

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА ВВЭР-1000
НА ПОЛЕ НЕЙТРОНОВ ЗА КОРПУСОМ РЕАКТОРА**

Бородкин П.Г. (НТЦ ЯРБ)

Введение

На современном этапе развития атомной энергетики основной задачей является повышение надежности и безопасности эксплуатации энергоблоков АС. Для обеспечения надежной и безопасной работы действующих и вводимых в эксплуатацию энергоблоков необходимо осуществлять контроль параметров и характеристик реактора, от которых зависит безопасность как активной зоны, так и оборудования реактора.

В соответствии с требованиями нормативных документов необходимо контролировать энерговыделение в активной зоне реакторов типа ВВЭР, оценивать выгорание топлива и определять флюенс нейтронов на корпусах, который является результатом утечки нейтронов из активной зоны. Утечка нейтронов и их пространственно-энергетическое распределение вне активной зоны определяются нейтронно-физическими характеристиками зоны, в основном, ее периферийной части. Нейтронно-активационные измерения за корпусами ВВЭР, проводимые в НТЦ ЯРБ по методике [1], позволяют получить функционалы поля нейтронов (ФПН) – скорости реакций и активности нейтронно-активационных детекторов (НАД). Данные ФПН позволяют оценить флюенс нейтронов, который характеризует интегральную утечку нейтронов через корпус реактора (КР). Значение интегральной утечки зависит от количества делений атомов ядерных материалов, а количество делений определяет выгорание топлива в тепловыделяющей сборке (ТВС). Деление сопровождается энерговыделением, которое фиксируется штатными системами контроля реактора, например системой внутриреакторного контроля (СВРК), а выгорание (интеграл деления) характеризуется энерговыработкой. Таким образом, выгорание, энерговыработка, утечка нейтронов и ее производная, флюенс, функционально зависимы.

Контроль выгорания топлива является важной функцией для его правильного использования, обеспечения безопасности при эксплуатации и обращении. Как правило, определение выгорания ТВС на АС с ВВЭР проводится расчетным путем, а сопровождающая его энерговыработка оценивается измерениями: интегральными по контролю мощности, дискретными по пространству и времени (по энерговыделению в системе СВРК).

Следует отметить, что, решая задачу переноса нейтронов для большого реактора расчетным или экспериментальным способом и преследуя любую практическую цель, необходимо представлять активную зону реактора как объемный источник с неоднородными и нестационарными свойствами, а околокорпусное пространство – как пространство с конструктивными особенностями, создающими неоднородность нейтронного поля (горизонтальные зазоры, опорные консоли, арматура). Такое представление источника обеспечивает правильное, с точки зрения физики, решение задачи о пространственно-энергетическом распределении нейтронов в приреакторном пространстве и уменьшит неопределенности, возникшие в результате сопоставления с данными внереакторного контроля при соответствующих измерениях.

В статье представлен анализ распределения энерговыработки (выгорания) по объему активной зоны ВВЭР-1000 и ее влияние на результаты измерения и расчета интегральной утечки нейтронов через корпус реактора. Исходя из этого, определены некоторые новые закономерности формирования поля нейтронов вне активной зоны, дан их анализ и объяснение. Все это позволило сформулировать некоторые выводы и рекомендации для совершенствования контроля флюенса нейтронов на корпусе и выгорания топлива в активной зоне.

1. Экспериментальные исследования на действующих энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000

Для понимания сути представленного в данной работе исследования приведем краткое описание экспериментального метода.

Объектом экспериментальных исследований является реактор типа ВВЭР-1000. На рис. 1 показана схема 60-градусного сектора симметрии реактора ВВЭР-1000 проекта В-320. Пространство зазора между внешней поверхностью корпуса и теплоизоляцией корпуса ВВЭР-1000 достаточно для размещения облучательного устройства (толщина зазора около 50 см). Однако верхняя часть зазора уменьшается за счет расширения бетонной фермы. Доступ к зазору возможен со стороны днища корпуса реактора, а из зоны патрубков возможен подъем и крепление конструкции на тросе. Типичная конструкция околокорпусного пространства ВВЭР-1000 представлена на рис. 2.

Нейтронно-активационные детекторы крепятся на специально разработанных конструкциях в виде сборных вертикальной штанги и горизонтальной планки. Конструкция позволяет разместить детекторы в направлении высоты и азимута реактора. Конструкция с НАД помещается в зазор между внешней поверхностью корпуса реактора и теплоизоляцией корпуса (рис. 2). На вертикальной штанге детекторы размещаются по всей высоте активной зоны, а также в пространстве выше активной зоны, включая область опорных конструкций. Горизонтальная планка охватывает азимут примерно в 45° . Конструкция позволяет размещать горизонтальные планки на разной высоте, но, как правило, они размещаются в области максимума в вертикальном распределении нейтронного потока. На ВВЭР-1000 серийного проекта В-320 вертикальная штанга может крепиться на угле $37 \pm 4^\circ$ для 60-градусного сектора симметрии.

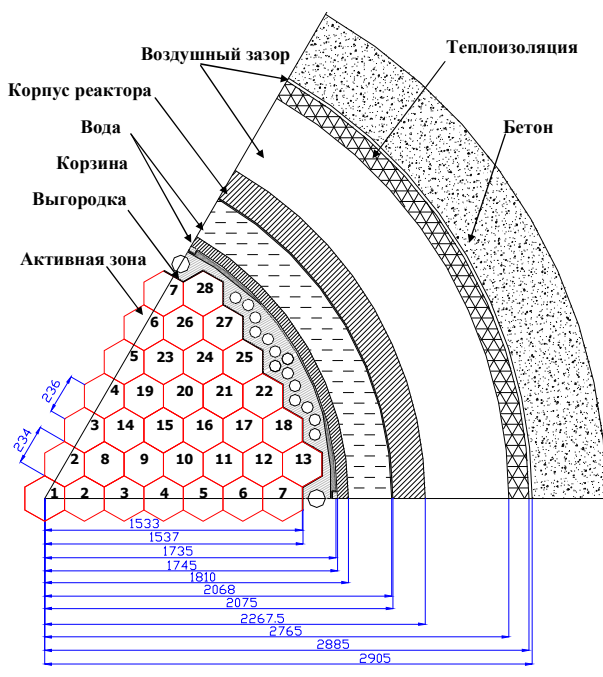


Рис.1. Схема 60-градусного сектора симметрии реактора ВВЭР-1000 проекта В-320

Методика установки следующая. Собранная конструкция заносится в подреакторное пространство. Трос из зоны патрубков опускается через зазор до днища за корпусом реактора. Конструкция привязывается к тросу, вносится в околокорпусное пространство и поднимается на необходимую высоту с помощью данного троса из зоны патрубков. Снизу конструкция крепится к полу при помощи металлического якоря. В зоне патрубков трос крепится к монорельсу, установленному на корпусе реактора. Ослабление троса за счет

удлинения при разогреве реактора устраняется с помощью прикрепленной пружины. Конструкция плотно прижимается к корпусу реактора за счет специальной упорной пружины. Таким образом, она жестко фиксируется как по вертикали, так и по горизонтали.

