



УДК 621.039.58

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ НА КОРПУСАХ И ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ВВЭР-1000 В ФАКТИЧЕСКИХ РЕАКТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Бородкин П.Г., Хренников Н.Н., к.ф.-м.н. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Представлен анализ выявленных закономерностей формирования полей нейтронов вне активной зоны (на корпусах и опорных конструкциях реактора) ВВЭР-1000, а также предложен и разработан новый метод подготовки модели источника нейтронов для расчета переноса нейтронов на основе фактических распределений полей энерговыделения, полученных в системе внутриреакторного контроля. Этот метод реализован в методике расчета флюенса быстрых нейтронов на корпусах реакторов ВВЭР-1000.

Приведены недавно полученные на АЭС с ВВЭР-1000 экспериментальные данные, используемые для апробации разработанного метода, которые позволяют отслеживать детальное распределение параметров радиационной нагрузки на корпусах и опорных конструкциях реактора ВВЭР-1000 и могут быть использованы как для валидации расчетных методик функционалов поля нейтронов, так и для других прикладных направлений исследования полей нейтронов внутри и вне активной зоны реакторов ВВЭР-1000.

► **Ключевые слова:** флюенс, корпус реактора, ВВЭР-1000, нейтронно-активационные измерения, расчет, выгорание, энерговыделение.

CALCULATION-EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF RADIATION LOADING PARAMETERS ON THE REACTOR PRESSURE VESSEL AND REACTOR SUPPORT STRUCTURES OF VVER-1000 IN ACTUAL REACTOR CONDITION

Borodkin P., Khrennikov N., Ph.D. (SEC NRS)

The paper deals with the analysis of revealed regularities neutron fields distributions outside the reactor core (on reactor pressure vessel and reactor support structures) VVER-1000, and also developed a new method of preparing the neutron source model or the neutron transport calculation, based on the actual distributions of the power fields received in the in-core reactor control system. This method is implemented in fast neutron fluence calculation procedure on VVER-1000 reactor pressure vessel.

Paper also present recently obtained experimental data at NPPs with VVER-1000, which used to testify the developed methods and allow to receive detailed distribution of the radiation loading parameters of the reactor pressure vessel and reactor support structures of VVER-1000, and also can be used for validation of calculation methods or for other areas of study of neutron fields parameters inside and outside reactor core of the VVER-1000 reactors.

► **Key words:** fluence, reactor pressure vessel, VVER-1000, neutron-activation measurements, neutron-transport calculations, fuel burn up, reactor power.

Введение

С целью обеспечения надежной и безопасной работы действующих и вводимых в эксплуатацию энергоблоков необходимо осуществлять надежный контроль параметров и характеристик реактора, которые определяют безопасность как активной зоны, так и оборудования реактора [1].

В частности, в соответствии с требованиями нормативных документов (НП-082-07, НП-006-98, ПНАЭ-Г-008-89, РБ-007-99, РБ-018-01), необходимо достоверно контролировать распределение энерговыделения в активной зоне реакторов типа ВВЭР, оценивать выгорание топлива и определять параметры радиационной нагрузки (флюенс, скорость накопления флюенса (СНФ) и другие функционалы поля нейтронов (ФПН)) на корпусе реактора (КР) и опорных конструкциях реактора (ОКР). Оценка радиационной нагрузки проводится расчетным путем с использованием результатов нейтронно-физических расчетов (штатная методика) и эксплуатационных реакторных данных (новый метод, предложенный в работе). Измерения за корпусом реактора в фактических реакторных условиях позволяют получить скорости реакций и активности нейтронно-активационных детекторов (НАД). Анализ расчетных и экспериментальных ФПН позволяет оценить параметры радиационной нагрузки и их неопределенность.

В работе приведен новый метод подготовки источника и оценка его вклада в уточнение флюенса на КР и ОКР.

Анализ закономерностей формирования поля нейтронов вне активной зоны

Принятый в настоящее время для расчетов параметров радиационной нагрузки на КР российских ВВЭР инженерный метод расчета основан на использовании аттестованного двумерного программного кода DORT [2] и нейтронно-физических характеристик (НФХ) активной зоны, полученных из расчетов по аттестованным программам.

Распределение источника нейтронов по высоте активной зоны в (r, z) геометрии (особенно важно в нашем рассмотрении) рассчитывается на основе высотных приращений выгорания в ТВС из двух периферийных рядов. Расчетно-экспериментальные исследования параметров радиационной нагрузки КР проведены на всех действующих энергоблоках с ВВЭР [2]. Были проанализированы экспериментальные данные по облучению НАД за корпусами

реакторов ВВЭР-1000 энергоблоков № 2, 3 и 4 Балаковской АЭС (БалАЭС), № 1 Ростовской АЭС (РстАЭС), № 1 Калининской АЭС (КлнАЭС), № 5 Нововоронежской АЭС (НВАЭС) [3].

На рис. 1 показаны сравнения высотных распределений расчетных и экспериментальных СНФ быстрых нейтронов, полученные на различных энергоблоках с ВВЭР-1000.

