

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 марта 2022 г. № 79.

Руководство по безопасности при использовании атомной энергии

Учет флюенса быстрых нейтронов на
корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для
последующего прогнозирования
радиационного ресурса корпусов.

РБ-007-22

Введено в действие с 15 марта 2022 г.

© Москва, 2022

Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов. РБ-007-22

Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов» (РБ-007-22) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в целях содействия соблюдению требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций» (НП-084-15), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 7 декабря 2015 г. № 502 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 10 марта 2016 г., регистрационный № 41366), и федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» (НП-089-15), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 521 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 9 февраля 2016 г., регистрационный № 41010) (с изменениями, внесенными приказами Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 января 2017 г. № 11 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 22 марта 2017 г., регистрационный № 46096) и от 19 ноября 2019 г. № 442 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 25 декабря 2019 г., регистрационный № 56980).

Руководство по безопасности РБ-007-22 содержит рекомендации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору по проведению учета флюенса нейтронов с энергией большей или равной 0,5 МэВ (далее — флюенс быстрых нейтронов) на корпусах и образцах-свидетелях реакторов типа ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов.

Действие руководства по безопасности РБ-007-22 распространяется на корпуса и образцы-свидетели реакторов типа ВВЭР, для которых необходимо проводить учет флюенса быстрых нейтронов для последующего прогнозирования радиационного ресурса. РБ-007-22 разработано с учетом отечественного и международного опыта регулирования безопасности и практических работ, связанных с учетом и прогнозом флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов типа ВВЭР. При разработке руководства по безопасности были учтены положения существующих документов, государственных и национальных стандартов в данной области, а также современный уровень развития науки и техники.

Выпускается взамен руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов» (РБ-007-99), утвержденного постановлением Федерального надзора России по ядерной и радиационной безопасности от 21 апреля 1999 г. № 2.

Разработано коллективом авторов в составе: Хренников Н. Н., Бородкин П. Г., Столбунов А. Ю. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), Белов В. И. (5 Управление Ростехнадзора). При разработке учтены замечания и предложения: Ростехнадзора, АО «Концерн Росэнергоатом», НИЦ «Курчатовский институт», ОКБ «Гидропресс».

Оглавление

I. Общие положения	4
II. Организация проведения учета флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР	5
III. Рекомендации к прогнозированию флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях при проектировании	7
IV. Рекомендации по учету флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях во время эксплуатации реактора	9
V. Рекомендации по учету флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов в период дополнительного срока эксплуатации	14
VI. Рекомендации по учету флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов после реализации термического отжига корпуса реактора	15
Приложение № 1	16
Рекомендуемые наборы нейтронно-активационных детекторов для экспериментального обоснования характеристик поля нейтронов в области корпуса реактора и образцов-свидетелей реакторов типа ВВЭР	16
Приложение № 2	17
Рекомендуемая методика экспертной оценки радиационного ресурса корпусов реакторов типа ВВЭР	17
1. Общие положения	17
2. Оценка радиационного ресурса корпуса реактора	17

I. Общие положения

1. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов» (РБ-007-22) (далее — Руководство по безопасности) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в целях содействия соблюдению требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций» (НП-084-15), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 7 декабря 2015 г. № 502 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 10 марта 2016 г., регистрационный № 41366) (далее — НП-084-15), и федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» (НП-089-15), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 521 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 9 февраля 2016 г., регистрационный № 41010) (с изменениями, внесенными приказами Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 января 2017 г. № 11 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 22 марта 2017 г., регистрационный № 46096) и от 19 ноября 2019 г. № 442 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 25 декабря 2019 г., регистрационный № 56980) (далее – НП-089-15).
2. Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору по проведению учета флюенса нейтронов с энергией большей или равной 0,5 МэВ (далее — флюенс быстрых нейтронов) на корпусах и образцах-свидетелях реакторов типа ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов.
3. Действие настоящего Руководства по безопасности распространяется на корпуса и образцы-свидетели реакторов типа ВВЭР, для которых необходимо проводить учет флюенса быстрых нейтронов для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов в соответствии с требованиями НП-084-15 и НП-089-15.
4. Положения настоящего Руководства по безопасности рекомендуется учитывать при формировании требований эксплуатирующей организации к учету и прогнозу флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов при эксплуатации атомных станций.

II. Организация проведения учета флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР

5. Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях реакторов типа ВВЭР рекомендуется проводить с целью учета и контроля остаточного ресурса корпусов реакторов.