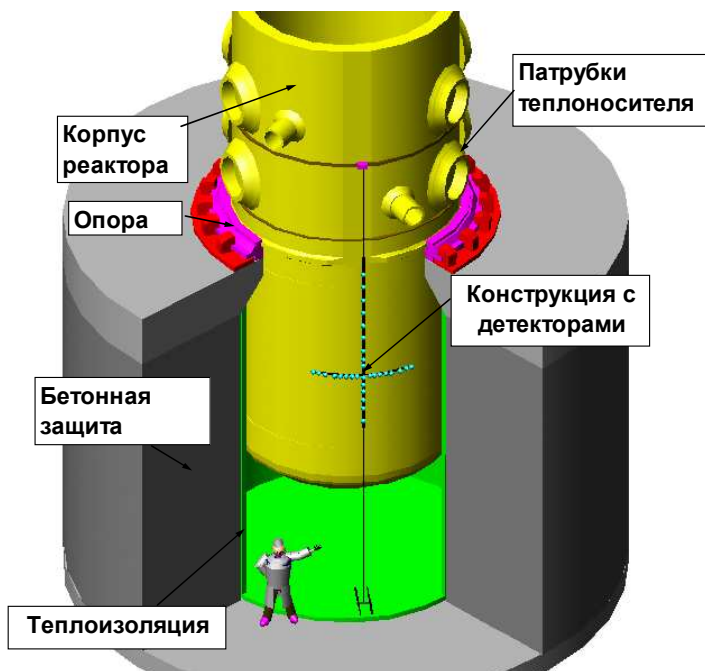


Рис. 2. Схема вертикального разреза реактора ВВЭР-1000 и область зазора у корпуса реактора, в которой устанавливается штанга с детекторами

Ориентация вертикальной штанги в плане реактора (относительно главных осей) уточняется путем угловых замеров удаленности конструкции от оси одного из входных патрубков главного циркуляционного трубопровода, ориентация которого относительно главных осей реактора хорошо известна.

Экспериментальные исследования по данной методике проводились на многих действующих энергоблоках с реакторами типа ВВЭР-1000. В данной работе анализируются имеющиеся экспериментальные данные из базы НТЦ ЯРБ по облучению НАД за корпусами реакторов ВВЭР-1000 энергоблоков № 3 и № 4 Балаковской АЭС, № 1 Волгодонской АЭС, № 5 Нововоронежской АЭС, а также ряда зарубежных АЭС с реакторами ВВЭР-1000.

2. Расчетные исследования ФПН за корпусом реактора и сравнение с экспериментом

2.1. Методика расчетного исследования

Методика предназначена для оценки расчетным путем скорости накопления флюенса (СНФ) нейтронов и других ФПН в околокорпусном пространстве реактора типа ВВЭР-1000. Она основана на использовании результатов расчета переноса нейтронов методом дискретных ординат, реализованным в двумерном программном коде DORT [2], аттестованном к настоящему времени для расчетов флюенса быстрых нейтронов на корпусах ВВЭР.

Методика учитывает нейтронно-физические характеристики активной зоны и параметры работы реактора в конкретную кампанию.

Геометрическая модель и материальный состав расчетов по DORT берутся из ранее подготовленных моделей, которые были верифицированы сравнением с расчетами по реперным кодам [3]. Трехмерное решение по коду DORT находится по усовершенствованным формулам синтеза [4]:

$$\varphi(r, \theta, z) = \varphi_{Q(r, \theta)}(r, \theta) K_z,$$

$$K_z = \frac{\varphi_{Q(r, z)}(r, z)}{\varphi_{Q(r)}(r, \theta)},$$

где:

K_z – фактор вертикальной растечки нейтронов, учитывающий конечную высоту расчетной области;

$\varphi_{Q(r, \theta)}(r, \theta)$ – двумерное решение в радиально-азимутальной геометрии с фиксированным источником нейтронов Q , зависящим от (r, θ) координат;

$\varphi_{Q(r, z)}(r, z)$ – двумерное решение в радиально-аксиальной геометрии с фиксированным источником нейтронов Q , зависящим от (r, z) координат;

$\varphi_{Q(r)}(r, \theta)$ – двумерное решение в радиально-азимутальной геометрии одномерной модели с фиксированным источником нейтронов Q , зависящим от (r) координаты.

Методика расчета по коду DORT успешно применяется для решения практических задач определения флюенса нейтронов на корпусе реактора ВВЭР с целью оценки безопасности корпусов. Она обоснована экспериментальными результатами, полученными на АС с ВВЭР, верифицирована сравнениями с реперными кодами (метод «Монте-Карло») [3] и может обеспечить точность 10–15 % в оценке максимального флюенса при корректном задании исходных данных [4].

2.2. Подготовка источника нейтронов для расчета

Исходными данными для подготовки источника нейтронов являются распределения выгорания топлива на начало и конец кампании. Эти распределения для ТВС берутся из результатов нейтронно-физического расчета по одной из версий программы БИПР, входящей в пакет аттестованных расчетных программ, применяемых в данный момент на АС для обоснований загрузок активной зоны (рис.3).

