РУКОВОДСТВА ПО БЕЗОПАСНОСТИ
в области использования атомной энергии



УЧЕТ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА КОРПУСАХ И ОБРАЗЦАХ-СВИДЕТЕЛЯХ ВВЭР ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО РЕСУРСА КОРПУСОВ

РБ-007-99

gost.e-ecolog.ru

ФБУ «НТЦ ЯРБ»

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

РУКОВОДСТВА ПО БЕЗОПАСНОСТИ

УТВЕРЖДЕНО
постановлением
Госатомнадзора России
от 21 апреля 1999 г.
№ 2

УЧЕТ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА КОРПУСАХ И ОБРАЗЦАХ-СВИДЕТЕЛЯХ ВВЭР ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО РЕСУРСА КОРПУСОВ

РБ–007-99

ВВЕДЕНО в действие
с 1 января 2000 г.

Москва, 1999

УЧЕТ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА КОРПУСАХ И ОБРАЗЦАХ-СВИДЕТЕЛЯХ ВВЭР ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО РЕСУРСА КОРПУСОВ (РБ-007-99)

(РБ-007-99)
Госатомнадзор России
Москва, 1999

Настоящий нормативный документ - руководство по безопасности - направлен на обеспечение реализации положений и требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии (ОПБ-88/97, ПБЯ РУ АС-89, ПНАЭ Г-7-002-86, ПНАЭ Г-7-008-89, ПНАЭ Г-01-036-95) по учету флюенса быстрых нейтронов. Руководство по безопасности содержит рекомендации, определяющие порядок и организацию учета флюенса быстрых нейтронов на КР и ОС ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса КР, а также рекомендации к учету флюенса быстрых нейтронов при проектировании и эксплуатации реактора.

Руководство по безопасности выпускается впервые.

Настоящий нормативный документ разработан в НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России при участии следующих специалистов: Бородкина Г.И., Калиберды И.В., Ковалевича О.М., Столбунова А.Ю., Фединой Л.Е., а также Просвирина А.В. (Госатомнадзор России), Цофина В.И. (ОКБ "Гидропресс"), Ярына В.П., Григорьева Е.И.(ВНИИФТРИ), Трошина В.С. (МИФИ), Мелехина Ю.А. (концерн "Росэнергоатом").

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений и основных обозначений
Термины и определения
1. Общие положения
2. Порядок и организация учета флюенса быстрых нейтронов
3. Рекомендации к прогнозированию флюенса быстрых нейтронов на КР и ОС при проектировании
4. Учет флюенса быстрых нейтронов на КР и ОС во время эксплуатации реактора
5. Рекомендации к учету флюенса быстрых нейтронов при решении вопроса о возможности продления эксплуатации КР после истечения назначенного в проекте срока эксплуатации
6. Рекомендации к учету флюенса быстрых нейтронов на КР, на котором проведен термический отжиг
Приложение 1 (рекомендуемое). Рекомендуемые наборы нейтронно-активационных детекторов для экспериментального обоснования характеристик поля нейтронов в области КР и ОС ВВЭР
Приложение 2 (рекомендуемое). Методика экспертной оценки радиационного ресурса корпусов ВВЭР

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВВЭР - водо-водяной энергетический реактор
КР - корпус реактора
ОС - образцы-свидетели
ППН - интегральная по энергии плотность потока нейтронов, н/(см^2·с)
Φ - скорость накопления флюенса нейтронов, н/(см^2·с)
dpa, dpa/c - число и скорость (с$^{-1}$) смещений на атом
E - энергия нейтронов, МэВ
F - интегральный по энергии флюенс нейтронов, н/см^2
R^i - удельная скорость реакции в i-м нейтронно-активационном детекторе, Бк/ядро
SI_E - спектральный индекс, отн.ед.
t - время, с

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ*

1. Флюенс быстрых нейтронов F **-** полное число быстрых нейтронов с энергией больше определенной выбранной энергии, которое проходит через единицу площади в течение времени облучения. Флюенс быстрых нейтронов выражен определенным интегралом по времени зависящей от времени плотности потока нейтронов с энергией больше определенной выбранной энергии.

