

С. Э. Яновский, М. Л. Еременко,  
Ю. Н. Овдиенко

Государственный научно-технический центр  
по ядерной и радиационной безопасности, г. Киев, Украина

## Разработка подходов к анализу чувствительности модели расчета флюенса нейтронов на корпуса реакторов ВВЭР на базе комплекса кодов DOORS

*Обосновывается важность проблемы анализа чувствительности расчетных кодов к определению флюенса нейтронов на корпус реактора. Предложены методологические подходы для такого анализа на модели расчетного кода DORT. Приведен пример расчета при реализации консервативного набора исходных параметров.*

*Ключевые слова: ВВЭР, ТВС, активная зона, нейтронно-физические расчеты, анализ безопасности, флюенс, анализ чувствительности расчетных кодов.*

**С. Е. Яновський, М. Л. Єременко, Ю. М. Овдієнко**

**Розробка підходів до аналізу чутливості моделі розрахунку флюєнсу нейтронів на корпус реактора ВВЕР-1000 на базі комплексу кодів DOORS**

*Обґрунтовується важливість проблеми аналізу чутливості розрахункових кодів до визначення флюєнсу нейтронів на корпус реактора. Запропоновано методологічні підходи для такого аналізу на моделі розрахункового коду DORT. Наведено приклад розрахунку з консервативними значеннями параметрів.*

*Ключові слова: ВВЕР, ТВЗ, активна зона, нейтронно-фізичні розрахунки, аналіз безпеки, флюєнс, аналіз чутливості розрахункових кодів.*

**В** Украине Национальной атомной энергокомпанией «Энергоатом», Кабинетом Министров Украины четко определена стратегия развития атомной энергетики. Важнейшая составляющая данной стратегии — продление срока эксплуатации АЭС на основе оценки и продления ресурса энергоблока. В свою очередь, ресурс энергоблока практически полностью определяется ресурсом корпуса реактора, который подвержен сильному радиационному излучению и, как следствие этого, — охрупчиванию. Поэтому задача точной оценки флюенса нейтронов на корпус реактора актуальна в рамках эксплуатации АЭС.

Политикой и стратегией Государственного научно-технического центра по ядерной и радиационной безопасности (далее — ГНТЦ ЯРБ) при выполнении технических экспертиз по заказу регулирующего органа Украины является всестороннее использование независимых расчетных оценок и независимых расчетных кодов при анализе документации и выработке обоснованного решения [15]. Аналогичный подход используется и при экспертизе документации по вопросам накопленного флюенса нейтронов на корпус реактора. Специалисты ГНТЦ ЯРБ выполняют большой объем работ по созданию соответствующей методики.

**Описание расчетной методики.** В ГНТЦ ЯРБ для оценки флюенса используется расчетный комплекс DOORS [1], широко применяющийся в мировой практике. Чтобы рассчитать поток нейтронов, для построения модели необходимо большое количество входящих данных, влияющих на результат. В целом достоверность расчета с помощью этого кода определяется точностью и степенью детализации модели.

В нормативных документах США [2] приведены рекомендации к расчетным кодам для определения флюенса, которые определяют два основных метода расчета: метод Монте-Карло и метод дискретных ординат [10]. В Европейской программе для продления ресурса корпусов реакторов VERLIFE [3] сформулированы требования к обязательному проведению анализа чувствительности расчетных кодов и моделей, применяемых для определения флюенса.

Целью данной работы является разработка подходов для анализа чувствительности к определению флюенса нейтронов на корпус реактора относительно входящих параметров (данных). Для достижения поставленной цели необходимы:

- выбор исходных параметров, относительно которых проводится анализ чувствительности;
- обоснование рамок (диапазонов) изменения этих параметров;
- разработка методики моделирования этих изменений в методике ГНТЦ ЯРБ, основанной на комплексе DOORS.

Методика расчета флюенса, разработанная в ГНТЦ ЯРБ, с помощью комплекса DOORS описывается схемой, показанной на рис. 1.

Остановимся подробнее на этой схеме расчета.