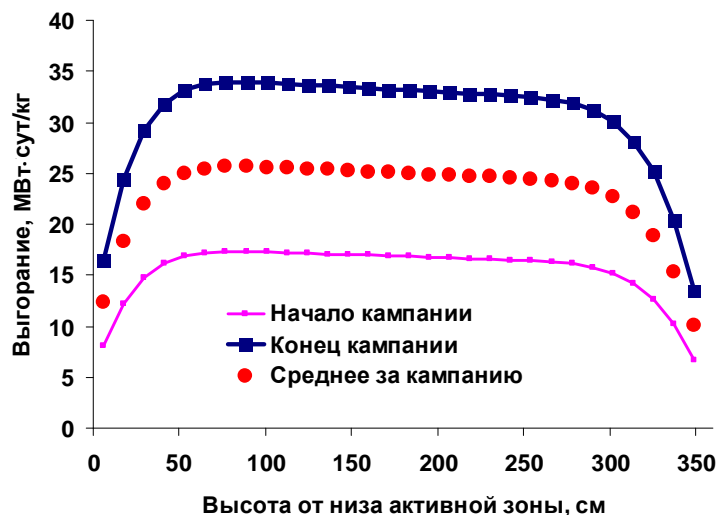


Рис. 3. Распределения выгорания топлива на начало, конец кампании и среднее за кампанию

Источник нейтронов в данной методике ассоциируется с распределением приращения глубины выгорания, что соответствует энерговыработке за время работы реактора или облучения детекторов (время кампании реактора). Приращение глубины выгорания Δw_{ij} , например за кампанию в точке ij (координаты ТВС или твэла), рассчитывается как разница конечного и начального выгораний ($w_{ij}^{\text{кон}} - w_{ij}^{\text{нач}}$).

Следует отметить, что данный подход при подготовке источника используется в некоторых организациях для расчетов флюенса нейтронов на корпусе, результаты которых эксплуатирующая организация применяет для обоснований безопасности корпусов.

В подходе НТЦ ЯРБ при подготовке источника нейтронов Q дополнительно учитывается зависимость выхода нейтронов деления от выгорания, которая имеет вид:

$$\bar{\nu} = \nu_0 + \nu_1 w + \nu_2 w^2,$$

где:

$\bar{\nu}$ – выход нейтронов на акт деления в топливе с выгоранием w ;

ν_0, ν_1, ν_2 – коэффициенты полинома (рассчитываются по специальной программе).

Источник нейтронов в точке ij задается в виде произведения ($\bar{\nu}_{ij} \bar{w}_{ij}$), где $\bar{\nu}_{ij}$ – выход нейтронов на акт деления в топливе с выгоранием $\bar{w}_{ij} = (w_{ij}^{\text{кон}} + w_{ij}^{\text{нач}}) / 2$.

В методике расчета НТЦ ЯРБ (как и в методиках других организаций) реализован учет потвального распределения энерговыделения в ТВС двух периферийных рядов. Потвальное распределение приращения выгорания за время облучения рассчитывается по программе ПЕРМАК, также входящей в пакет аттестованных расчетных программ, используемых на АС. С помощью разработанной в НТЦ ЯРБ программы потвальное распределение трансформируется в распределение источника нейтронов в соответствии с пространственной сеткой в (r, θ) геометрии, используемой при расчете по коду DORT.

Распределение источника по высоте активной зоны в (r, z) геометрии (особенно важно для рассмотрения) рассчитывается на основе высотных распределений источников в ТВС из двух периферийных рядов. В направлении вертикальной экспериментальной штанги (по азимуту) высотные распределения в ТВС учитываются с соответствующим весом. Вес различных ТВС был определен предварительно в отдельном расчете.

В расчете учтена зависимость спектра нейтронов деления от выгорания топлива (учитывается накопление и деление ^{239}Pu).

В настоящее время вышеприведенная методика подготовки источника является штатной при рутинных расчетах флюенса на корпусе как в эксплуатирующей организации, так и в НТЦ ЯРБ.

2.3. Расчет по штатной методике и сравнение с экспериментом

Результат расчета представляет собой значение СНФ в энергетической группе нейтронов. В относительном виде пространственное распределение СНФ полностью соответствует распределению флюенса, например накопленного за кампанию или за время облучения НАД.

На основе групповых СНФ рассчитываются скорости реакций или активности для соответствующих НАД, приведенные на конец облучения. В расчетно-экспериментальном анализе значения скоростей реакций (или активностей) сравниваются с результатами измерений.

На рис. 4 приведен пример сравнения азимутальных распределений СНФ для уровня вблизи центра активной зоны. Видно, что расчетные и экспериментальные распределения по форме очень близки. Такое совпадение наблюдается практически для всех исследований на ВВЭР-1000.

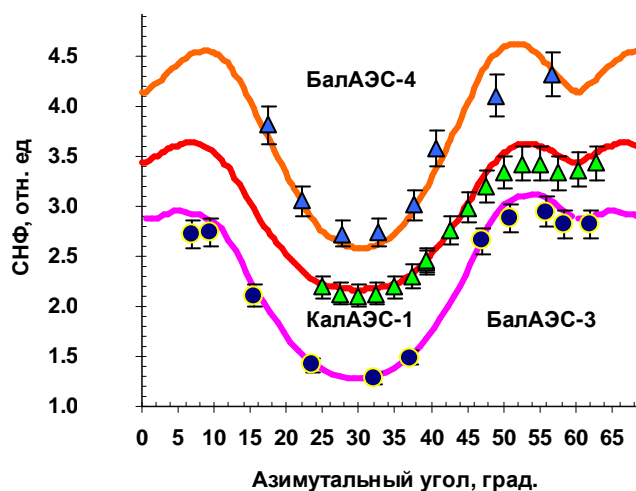


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных азимутальных СНФ быстрых нейтронов за корпусами реактора энергоблоков № 3, 4 Балаковской АЭС и № 1 Волгоградской АЭС

При сравнении высотных распределений ФПН выявлены некоторые особые закономерности, которые и являются предметом настоящего анализа. На рис. 5 показаны сравнения высотных распределений расчетных и экспериментальных скоростей реакций (активностей), полученные на различных энергоблоках с ВВЭР-1000. Анализировались реакции детекторов-мониторов $^{54}\text{Fe}(n,p)$ и $^{58}\text{Ni}(n,p)$. Данные пороговые реакции характеризуют СНФ или флюенс нейтронов с энергиями выше 3 и 2,5 МэВ соответственно, т.е. они характеризуют поле быстрых нейтронов.