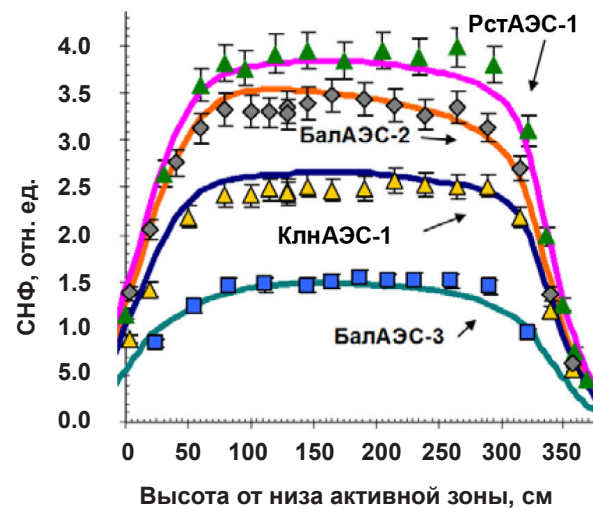


Рис. 1. Расчетные (по выгоранию) и экспериментальные распределения скоростей реакций СНФ быстрых нейтронов по высоте за корпусами реакторов ВВЭР-1000

Форма расчетных распределений СНФ за корпусом реактора, полученных по штатной методике, коррелирует с использованным в расчете распределением источника нейтронов по высоте активной зоны.

Типичная форма распределения глубины выгорания за кампанию ВВЭР-1000, а, следовательно, и источника нейтронов для расчета переноса имеет ярко выраженный максимум в нижней половине активной зоны и характеризуется отрицательным офсетом (интеграл энерговыделения в нижней половине зоны больше, чем в верхней).

Такой же формы следует ожидать и в расчетном распределении СНФ быстрых нейтронов по высоте за корпусом реактора (см. рис. 1). Однако результаты измерений за время кампании показывают, что на уровне верхней части активной зоны практически во всех случаях наблюдается локальный рост СНФ (флюенса нейтронов). Отмеченная закономерность (локальный рост вверху и положительный офсет) наблюдается практически во всех экспериментальных исследованиях на энергоблоках с ВВЭР-1000.

Для выяснения причин наблюдаемых расхождений был проведен дополнительный анализ распределения параметров активной зоны. В частности, было проведено исследование фактических характеристик активной зоны за кампанию и дополнительный детальный анализ результатов внутрореакторных измерений и сопутствующих им вычислений в системе внутрореакторного контроля (СВРК) [4], [5]. Средние распределения энерговыделения характеризуют профиль энерговыработки за время кампании. Форма энерговыделений, рассчитанных в СВРК, использовалась для корректировки источника нейтронов, полученного по выгоранию. Пример сравнения откорректированного распределения источника нейтронов (на основе данных по энерговыделению ТВС) с источником, рассчитанным по выгоранию для энергоблока № 3 БалаЭС, представлен на рис. 2.

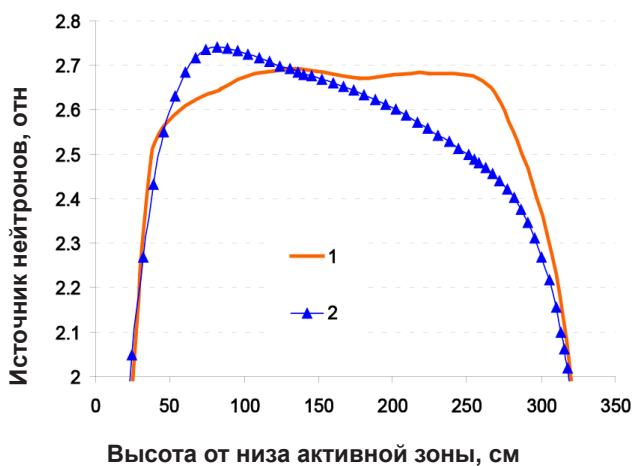


Рис. 2. Распределение источника нейтронов по высоте активной зоны, полученное двумя методами:
1 – энерговыделение; 2 – выгорание

Можно отметить отличие форм распределения источника нейтронов, полученных в этих двух подходах (рис. 2). В данном примере наблюдается локальный максимум вверху активной зоны и положительный офсет, полученный с учетом данных СВРК. На основании выявленных закономерностей предложен метод корректировки источника на базе данных СВРК, который внедрен в методику расчета переноса нейтронов. С откорректированным источником, подготовленным на основании энерговыделения ТВС, были рассчитаны СНФ за корпусами нескольких реакторов энергоблоков с ВВЭР-1000 [3], [4]. Новые расчетные высотные распределения СНФ быстрых нейтронов за корпусами реакторов сравнивались с экспериментальными данными.

Форма расчетных распределений значительно приблизилась к форме экспериментальных зависимостей по сравнению с рис. 3. Совпадение абсолютных значений в высотных распределениях улучшилось до 10 – 15 % (было 20 – 30 %).

