проверены на отсутствие мешающих примесей. Погрешность числа ядер должна составлять 1-4% (уровень доверительной вероятности P принят равным 0,95).

Допускается применение нестандартизованных детекторов после аттестации их в установленном порядке.

4.3. Типы детекторов в наборе подбираются согласно требованиям конкретной задачи из реакций активации, перечень которых дан в приложении 2 (рекомендуемом).

Допускается расширение перечня по мере освоения новых реакций, чувствительных к контролируемому диапазону энергии нейтронов от 0,1 до 10 МэВ. Рекомендуется в набор детекторов включать реакции, чувствительные к тепловым нейтронам.

Характеристики, представленные в табл. П2-1÷ П2-3, рекомендуется использовать при планировании экспериментов.

4.4. Измерительная оснастка в сборке представляет собой различные капсулы-держатели и кадмиевые экраны, предназначенные для размещения набора детекторов в облучательном устройстве.

Состав сборки, геометрия заполнения, маркировка и другие сведения документируются в протоколе облучения.

4.5. Облучательное устройство предназначено для фиксации сборок при облучении. Рекомендации по облучательному устройству приведены в приложении 1.

4.6. Необходимая информация о подготовке и проведении облучения детекторов должна быть представлена в протоколе облучения. Она должна включать: сведения о формировании сборок детекторов согласно пункту 4.4; геометрию размещения сборок в облучательном устройстве; геометрию размещения устройства на корпусе реактора; данные о времени облучения и истории мощности реактора за время облучения; значения аттестованных характеристик детекторов, необходимых для последующей обработки результатов (могут быть даны ссылки на литературные источники, содержащие эти данные).

5. Требования к средствам и методике измерения активности детекторов

5.1. Нейтронно-активационные детекторы (или детекторы флюенса нейтронов) после облучения представляют собой источники фотонного излучения. Характеристики схем распада радионуклидов-продуктов реакций активации и деления приведены в приложении 2.

5.2. Активность облученных детекторов следует измерять на специализированной радиометрической установке (далее - установка) на основе гамма-спектрометра, аттестованной в установленном порядке.

Установка должна включать следующие обязательные элементы:

- гамма-спектрометр;
- контрольный источник;
- МВИ.

Дополнительно установка может комплектоваться специализированными эталонными мерами активности для реализации метода замещения, если это предусмотрено МВИ. Все элементы установки должны иметь эксплуатационную документацию и действующие свидетельства на комплектующие источники, представляемые вместе с установкой при ее аттестации.

5.3. Гамма-спектрометр может включать один или несколько измерительных трактов, собранных на основе спектрометрических сцинтилляционных или полупроводниковых детекторов, удовлетворяющих потребностям измерений активности источников согласно пункту 5.1.

Типичная погрешность измерений внешнего гамма-излучения от облученных детекторов должна составлять 3 - 5 % (уровень доверительной вероятности P принят равным 0,95).

5.4. Контрольный источник гамма-излучения предназначен для проверки сохранности аттестованных характеристик установки. Ак-

тивность источника должна быть оптимальна по загрузочным характеристикам измерительного тракта. Энергия, используемая для контроля гамма-линий, должна соответствовать середине рабочего энергетического диапазона, а конструкция источника должна быть рассчитана на длительное интенсивное использование. Контрольный источник должен быть аттестован в установленном порядке.

5.5. Методика выполнения измерений активности облученных детекторов может реализовывать следующие три способа.

5.5.1. Первый способ основан на применении гамма-спектрометра, отградуированного по эффективности регистрации фотонов в рабочем диапазоне энергии, характерном для излучения продуктов реакций активации рекомендованной номенклатуры. Эффективность регистрации задана для условий точечного источника, размещенного на фиксированном расстоянии от кристалла детектора, в виде зависимости от энергии фотонов $\varepsilon(E)$. В этом случае экспериментально определяемая величина - скорость счета импульсов в ППП энергии измеряемых фотонов S_j - связана с активностью соотношением:

$$A = \frac{S_j}{\varepsilon(E_j)\eta_j} \prod_p C_p . \qquad (1)$$

где $\varepsilon(E_j)$ - значение эффективности для энергии E_j, взятое из зависимости $\varepsilon(E)$;

η_j - абсолютная интенсивность фотонов с энергией E_j для измеряемого радионуклида;

C_p - поправки на неидентичность детектора и точечного источника.