2. Накопленный флюенс быстрых нейтронов F_i **-** фактический флюенс быстрых нейтронов, накопленный к конкретному моменту времени работы реактора.

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

4. Спектральный индекс SI_E - отношение Φ нейтронов с энергией больше E к Φ нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ.

5. Радиационный ресурс КР - прогнозируемое время работы реактора на номинальной мощности, в течение которого выполняются условия, при которых обеспечивается сопротивление хрупкому разрушению КР.

6. Коэффициент запаса - безразмерная величина, которая больше единицы и показывает, во сколько раз нужно изменить

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

значение оцененного параметра, чтобы результат перекрывал максимальные отклонения параметра, обусловленные неопределенностями в оценке параметра, соблюдая принцип консервативности величины, учитываемой в оценках критериев безопасности, и при вычислении которой используется оцененный параметр.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящее руководство по безопасности (далее - РБ) разработано с целью обеспечения реализации положений и требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии (ОПБ-88/97, ПБЯ РУ АС-89, Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86), Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-008-89), Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности АС с реакторами типа ВВЭР (ПНАЭ Г-01-036-95) по учету флюенса быстрых нейтронов. Рекомендуемые подходы уточняют, развивают и совершенствуют принятые на практике пути реализации положений и требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии для обеспечения надежного определения и контроля флюенса и других характеристик поля быстрых нейтронов на КР и ОС ВВЭР, приемлемых для использования при прогнозировании радиационного ресурса КР.

В случае если для выполнения соответствующих положений и требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии организация, осуществляющая деятельность в области использования атомной энергии, применяет иные способы и методы, чем те, которые рекомендованы в РБ, их следует обосновать, показав, что выбранные способы и методы обеспечивают выполнение требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии.

1.2. РБ определяет порядок и организацию учета флюенса быстрых нейтронов на КР и ОС ВВЭР для прогнозирования радиационного ресурса КР, а также содержит рекомендации к учету флюенса быстрых нейтронов при проектировании, эксплуатации реактора (включая эксплуатацию после термического отжига КР), в том числе к:

- порядку и организации учета флюенса быстрых нейтронов;

• прогнозированию флюенса быстрых нейтронов при проектировании;

• учету флюенса быстрых нейтронов при эксплуатации, методикам учета и их обоснованию;

• оценке значений характеристик поля быстрых нейтронов для прогнозирования радиационного ресурса КР.

1.3. Положения РБ распространяются на ВВЭР атомных электростанций, для корпусов которых проводится расчет на сопротивление хрупкому разрушению с учетом сдвига критической температуры хрупкости вследствие влияния облучения (в соответствии с разделом 5.8 ПНАЭ Г-7-002-86 и разделом 8 приложения 2 ПНАЭ Г-7-002-86), а также на ВВЭР атомных электростанций, на которых осуществляется программа контроля за состоянием металла КР при эксплуатации путем испытаний ОС, устанавливаемых в реактор (в соответствии с разделом 7 ПНАЭ Г-7-008-89).

1.4. РБ предназначено для специалистов Госатомнадзора России, а также эксплуатирующих организаций и организаций, выполняющих работы и предоставляющих услуги эксплуатирующим организациям.

2. ПОРЯДОК И ОРГАНИЗАЦИЯ УЧЕТА ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

2.1. Порядок учета флюенса быстрых нейтронов на КР и ОС ВВЭР включает определение характеристик поля нейтронов, их контроль во времени, представление с указанием погрешности, документирование.

2.2. Установленные при этом учете значения характеристик поля нейтронов используются для прогнозирования флюенса быстрых нейтронов на КР на весь срок службы и для прогнозирования радиационного ресурса КР.

2.3. Учет флюенса быстрых нейтронов организуется при проектировании (проводится определение проектных значений характеристик поля нейтронов) и эксплуатации реактора.