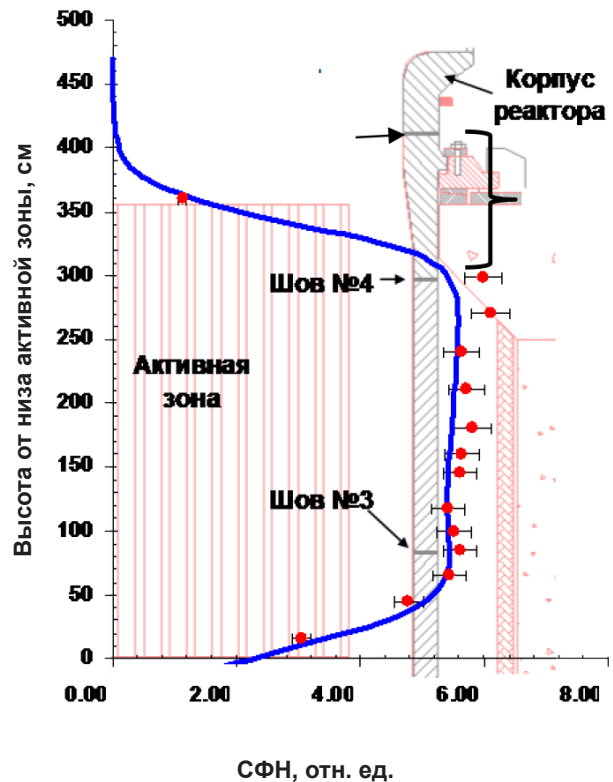


Рис. 3. Расчетные (с учетом СВРК) и экспериментальные распределения СНФ по высоте за корпусом реактора ВВЭР-1000

Результаты проведенных расчетно-экспериментальных исследований радиационной нагрузки на КР и ОКР ВВЭР-1000 и проведенный анализ закономерностей формирования поля нейтронов вне активной зоны позволяет сформулировать некоторые выводы, которые подчеркивают актуальность проведения настоящих исследований:

- обнаружено систематическое расхождение высотных расчетных и экспериментальных распределений СНФ (или флюенса быстрых нейтронов) за КР, особенно в верхней части в пределах высоты активной зоны;
- расхождение измерений и расчетов СНФ в высотном направлении показало, что расчетное выгорание в ТВС не коррелирует однозначно с результатами внекорпусных измерений;
- источник нейтронов, откорректированный по показаниям СВРК, позволил получить лучшее совпадение с экспериментом за корпусами для всех исследованных энергоблоков;

– расчет с новым источником во многих случаях показывает, что шов № 4 КР расположен в районе локального максимума флюенса быстрых нейтронов; однако традиционно считалось (в том числе в проекте ВВЭР-1000), что максимум флюенса находится вблизи шва № 3;

– флюенс нейтронов на шве № 5 (между опорной обечайкой и обечайкой активной зоны КР) существенно занижен, если не учитывать рост СНФ в верхней части активной зоны;

– флюенс в области ОКР также существенно занижен из-за данного эффекта.

Следует отметить, что учет отмеченного эффекта приводит к тому, что шов № 5 и ОКР ВВЭР-1000 подпадают под контроль радиационного охрупчивания в соответствии с ПНАЭ-Г-002-86, так как флюенс на них к концу срока службы, особенно при продлении эксплуатации, может достигнуть значения выше 10^{18} нейтр./см².

Анализ неопределенностей, влияющих на формирование поля нейтронов вне активной зоны

Для полного понимания выявленных закономерностей проведен детальный анализ неопределенностей используемых методов расчета и методик проведения измерений.

Разработанная в ФБУ «НТЦ ЯРБ» методика измерений за корпусом реактора рекомендована к использованию на АЭС с ВВЭР [1]. На рис. 4 показана схема размещения конструкции с НАД за КР ВВЭР-1000.

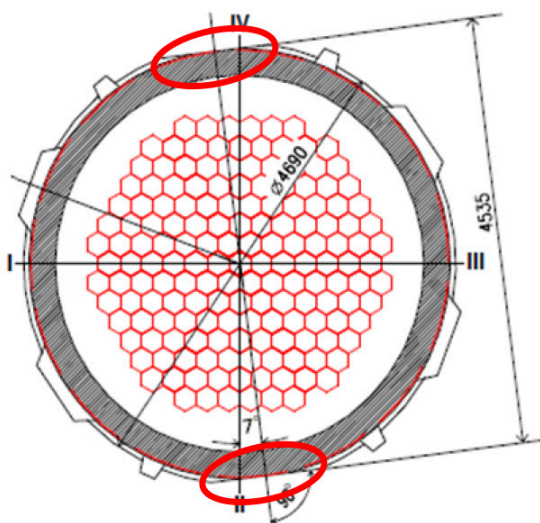


Рис. 4. Области зазора, где возможна установка устройства с детекторами (область выделена)

Следует отметить, что методика нейтронного контроля [2] предназначена для экспериментальной проверки расчетных методов, используемых для определения прогнозных данных о флюенсе быстрых нейтронов в критических точках корпусов реакторов типа ВВЭР, и предполагает наличие ограниченного числа экспериментальных данных.

Анализ ранее проведенных экспериментальных исследований позволил обозначить особенности [5], которые ограничивали проведение детальных исследований поля нейтронов вне активной зоны:

– расположение НАД и конструкции строго зависит от особенностей околокорпусного пространства и возможно только в определенном месте КР в районе II и IV оси (где имеется срез на КР – см. рис. 4);

– размещение НАД по азимуту и высоте реализовано только для одного азимутального и одного вертикального направлений (одна крестообразная конструкция);

– в проведенных экспериментальных исследованиях вертикальные подвески с НАД располагались на азимутальном угле 40 – 45 градусов (для 60-градусного сектора), что не точно соответствует максимуму в азимутальном распределении СНФ на КР;

– для фиксации НАД в вертикальном положении использовались алюминиевые направляющие штанги, которые располагаются вблизи НАД и могут создавать эффект экранировки.