5.5.2. Второй способ основан на использовании дискретной чувствительности ε_{ij}, измеряемой в (имп/с)/Бк. Дискретная чувствительность задана для энергии фотонов E_j от радионуклида типа "i" и связывает измеряемую активность A_i со скоростью счета S_{ij} в ППП от фотонов с энергией E_j:

$$A_i = \frac{S_{ij}}{\varepsilon_{ij}} \prod_p C_p . \qquad (2)$$

При использовании этого способа автоматически исключается погрешность за счет аппроксимации $\varepsilon(E)$ и погрешность η_j, присутствующие в первом способе, а также поправка на каскадное суммирование.

5.5.3. Третий способ связан с применением специализированных эталонных мер активности гамма-источников, имитирующих облученные детекторы по типу радионуклида и его конструкции. Измерения выполняют путем сравнения детектора и меры на компараторе - гамма-спектрометре, а в качестве параметра сравнения используют соответствующие скорости счета импульсов S_j в ППП:

$$A = \frac{S_j}{S_{je}} A_e \prod_p C_p \,, \qquad (3)$$

где A_e - активность эталонной меры на момент измерения.

5.6. При разработке методики и метрологическом исследовании установки необходимо определить все возможные факторы отличия измеряемого образца от условий градуировки и указать способы определения соответствующих поправок C_p или их конкретные значения. Основными факторами, требующими учета в поправках C_p , являются:

- отличие диаметра и толщины измеряемого детектора от градуировочного источника (или эталонной меры и детектора);
- каскадное суммирование фотонов;
- возможные эффекты от примесных излучений (например, инициированное характеристическое излучение в детекторе из ниобия).

5.7. Методика выполнения измерений активности нейтронно-активационных детекторов на конкретной установке должна соответствовать ГОСТ Р8.563-96 "ГСИ. Методики выполнения измерений" и содержать:

- назначение и область применения;
- принцип (способ) измерения;
- описание счетных образцов (нейтронно-активационных детекторов);
- краткое описание установки;
- описание системы регламентированных характеристик установки для реализации методики;
- правила подготовки и выполнения измерений, включая контрольные измерения;
- способ и алгоритм обработки спектрограммы;
- перечень поправок и способы их определения;
- соотношения для определения суммарной погрешности активности для уровня доверительной вероятности 0,95;
- требования к оформлению результата;
- требования к квалификации работников.

Допускаются ссылки на стандартизованные методики или прошедшие метрологическую экспертизу частные методики и правила, а также допускается возможность изложения отдельных положений методики в виде приложений.

Метрологическая экспертиза и аттестация МВИ проводятся в установленном порядке.

5.8. Детальные результаты измерения активности детекторов регистрируются в рабочих протоколах. Для последующей обработки

результатов должен быть оформлен Сводный протокол измерения активности детекторов, в котором указаны маркировка детектора, измеренная активность A, ее погрешность и значение активности детектора, приведенное на конец его облучения A_0:

$$A_0 = Ae^{\lambda t_в}, \quad (4)$$

где $t_в$ - время выдержки от конца облучения до начала измерения активности;

λ - постоянная распада продукта реакции активации.

6. Требования к типовой методике определения отклика детекторов и оценки характеристик нейтронного поля

6.1. Типовая методика определения отклика детекторов и оценки характеристик нейтронного поля регламентирует способ определения отклика детекторов и контролируемых нейтронных величин по результатам нейтронно-активационных измерений вблизи корпуса реактора ВВЭР набором детекторов флюенса.

6.2. Методика предполагает наличие информации об истории мощности реактора и оценки изменения за время облучения локальной ППН в месте облучения детектора относительно полной тепловой мощности (истории локальной мощности), а также данных об изменении температуры теплоносителя на входе в реактор за время облучения.

6.3. Методика предполагает наличие расчетной или полученной другими способами (например, экспериментами на макетах) информации о спектре нейтронов и гамма-квантов в месте облучения детектора (например, в многогрупповом приближении).