6. Рекомендуется организовывать прогнозирование флюенса быстрых нейтронов при проектировании (рекомендуется проводить определение проектных значений характеристик поля нейтронов и прогнозирование значений флюенса и скорости накопления флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях) и учет флюенса быстрых нейтронов при эксплуатации реактора.

7. Эксплуатирующей организации рекомендуется осуществлять выполнение работ (в части организационно-технических вопросов) по учету флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях действующих энергоблоков атомных станций.

8. При организации учета флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях реакторов типа ВВЭР рекомендуется предусматривать следующий порядок:

- определение характеристик поля нейтронов в характерных точках корпуса реактора и образца-свидетеля;
- контроль изменения характеристик поля нейтронов в процессе эксплуатации;
- экспериментальные проверки характеристик поля нейтронов;
- прогноз значений флюенса быстрых нейтронов (с учетом консервативного подхода), соответствующих концу проектного срока службы корпуса реактора (концу проектного срока службы энергоблока атомной станции), и их сравнение с проектными и/или предельно допустимыми значениями;
- прогноз значений флюенса быстрых нейтронов на образцах-свидетелях к моменту запланированной выгрузки образцов-свидетелей из реактора и сравнение со значениями флюенса быстрых нейтронов, установленными в программе контроля радиационного охрупчивания;
- представление характеристик поля нейтронов с указанием погрешности и документирование.

9. Установленные при этом учете значения характеристик поля нейтронов рекомендуется использовать для прогнозирования флюенса быстрых нейтронов на корпусе реактора на весь срок службы и для прогнозирования радиационного ресурса корпуса реактора.

10. Для учета флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях рекомендуется использовать следующие характеристики поля нейтронов, важные с точки зрения учета флюенса быстрых нейтронов:

- флюенс нейтронов (далее — F) с энергией большей или равной 0,5 МэВ;
- скорость накопления флюенса нейтронов (средняя (за время накопления флюенса быстрых нейтронов) плотность потока нейтронов с энергией большей или равной 0,5

МэВ, приведенная к номинальному уровню тепловой мощности реактора) (далее — Ф).

Функционально связанные с характеристиками поля нейтронов параметры, которые могут быть использованы для подтверждения консервативности оценок флюенса быстрых нейтронов:

- спектр нейтронов;
- спектральный индекс (далее — SI_E);
- число смещения на атом (далее — dpa);
- скорость смещений на атом в единицу времени (далее — dpa/c);
- удельная скорость реакции в i -м нейтронно-активационном детекторе (далее — R^i).

11. Рекомендуется учет флюенса быстрых нейтронов проводить в следующих характерных точках корпуса реактора и образца-свидетеля:

- точки по толщине стенки корпуса реактора, начиная от точки внутренней поверхности, в которых достигается максимум флюенса быстрых нейтронов;
- точки исходя из наихудших условий по критерию хрупкого разрушения для расчетного сечения корпуса реактора;
- точки внешней поверхности корпуса реактора, в которых достигается максимум флюенса быстрых нейтронов;
- центр середины отдельного образца-свидетеля материала корпуса реактора (для образца-свидетеля с надрезом — центр плоскости распространения трещины) и точки в отдельном исследованном образце, в которых проводится изучение свойств материала (в планируемой области разрушения образцов при исследовании).

12. Прогнозирование радиационного ресурса корпуса реактора с использованием установленных в результате учета значений характеристик поля нейтронов рекомендуется проводить для критической точки корпуса реактора, являющейся одной из точек расчетного сечения корпуса реактора, в которой достигаются предельные условия обеспечения сопротивления хрупкому разрушению.

13. Проектные значения характеристик поля нейтронов на корпусе реактора рекомендуется приводить в проектных документах по корпусу реактора, содержащих обоснование сопротивления хрупкому разрушению корпуса реактора. Проектные (целевые) значения характеристик поля нейтронов на образцах-свидетелях рекомендуется приводить в программах контроля изменения свойств металла корпуса реактора. Результаты учета флюенса быстрых нейтронов на корпусе реактора во время эксплуатации рекомендуется вносить в документацию, содержащую обоснование эксплуатации реактора в очередную кампанию, а также использовать при корректировке паспорта реакторной установки. Результаты учета флюенса быстрых нейтронов на образцах-свидетелях во время эксплуатации рекомендуется вносить в отчетную документацию по испытаниям образцов-свидетелей.