2.4. Характеристики поля нейтронов, важные с точки зрения учета флюенса быстрых нейтронов: флюенс нейтронов F с энергией больше 0,5 МэВ, скорость накопления флюенса нейтронов Φ с энергией больше 0,5 МэВ, спектр нейтронов, спектральный индекс SI_E . Функционально связанные с характеристиками поля нейтронов параметры, важные с точки зрения учета флюенса быстрых нейтронов: *dpa*, *dpa/c*, R' .

2.5. Учет флюенса быстрых нейтронов проводится в характерных точках КР и ОС ВВЭР, которые должны включать:

- точки по толщине стенки КР, начиная от точки внутренней поверхности, в которых достигается максимум флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ;
- точки в соответствии с п.5.8.7.2 ПНАЭ Г-7-002-86 для расчетного сечения КР;
- точки внешней поверхности КР, в которых достигается максимум флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ;
- центр середины отдельного ОС стали КР (для ОС с надрезом - центр плоскости распространения трещины) и точки в отдельном исследованном ОС, в которых проводилось изучение свойств стали (точки излома, микроструктурного анализа и т.п.).

2.6. Прогнозирование радиационного ресурса КР с использованием установленных в результате учета значений характеристик поля нейтронов проводится для критической точки КР, являющейся одной из точек расчетного сечения КР, в которой достигаются предельные условия обеспечения сопротивления хрупкому разрушению, приведенные в разделе 5.8 ПНАЭ Г-7-002-86, исходя из анализа всех возможных режимов.

2.7. Организацию учета флюенса быстрых нейтронов осуществляют эксплуатирующие организации.

2.8. Проектные значения характеристик поля нейтронов на КР и ОС приводятся в проекте ВВЭР и проектных документах по КР, содержащих обоснование сопротивления хрупкому разрушению КР. Результаты учета флюенса быстрых нейтронов на КР во время эксплуатации вносятся в документацию, содержащую обоснование эксплуатации реактора в очередную кампанию. Результаты учета флюенса быстрых нейтронов на ОС во время эксплуатации вносятся в отчетную документацию в соответствии с п.7.8 ПНАЭ Г-7-008-89.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА КР И ОС ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

3.1. При проектировании ВВЭР осуществляется прогнозирование значений флюенса и скорости накопления флюенса быстрых нейтронов на КР и ОС.

3.2. Следует:

- приводить расчетные значения скорости накопления флюенса, флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ,

накапливаемого за расчетный проектный срок службы КР в точке максимума распределения по КР флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ для проектных режимов эксплуатации, а также оценивать погрешность этих значений скорости накопления флюенса и флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ;

- определять и обосновывать значения и погрешности значений характеристик поля нейтронов в характерных точках КР и ОС, таких как F, Φ нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ, спектр нейтронов (возможно рассматривать многогрупповой спектр для выбранных точек КР (внутренняя, внешняя поверхность, 1/4 толщины) и ОС (центр середины), спектральные индексы SI_E для энергий нейтронов 0,1; 1; 3; 6 МэВ, а также значение скорости накопления флюенса тепловых нейтронов.

3.3. Рекомендуется приводить информацию об обосновании флюенса быстрых нейтронов на КР и ОС, а также:

- описание расчетной методики получения трехмерных характеристик поля нейтронов на КР и ОС;
- обоснование использования указанной расчетной методики;
- пространственные распределения скорости накопления флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ и тепловых нейтронов (на внутренней, внешней поверхности КР, по толщине КР, по высоте и толщине отдельных ОС);
- значения *dpa*, *dpa/c*, R^I для выбранных точек КР и ОС (где имеется обоснованная информация о спектре нейтронов), оценку их погрешности и методы их получения. Рекомендуемые наборы нейтронно-активационных детекторов для экспериментального обоснования характеристик поля нейтронов в области КР и ОС ВВЭР приведены в приложении 1.