6.4. Исходной экспериментальной информацией для последующей обработки и вычислений по данной методике является активность в нейтронно-активационном детекторе, приведенная на конец облучения A_0, сведения о которой занесены в Сводный протокол согласно пункту 5.8.

6.5. Типовая методика определения отклика детекторов и оценки характеристик нейтронного поля приведена в приложении 3 (рекомендуемом).

6.6. Результатом реализации методики должен быть Сводный протокол, куда заносятся результаты определения отклика детекторов и оценки характеристик нейтронного поля. Обязательной величиной, приведенной в Сводном протоколе, должна быть активность детекторов A^i_{EOI}, приведенная на конец облучения и на одно ядро нуклида-мишени, с оцененной погрешностью для P, равной 0,95.

7. Рекомендации по использованию результатов измерений для проверки обоснований флюенса быстрых нейтронов в критических точках корпуса ВВЭР

7.1. Флюенс быстрых нейтронов в критических точках корпуса ВВЭР может быть получен из расчетов переноса нейтронов. Экспериментальные данные, полученные в точках на внешней поверхности корпуса, могут быть использованы для сравнения с расчетными данными, полученными для этих же точек.

7.2. Для проверки обоснований расчетного флюенса в критических точках корпуса рекомендуется использовать экспериментальные данные, полученные на внешней поверхности корпуса, по возможности вблизи критических точек (например, для ВВЭР-440 - напротив азимутального максимума флюенса быстрых нейтронов на уровне сварного шва № 4; для ВВЭР-1000 - напротив высотного и азимутального максимумов флюенса быстрых нейтронов).

7.3. В качестве экспериментального результата рекомендуется использовать активности A^{i}_{EOI}, приведенные на конец облучения и на одно ядро. Следует проводить сравнение как абсолютных значений, так и относительных пространственных распределений активностей детекторов-мониторов.

7.4. При анализе обоснований флюенса или скорости накопления флюенса быстрых нейтронов, соответствующих эффективной пороговой энергии конкретного детектора $E_{эфф.i}$, рекомендуется использовать отношение:

$$C^{i}_{Р/Э} = \left(\frac{A^{расч}_{EOI}}{A^{эксп}_{EOI}} \right)_i , \qquad (5)$$

характеризующее степень отклонения расчета от эксперимента.

Приложение 1
(рекомендуемое)

Порядок установки и снятия облучательного устройства, способы и схемы размещения детекторов за корпусами ВВЭР

П1.1. Расположение детекторов относительно реактора

Наборы детекторов флюенса нейтронов упаковывают в капсулы или контейнеры, которые прикрепляют к облучательному устройству. Это устройство, например, может содержать две необходимые компоненты - азимутальную и вертикальную штанги. Установку и снятие устройства проводят на остановленном реакторе, обычно во время планово-предупредительного ремонта, связанного с перегрузкой топлива. Облучение детекторов, как правило, длится в течение кампании работы реактора. Экспериментальное устройство может быть изготовлено в виде рамы или креста. Азимутальная штанга может представлять жесткую дугу окружности с рекомендуемым обхватом угла в 60°. Вертикальная штанга должна позволять размещать детекторы по всей высоте активной зоны. Количество вертикальных и азимутальных штанг в устройстве устанавливают, исходя из потребностей в решении конкретной задачи на конкретном реакторе. Капсулы и облучательное устройство рекомендуется изготавливать из алюминия или его сплавов (дюралюминия).

Количество наборов детекторов и детекторов-мониторов, а также их расположение относительно реактора выбирают исходя из решения конкретной задачи. Наборы детекторов рекомендуется устанавливать напротив критической точки корпуса и, в частности, в каждом предполагаемом, исходя из расчета, азимутальном максимуме и минимуме, высотном максимуме и на уровне сварного шва. Детекторы-мониторы рекомендуется устанавливать не реже чем через 3° по азимуту и не реже чем через 30 см по высоте.

Каждый набор детекторов флюенса нейтронов рекомендуется заключать в кадмиевый экран толщиной 0,5 мм. Для оценки кадмиевого отношения для детекторов тепловых нейтронов рекомендуется выбрать поле нейтронов с предполагаемым малым градиентом флюенса (например, поле по высоте вблизи центра активной зоны). Как минимум, один набор таких детекторов рекомендуется не помещать в кадмиевый экран, а располагать на расстоянии 10 см от набора, покрытого кадмием.