III. Рекомендации к прогнозированию флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях при проектировании

14. При проектировании реакторов типа ВВЭР рекомендуется предусматривать прогнозирование значений флюенса и скорости накопления флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях.

15. Рекомендуется при прогнозировании флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях приводить расчетные значения скорости накопления флюенса, флюенса быстрых нейтронов, накапливаемого за расчетный проектный срок службы корпуса реактора в точке максимума распределения по корпусу реактора флюенса быстрых нейтронов для проектных режимов эксплуатации, а также оценивать погрешность этих значений скорости накопления флюенса и флюенса быстрых нейтронов.

16. Рекомендуется при прогнозировании флюенса быстрых нейтронов определять и обосновывать значения и погрешности значений характеристик поля нейтронов в характерных точках корпуса реактора и образца-свидетеля, таких как F , Φ нейтронов с энергией большей или равной 0,5 МэВ.

17. Рекомендуется в отчете по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР и/или в материалах, на основе которых он разработан, приводить информацию об обосновании проектных значений флюенса быстрых нейтронов на корпусе реактора и образце-свидетеле, а также:

- описание расчетной методики получения трехмерных характеристик поля нейтронов;
- обоснование использования указанной расчетной методики;
- пространственные распределения скорости накопления флюенса быстрых нейтронов (на внутренней, внешней поверхностях, по толщине корпуса реактора, по высоте и толщине отдельного образца-свидетеля), значения dpa , dpa/c , R^i для выбранных точек корпуса реактора и образца-свидетеля (где имеется обоснованная информация о спектре нейтронов), оценку их погрешности и методы их получения. Рекомендуется при использовании результатов нейтронно-активационных измерений проводить оценку вклада энергетического спектра быстрых нейтронов в используемые реакции с целью их применения для подтверждения консервативности оценки флюенса быстрых нейтронов.

18. Для обоснования расчетных методик, значений и погрешности значений характеристик поля нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях рекомендуется проводить сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных в контрольных и базовых измерениях. Рекомендуется проводить обоснование:

- спектральных индексов и пространственных коэффициентов (отношение значений плотности потока нейтронов с энергией больше определенной выбранной энергии, например, 0,5 МэВ, в двух разных характерных пространственных точках) экспериментально на макетах корпусов реакторов типа ВВЭР на исследовательских реакторах или установках;

- абсолютных значений характеристик поля нейтронов (или R^i для характерных реакций) экспериментами на действующих реакторах типа ВВЭР в околорпусном пространстве (например, в воздушном зазоре за корпусом реактора).

IV. Рекомендации по учету флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях во время эксплуатации реактора

19. Учет флюенса быстрых нейтронов в характерных точках каждого корпуса реактора и образца-свидетеля во время эксплуатации реактора рекомендуется проводить по методикам с использованием аттестованных программ для электронно-вычислительных машин. Эксплуатирующей организации рекомендуется организовывать разработку методик учета флюенса быстрых нейтронов.

20. Рекомендуется использовать методику учета флюенса быстрых нейтронов на корпусе реактора, которая предусматривает возможность определения с обоснованной оценкой погрешности накопленного флюенса быстрых нейтронов, характеристик поля нейтронов в характерных точках корпуса реактора по каждой кампании в отдельности. Допускается определять усредненные за кампанию значения характеристик, но с учетом изменений в работе реактора за кампанию.

21. Рекомендуется использовать методику учета флюенса быстрых нейтронов на образцах-свидетелях, которая предусматривает определение с обоснованной оценкой погрешности флюенса быстрых нейтронов, характеристик поля нейтронов в характерных точках образца-свидетеля, усредненных за время облучения контейнера с образцами-свидетелями в реакторе.

22. Рекомендуется использовать методики учета флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях, которые экспериментально обоснованы. При обосновании методики учета флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях рекомендуется использовать следующие экспериментальные результаты:

- базовые эксперименты (с использованием широкого набора нейтронно-активационных и других детекторов) вблизи корпуса реактора и в контейнере с образцами-свидетелями;
- контрольные эксперименты (возможно с использованием ограниченного набора характерных нейтронно-активационных детекторов в качестве мониторов) вблизи корпуса реактора каждого блока атомной станции;
- измерения активности детекторов сопровождения, устанавливаемых вместе с образцами-свидетелями, и измерения активности материала образца-свидетеля;
- измерения активности проб антикоррозионной наплавки корпуса реактора и/или проб металла корпуса реактора.