Отмеченные признаки ограничивали получение детального экспериментального распределения ФПН за КР, в полной мере достаточного для подробного анализа формирования поля нейтронов вне активной зоны.

Кроме того, на формирование поля нейтронов за корпусом реактора, кроме нейтронов утечки, рожденных в активной зоне, влияют конструктивные особенности внутрикорпусных устройств, корпуса и околокорпусного пространства. В настоящем расчетном исследовании применялась наиболее точная модель конструкции ВВЭР-1000, в особенности, в вертикальной плоскости: точно учитывались утолщение корпуса реактора в верхней части, конусообразность опорной фермы, изменение во времени температуры теплоносителя и др. Для верификации расчетной модели ВВЭР-1000 было проведено сравнение с прецизионными расчетами по кодам TRAMO и MCNP [6], реализующими метод Монте-Карло. Кроме того, исследовалось влияние неточности (неопределенности) в составе материалов и допусках конструктивных элементов [7].

Исследования показали, что устранить наблюдаемое расхождение расчета и эксперимента при учете всех неопределенностей в расчете не удастся.

Метод подготовки модели источника нейтронов на основе СВРК

СВРК предназначена для измерения параметров, определяющих состояние активной зоны реактора, обработки указанной информации, проведения нейтронно-физических расчетов с целью выработки рекомендаций по режиму работы и управлению реактором, в том числе по управлению распределением энерговыделения в активной зоне. Вычисление распределения энерговыделения по объему активной зоны проводится с использованием показаний устанавливаемых в ТВС 64 каналов нейтронных измерительных (КНИ), каждый из которых содержит семь родиевых детекторов прямой зарядки (ДПЗ), расположенных равномерно по высоте ТВС.

По показаниям ДПЗ и термопар на определенный момент восстанавливается поле энерговыделения по объему активной зоны.

В настоящей работе для сокращения массива данных СВРК распределения энерговыделения в течение кампании предложено разбить на интервалы от 3 до 10 календарных суток. Таким образом, массив энерговыделений для *i*-ой ТВС представляет собой функцию от времени работы (*t_j*) реактора при стационарном (усредненном) режиме работы:

$$Q_{ij}(t) = \{QED_{km}, t_j\},$$

где *QED_{km}* – линейные энерговыделения в ДПЗ, МВт/м;
m – число СВРД в активной зоне;
k – число ДПЗ в одном СВРД.

Источник нейтронов по высоте активной зоны формируется на основании имеющихся данных для периферийного ряда в 60-градусном секторе, для которого необходимо проводить расчет. В случае, если положение СВРД в активной зоне отличается от серийного, тогда следует учитывать все СВРД, расположенные в периферийных ТВС активной зоны. Ориентация ТВС с КНИ выбирается для определенного сектора (60 градусов), для которого необходимо проводить расчет.

После обработки имеющейся информации по показаниям ДПЗ за всё время кампании с интервалом 3 – 10 суток получают интегрированные

распределения энерговыделений *i*-ой ТВС периферийного ряда:

$$Q_i = \int_{t=0}^{t_{камп}} Q_{ij}(t)$$

Следует отметить, что при проведении прямого трехмерного расчета полученные значения *Q_i* могут использоваться в качестве источника нейтронов и быть заданы для каждой ТВС. Распределение по высоте ТВС рассчитывается при помощи полинома с использованием энерговыделения в каждой ячейке модели конкретной ТВС. При подготовке источника нейтронов для методики расчета на основе кода DORT, реализующей метод трехмерного синтеза, необходимо готовить источник нейтронов с учетом вклада каждой ТВС в точку пространства, в которой необходимо определять ФПН, в зависимости от расстояния до периферийных ТВС.

В направлении по азимуту (*θ*) на определенную точку пространства за корпусом реактора высотные распределения в ТВС учитываются с соответствующим весом – *w_i*. Значения веса ТВС (*w_i*) в направлении на конкретный азимутальный угол рассчитываются предварительно (отдельный расчет).

Таким образом, энерговыделение периферийного ряда с учетом вклада каждой ТВС может быть представлено, как:

$$Q_{ряда,θ} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \times w_{i,θ}}{n},$$

где

n – количество ТВС с СВРД для каждого периферийного ряда (можно учитывать один или два ряда периферийных ТВС);
θ – азимутальное направление.

Источник по высоте, в конечном счете, рассчитывается при помощи полинома с учетом каждой пространственной ячейки по всей высоте активной зоны.

Расширенные экспериментальные исследования на АЭС с ВВЭР-1000 для подтверждения корректности разработанного метода

С целью уточнения и детального обоснования предложенного метода для расчетов ФПН на КР были проведены расширенные расчетно-экспериментальные исследования на энергоблоках с ВВЭР-1000.

Детекторы крепились на специально разработанных конструкциях в виде рамы из сборных вертикальных и горизонтальных планок, на которых устанавливались детекторы в направлении высоты и азимута реактора [8]. Принципиальная усовершенствованная схема размещения НАД на КР ВВЭР-1000 приведена на рис. 5. Размеры рамы составляют 4,5 метра по высоте и 2 метра по азимуту. Конструкция помещается в зазор между внешней поверхностью корпуса реактора и теплоизоляцией бетонной шахты.