Каждый набор должен содержать детектор-монитор. Для определения эффекта возмущения нейтронного поля материалом

контейнера или окружения детектора детекторы-мониторы можно размещать как внутри контейнера, так и снаружи, а при необходимости также в любых важных точках окружения детектора.

П1.2. Способы и порядок установки и снятия облучательного устройства у корпуса ВВЭР

Рекомендуются два технологических способа установки облучательного устройства у корпуса ВВЭР.

Первый способ условно назван способом верхней установки. В зоне входных патрубков теплоносителя к околокорпусным конструкциям, прилегающим к корпусу, крепят гибкий металлический тросик. Он должен выдерживать груз массой примерно 20 кг в течение длительного (около года) времени. Тросик опускают вниз до днища корпуса. Верхний конец устройства прикрепляют к этому тросику в радиационно безопасной зоне, находящейся в районе днища корпуса. Облучательное устройство подтягивают вверх и подвешивают на заранее определенной высоте. Нижний конец устройства крепят к полу подреакторного пространства (ВВЭР-1000) или к специальным конструкциям в зоне днища корпуса (ВВЭР-440). Прилегание к корпусу обеспечивают специальными распорками. Провисание конструкции от теплового расширения устраняют путем натяжения пружины. Снимают устройство в порядке, обратном установке.

Второй способ условно назван способом нижней установки. Облучательное устройство устанавливают на опорную станину в зоне днища корпуса и поднимают вверх на определенную высоту, например, телескопическим способом.

Выбор способа определяют практическими условиями в конкретный момент времени на конкретном реакторе.

Преимущество первого способа - надежность сохранения вертикальности установки, гарантия прилегания к корпусу и возможность размещения детекторов по всей высоте от днища корпуса до зоны патрубков, включая всю высоту активной зоны и зону опорных конструкций. Кроме того, дозозатраты в первом способе установки значительно ниже, чем во втором. Преимущество второго способа - возможность установки детекторов в любом азимутальном секторе реактора.

Снимать устройство рекомендуется после недельной выдержки после останова реактора.

П1.3. Рекомендации по координатам размещения устройства у корпусов ВВЭР

Рекомендуемые азимутальные координаты размещения устройства с детекторами флюенса нейтронов у внешней поверхности корпусов ВВЭР для первого способа установки приведены на рис.1 - 3. Второй способ установки не имеет ограничений по азимутальному размещению детекторов.

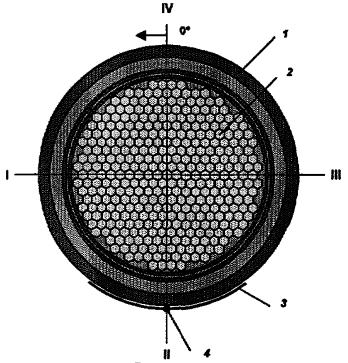

Рис. 1. Схема размещения облучательного устройства у корпуса ВВЭР-440 со стандартной загрузкой:

1 - корпус; *2* - ТВС; *3* - азимутальная штанга; *4* - вертикальная штанга

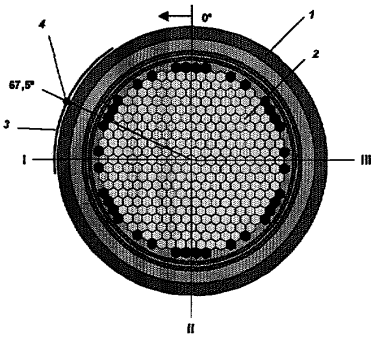

Рис. 2. Схема размещения облучательного устройства у корпуса ВВЭР-440 с кассетами-экранами:

1 - корпус; *2* - ТВС; *3* - азимутальная штанга; *4* - вертикальная штанга

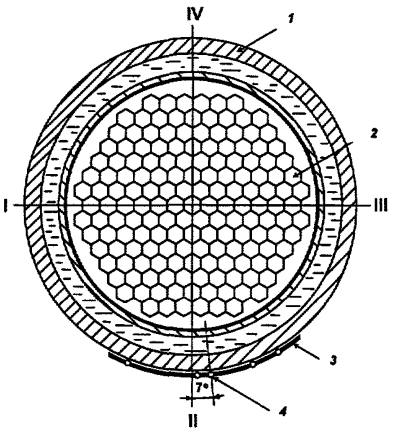

Рис. 3. Схема размещения облучательного устройства у корпуса ВВЭР-1000:

1 - корпус; *2* - ТВС; *3* - азимутальная штанга; *4* - вертикальная штанга

Приложение 2
(рекомендуемое)

Характеристики детекторов флюенса нейтронов

Таблица П2-1

Рекомендуемый для нейтронного контроля за корпусами ВВЭР набор детекторов флюенса нейтронов и их оценочные характеристики

Детектор, реакция	Период полураспада, сут. [1]	Эффективная энергия *, МэВ	Эффективное сечение **, мб	
			ВВЭР-440	ВВЭР-1000
$^{237}Np(n,f)^{137}Cs$	11020	0,5	1407	1398
$^{93}Nb(n,n')^{93m}Nb$	5890	1,0	214	225
$^{238}U(n,f)^{137}Cs$	11020	1,7	715	736
$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	70,86	2,5	413	429
$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	312,3	3,0	439	440
$^{46}Ti(n,p)^{46}Sc$	83,79	5,0	175	175
$^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$	1925,5	6,1	20,4	20,6
$^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$***	1925,5	-	-	-
$^{93}Nb(n,\gamma)^{94}Nb$***	$7{,}30\cdot10^{6}$	-	-	-

* Значения выбраны равными границам энергетических групп нейтронов для формата библиотеки BUGLE-96, вблизи которых находятся рекомендованные в [2] эффективные сечения.

** Оценки сделаны по расчетному спектру, полученному по программе DORT с библиотекой BUGLE-96.

*** Реакция на тепловых и эпитепловых нейтронах.

[1] X-ray and gamma-ray standards for detector calibration, IAEA-TECDOC-619. IAEA, VIENNA, 1991.

[2] Сб. статей: "Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях". -М., ЦНИИатоминформ, 1983, т.2.

Таблица П2-2

Характеристики продуктов реакций детекторов флюенса нейтронов [1]

Продукт реакции	Период полураспада, сут.	Выход продукта реакции, χ [3]	Энергия фотонов, КэВ	Эмиссия фотонов
^{137}Cs	11020 ± 60	0,0617 ± 0,0017 [$^{237}Np(n,f)$] 0,0602 ± 0,0006 [$^{238}U(n,f)$]	661,660	0,851 ± 0,002
^{93m}Nb	5890 ± 50	1	16,52 - 19,07*	0,1104 ± 0,0035
^{58}Co	70,86 ± 0,07	1	810,775	0,9945 ± 0,0001
^{54}Mn	312,3 ± 0,4	1	834,843	0,99976 ± 0,000024
^{46}Sc	83,79 ± 0,04	1	889,277 1120,545	0,99984 ± 0,000016 0,99987 ± 0,000011
^{60}Co	1925,5 ± 0,5	1	1173,238 1332,502	0,99857 ± 0,00022 0,99983 ± 0,00006
^{94}Nb	$(7,3 \pm 0,9)\cdot 10^{6}$	1	702,627 871,099	0,9981 ± 0,0005 0,9989 ± 0,0005

* Приведена суммарная эмиссия всех фотонов данного диапазона энергий.

[3] T.R.England, B.F.Rider, "Evaluation and Compilation of Fission Product Yields", Report ENDF-349, 1989.

Таблица П2-3

Оцененные* максимальные скорости накопления флюенса нейтронов на внешней поверхности корпусов ВВЭР, нейтр./(см^2·с), и азимутальные углы, где расположены эти максимумы**

Реактор	Угол максимума, град.	$E > 0{,}5$ МэВ	$E > 1$ МэВ	$E > 3$ МэВ
ВВЭР-440 Стандартная зона	30	$4 \cdot 10^{10}$	$1{,}5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{9}$
ВВЭР-440 Кассеты-экраны	13	$1{,}5 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{9}$	$7 \cdot 10^{8}$
ВВЭР-1000 ***	7	$6 \cdot 10^{9}$	$2 \cdot 10^{9}$	$2 \cdot 10^{8}$

* Приведены оценочные значения для типовых загрузок, которые могут использоваться для оптимального подбора детекторов.
** Для 30-градусного сектора симметрии (отсчет от оси *I*).
*** Кроме блока 5 Нововоронежской АЭС.