23. Выбор способа постановки экспериментов, их состава, периодичности проведения рекомендуется принимать на основании требований нормативных документов и с учетом программ контроля, разработанных эксплуатирующей организацией.

24. Для базовых и контрольных экспериментов вблизи корпусов реакторов типа ВВЭР рекомендуется использовать пространство воздушного зазора за корпусом реактора. Рекомендуемые наборы нейтронно-активационных детекторов для экспериментального обоснования характеристик поля нейтронов в области корпуса реактора и образцов-свидетелей реакторов типа ВВЭР представлены в приложении № 1 к настоящему Руководству по безопасности.

25. При проведении прогноза флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов и образцах-свидетелях реакторов типа ВВЭР рекомендуется использовать следующий порядок:

- анализ текущих значений флюенса быстрых нейтронов в характерных точках корпуса реактора (на конец последней завершенной кампании);
- прогноз флюенса быстрых нейтронов в характерных точках корпуса реактора на конец последующей кампании (одной следующей кампании после завершенной) и планируемых кампаний с конкретными нагрузками (при наличии таковых);
- прогноз флюенса быстрых нейтронов на конец проектного срока службы корпуса реактора (на конец проектного срока эксплуатации блока атомной станции) в точках корпуса реактора, для которых определен проектный флюенс быстрых нейтронов;
- сравнение прогнозных значений флюенса быстрых нейтронов с проектными значениями флюенса быстрых нейтронов на конец проектного срока службы корпуса реактора (на конец проектного срока эксплуатации блока атомной станции) и/или с предельными допустимыми значениями флюенса быстрых нейтронов;
- прогноз флюенса быстрых нейтронов на образцах-свидетелях к моменту запланированной выгрузки и сравнение со значениями, установленными в программе контроля радиационного охрупчивания;
- анализ значений коэффициентов опережения облучения образцов-свидетелей относительно корпуса реактора.

26. Рекомендуется проводить прогнозирование флюенса быстрых нейтронов в критической точке на проектный срок службы корпуса реактора после завершения каждой кампании. При этом рекомендуется руководствоваться следующим принципом.

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

$$F_T = F_t + \Phi_{max}(t_T - t_t), \quad (1)$$

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.

При прогнозировании флюенса быстрых нейтронов на конец проектного срока службы корпуса реактора (на конец проектного срока эксплуатации блока атомной станции) принимается, что в оставшееся время эксплуатации от конца последней планируемой кампании до конца проектного срока службы корпуса реактора (до конца проектного срока эксплуатации блока атомной станции) приращение флюенса быстрых нейтронов в единицу календарного времени

равно $\frac{\bar{F}_{пр}}{\tau}$. Тогда после завершения кампании N достаточно управлять прогнозируемым на конец проектного срока службы корпуса реактора (на конец проектного срока эксплуатации

блока атомной станции) флюенсом быстрых нейтронов, который выражен следующей формулой, при условии неперевышения проектного и/или предельно допустимого значения ($F_{пр}$) флюенса быстрых нейтронов, установленного в результате расчета на сопротивление хрупкому разрушению:

$$F_t = \frac{F_t + \sum_M F_j}{T_N + \frac{\sum_M \Delta t_j}{КИМ}} \tau \leq \overline{F_{пр}}, \quad (2)$$

где:

F_t — текущий флюенс быстрых нейтронов, который определяется по формуле $F_t = \sum_N F_i$;

F_i — флюенс быстрых нейтронов, накопленный за прошедшую завершённую i -ю кампанию;

N — количество прошедших завершённых кампаний, флюенс за которые определен на основе фактических нейтронно-физических характеристик активной зоны и режима эксплуатации;

M — количество предстоящих планируемых кампаний, включая идущую кампанию, за время которых проведена оценка флюенса, и флюенс за которые определен на основе расчетных нейтронно-физических характеристик активной зоны, соответствующих конкретной загрузке активной зоны;

F_j — флюенс быстрых нейтронов, накопленный за текущую или предстоящую планируемую j -ю кампанию ($j = N + 1, \dots, M$);

КИМ — коэффициент использования мощности для прогноза флюенса;

T_N — календарное время эксплуатации на момент окончания N -го планово-предупредительного ремонта, следующего после окончания N -й кампании;

Δt_j — эффективное время работы реактора в j -ю кампанию.