BUGLE-96 [1] — библиотека сечений для 46 групп нейтронов, используемая для решения задач дозиметрии корпусов реакторов водо-водяного типа. С помощью программы GIP [1] генерируется непосредственно рабочая библиотека, содержащая нейтронно-физические характеристики материалов расчетной модели. С помощью программ HELIOS [4] или CASMO [5] (в сотрудничестве с TUV) подготавливаются (рассчитываются) малогрупповые кон-

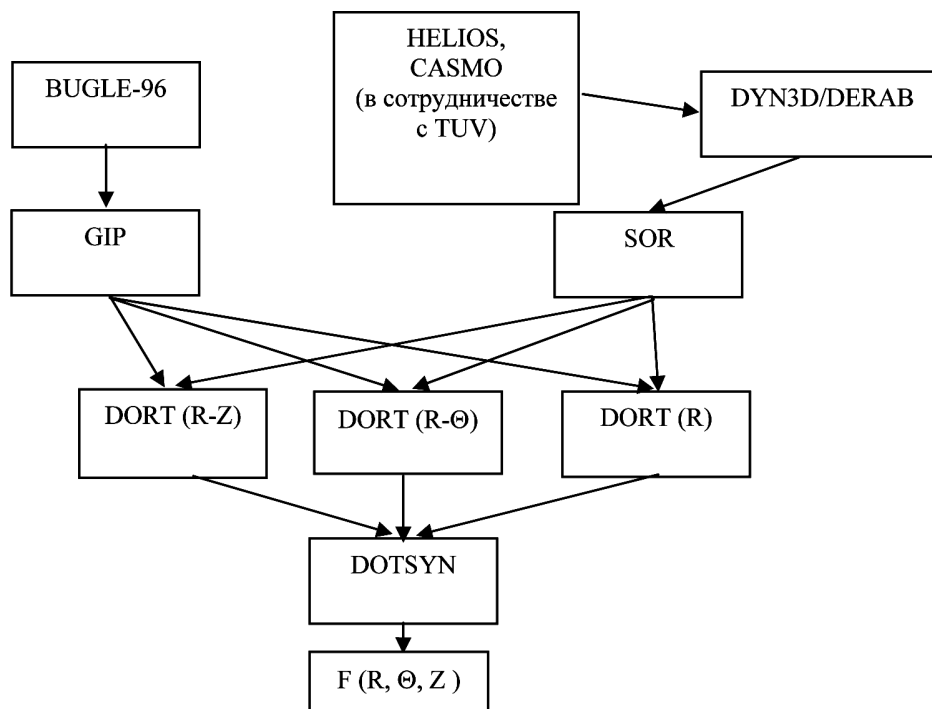


Рис. 1. Схема расчета потока нейтронов в DOORS

станты для программы DYN3D [6]. Программа DYN3D решает двухгрупповое уравнение диффузии нодальным методом, и результатом этого расчета является распределение покассетного энерговыделения, после чего с помощью программы DERAB [12], [13] расчет производится потвэльно. На окончательной стадии расчета источников используется специально разработанная в ГНТЦ ЯРБ программа SOR [14], которая формирует файлы с источниками для трех видов расчета основной программой DORT. Программа DORT использует для расчета модели, основанные на дискретном описании геометрии. В этом случае сечение описываемой геометрии представляется в виде сетки. Каждой расчетной ячейке сетки присваивается свой тип материала согласно чертежу. Естественно, чем мельче наложенная сетка, тем ближе к реальной закладываемая для расчета модель. Результаты расчета распределения потоков по объему являются синтезом трех видов расчета, описанных ниже, которые осуществляют с помощью программы DOTSYN (входит в комплекс DOORS). Для расчета распределения потока по объему в программе DOTSYN применяется соотношение

$$F(R, \Theta, Z) = \frac{F(R, \Theta) \cdot F(R, Z)}{F(R)},$$

где  $F(R, \Theta)$  — распределение, полученное в результате расчета в  $R$ - $\Theta$ -геометрии (цилиндрическая система координат, в горизонтальной плоскости);  $F(R, Z)$  — распределение, полученное в результате расчета в  $R$ - $Z$ -геометрии (Декартова система координат, в вертикальной плоскости);  $F(R)$  — одномерный расчет в  $R$ -геометрии.

Подход для получения трехмерного распределения потока нейтронов путем синтеза решений трех этих расчетов является общепринятым.

В Украине на данный момент эксплуатируются два типа реакторов ВВЭР, а именно ВВЭР-1000 и ВВЭР-440. Реакторы ВВЭР-440 эксплуатируются на энергоблоках № 1

и № 2 Ровенской АЭС, и между этими двумя реакторами существует различие в конструкции активной зоны: на блоке № 1 в активной зоне реактора, с целью снижения флюенса на корпус, на периферии установлены кассеты-экраны. Поэтому модель DORT для ВВЭР-440 разрабатывалась в двух вариантах — соответственно для блоков № 1 и № 2 РАЭС. Далее рассмотрим особенности моделей реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440, а также подходы к анализу чувствительности с учетом особенности конструкций этих реакторов.