Приложение 3
(рекомендуемое)

Типовая методика определения отклика детекторов и оценки характеристик нейтронного поля

П3.1. Исходные данные

Для проведения вычислений необходимо иметь следующие исходные данные и характеристики детекторов:

A_{0i} - активность с погрешностью i-го детектора флюенса, измеренная в соответствии с разделом 5 на момент окончания облучения;

$N_{яi}$ - число ядер нуклида-мишени в i-м детекторе с погрешностью θ_N (паспортные данные);

d - толщина детектора по нуклиду-мишени для детекторов по реакции (n,γ) для учета электронного самоэкранирования (паспортные данные), мг/см^2;

λ_i - постоянные распада (или периоды полураспада $T_{1/2}$) для продуктов реакций активации и деления (приложение 2);

χ_{Np} , χ_U - выходы Cs-137 в продуктах реакции деления на Np-237 и U-238 (приложение 2);

$E_{эфф.i}$, $\sigma_{эфф.i}$ - эффективные пороги и сечения;

T_0 , T_k , τ_0 - календарное время начала и конца облучения и календарная продолжительность облучения;

$P(t)$ - история мощности реактора за время облучения (зависимость мощности реактора от времени);

$f(t)$ - история локальной мощности за время облучения;

$P_{ном}$ - декларированный номинальный уровень мощности реактора. Сведения о времени облучения и мощности берутся из протокола облучения согласно пункту 4.6.

П3.2. Определение отклика детектора флюенса

П3.2.1. Откликом детектора флюенса является число реакций активации Q, произошедших в детекторе за время облучения, в расчете на одно ядро нуклида-мишени. Общеупотребительное название Q - активационный интеграл реакции активации (детектора).

П3.2.2. Активационный интеграл Q рассчитывают с использованием исходных данных, приведенных в пункте *П3.1*, по формуле:

$$Q = \frac{A_0}{N_я \lambda \chi} M_p C_в C_f C_{сэ} C_г , \qquad (П3\text{-}1)$$

где M_p - поправка на историю мощности реактора и локальной мощности, которая учитывает образование и распад про-

дукта реакции активации при изменении ППН за время облучения в месте облучения детектора;

C - поправки, рекомендации по определению которых приведены ниже;

$$M_p = \frac{\int_{T_0}^{T_k} f(t)P(t)dt}{\int_{T_0}^{T_k} f(t)P(t)e^{-\lambda(T_k - t)}dt}. \qquad \text{(П3-2)}$$

Для условия детектора флюенса при $T_{1/2} >> \tau_0$ и точного вычисления интегралов в формуле (П3-2) погрешность поправки θ_p не превышает 1 - 2% (P = 0,95);

C_B - поправка на выгорание, которая учитывает возможность уменьшения числа ядер продукта активации за счет реакции (n,γ). Поправка существенна для реакции $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$ при плотности потока тепловых нейтронов более 10^{12} нейтр./(см^2·с). При плотности потока 10^{13} нейтр./(см^2·с) и продолжительности облучения от 50 до 300 сут. поправка C_B составляет от 1,05 до 1,15. Поправку C_B можно оценить экспериментально или расчетом (например, способом, изложенным в [3]). Для условий облучения в рамках данной задачи этой поправкой можно пренебречь;

C_f - поправка на фотоделение, которая учитывает появление регистрируемого продукта деления в облучаемом детекторе за счет реакции (γ,f). Поправку C_f можно оценить расчетом на основе известных оценок нейтронного спектра $\varphi(E)$ и фотонного спектра $\varphi_\gamma(E)$, а также сечений реакций (n,f) – $\sigma(E)$ и (γ,f) – $\sigma_\gamma(E)$ по формуле:

$$C_f = 1 - \frac{\int_0^{E_{max}} \sigma_{\gamma f}(E)\varphi_\gamma(E)dE}{\int_0^{E_{max}} \sigma(E)\varphi(E)dE}. \qquad \text{(П3-3)}$$