При этом:

$$\begin{aligned} F_t &= \Phi_i \cdot \Delta t_i; \\ F_j &= \Phi_j \cdot \Delta t_j, \end{aligned} \quad (3)$$

где:

Φ_i — скорость накопления флюенса быстрых нейтронов в i -ю кампанию, определенная на основе фактических нейтронно-физических характеристик активной зоны и режима эксплуатации для завершённой i -й кампании;

Φ_j — скорость накопления флюенса быстрых нейтронов в j -ю кампанию;

Δt_i — фактическое эффективное время работы реактора в i -ю кампанию, с.

27. В случае если с учетом текущего значения флюенса быстрых нейтронов прогнозное значение флюенса быстрых нейтронов на конец проектного срока службы корпуса реактора (на конец проектного срока эксплуатации блока атомной станции), определенное согласно формуле (2), превысит предельно допустимое значение флюенса быстрых нейтронов, рекомендуется для прогнозируемых кампаний, последующих за кампанией номер « $N+M$ », или для M кампаний (в случае приближения кампании номер « $N+M$ » к окончанию проектного срока службы корпуса реактора или проектного срока эксплуатации блока атомной станции) провести предварительные расчетные оценки флюенса быстрых нейтронов с варьированием расстановки топлива в активной зоне с тем, чтобы прогнозное значение флюенса быстрых нейтронов не

превысило предельно допустимого значения флюенса быстрых нейтронов. Эксплуатирующая организация, по предложению атомной станции, принимает решение о режиме дальнейшей эксплуатации энергоблока для выполнения условия (2), исходя из наличия запаса до предельно допустимого значения флюенса быстрых нейтронов.

28. С целью обеспечения консервативности при обосновании проектного срока службы корпуса реактора рекомендуется при прогнозировании флюенса быстрых нейтронов и при оценке флюенса во время эксплуатации использовать значения характеристик поля нейтронов с учетом их погрешности. Рекомендуется использовать в качестве верхней границы следующие значения:

$$\begin{aligned} F_t^* &= F_t + \delta F_t; \\ \Phi_{max}^* &= \Phi_{max} + \delta \Phi_{max}, \end{aligned} \quad (4)$$

где:

F_t^* , Φ_{max}^* — оцененные консервативные значения флюенса быстрых нейтронов и скорости накопления флюенса;

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

29. Установленные после завершения кампании и прогнозируемые значения флюенса быстрых нейтронов в критической точке корпуса реактора рекомендуется сравнивать с проектным или предельно допускаемым значением и использовать для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпуса реактора, определяемого как прогнозируемое время работы реактора на номинальной мощности, в течение которого выполняются условия, при которых обеспечивается сохранение свойств материала корпуса реактора в зависимости от степени радиационного повреждения при условии недостижения оцененного значения параметра радиационной нагрузки (флюенса быстрых нейтронов) своего предельного значения (предельно допустимого значения — при проектировании, проектного значения — при эксплуатации). Рекомендуется проводить экспертную оценку радиационного ресурса корпусов реакторов типа ВВЭР в соответствии с методикой, приведенной в приложении № 2 к настоящему Руководству по безопасности.

30. Рекомендуется проводить сравнение проектных данных о характеристиках поля нейтронов на корпусе реактора и образцах-свидетелях и результатов определения тех же величин, полученных во время эксплуатации реакторов типа ВВЭР и обоснованных базовыми и/или контрольными экспериментами.

31. При внедрении режимов загрузки топлива, отличных от проектных или конструктивных изменений, влияющих на перенос быстрых нейтронов до корпуса реактора и мест размещения образцов-свидетелей (характерное изменение конструкции активной зоны, использование нового вида топлива или типа конструкции тепловыделяющей сборки, установка выгоревшего (глубоко выгоревшего) топлива на периферию активной зоны), рекомендуется выполнять расчет характеристик поля быстрых нейтронов на корпусе реактора и образцах-свидетелях с целью подтверждения проектного значения флюенса быстрых нейтронов. При обосновании расчетных значений характеристик поля быстрых нейтронов на корпусе реактора рекомендуется рассматривать необходимость их экспериментального подтверждения при первой опытной эксплуатации рассматриваемого проекта ВВЭР. Результаты этого расчета и обоснования рекомендуется включать в комплект документации, представляемой на согласование в

установленном порядке с целью внедрения нового режима загрузки топлива или внесения конструктивных изменений.