**Расчетная модель ВВЭР-1000** представляет собой 60°-й сектор симметрии реактора (рис. 2).

Дискретизация расчетной сетки для модели следующая. Шаг расчетных узлов сетки в направлении по радиусу — от 1 до 10 мм, шаг в направлении  $Z$  — от 3 мм до 1 см,

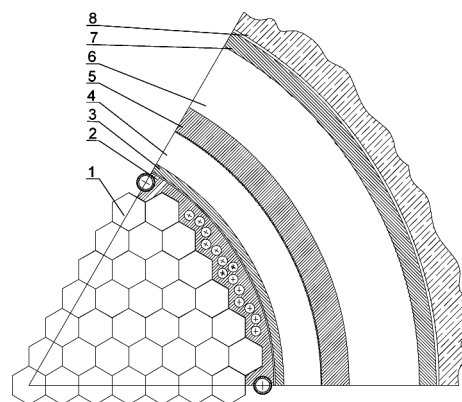


Рис. 2. Схема 60°-го сектора симметрии реактора с корпусом, внутрик корпусными устройствами (ВКУ), тепловой и биологической защитой: 1 — активная зона; 2 — выгородка; 3 — шахта; 4 — опускная камера; 5 — корпус; 6 — воздушный зазор; 7 — тепловая защита; 8 — бетон (биологическая защита)

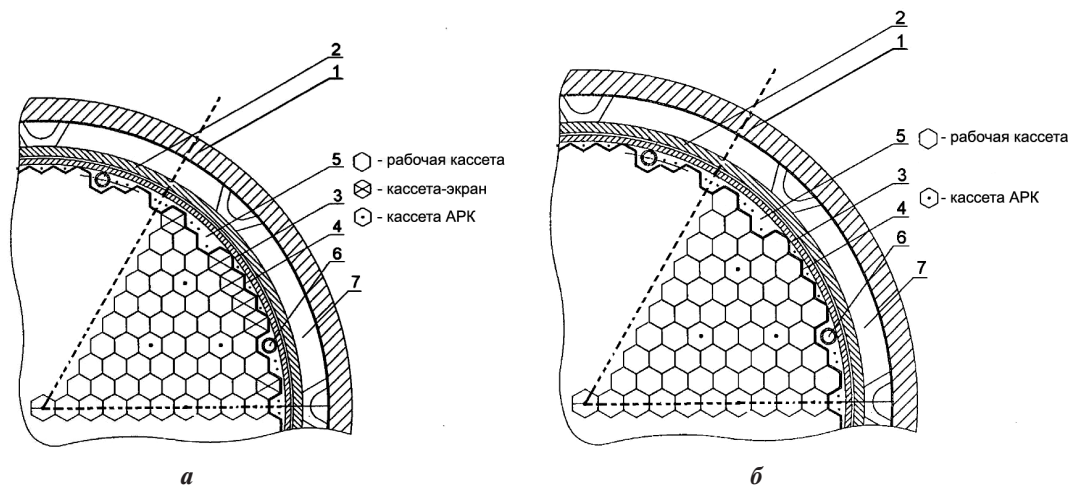


Рис. 3. Схема 60°-го сектора симметрии реактора ВВЭР-440 с корпусом и внутрикорпусными устройствами:

*a* — для блока № 1; *б* — для блока № 2;

1 — корпус; 2 — шахта; 3 — корзина; 4 — гранчатый пояс; 5 — сегмент; 6 — труба системы контроля нейтронного потока; 7 — опускающая камера

дискретизация по углу — с шагом  $0,1^\circ$ . Размеры интервалов (расчетных ячеек) соответствуют всем требованиям, представленным разработчиком расчетного кода [1].

Источники нейтронов для выполнения расчетов при анализе чувствительности выбираются исходя из того, что реактор должен находиться на номинальной мощности (поскольку в таком режиме энергоблок работает большую часть времени), а загрузка активной зоны в кампании должна быть близка к стационарной нагрузке для конкретного типа используемого топлива.

Расчеты проводятся для нейтронов с энергией более 0,5 МэВ для 26 групп. Библиотека нейтронных сечений — BUGGLE-96, разработанная для реакторов PWR, близких по конструкции и спектру нейтронов к реакторам типа ВВЭР.