Если спектры известны из расчетов переноса нейтронов и фотонов в многогрупповом приближении, то поправку можно рассчитать по формуле:

$$C_f = 1 - \frac{\sum_g \sigma_{i,g}\Phi_g}{\sum_n \sigma_{i,n}\Phi_n}, \qquad \text{(П3-4)}$$

где $\sigma_{i,g}$, $\sigma_{i,n}$ - групповые сечения i-й реакции деления под действием фотонов и нейтронов соответственно;

Φ_g, Φ_n - расчетные групповые плотности потока фотонов и нейтронов соответственно;

$C_{сэ}$ - поправка на самоэкранирование, относящаяся только к детекторам по реакции (n,γ). Она приводит значение активационного интеграла к условиям "тонкого" детектора. Для условий рассматриваемой задачи существенна поправка на самоэкранирование резонансов в сечении реакции (n,γ). Рекомендованные подходы расчета такой поправки даны в [2]. Самоэкранированием детекторов в области тепловых нейтронов для рекомендованных реакций активации в рамках данной задачи можно пренебречь;

$C_Г$ - поправка геометрическая, вводимая для приведения всех измеренных активационных интегралов детекторов одной сборки к условиям облучения в единой точке пространства, в которой размещался основной детектор-монитор. Она учитывает градиент плотности потока нейтронов. Для i-го детектора $C_{Гi}$ определяется с помощью отношения показаний монитора вблизи детектора M_i и основного монитора M_0:

$$C_{Гi} = \frac{M_0}{M_i}. \qquad \text{(П3-5)}$$

В качестве показаний детекторов-мониторов следует использовать скорость счета импульсов на радиометрической установке, приведенную на одно ядро. В качестве детекторов-мониторов следует выбрать один из пороговых детекторов флюенса (например, детектор Fe-54).

П3.2.3. Погрешность активационных интегралов для P, равного 0,95, следует оценивать по формуле:

$$\delta_Q = \sqrt{\theta_A^2 + \theta_N^2 + \theta_\chi^2 + \sum_k \theta_k^2}, \qquad \text{(П3-6)}$$

где θ_A - полная погрешность измерения активности детектора (берется из Сводного протокола по пункту 5.8);

θ_N - погрешность числа ядер нуклида-мишени в детекторе (берется из Сводного протокола по пункту 4.6);

θ_χ - погрешность выхода Cs-137 в осколках деления (по приложению 2, табл. П2-2);

θ_k - погрешность поправок M и C по формуле (П3-1).

П3.2.4. По результатам определения отклика детекторов флюенса составляется Сводный протокол определения активационных интегралов, в котором должны быть указаны: номера точек облучения, для которых определены значения активационных интегралов; активности детекторов, приведенные на одно ядро; реакции активации;значения активационных интегралов и их погрешности.

П3.3. Расчетно-экспериментальная оценка контролируемых характеристик поля быстрых нейтронов

П3.3.1. Контролируемыми нейтронными характеристиками по результатам нейтронно-активационных измерений в реакторах ВВЭР являются величины:

F_i - флюенсы нейтронов с энергией больше $E_{эфф.i}$ - эффективных порогов реакций активации из набора облученных детекторов;

Φ_i - скорости накопления флюенсов F_i;

Q^{M_i} – нормированные на показание монитора активационные интегралы используемых детекторов.

Дополнительными контролируемыми характеристиками могут быть аппроксимированные значения флюенса $F(E)$ и скорости накопления флюенса $\Phi(E)$, определяемые на основе непосредственно измеренных величин и расчетных методов, аттестованных в установленном порядке.

П3.3.2. Флюенс нейтронов с энергией больше $E_{эфф.i}$ можно рассчитывать по формуле:

$$F_i = \frac{Q_i}{\sigma_{эфф.i}}, \qquad (П3\text{-}7)$$

где Q_i - активационный интеграл i-й пороговой реакции активации, определяемый по формуле (П3-1);

$\sigma_{эфф.i}$ - эффективное сечение реакции для порога $E_{эфф.i}$.