Форма расчетных распределений ФПН за корпусом реактора, полученных по штатной методике, коррелирует с использованным в расчете распределением источника нейтронов по высоте активной зоны. Напомним, что данное распределение источника получено исходя из распределений глубины выгорания (МВт-сут/кг U) по высоте ТВС, которое характеризует энерговыработку. Как уже отмечалось, распределения глубины выгорания были получены из расчетов по аттестованным программам БИПР и ПЕРМАК.

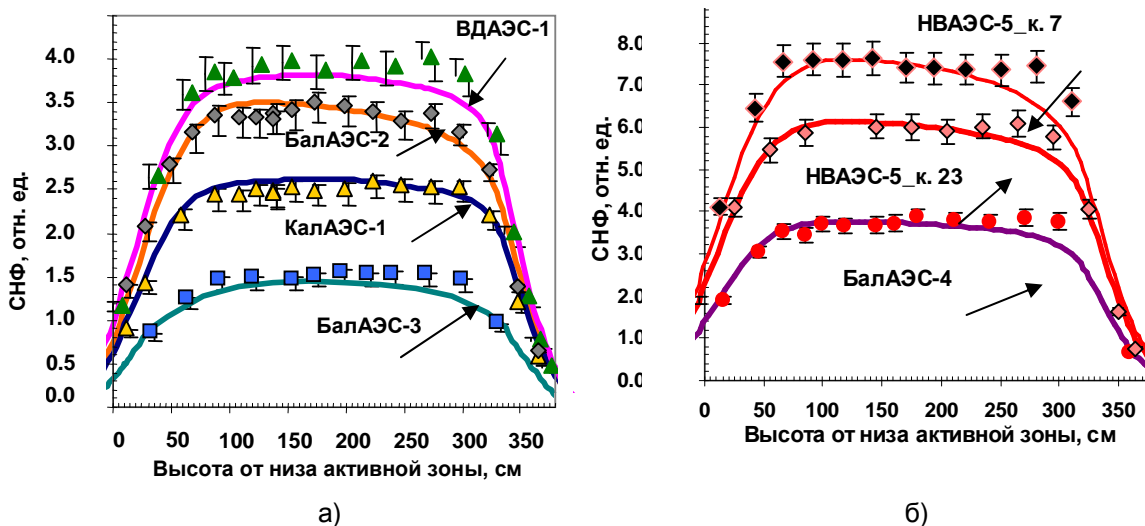


Рис. 5. Расчетные (по выгоранию) и экспериментальные распределения скоростей реакций СНФ быстрых нейтронов по высоте за корпусами реакторов энергоблоков:
 а) № 2 и 3 Балаковской АЭС, № 1 Калининской АЭС, № 1 Волгоградской АЭС;
 б) № 4 Балаковкой АЭС, № 5 Нововоронежской АЭС (кампании 7 и 23)

Типичная форма распределения глубины выгорания за кампанию ВВЭР-1000 (рис. 3), а следовательно и источника нейтронов для расчета переноса имеет ярко выраженный максимум в нижней половине активной зоны и характеризуется положительным офсетом (интеграл энерговыделения в нижней половине зоны больше, чем в верхней). Такую же форму следует ожидать и в расчетном распределении флюенса быстрых нейтронов по высоте за корпусом реактора (см. рис. 5). Однако результаты измерений за время кампании показывают, что на уровне верхней части активной зоны наблюдается ярко выраженный локальный рост ФПН (или флюенса, накопленного за кампанию).

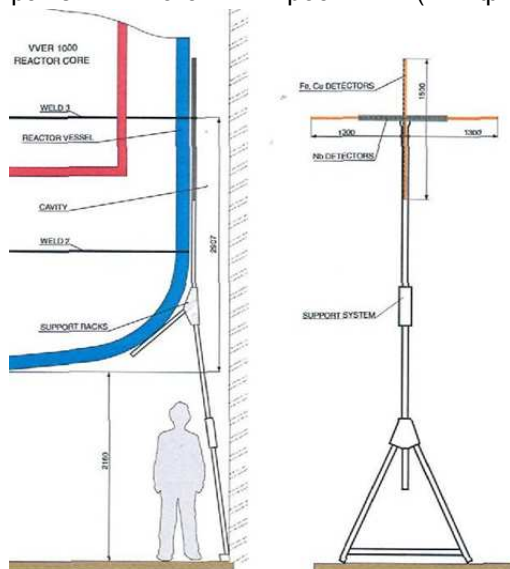


Рис. 6. Схема установки конструкции с НАД за корпусом реактора ВВЭР-1000 энергоблока № 6 АЭС Козлодуй

Тем не менее, даже эти исследования, результаты которых представлены на рис. 7 и 8, показывают неоднозначность расчета и эксперимента. На рис. 7 показано необъяснимое расхождение расчетного и измеренного профилей, а на рис. 8 – смещение максимума флюенса при измерениях в область выше активной зоны.

Следует отметить, что, несмотря на множество проведенных измерений за корпусами ВВЭР-1000 на Украине, Болгарии и Чехии и наличие большого количества публикаций по анализу азимутальных распределений (где наблюдается хорошее совпадение расчета и эксперимента), имеется очень ограниченное количество опубликованных высотных распределений (за исключением публикаций НТЦ ЯРБ).

Учитывая, что отмеченная закономерность наблюдается практически во всех экспериментальных исследованиях для энергоблоков с ВВЭР-1000, данный факт исключает возможность каких-либо ошибок в экспериментальной методике или влияние случайного локального эффекта.

Таким образом, можно констатировать, что эффект завышения экспериментального распределения флюенса быстрых нейтронов за корпусом ВВЭР-1000 в верхней части уровня активной зоны присутствует, если в расчете переноса нейтронов использовать в качестве источника нейтронов распределение глубины выгорания, рассчитанное по штатным нейтронно-физическим программам. Еще раз напомним, что в эксплуатирующей организации при обоснованиях флюенса быстрых нейтронов на корпусе используется именно такой расчетный подход.

Разумного объяснения данной закономерности до сих пор не было дано. Следует отметить, что измерения флюенса за корпусом по всей высоте активной зоны и выше проводятся, практически, только по методике НТЦ ЯРБ (которая также стала использоваться на Украине). В закорпусных измерениях на ВВЭР-1000 в Болгарии на АЭС Козлодуй [5] и Чехии на АЭС Темелин [6] используется методика установки детекторов на конструкцию, устанавливаемую снизу (рис. 6), которая позволяет измерить флюенс не по всей высоте активной зоны, а только в нижней половине и части верхней половины, в силу недоступности из-за расположения опорной консоли.