3.4. Для обоснования расчетных методик, значений и погрешности значений характеристик поля нейтронов на КР и ОС должно быть проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных в базовых экспериментах (экспериментах с использованием максимально возможных по типу, составу и номенклатуре детекторов и с подтверждением надежности полученных результатов). Рекомендуется проводить обоснование:

- спектральных индексов и пространственных коэффициентов (отношение значений ППН с энергией больше определенной выбранной энергии, например, 0,5 МэВ, в двух разных характерных пространственных точках) экспериментами на

макетах корпусов ВВЭР на исследовательских реакторах или установках;

- абсолютных значений характеристик поля нейтронов (или R' для характерных реакций) экспериментами на действующих ВВЭР (возможно других модификаций) в околокорпусном пространстве (например, в воздушном зазоре за КР и на ОС).

4. УЧЕТ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА КР И ОС ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА

4.1. Учет флюенса быстрых нейтронов в характерных точках каждого КР и ОС во время эксплуатации реактора должен проводиться по методикам, разработанным эксплуатирующей организацией и разрешенным для применения. При этом следует учитывать, что:

4.1.1. Методика учета флюенса быстрых нейтронов на КР должна предусматривать возможность определения с обоснованной оценкой погрешности накопленного флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ, характеристик поля нейтронов в характерных точках КР по каждой кампании в отдельности. Допускается определять усредненные за кампанию и приведенные к номинальной мощности значения характеристик, но с учетом всех изменений в работе реактора за кампанию.

4.1.2. Методика учета флюенса быстрых нейтронов на ОС должна предусматривать определение с обоснованной оценкой погрешности флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ, характеристик поля нейтронов в характерных точках ОС, усредненных за время облучения контейнера с ОС в реакторе и приведенных к номинальной мощности, а также оценку распределения флюенса быстрых нейтронов по высоте размещения ОС.

4.1.3. Методики должны быть экспериментально обоснованы. Рекомендуется проводить обоснование:

- разовыми базовыми экспериментами (с использованием широкого набора нейтронно-активационных и других детекторов) вблизи КР и в контейнере с ОС для головных блоков;
- контрольными регулярными экспериментами (возможно с использованием ограниченного набора характерных нейтронно-активационных детекторов в качестве мониторов) вблизи КР каждого блока;

- измерениями активности детекторов сопровождения, устанавливаемых вместе с ОС, и измерениями активности материала ОС.

Выбор способа постановки экспериментов, их состава, периодичности проведения принимается на основании обоснованного соответствующими исследованиями технического решения. Эксперименты проводятся с учетом п.9.1.16 ПНАЭ Г-7-008-89. Методики выполнения измерений должны удовлетворять ГОСТ Р 8.563-96.

Для базовых и контрольных экспериментов вблизи КР ВВЭР рекомендуется использовать пространство воздушного зазора за КР. Рекомендуемый набор нейтронно-активационных детекторов представлен в приложении 1[1].

4.2. Рекомендуется проводить прогнозирование флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ в критической точке на проектный срок службы КР после завершения каждой кампании. При этом рекомендуется руководствоваться следующим:

4.2.1. Если режим эксплуатации в последующие кампании будет соответствовать режиму в предыдущие кампании, прогнозируемый на проектный срок службы, выраженный моментом эффективного времени t_τ , флюенс F_τ (здесь и далее, если особо не оговорено, используются F и Φ нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ) может определяться по формуле:

$$F_\tau = F_t + \Phi_{max}\left(t_\tau - t_t\right), \qquad (1)$$

где:

F_t - накопленный флюенс быстрых нейтронов на конец последней завершенной кампании;

Φ_{max} - максимальная из предыдущих кампаний скорость накопления флюенса быстрых нейтронов за кампанию;

t_t - эффективное время работы реактора на момент определения накопленного флюенса быстрых нейтронов.

4.2.2. С целью обеспечения консервативности при обосновании проектного срока службы КР необходимо при прогнозировании флюенса быстрых нейтронов использовать значения характеристик поля нейтронов с учетом их погрешности. Рекомендуется использовать в качестве верхней границы следующие значения:

$$F_t^* = F_t + \delta F_t \quad ; \qquad (2)$$

[1] При использовании нейтронно-активационных детекторов для экспериментального обоснования расчетов рекомендуется проводить сравнение расчетных и измеренных удельных активностей продуктов реакций, приведенных на конец облучения детекторов.

$$\Phi^*_{max} = \Phi_{max} + \delta\Phi_{max} \quad ,$$

где:

δF_t , $\delta\Phi_{max}$ - оцененные погрешности соответствующих величин для уровня доверительной вероятности 0,95.