При известном спектре нейтронов эффективное сечение рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{эфф.i} = \frac{\int_0 \sigma_i(E)\varphi(E)dE}{\int_{E_{эфф.i}} \varphi(E)dE}, \qquad (П3\text{-}8)$$

где $\sigma_i(E)$ - дифференциальное сечение дозиметрической реакции;

$\varphi(E)$ - дифференциальная плотность потока нейтронов (спектр нейтронов) в точках за корпусом ВВЭР.

В многогрупповом представлении расчет выглядит так:

$$\sigma_{эфф.i} = \frac{\sum_{n} \sigma_{i,n} \Phi_n}{\sum_{n=E_{эфф.i}} \Phi_n}, \qquad (П3\text{-}9)$$

где $n = E_{эфф.i}$ означает, что сумма берется по группам от первой до группы n, нижняя граница которой равна $E_{эфф.i}$.

Погрешность F_i для доверительной вероятности 0,95 можно оценить по формуле:

$$\delta_{F_i} = \sqrt{\delta_{Qi}^2 + \theta_\sigma^2}, \qquad (П3\text{-}10)$$

где δ_{Qi} - погрешность активационного интеграла i-й реакции (из Сводного протокола по пункту *П3.2.4*);

θ_σ - разброс значений $\sigma_{эфф.i}$ при энергии $E_{эфф.i}$ для i-й реакции в спектрах рассматриваемого класса (например, см. Ярына В.П., и др. Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Характеристики реакторных нейтронных полей. Методика нейтронно-активационных измерений. МИ 1393-86. ВНИИФТРИ. М.: 1986).

П3.3.3. Расчет скорости накопления флюенса быстрых нейтронов для i–го порогового детектора можно рассчитать по формуле:

$$\Phi_i = \frac{F_i}{\tau_{эфф}}, \qquad (П3\text{-}11)$$

где $\tau_{эфф}$ - эффективное время облучения, которое определяется по формуле:

$$\tau_{эфф} = \frac{\int_{T_0}^{T_k} P(t)dt}{P_{ном}}. \qquad (П3\text{-}12)$$

Погрешность Φ_i для доверительной вероятности P, равной 0,95, можно оценить по формуле:

$$\delta_{\Phi_i} = \sqrt{\delta_{F_i}^2 + \theta_\tau^2}, \qquad (П3\text{-}13)$$

где δ_{F_i} - погрешность флюенса F_i по пункту *П3.3.2*;

θ_τ - оценка погрешности $\tau_{эфф}$.

П3.3.4. Активационные интегралы, нормированные на показания детектора-монитора, являются спектральной характеристикой поля нейтронов.

Активационные интегралы Q_i, определенные по пункту *П3.2.2*, приведены с помощью поправочного коэффициента $C_{Гi}$ к условиям облучения в точке размещения основного детектора-монитора в сборке. Контролируемые характеристики $Q_i^{М}$ - активационные интегралы реакций активации, нормированные на показания детектора-монитора, следует вычислять по формуле:

$$Q_i^{М} = \frac{Q_i}{Q_М}, \qquad \text{(П3-14)}$$

где $Q_М$ - активационный интеграл порогового детектора-монитора.

Погрешности нормированных $Q_i^{М}$ равны погрешностям соответствующих Q_i (по пункту *П3.2.3*), включая $Q_М^{М}$, равный 1.

П3.3.5. Аппроксимированные значения контролируемых характеристик представляют собой флюенсы нейтронов с энергией, отличающейся от эффективных порогов используемых детекторов. Наиболее характерными для материаловедения корпусов ВВЭР являются флюенсы нейтронов с энергией больше 0,1, 0,5 и 1 МэВ соответственно $F_{0,1}$, $F_{0,5}$ и F_1. Для определения этих величин используются в качестве исходных данных активационные интегралы Q_i (по пункту *П3.2.2*) или флюенсы F_i (по пункту *П3.3.2*).

Методика нейтронного контроля на внешней поверхности корпусов водо-водяных энергетических реакторов АЭС

РБ-018-01

Ответственный за выпуск Синицына Т.В.
Верстка Зернова Э.П.
Оригинал-макет подготовлен в НТЦ ЯРБ

Подписано в печать 20.11.01
Тираж 100 экз.
Формат 60x90 1/16

Отпечатано В НТЦ ЯРБ

gost.e-ecolog.ru