Тем не менее, даже эти исследования, результаты которых представлены на рис. 7 и 8, показывают неоднозначность расчета и эксперимента.

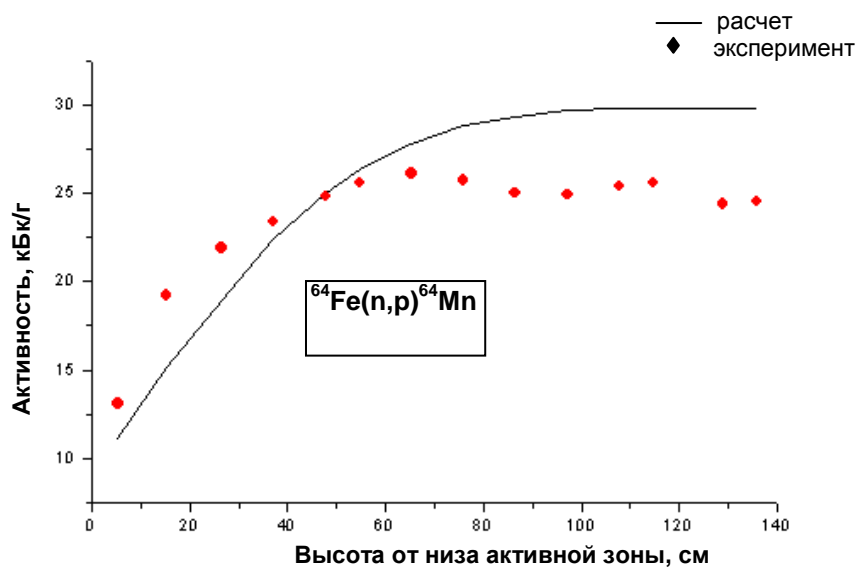


Рис. 7. Сравнение расчета и измерений по высоте за корпусом реактора ВВЭР-1000 энергоблока № 6 АЭС Козлодуй

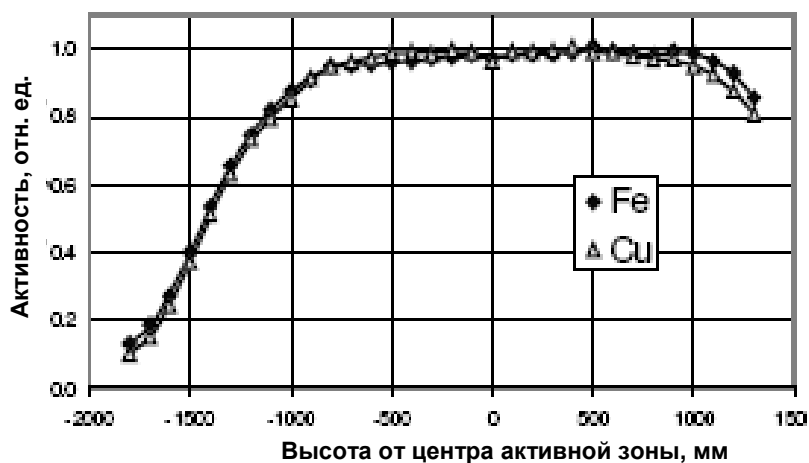


Рис. 8. Распределение активностей Fe и Cu по высоте, измеренных за корпусом реактора ВВЭР-1000 энергоблока № 1 АЭС Темелин (Чехия)

Эксперимент показывает, что возможны случаи, когда локальный максимум флюенса быстрых нейтронов на корпусе наблюдается в верхней части относительно высоты активной зоны, т.е. вблизи шва № 4, в то время как в эксплуатирующей организации всегда считалось, что максимум находится внизу на уровне шва № 3. Таким образом, оценки флюенса на сварном шве № 4 могут быть неконсервативны. Данный факт следует учиты-

вать при оценке хрупкой прочности корпуса, так как предельно-допустимый флюенс из-за протекания термошока меньше на шве № 4 по сравнению с аналогичной величиной для шва № 3. Факт, что текущий флюенс на шве № 4 может быть больше, чем на шве № 3, только усугубляет ситуацию.

2.4. Подготовка источника нейтронов по значениям ДПЗ

Полученные несовпадения расчетных (на основе данных по выгоранию) и экспериментальных результатов (форм распределения) говорят о необходимости проведения более глубокого анализа распределения параметров активной зоны. В связи с этим в инициативном порядке был проведен детальный анализ результатов внутриреакторных измерений и сопутствующих им вычислений в СВРК.

СВРК предназначена для измерения параметров, определяющих состояние активной зоны реактора, обработки указанной информации, проведения ядерно-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 с семью родиевыми детекторами прямой зарядки (ДПЗ), расположенными равномерно по высоте ТВС (рис. 9).

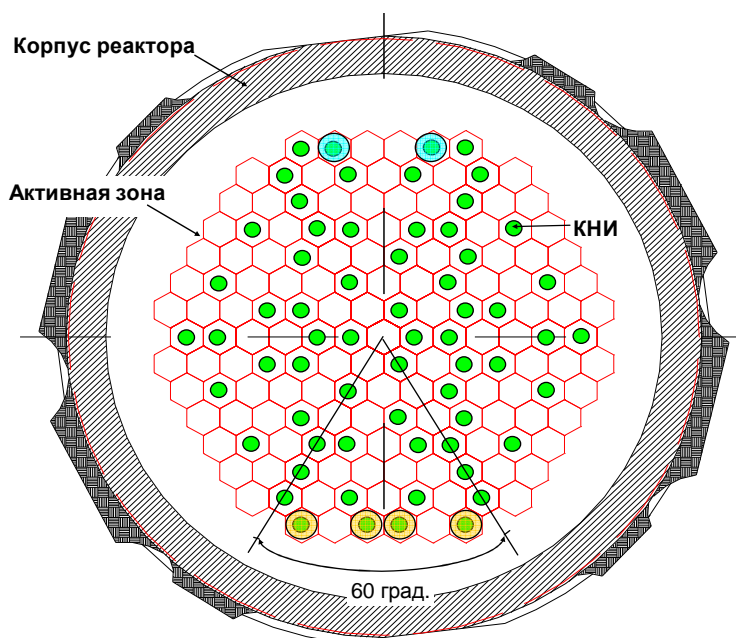


Рис. 9. Картограмма размещения КНИ в активной зоне ВВЭР-1000

По показаниям ДПЗ и термопар поле энерговыделения восстанавливается на определенный момент времени в зависимости от объема активной зоны. Восстановление проводится с помощью программы ПИР-А, также аттестованной к применению на АС.