4.2.3. Установленные после завершения кампании и прогнозируемые значения флюенса быстрых нейтронов в критической точке следует сравнивать с предельным допустимым значением и использовать для последующего прогнозирования радиационного ресурса КР. Допустимо проводить экспертную оценку радиационного ресурса КР в соответствии с методикой, приведенной в приложении 2.

4.3. Должно быть проведено сравнение проектных данных о характеристиках поля нейтронов на КР и ОС и результатов определения тех же величин, полученных во время эксплуатации ВВЭР и обоснованных базовыми экспериментами. В зависимости от результатов сравнения допускается уточнение проектных данных. Могут быть внесены необходимые коррективы в соответствующие документы согласно процедуре, определенной в п.9.2.2 ПНАЭ Г-7-008-89.

При внедрении режимов загрузки топлива, отличных от проектных, или конструктивных изменений, влияющих на перенос быстрых нейтронов до КР, необходимо выполнить расчет характеристик поля быстрых нейтронов на КР. При обосновании расчетных значений характеристик поля быстрых нейтронов на КР следует рассматривать необходимость их экспериментального обоснования при первой опытной эксплуатации такого ВВЭР. Результаты этого расчета и обоснования должны быть включены в комплект документации, представляемой на согласование в установленном порядке с целью внедрения нового режима загрузки топлива или внесения конструктивных изменений.

4.4. Если при учете флюенса быстрых нейтронов в силу каких-либо причин (например, при отсутствии информации о предыдущей работе реактора) затруднено использование в полной мере методик учета флюенса быстрых нейтронов на КР и ОС, то при определении и прогнозировании характеристик поля нейтронов следует использовать консервативные коэффициенты запаса для этих величин на неопределенности, обусловленные спецификой работы реактора. Обоснованность используемых коэффициентов запаса должна быть подтверждена.

5. РЕКОМЕНДАЦИИ К УЧЕТУ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ПРИ РЕШЕНИИ ВОПРОСА О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОДЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ КР ПОСЛЕ ИСТЕЧЕНИЯ НАЗНАЧЕННОГО В ПРОЕКТЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

5.1. При решении вопроса о возможности продления эксплуатации КР ВВЭР после истечения назначенного в проекте срока эксплуатации необходимо уточнить значения характеристик поля нейтронов в характерных точках КР с использованием последних рекомендаций в области нейтронной дозиметрии КР.

5.2. Необходимо прогнозировать флюенс нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ на КР, соответствующий моменту окончания продлеваемого срока эксплуатации, по аналогии с рекомендациями п.4.2 РБ. При определении флюенса быстрых нейтронов следует пользоваться формулой (1), где вместо t_τ нужно использовать $t_\tau + t^*$, где t^* - продлеваемый срок эксплуатации.

5.3. В процессе каждой продлеваемой кампании необходимо вести учет флюенса быстрых нейтронов на КР за кампанию, при этом флюенс быстрых нейтронов должен быть экспериментально обоснован. Рекомендуется проводить эксперимент с установкой нейтронно-активационных детекторов в зазоре у внешней поверхности КР.

5.4. Рекомендуется для подтверждения достоверности значений накопленного флюенса быстрых нейтронов на корпусе провести анализ активности соскобов с внутренней поверхности КР для оценки флюенса быстрых нейтронов по реакции ^{93}Nb(n,n').

6. РЕКОМЕНДАЦИИ К УЧЕТУ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА КР, НА КОТОРОМ ПРОВЕДЕН ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ

6.1. При учете флюенса быстрых нейтронов на КР ВВЭР, на которых проведен термический отжиг, необходимо вести подсчет накопления флюенса быстрых нейтронов как от начала эксплуатации, так и от кампании, перед которой проведен термический отжиг.