32. Если при учете флюенса быстрых нейтронов в силу каких-либо причин (например, при отсутствии информации о предыдущей истории эксплуатации реактора) ограничено использование в полной мере методик учета флюенса быстрых нейтронов на корпусе реактора, то при определении и прогнозировании характеристик поля нейтронов рекомендуется использовать консервативные коэффициенты запаса для этих величин на неопределенности, обусловленные спецификой работы реактора. Рекомендации по определению консервативных коэффициентов запаса приведены в разделе 2.4 приложения № 2 к настоящему Руководству по безопасности.

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

V. Рекомендации по учету флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов в период дополнительного срока эксплуатации

34. При решении вопроса о возможности продления эксплуатации корпуса реактора ВВЭР после истечения назначенного в проекте срока службы корпуса реактора рекомендуется уточнять значения характеристик поля нейтронов в характерных точках корпуса реактора.

35. Рекомендуется прогнозировать флюенс быстрых нейтронов на корпусе реактора, соответствующий моменту окончания продлеваемого срока эксплуатации блока атомной станции, по аналогии с рекомендациями, приведенными в пунктах 25–28 настоящего Руководства по безопасности. При определении флюенса быстрых нейтронов рекомендуется пользоваться формулой (1), где вместо t_r нужно использовать $t_r + t^*$, где t^* — продлеваемый срок эксплуатации блока атомной станции.

36. В процессе каждой продлеваемой кампании рекомендуется вести учет флюенса быстрых нейтронов на корпусе реактора за кампанию. Рекомендуется проводить эксперимент с установкой нейтронно-активационных детекторов в зазоре у внешней поверхности корпуса реактора для подтверждения флюенса быстрых нейтронов на корпусе реактора за кампанию.

37. Рекомендуется для подтверждения достоверности значений накопленного флюенса быстрых нейтронов на корпусе провести анализ активности соскобов с внутренней поверхности корпуса реактора для оценки флюенса быстрых нейтронов по реакции $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$.

VI. Рекомендации по учету флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов после реализации термического отжига корпуса реактора

38. При учете флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов типа ВВЭР, на которых проведен термический отжиг, рекомендуется вести подсчет накопления флюенса быстрых нейтронов как от начала эксплуатации, так и от кампании, перед которой проведен термический отжиг.

39. С последующей после отжига кампании рекомендуется проводить учет флюенса быстрых нейтронов на корпусе реактора с экспериментальным обоснованием флюенса быстрых нейтронов, накопленного за реализованные после отжига кампании.

40. Рекомендуется прогнозировать накопление флюенса быстрых нейтронов в критической точке корпуса реактора 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 корпуса реактора кампании. При этом рекомендуется определять и обосновывать скорость накопления флюенса быстрых нейтронов и коэффициент запаса для нее в критической точке в каждую планируемую кампанию.

41. При учете и прогнозе флюенса быстрых нейтронов на корпусах, на которых проведен термический отжиг, рекомендуется оценивать суммарный флюенс быстрых нейтронов в позициях отжига как от начала эксплуатации, так и от начала кампании, перед которой проведен термический отжиг.

Приложение № 1

к руководству по безопасности при использовании атомной энергии «Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов», утвержденному приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 марта 2022 г. № 79.

Рекомендуемые наборы нейтронно-активационных детекторов для экспериментального обоснования характеристик поля нейтронов в области корпуса реактора и образцов-свидетелей реакторов типа ВВЭР

Детектор, реакция	Период полураспада, сут	Эффективная энергия, МэВ	Базовые измерения в зазоре за корпусом реактора	Контрольные измерения в зазоре за корпусом реактора	Измерения на образцах-свидетелях*	Методика анализа соскобов с корпуса реактора
$^{237}\text{Np}(n,f)^{137}\text{Cs}$	11 020	0,55	+	+	-	-
$^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$	5 890	1,0	+	+	+	+
$^{238}\text{U}(n,f)^{137}\text{Cs}$	11 020	1,5	+	-	-	-
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	70,86	2,5	+	-	-	-
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	312,3	3,0	+	+	+	+
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	83,79	4,5	+	-	-	-
$^{63}\text{Cu}(n,a)^{60}\text{Co}$	1 925,5	7,0	+	+	+	-
$^{55}\text{Mn}(n,2n)^{54}\text{Mn}$	312,3	11,6	+	-	-	-
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	1 925,5	реакция на тепловых нейтронах	+	+	+	+

Примечание. *Окончательные наборы нейтронно-активационных детекторов при формировании облучаемых сборок с образцами-свидетелями рекомендуется устанавливать с учетом условий, оговоренных в программах контроля изменения свойств металла корпусов.