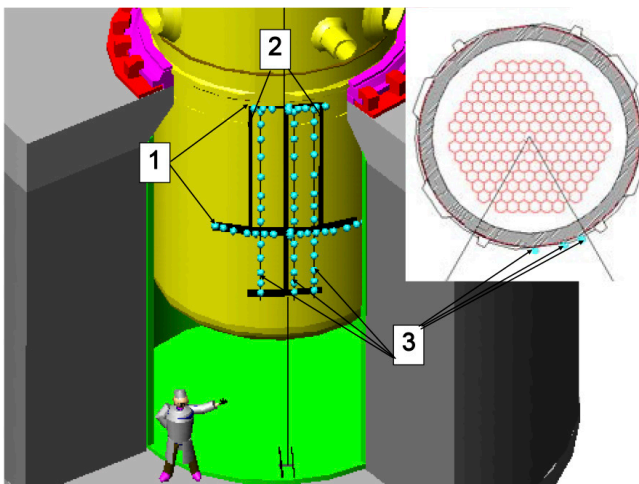


Рис. 5. Схема размещения НАД за КР ВВЭР-1000:
1 – азимутальные штанги с НАД; 2 – крепежные штанги для формирования жесткого каркаса;
3 – вертикальные подвески с НАД

Разработанный метод установки НАД за корпусом реактора позволяет реализовать следующие принципы размещения НАД:

- НАД размещены на нескольких вертикальных подвесках, расположенных в различных азимутальных направлениях;
- азимутальные направления размещения вертикальных подвесок выбирались с учетом неравномерности распределения поля нейтронов за КР;
- размещения НАД с учетом суперпозиции по отношению к периферийным ТВС (в зависимости от формирования активной зоны);
- размещение НАД вблизи ожидаемого максимума ФПН на КР;
- НАД размещены на вертикальных подвесках непосредственно на корпусе, где нет экранировки (возмущения поля нейтронов) биозащитой, опорной консолью или крепежными штангами;
- в высотном направлении НАД размещены по азимуту на уровне центра активной зоны и на уровне расположения ОКР (между КР и опорной консолью, прямо под опорным буртом);
- НАД могут располагаться в большом количестве по высоте и азимуту для выявления тонкой структуры в распределении (вплоть до непрерывной, если использовать проволоку как активационный детектор).

В таблице 1 представлены энергоблоки с ВВЭР-1000, для которых уже проведены расширенные расчетно-экспериментальные исследования флюенса быстрых нейтронов на КР.

Таблица 1

Энергоблоки АЭС с ВВЭР-1000, на которых проведены расчетно-экспериментальные исследования по новой усовершенствованной методике

АЭС	Э/Б	Тип реактора	Номер кампании, год	Тэфф, сут	Конфигурация активной зоны
БалАЭС	№ 3	ВВЭР-1000/В-320	18 ППР-2009-2010	451	ТВС-2М с бланкетами (104% Nном)
БалАЭС	№ 4	ВВЭР-1000/В-320	15 ППР-2009-2010	420	ТВС-2М с бланкетами (104% Nном)
КлнАЭС	№ 1	ВВЭР-1000/В-338	28 ППР-2012-1014	360	загрузка ТВСА и ТВСА-PLUS
НВАЭС	№ 5	ВВЭР-1000/В-187	29 ППР-2012-1013	307	стандартная активная зона (проекта 187) с выгоревшим топливом
РстАЭС	№ 2	ВВЭР-1000/В-320	2 ППР-2011-1012	305,7	загрузка ТВС-2М без бланкетов

Анализ расчетно-экспериментальных исследований радиационной нагрузки

В зависимости от азимутального расположения вертикальных подвесок с НАД подготавливаются несколько источников нейтронов с учетом весового вклада каждой ТВС из первого периферийного ряда в заданное азимутальное направление.

Распределение источника нейтронов в активной зоне, полученное по СВРК, использовалось для нового расчета ФПН за корпусом реактора ВВЭР-1000 для всех исследуемых энергоблоков. На рис. 6 показаны сравнения расчетных (по новой методике) высотных распределений и экспериментальных СНФ (активностей).

Расчетные высотные распределения скоростей реакций и активностей сравнивались с имеющимися экспериментальными данными, а также с расчетом по источнику нейтронов, полученным по новому методу подготовки источника с учетом СВРК.

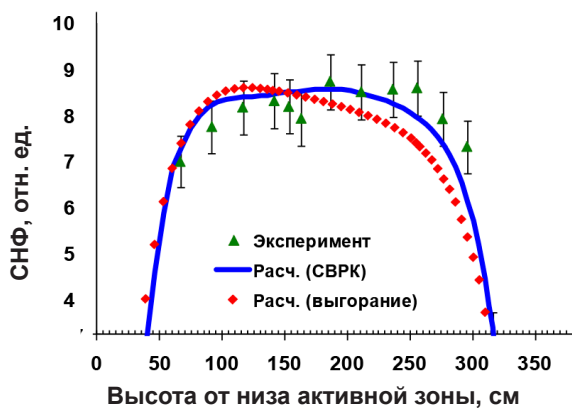


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные распределения СНФ по высоте за КР энергоблока № 3 БалаЭС для азимутального расположения 55 градусов

Результаты расширенных измерений за время облучения НАД подтверждают, что на уровне верх-

ней части активной зоны наблюдается локальный рост ФПН (см. рис. 6). Максимум поля нейтронов наблюдается в верхней части активной зоны.