При анализе последних экспериментальных данных измерений флюенса за корпусами реакторов энергоблоков № 4 Балаковской АЭС и № 1 Волгодонской АЭС по показаниям ДПЗ были определены высотные распределения энерговыделений.

Распределения энерговыделения получены для всей кампании с интервалом не более 10 календарных суток при стационарном режиме работы (это особо важный фактор). Источник нейтронов по высоте активной зоны формируется на основании имеющихся данных для периферийного ряда в 60-градусном секторе, напротив установки экспериментального устройства (напротив II оси), рис. 9. Данные по кассетам № 2 и 5 для периферийного ряда ТВС в рассматриваемом 60-градусном секторе идентифицируются с

данными для симметричных кассет № 159 и 162. После обработки имеющейся информации по показаниям ДПЗ за всё время кампании (через 10 суток) были получены средние распределения энерговыделений для первого ряда периферийных ТВС в рассматриваемом секторе симметрии. На рис. 10 показаны профили, полученные на реакторе энергоблока № 4 Балаковской АЭС. Средние распределения энерговыделения характеризуют профиль энерговыработки за время кампании.

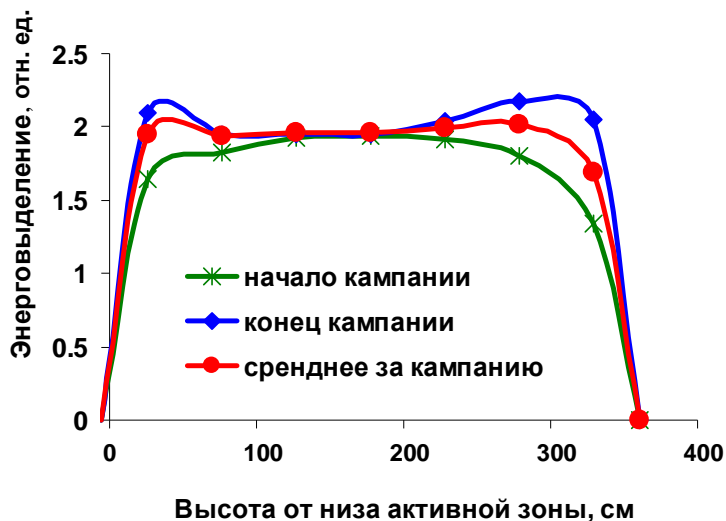


Рис. 10. Изменение распределения энерговыделения для периферийной ТВС за кампанию, оцененное на основе показаний ДПЗ

Распределение источника по высоте активной зоны в (r, z) геометрии на основе данных СВРК рассчитывается по аналогии со штатной методикой, где вместо распределений выгораний используется среднее за кампанию энерговыделение, полученное по СВРК.

Сравнение полученного распределения источника нейтронов с источником, рассчитанным по выгоранию, представлено на рис. 11. Можно отметить отличие форм распределения источника нейтронов, полученных в этих двух подходах. Наблюдаются ярко выраженные локальные максимумы внизу и вверху зоны, определенные по показаниям СВРК. Данное распределение источника нейтронов в активной зоне использовалось для нового расчета ФПН за корпусом реактора ВВЭР-1000 по модели, применяемой в штатной методике расчета.

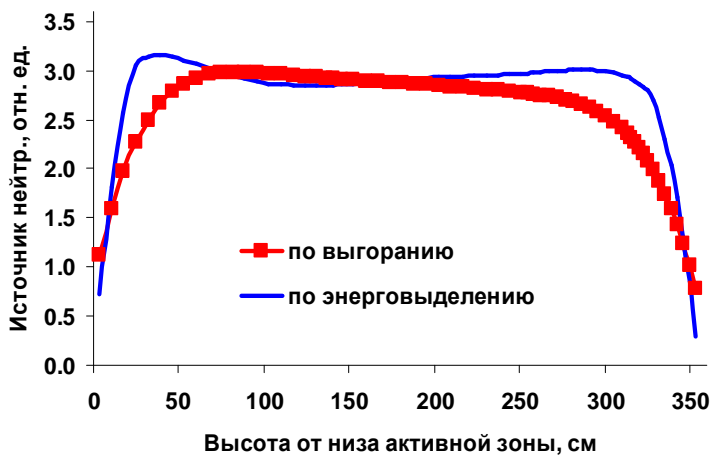


Рис. 11. Распределение источника нейтронов по высоте активной зоны, полученное двумя методами

2.5. Расчет по новому источнику и сравнение с экспериментом

Источник, подготовленный на основе данных СВРК, был использован при расчете переноса нейтронов и ФПН за корпусами реакторов нескольких энергоблоков с ВВЭР-1000 Российских АС. На рис. 12 представлены расчетные распределения СНФ быстрых нейтронов для различных энергетических диапазонов. Форма распределений отражает используемое распределение источника нейтронов в активной зоне. Максимум поля нейтронов наблюдается в верхней части активной зоны.

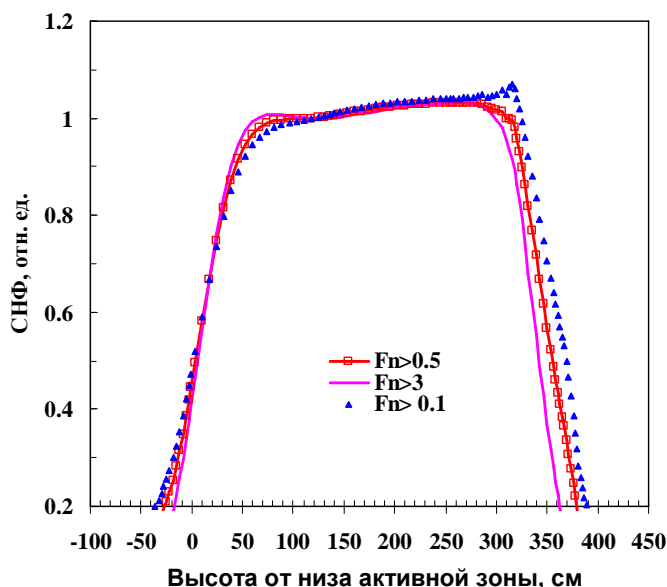


Рис. 12. Расчетные (по энерговыделению) распределения СНФ в зависимости от высоты за корпусом реактора энергоблока № 1 Волгодонской АЭС

Расчетные высотные СНФ сравниваются с имеющимися экспериментальными данными (рис. 13). Форма измеренных и расчетных распределений совпадает в пределах 10–15 %.