6.2. С последующей после отжига кампании необходимо проводить учет флюенса быстрых нейтронов на КР с экспериментальным обоснованием флюенса быстрых нейтронов, накопленного за реализованные после отжига кампании.

6.3. Необходимо прогнозировать накопление флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ в критической точке КР в каждую планируемую после отжига кампанию, и после каждой кампании, начиная с момента отжига, прогнозировать флюенс быстрых нейтронов на момент окончания последней до исчерпания радиационного ресурса КР кампании. При этом необходимо определять и обосновывать скорость накопления флюенса нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ и коэффициент запаса для нее в критической точке в каждую планируемую кампанию.

Приложение 1 (рекомендуемое) к РБ "Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов"

Рекомендуемые наборы нейтронно-активационных детекторов для экспериментального обоснования характеристик поля нейтронов в области КР и ОС ВВЭР

Детектор, реакция	Период полураспада, сут [1]	Эффективная энергия, МэВ [2]	Базовые измерения в зазоре за КР	Контрольные измерения в зазоре за КР	Измерения на ОС	Методика анализа соскобов с КР
$^{237}Np(n,f)^{137}Cs$	11020	0,55	+	+	+	–
$^{93}Nb(n,n')^{93m}Nb$	5890	1,0	+	+	+	+
$^{238}U(n,f)^{137}Cs$	11020	1,5	+	–	+	–
$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	70,86	2,5	+	–	–	–
$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	312,3	3,0	+	+	+	+
$^{46}Ti(n,p)^{46}Sc$	83,79	4,5	+	–	–	–
$^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$	1925,5	7,0	+	+	+	–
$^{55}Mn(n,2n)^{54}Mn$	312,3	11,6	+	–	–	–
$^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$	1925,5	Реакция на тепловых нейтронах	+	+	+	+

1. X-ray and gamma-ray standards for detector calibration, IAEA-TECDOC-619. IAEA, VIENNA, 1991.
2. Ярына В.П., Григорьев Е.И., Тарновский Г.Б. Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Характеристики реакторных нейтронных полей. Методика нейтронно-активационных измерений. МИ 1393-86. ВНИИФТРИ. Москва, 1986.

Приложение 2 (рекомендуемое) к РБ "Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов"

МЕТОДИКА ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОГО РЕСУРСА КОРПУСОВ ВВЭР

1. Общие положения

Методика предназначена для экспертного анализа документов, обосновывающих сопротивление хрупкому разрушению и радиационный ресурс КР ВВЭР как на стадии проектирования, так и во время эксплуатации. Она может использоваться в качестве факультативной при подготовке соответствующих документов в эксплуатирующих организациях и организациях, выполняющих работы и предоставляющих услуги эксплуатирующим организациям.

Методика позволяет получать экспертную оценку радиационного ресурса КР после каждой завершенной кампании при известных априори свойствах стали, прочностных характеристиках и принятых расчетных аварийных режимах, если получены оценки накопленного флюенса быстрых нейтронов с учетом всех предыдущих кампаний.

Методика применима к КР ВВЭР, на которых не проводился термический отжиг.

В методике использованы критерии и зависимости, принятые в [1].

2. Оценка радиационного ресурса

2.1. Радиационный ресурс КР и флюенс быстрых нейтронов

Остаточный радиационный ресурс корпуса ВВЭР определяется из соотношения:

$$[F] - F_t - \sum_{n=1}^{N} \Phi_n t_n = 0 \quad , \qquad (П1)$$

где:

$[F]$ - предельный допускаемый флюенс нейтронов в критической точке корпуса (здесь и далее, если особо не оговорено, используются F и Φ нейтронов с энергией больше 0,5 МэВ);

F_t - накопленный флюенс нейтронов на момент проведения экспертной оценки в той же точке;

N - количество кампаний работы реактора в оставшееся до исчерпания радиационного ресурса время от момента проведения экспертной оценки;

Φ_n - предполагаемая скорость накопления флюенса нейтронов в той же точке за кампанию n;

t_n - предполагаемое эффективное время работы реактора во время кампании n.