На рис. 7 приведены детальные результаты расчетно-экспериментальных исследований для энергоблока № 4 Балаковской АЭС, полученные для различных азимутальных направлений. Форма измеренных и расчетных (по СВРК) распределений для различных азимутальных направлений совпадает в пределах 10 – 15%. Остальные функционалы нейтронного поля, представленные ниже, были также рассчитаны по источнику, подготовленному на основе показаний СВРК.

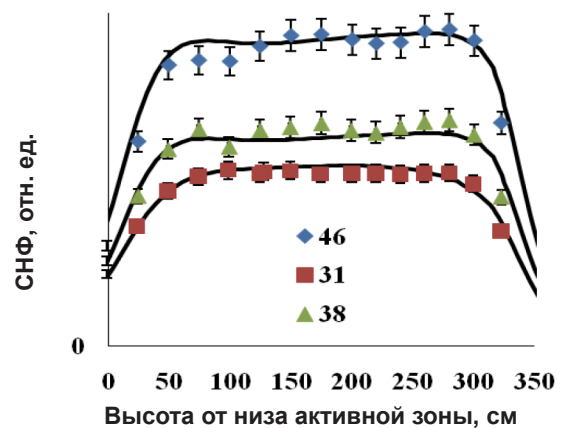


Рис. 7. Расчетные (с учетом СВРК) и экспериментальные распределения СНФ по высоте за корпусами реакторов ВВЭР-1000 энергоблока № 4 БалаЭС для трех разных азимутальных координат в 60-градусном секторе

Сравнение расчетных активностей с экспериментальными значениями для соответствующих координат (азимутальных и высотных) у внешней поверхности корпуса приводятся в табл. 2. Кроме того, проведенные расширенные измерения за КР для разных энергоблоков в разные кампании для различных азимутальных направлений подтверждают отмеченные закономерности.

Таблица 2

Отношение расчетных данных к экспериментальным, полученным на энергоблоке № 3 БалаЭС по всей высоте для разных азимутальных направлений, и для других энергоблоков в азимутальном максимуме

Высота, см	БалаЭС-3			НВАЭС-5		КлнАЭС-1		РстАЭС-2	
	55	47	33	Высота, см	33	Высота, см	44,5	Высота, см	57
336,5	1,10	1,18	1,18	349,5	1,14	345,9	1,02	350,5	1,15
316,0	1,05	1,09	1,09	323,7	1,04	326,5	0,95	328,2	1,05

Высота, см	БалАЭС-3			НВАЭС-5		КлиАЭС-1		РстАЭС-2	
	55	47	33	Высота, см	33	Высота, см	44,5	Высота, см	57
295,6	1,00	1,01	1,00	304,7	1,06	306,5	0,94	308,0	1,12
276,0	1,02	1,01	1,02	284,6	1,01	286,9	0,98	287,8	1,16
255,6	1,02	1,05	1,02	264,8	1,03	262,8	1,02	278,0	1,12
236,2	1,03	1,06	1,02	244,7	1,04	236,7	1,01	267,5	1,08
211,0	1,04	1,06	1,04	224,6	1,04	212,5	1,00	248,5	1,10
186,0	1,04	1,04	1,04	199,7	1,09	201,9	1,04	228,4	1,09
163,0	1,06	1,05	1,04	174,4	1,08	181,9	1,07	203,2	1,12
153,0	1,05	1,05	1,04	158,6	1,03	156,8	1,06	178,7	1,16
141,4	1,05	1,06	1,04	149,2	1,12	123,8	1,07	159,0	1,10
116,2	1,05	1,05	1,02	129,3	1,06	106,4	1,09	151,7	1,13
91,5	1,06	1,03	1,02	104,6	1,05	81,9	1,03	133,1	1,13
66,2	1,05	1,03	1,03	80,4	1,02	56,8	0,98	108,5	1,11
41,2	1,08	1,06	1,12	54,7	1,03	31,8	0,99	83,6	1,12
16,0	1,22	1,19	0,99	29,5	0,95	7,3	1,06	58,7	1,16
				5,4	1,10			33,6	1,07

Из табл. 2 видно, что расчет активностей на ⁵⁴Fe практически совпадает с экспериментом для всего набора данных в пределах 10 – 15%. Таким образом, уточненный расчет аксиального распределения СНФ на основе показаний СВРК позволяет добиться сходимости результатов в ± 10 – 15% практически по всей высоте активной зоны (ранее такая точность была обоснована только для центральной плоскости). Метод подготовки источника по СВРК позволяет получать корректные распределения флюенса по высоте за КР, сопоставимые с экспериментальными данными, для различных азимутальных направлений с учетом вклада периферийных ТВС в заданное направление.

Новые закономерности формирования поля нейтронов на КР и ОКР

По результатам проведенных расчетно-экспериментальных исследований можно выделить новые закономерности распределения параметров радиационной нагрузки на КР и ОКР.