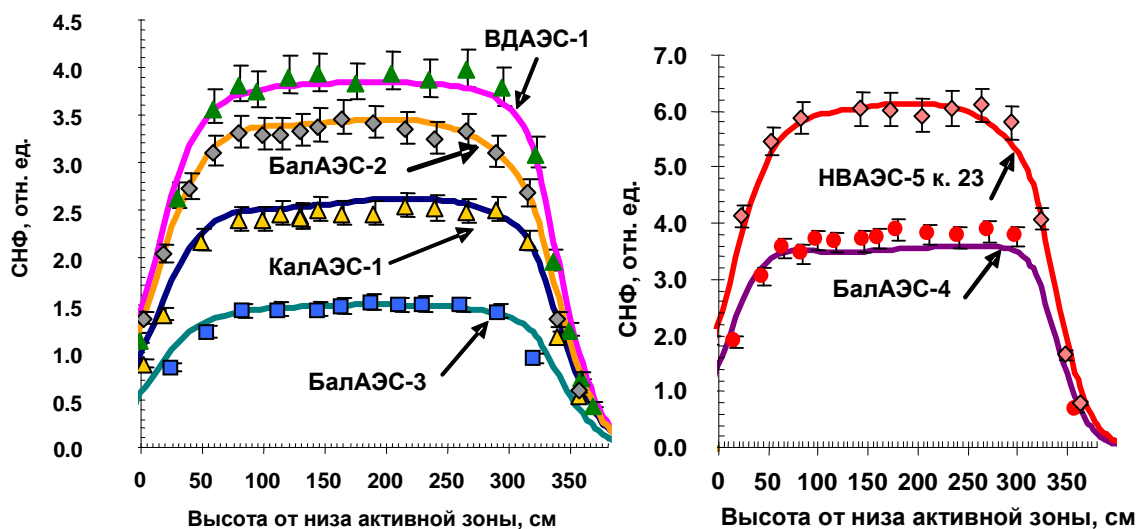


Рис. 13. Расчетные (по энерговыделению СВРК) и экспериментальные распределения СНФ в зависимости от высоты за корпусами реакторов ВВЭР-1000

Аксиальный максимум поля нейтронов за корпусом реактора наблюдается в верхней части активной зоны на высоте примерно 270–300 см от низа активной зоны.

Совпадение результатов расчета по источнику нейтронов, подготовленному по показаниям ДПЗ, с данными эксперимента показывает, что такой подход дает более корректный результат по сравнению со штатным подходом по подготовке источника.

Как видно из рис. 14, расчет с новым источником показал, что шов № 4 расположен в районе локального максимума флюенса быстрых нейтронов, это было замечено ранее при анализе экспериментальных данных. Однако традиционно считалось, что максимум флюенса находится вблизи шва № 3. На это различие следует обращать внимание при анализе хрупкой прочности корпуса реактора ВВЭР-1000.

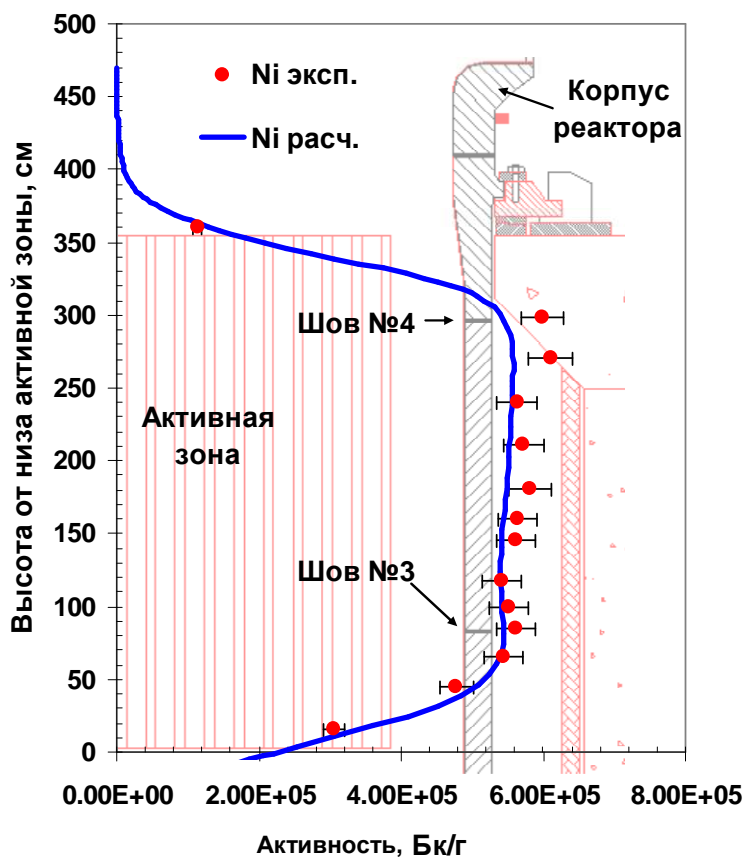


Рис.14. Сравнение данных расчета и эксперимента с учетом расположения сварных швов ВВЭР-1000 (энергоблок № 4 Балаковской АЭС)

3. Возможность нового использования результатов нейтронно-активационных измерений за корпусами ВВЭР-1000

Вернемся к анализу источника нейтронов в активной зоне. Если решать обратную задачу, т.е. по результатам внекорпусных измерений восстанавливать источник нейтронов в зоне, то можно получить, что восстановленное высотное распределение источника и соответствующее ему распределение выгорания не соответствуют полученному из нейтронно-физических расчетов. Задача восстановления выгорания по внекорпусным измерениям с НАД решается аналогично уже решенной задаче оценки высотного распределения энерговыделения по показаниям ионизационных камер системы аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП), расположенных в каналах в биозащите. При этом в канале

должна быть гирлянда не менее чем из 3 камер [7]. Данный метод контроля внедрен в настоящее время на АЭС Тяньвань в Китае.