Тогда остаточный радиационный ресурс КР будет равен:

$$\tau = \sum_{n=1}^{N} t_n \ . \qquad \text{(П2)}$$

Если скорость накопления флюенса быстрых нейтронов в оставшиеся кампании принимается одинаковой (например, из соображений консервативности скорость принимается максимальной из выборки значений по всем возможным в будущем кампаниям), то радиационный ресурс КР будет определяться так:

$$\tau = \frac{[F] - F_t}{\Phi_{max}} , \qquad \text{(П3)}$$

где:

Φ_{max} - принятая максимальная скорость накопления флюенса нейтронов из всех возможных кампаний.

Учитывая, что F_t до начала эксплуатации реактора равен нулю, проектный радиационный ресурс КР будет определяться так:

$$\tau = \frac{[F]}{\Phi_{max}} . \qquad \text{(П4)}$$

Поскольку все значения характеристик поля нейтронов могут быть определены только с некоторой погрешностью, при прогнозировании флюенса быстрых нейтронов необходимо вводить консервативные коэффициенты запаса по каждой составляющей в формуле (П3), чтобы уверенно прогнозировать радиационный ресурс КР:

$$[F] = \frac{1}{k_{[F]}}[F]^* \ ;$$

$$F_t = k_F F_t^* \ ;$$

(П5)

$$\Phi_{max} = k_\Phi \Phi_{max}^* \ ,$$

где:

$k_{[F]}$, k_F, k_Φ - консервативные коэффициенты запаса (по величине равны или больше единицы) по предельному допускаемому флюенсу, накопленному флюенсу и скорости накопления флюенса быстрых нейтронов;

$[F]^*$, F_t^*, Φ_{max}^* - оцененные значения предельного допускаемого флюенса, накопленного флюенса и скорости накопления флюенса быстрых нейтронов.

2.2. Определение предельного допускаемого флюенса нейтронов

В соответствии с зависимостями из [1] и принимая во внимание подходы из [2, 3], предельный допускаемый флюенс быстрых нейтронов в экспертных оценках можно оценить по формуле:

$$[F] = \left(\frac{T_k^a - T_{k0}}{A_F} \right)^3 F_0 , \qquad (П6)$$

где:

T_k^a - предельная допускаемая критическая температура хрупкости в критической точке;

T_{k0} - критическая температура хрупкости в исходном (до облучения) состоянии;

A_F - коэффициент радиационного охрупчивания, °С;

F_0 - константа, равная 10^{18} н/см^2.

За значение T_k^a принимается минимальное, исходя из полученных в анализе всех теплогидравлических режимов, напряженно-деформированного состояния металла в зоне постулированного расчетного дефекта [3] (значение известно из документов, обосновывающих проектный срок службы КР). Значения T_{k0} и A_F принимаются в соответствии с п.5.8.4.2 [1]. При этом допускается, что нормативные значения T_k^a, T_{k0}, A_F определены с достаточной степенью консервативности. В этом случае можно принять, что $k_{[F]}$ равен единице.

Следует отметить, что в соответствии с методикой раздела 8 приложения 2 [1] по испытаниям ОС проводится определение коэффициента радиационного охрупчивания материала ОС A_F^{SS} с учетом сдвига критической температуры хрупкости вследствие влияния облучения ΔT_F^{SS} и флюенса быстрых нейтронов на ОС F^{SS} согласно формуле:

$$A_F^{SS} = \Delta T_F^{SS}\left(F^{SS}/F_0\right)^n, \qquad (П7)$$

где:

n - показатель степени, принимаемый в соответствии с [1].

В этом случае значение F^{SS}, имеющее некоторую погрешность, должно использоваться с коэффициентом запаса, чтобы обеспечить достаточную консервативность значения A_F^{SS}, которое используется для сравнения с нормативным значением A_F, приведенным в аттестационном отчете согласно п.5.8.4.2 [1]. Рекомендуемое значение коэффициента запаса для F^{SS} - 1,3.