Особенности размещения конструкции с НАД за корпусом реактора позволяют получить азимутальные распределения в областях по высоте около 350 – 370 см от низа активной зоны (вся высота активной зоны и выше). Доступность зазора для установки конструкции с НАД ранее ограничивалась высотой 250 см от низа активной зоны. Следует отметить, что расширенная область размещения детекторов охватывает уровень расположения ОКР КР. На рис. 8 показаны полученные расчетные и

экспериментальные распределения СНФ в районе ОКР для ВВЭР-1000 проектов В-320 (энергоблок № 3 БалАЭС – высота 366 см).

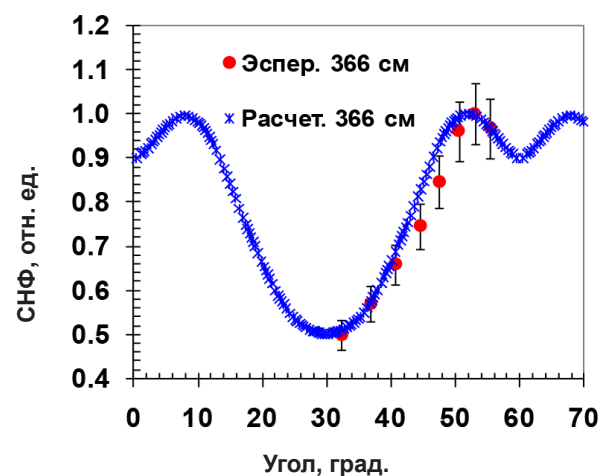


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные распределения СНФ по азимуту за КР энергоблока № 3 БалАЭС

Из сравнения расчетных и экспериментальных данных можно отметить, что форма распределений за КР на высоте ОКР коррелирует с азимутальным распределением источника нейтронов в активной зоне, используемым при расчете. Наблюдаются характерные максимумы в местах размещения ТВС, наиболее приближенных к корпусу реактора. Таким образом, было впервые экспериментально подтверждено, что используемый в ФБУ «НТЦ ЯРБ» расчетный метод синтеза с использованием кода

DORT позволяет получить корректные результаты при расчетах ФПН в области ОКР (уровень верха активной зоны по высоте).

Другим важным моментом было размещение НАД различного изотопного состава по высоте. На рис. 9 показано сравнение измеренных активностей НАД из $^{54}\text{Fe}(n,p)$, $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)$ и $^{93}\text{Nb}(n,p)$ за КР.

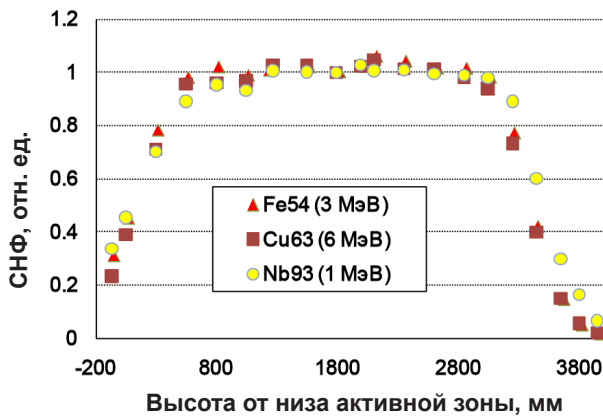


Рис. 9. Сравнение экспериментальных распределений СНФ по высоте для реакций $^{54}\text{Fe}(n,p)$, $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)$ и $^{93}\text{Nb}(n,p)$ за КР энергоблока № 1 КЛнАЭС

Сравнение показывает, что формы высотных распределений активностей НАД различного изотопного состава ($^{54}\text{Fe}(n,p)$, $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)$ и $^{93}\text{Nb}(n,p)$) коррелируют друг с другом, а также, как было показано выше, с расчетными распределениями СНФ, оцененными с использованием нового метода подготовки источника по СВРК. Это означает, что спектральный индекс $^{54}\text{Fe}(n,p)RR/^{63}\text{Cu}(n,\alpha)RR$ или $^{54}\text{Fe}(n,p)RR/^{93}\text{Nb}(n,p)RR$ (или $\text{СНФ}(>3 \text{ МэВ})/\text{СНФ}(>6 \text{ МэВ})$ или $\text{СНФ}(>3 \text{ МэВ})/\text{СНФ}(>1 \text{ МэВ})$) остается постоянным (не изменяется) по всему высотному распределению, включая области верха активной зоны за КР на высоте ОКР.

В процессе измерений (например на энергоблоке № 1 КЛнАЭС) были проведены экспериментальные исследования с использованием большого количества НАД, размещенных по высоте и образующих практически непрерывную зависимость. На рис. 10 приведены распределения измеренных активностей $^{54}\text{Fe}(n,p)$ по всей высоте для разных азимутальных позиций.