Предлагаемый метод восстановления выгорания по внекорпусным измерениям с помощью НАД по сравнению с методом контроля распределения энерговыделения по АКНП имеет ряд преимуществ. НАД располагаются непосредственно на корпусе, где нет экранировки биозащитой и опорной консолью, создающей неоднородные условия работы камер в гирлянде. Они регистрируют быстрые нейтроны – непосредственный результат деления (выгорания). НАД в большом количестве могут располагаться по высоте корпуса, получая тонкую структуру в распределении (вплоть до непрерывной, если использовать проволоку). Если располагать несколько вертикальных штанг в разных азимутальных направлениях, можно путем суперпозиции, с учетом веса каждой ТВС, оценивать приращение глубины выгорания в отдельных периферийных ТВС. Это важный момент, так как высотное расхождение измерений и расчетов показало, что расчетное выгорание в ТВС не подтверждается однозначно результатами внекорпусных измерений.

Заключение

1. В данной работе были проанализированы имеющиеся в базе НТЦ ЯРБ экспериментальные данные, полученные в результате нейтронно-активационных измерений за корпусами реакторов ВВЭР-1000 на нескольких российских и зарубежных АС. По расчетной методике, используемой условно в качестве штатной как в НТЦ ЯРБ, так и в эксплуатирующей организации, выполнены расчеты ФПН и проведено сравнение с экспериментальными данными.

2. Было обнаружено, что высотные расчетные и экспериментальные распределения ФПН (или флюенса быстрых нейтронов) имеют закономерное расхождение, особенно в верхней части в пределах высоты активной зоны. Эксперимент практически всегда значительно (более 20 %, а на уровне центра активной зоны обычно наблюдается ± 10 %) превышает расчет. Данное расхождение происходит, если в штатной методике использовать подготовку источника нейтронов на основе расчетных данных по выгоранию топлива в периферийных ТВС. До настоящего времени анализ такого расхождения не проводился.

3. Анализ показал, что во многих случаях максимум в экспериментальном высотном распределении флюенса быстрых нейтронов за корпусом реактора наблюдается в верхней части активной зоны, т.е. вблизи шва № 4, в то время как исходя из расчетов всегда считалось (в том числе и в эксплуатирующей организации), что максимум находится внизу на уровне шва № 3. Таким образом, установлено, что расчетные оценки флюенса быстрых нейтронов на сварном шве № 4 могут быть не консервативны. Это следует учитывать при оценке хрупкой прочности корпуса, так как предельно-допустимый флюенс из-за протекания термошока меньше на шве № 4 по сравнению с аналогичной величиной для шва № 3. Факт, что текущий флюенс на шве № 4 может быть больше, чем на шве № 3, только усугубляет ситуацию.

4. Для объяснения расхождения расчета по штатной методике с экспериментальным расчетом был предложен новый метод подготовки источника нейтронов на основе эксплуатационных данных, регистрируемых системой СВРК на АС с ВВЭР-1000. Был проведен детальный анализ показаний ДПЗ во время работы нескольких реакторов энергоблоков с ВВЭР-1000. На основе этих показаний, регистрировавшихся с интервалом не менее 10 суток при стационарных состояниях активной зоны, были получены распределения энерговыделений по активной зоне. Путем интегрирования было получено среднее за кампанию высотное распределение источника, которое использовалось в новом расчете флюенса нейтронов за корпусом. Полученное совпадение результатов расчета по источнику нейтронов, подготовленному по показаниям ДПЗ, с данными эксперимента показало, что такой подход дает более корректный результат по сравнению со штатным подходом подготовки источника. Более того, новый расчет подтвердил возможное наличие максимума в верхней части активной зоны в распределении флюенса на корпусе.

5. Учитывая, что расчетное выгорание в периферийных ТВС не всегда правильно отражает утечку нейтронов через корпус, оцениваемую экспериментально, предложена

методика восстановления высотного распределения источника и соответствующего ему распределения глубины выгорания по результатам внекорпусных нейтронно-активационных измерений. Оценить приращение глубины выгорания в отдельных периферийных ТВС можно, если расположить несколько вертикальных штанг с НАД в разных азимутальных направлениях и использовать их суперпозицию с учетом веса каждой ТВС. Для разработки такой экспериментальной методики оценки выгорания ТВС необходимо провести расширенный эксперимент на одном из энергоблоков с ВВЭР-1000 по методике РБ-018-01.

Список литературы

1. Бородкин Г.И. и др. Методика нейтронного контроля на внешней поверхности корпусов водо-водяных энергетических реакторов АЭС (РБ-018-01). Руководства по безопасности. Вестник Госатомнадзора России, № 6(19), 2001.
2. Rhoades W.A., Childs R.L. The DORT Two-Dimensional Discrete Ordinate Transport Code, Nucl.Sci.&Eng., 99, 1 (May 1988).
3. Borodkin G., Khrennikov N., Konheiser J., Noack K. Neutron Dosimetry Study in the Region of the Support Structure of a VVER-1000 Type Reactor. 13-th International Symposium of Reactor Dosimetry, Alkmaar, May 2008.
4. Borodkin G. and Boehmer B. Validation of 3D Synthesis RPV Neutron Fluence Calculations using VVER-1000 Ex-Vessel Reference Dosimetry Results, 2000 ANS Annual Meeting, June 4-8, 2000, San Diego, California, Transactions of the ANS, volume 82, 2000.
5. Lukanov E., Radoslavov B. Overview of Surveillance Program for Units 5&6 of Kozloduy NPP, Regional workshop on reactor pressure vessel, 2008 Ukraine.
6. Marek M., Zerola L., Brumovskiy M. Neutron Dosimetry in Modified for VVER 1000/V-320 C Type of Reactor Vessels., 13-th International Symposium of Reactor Dosimetry, Alkmaar, May 2008.
7. Изъюров А.С., Лужнов А.М. и др. Применение вне реакторных детекторов для контроля за распределением энерговыделения по высоте активной зоны реакторов PWR. -М.: Информэнерго, 1985. Сер. 3. Атомные электростанции, вып. 7.