2.3. Определение накопленного флюенса быстрых нейтронов

Накопленный флюенс быстрых нейтронов в критической точке КР определяется в результате учета флюенса быстрых нейтронов при эксплуатации реактора (в соответствии с п.4 РБ). При этом должны быть определены накопленные флюенсы быстрых нейтронов по каждой кампании в отдельности и зафиксированы как последовательный набор значений

$\{F_i\}_{i=1....m}$,

где: m - количество реализованных кампаний до момента оценки накопленного флюенса быстрых нейтронов.

2.4. Определение скорости накопления флюенса быстрых нейтронов

Прогнозирование скорости накопления флюенса быстрых нейтронов в оставшееся время эксплуатации проводится из анализа планируемых загрузок активных зон реактора. При этом могут быть использованы результаты расчета характеристик поля нейтронов, соответствующего этим загрузкам.

Если режим эксплуатации будет соответствовать режиму, использованному в предыдущих загрузках, в качестве максимальной скорости накопления флюенса быстрых нейтронов можно применять максимальное значение из выборки

$$\left\{F_i/t_i\right\}_{i=1....m},$$

где: t_i - эффективное время работы реактора в кампанию i.

2.5. Определение коэффициентов запаса

Значения коэффициентов запаса k_F и k_Φ в выражениях (П5) можно оценивать из анализа расчетно-экспериментальных результатов определения флюенса быстрых нейтронов, полученных на конкретном реакторе. Исследования на действующих ВВЭР, например, [4-7], показывают, что расчетные и экспериментальные данные о характеристиках поля нейтронов в области КР (флюенс и скорость накопления флюенса быстрых нейтронов) могут расходиться на 10 - 20 %. При этом погрешность экспериментальных данных находится в районе 10 %. Таким образом, общая неопределенность значений характеристик поля быстрых нейтронов в критических точках может составить 30 %. Поэтому для экспертных оценок рекомендуется использовать значения этих коэффициентов запаса не ниже 1,3. Более низкие значения должны быть обоснованы и пройти экспериментальную валидацию.

3. Список использованной литературы

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86)/ГАЭН СССР. М.: Энергоатомиздат, 1989.

2. *Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов.* Алексеенко Н.Н., Амаев А.Д. и др. М.:Энергоатомиздат, 1981.

3. *Проблема обеспечения радиационного ресурса корпусов ВВЭР.* Абагян А.А. и др. Сб.: Атомные электрические станции, вып.10. М.: Энергоатомиздат, 1988.

4. Бородин А.В., Бродкин Э.Б., Хрусталев А.В. и др. *Расчетно-экспериментальные исследования поля нейтронов в околокорпусном пространстве реакторов ВВЭР.* ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1985, вып.4.

5. Spinney K.B. et al. *Benchmarking of YAEC Pressure Vessel Fluence Methodology on Maine Yankee,* Proc. of the 9th Intern. Symp. on Reactor Dosimetry, 2 - 6 Sep. 1996, Prague, Czech Republic, Hamid Ait Abderrahim et al. Eds., World Scientific, 1998.

6. Barz H.-U., Boehmer B., Borodkin G.I. et al. *Determination of Pressure Vessel Fluence Spectra for a Low Leakage Rovno-3 Reactor Core Using Three Dimensional Monte Carlo Neutron Transport Calculations and Ex-vessel Neutron Activation Data.* In [6].

7. Brodkin E.B., Borodkin G.I., Egorov A.L., Zaritsky S.M. *The Neutron Fluence Monitoring System for VVER-1000 Pressure Vessel and Its Validation.* Proc. of Radiation Protection and Shielding Division Topical Meeting, April 21-25, 1996, Sea Crest Resort, MA, 1996.

Нормативный документ

Руководство по безопасности

Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов РБ–007-99

Официальное издание

Ответственный за выпуск Синицына Т.В.
Верстка выполнена в ФБУ «НТЦ ЯРБ» в полном соответствии с приложением к приказу Федеральной службы по атомному надзору от 21 апреля 1999 г. № 2

Подписано в печать 30.04.1999.

Тираж 100 экз.
Отпечатано в НТЦ ЯРБ.
Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5
Телефон редакции: 8-499-264-28-53

gost.e-ecolog.ru