Анализ полученных распределений позволяет выделить некоторые особенности:

- детальное распределение по высоте за КР отображает фактическое распределение поля нейтронов в данной области;
- форма распределений, расположенных в различных азимутальных направлениях, может

отличаться в зависимости от энерговыделения близко расположенных ТВС;

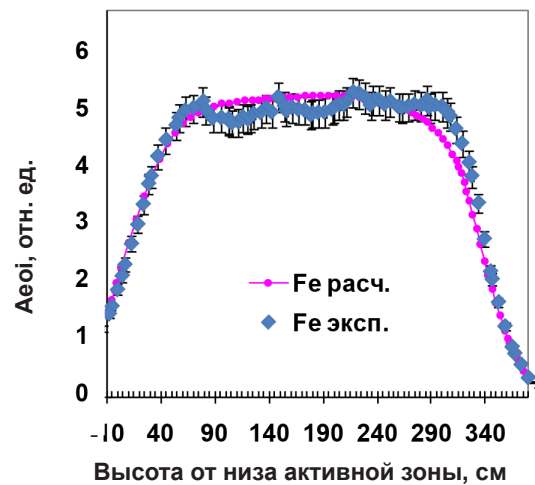


Рис. 10. Измеренные активности НАД за КР и их сравнение с расчетными значениями по новому методу подготовки источника распределения СНФ для энергоблока № 1 КЛнАЭС

– форма высотного распределения расположенного вблизи к максимуму ФПН за КР показывает наличие нескольких локальных максимумов, которые коррелируют с распределением источника в активной зоне.

Форма измеренных и расчетных (по СВРК) распределений (см. рис. 10) совпадает в пределах 10 – 15%. Максимум поля нейтронов наблюдается в верхней части активной зоны. Таким образом, полученная тонкая структура в распределении активностей НАД по высоте подтверждает отмеченные закономерности и возможность применения нового метода подготовки источника по СВРК.

Выводы

1. Проведен анализ закономерностей формирования поля нейтронов вне активной зоны на основании расчетно-экспериментальных исследований радиационной нагрузки на корпусах и опорных конструкция ВВЭР-1000, полученных в фактических реакторных условиях.

2. Выявлено, что использование модели источника нейтронов в активной зоне, подготовленного по штатной методике на основе расчетного выгорания в ТВС, показывает расхождение расчета и эксперимента в корпусе на уровне верхней части активной зоны, в районе швов № 4 и № 5 КР и ОКР, что может приводить к неконсервативности обоснования прогноза как проектного, так и

продленного срока службы оборудования ВВЭР (особенно сварные швы № 4 и № 5 КР и ОКР).

3. По результатам проведенных исследований предложен и разработан новый метод подготовки модели источника нейтронов на основе фактических распределений полей энерговыделения, полученных в СВРК. Проведены расширенные экспериментальные исследования на АС с ВВЭР-1000 в фактических реакторных условиях и выполнено тестирование (валидация) корректности разработанного метода.

4. Уточненный расчет СНФ на основе показаний СВРК позволяет добиться сходимости резуль-

татов в $\pm 10 - 15\%$ практически для всей высоты активной зоны, включая ОКР (ранее такая точность была обоснована только для центральной плоскости).

5. Приведены недавно полученные экспериментальные данные, которые позволяют отслеживать детальное распределение параметров радиационной нагрузки на КР и ОКР ВВЭР-1000 и могут быть использованы как для валидации расчетных методик ФПН, так и для других прикладных направлений исследования полей нейтронов внутри и вне активной зоны реакторов типа ВВЭР-1000.

Список литературы

1. P. Borodkin, G. Borodkin, N. Khrennikov, «Analysis of Justification of Long Term Operation of Russian NPP with VVER in Aspect of Pressure Vessel Radiation Embrittlement» Paper № IAEA-CN-194-056, Proc. Of Third International Conference on Nuclear Power Plant Life Management (Plim), Salt Lake City, Utah, USA 14-18 May 2012.
2. P. Borodkin, G. Borodkin, N. Khrennikov, B. Gordon, M. Miroshnichenko, V. Khlebtsevich and Yu. Ryabinin «Monitoring of Radiation Load of Pressure Vessels of Russian VVER in Compliance with License Amendments» Proc. of the 13th International Symposium on Reactor Dosimetry, May 25-30, 2008, Alkmaar, the Netherlands. Jan Wagemans et al. Eds., World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009.
3. Бородин П.Г. Расчетно-экспериментальный анализ влияния распределения выгорания топлива ВВЭР-1000 на поле нейтронов за корпусом реактора. Ядерная и Радиационная Безопасность, № 3 (57), 2010.
4. Бородин П.Г., Бородин Г.И., Хренников Н.Н. Анализ распределения энерговыработки по объему активной зоны ВВЭР-1000 и его влияния на интегральную утечку нейтронов через корпус реактора. Сборник докладов 6-ой МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». М., ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2009.
5. P.G. Borodkin, G.I. Borodkin, N.N. Khrennikov, «Application of integral ex-core and differential in-core neutron measurements for adjustment of fuel burn-up distributions in VVER-1000». IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume: 57, Issue: 5, Part: 2, 2010.
6. P. Borodkin, «Monte Carlo Method Based Procedure For VVER-1000 Ex-Vessel Neutron Field Parameters Estimation And Its Experimental Validation», Proc. Of the International Youth Nuclear Congress 2010, Cape Town, South Africa, 12 – 18 July 2010, Paper No. 133.
7. G. Borodkin, N. Khrennikov, J. Konheiser, K. Noack, Neutron Dosimetry Study in the Region of the Support Structure of a VVER-1000 Type Reactor. Jan Wagemans et al. Eds., World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009.
8. P.G. Borodkin, G.I. Borodkin, N.N. Khrennikov, J. Konheiser «Application of Ex-vessel Neutron Dosimetry Combined with In-core Measurements for Correction of Neutron Source Used for RPV Fluence Calculations», Journal of ASTM International, Vol. 9, № 4, 2012.