Приложение № 2

к руководству по безопасности при использовании атомной энергии «Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов», утвержденному приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 марта 2022 г. № 79.

Рекомендуемая методика экспертной оценки радиационного ресурса корпусов реакторов типа ВВЭР

1. Общие положения

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

1.2. Методика позволяет получать экспертную оценку радиационного ресурса корпуса реактора после каждой завершенной кампании, если получены оценки накопленного флюенса быстрых нейтронов с учетом всех предыдущих кампаний.

1.3. Методика применима к корпусам реакторов типа ВВЭР, на которых не проводился термический отжиг.

2. Оценка радиационного ресурса корпуса реактора

2.1. Радиационный ресурс корпуса реактора и флюенс быстрых нейтронов

2.1.1. В экспертных оценках остаточный радиационный ресурс корпуса ВВЭР при эксплуатации рекомендуется определять из соотношения:

$$F_{\text{пр}} - F_t - \sum_{n=1}^N \Phi_n t_n = 0, \quad (1)$$

где:

$F_{\text{пр}}$ — проектное значение флюенса быстрых нейтронов на конец обоснованного проектного срока службы корпуса реактора;

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 .

2.1.2. Для определения остаточного радиационного ресурса корпуса реактора рекомендуется использовать следующее соотношение:

$$\tau = \sum_{n=1}^N t_n. \quad (2)$$

2.1.3. 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 для определения радиационного ресурса корпуса реактора рекомендуется использовать следующее соотношение:

$$\tau = \frac{F_{пр} - F_t}{\Phi_{max}}, \quad (3)$$

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

2.1.4. Учитывая, что F_t до начала эксплуатации реактора равен нулю, для определения проектного радиационного ресурса корпуса реактора рекомендуется использовать следующее соотношение:

$$\tau = \frac{[F]}{\Phi_{max}}, \quad (4)$$

где $[F]$ — предельно допустимый флюенс быстрых нейтронов, определяемый в соответствии с расчетами на сопротивление хрупкому разрушению.

2.1.5. 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 (3) настоящего приложения, чтобы прогнозировать радиационный ресурс корпуса реактора:

$$\begin{aligned} F_t &= k_F F_t^*; \\ \Phi_{max} &= k_\Phi \Phi_{max}^*, \end{aligned} \quad (5)$$

где:

k_F, k_Φ , — консервативные коэффициенты запаса (по величине равны или больше единицы) по накопленному флюенсу и скорости накопления флюенса быстрых нейтронов;

F_t^*, Φ_{max}^* — оцененные значения накопленного флюенса и скорости накопления флюенса быстрых нейтронов.

2.2. Определение проектного и накопленного флюенса быстрых нейтронов

2.2.1. Проектное значение флюенса быстрых нейтронов в критической точке корпуса реактора определяется на стадии проектирования для подтверждения выполнения критериев сопротивления хрупкому разрушению.

2.2.2. Накопленный флюенс быстрых нейтронов в критической точке корпуса реактора определяется в результате учета флюенса быстрых нейтронов при эксплуатации реактора. При этом накопленные флюенсы быстрых нейтронов рекомендуется определять по каждой кампании в отдельности и фиксировать как последовательный набор значений $\{F_i\}_{i=1...m}$, где m — количество реализованных кампаний до момента оценки накопленного флюенса быстрых нейтронов.

2.3. 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 $\left\{ \frac{F_i}{t_i} \right\}_{i=1 \dots m}$, где t_i — эффективное время работы реактора в кампанию i .

2.4. Определение коэффициентов запаса

Значения коэффициентов запаса k_f и k_ϕ в выражениях (5) настоящего приложения можно оценивать из анализа расчетно-экспериментальных результатов определения флюенса быстрых нейтронов, полученных на конкретном реакторе. Расхождение расчетных и экспериментальных данных по характеристикам поля нейтронов в области корпуса реактора может достигать 10–20 %. При этом неопределенность экспериментальных данных может достигать 10 %. Общая неопределенность значений характеристик поля быстрых нейтронов в критических точках может составить 30 %. Для экспертных оценок рекомендуется использовать значения этих коэффициентов запаса не ниже 1,3. Более низкие значения коэффициентов запаса рекомендуется обосновывать с использованием экспериментальной валидации.