Параметры исходной модели: внутренний радиус корпуса — проектный, равен 206,8 см; содержание железа во внутрикорпусных устройствах — 68,465 %, остальных нуклидов — согласно ГОСТ [9]; положение кассет в активной зоне определено проектными размерами; температура воды в опускающем участке —  $289^\circ\text{C}$ ; содержание борной кислоты в теплоносителе — 3 г/кг. Параметры точности расчета в основном определены в соответствии с рекомендациями разработчиков [1]: критерий схождения потоков при итерациях —  $5 \cdot 10^{-4}$ ; точность расчета источников (шаг интегрирования) — 1 мм; полиномиальное разложение библиотеки — три члена; степень угловой дискретизации рассеяния нейтрона — 8 (S8).

**Расчетная модель ВВЭР-440** по характеристикам расчетной сетки аналогична ВВЭР-1000. Сектора 60°-й симметрии ВВЭР-440 блоков № 1 и № 2 РАЭС показаны на рис. 3.

Исходная модель расчета имеет следующие параметры: внутренний радиус корпуса — проектный, равен 177,10 см; содержание железа во внутрикорпусных устройствах — 68,465 %, остальных нуклидов — согласно ГОСТ [9]; положение кассет в активной зоне определено проектными размерами; температура воды в опускающем участке —  $267^\circ\text{C}$ ; содержание борной кислоты в теплоносителе — 3 г/кг. Параметры точности расчета в модели DORT [1] для реактора ВВЭР-440 имеют значения, аналогичные модели ВВЭР-1000. Отличается только шаг интегрирования при

расчете источников, который в модели ВВЭР-440 равен 2 мм [14].

Модели для блоков № 1 и № 2 РАЭС в программе DORT отличаются тем, что периферийные кассеты-экраны для блока № 1 задаются другим материалом в расчетной модели из рабочей библиотеки, подготовленной для обоих блоков. Геометрические характеристики расчетного сектора остаются неизменными.

**Обоснование перечня изменяемых параметров для проведения анализа чувствительности.** Для определения влияния каждого из параметров на расчетное значение флюенса необходимо провести ряд расчетов с поочередным изменением каждого из исследуемых параметров в рамках возможного (прогнозируемого) интервала и сравнить полученные результаты с базовой моделью.

Базируясь на технической документации об эксплуатации энергоблоков украинских АЭС с реакторами типа ВВЭР, для исследования были выбраны следующие параметры, влияющие на поток нейтронов:

- производственный допуск на изменение радиуса корпуса;
- сдвиг кассет в результате искривления (сдвиг периферийной кассеты и сдвиг всех кассет вместе);
- изменение температуры воды в опускающем участке;
- изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе;

содержание железа во внутрикорпусных устройствах.

Изменения приведенных параметров как входящих данных для расчета обусловлено реальными изменениями в системе реактора. Но на расчетные значения также влияют параметры самой модели, заложенной при расчете, такие как:

- критерий схождения значений потоков при итерациях;
- шаг расчетной сетки;
- точность расчета источников;
- полиномиальное разложение библиотеки нейтронных сечений;
- угловая дискретизация рассеяния нейтронов;
- влияние детализации описания конструкции кассет-экранов (ВВЭР-440, блок № 1 РАЭС).

**Реализация в расчетной модели.** Для расчетов по каждому из перечисленных выше параметров изменения в модели



расчета касаются разных элементов схемы (см. рис. 1) и реализованы по-разному.

*Производственный допуск на изменение радиуса корпуса.* Изменение данного параметра влечет за собой изменение разбиения расчетной сетки в модели DORT. Расчетная сетка одновременно является основой моделирования геометрии. Изменяются значения внутреннего радиуса корпуса в пределах, определенных паспортом сосуда [7]. Исходя из данных паспорта сосуда для ВВЭР-1000, значение внутреннего радиуса корпуса имеет технологический допуск от  $-3$  до  $+5$  мм. Для реакторов ВВЭР-440 информации о допуске на радиус нет, поэтому для ВВЭР-440 этот параметр принят по аналогии с ВВЭР-1000.

*Сдвиг кассет в результате искривления (сдвиг периферийной кассеты и сдвиг всех кассет вместе).* В ходе эксплуатации под воздействием больших нагрузок положение центральной части кассет в активной зоне может изменяться (искривляться) в радиальном направлении. Критерием величины этого искривления является размер зазора между кассетами, а также между кассетами и выгородкой.

Размер зазора для ВВЭР-1000 составляет 2 мм [11].

Для реакторов ВВЭР-440 применяются ТВС с чехлом. Зазор между кассетами равен 3,0 мм и определяется разностью шага расположения кассет в активной зоне и размером кассеты «под ключ» [16]. Сегодня на РАЭС эксплуатируются чехловые кассеты, искривления которых практически отсутствуют. Однако в России уже эксплуатируются аналогичные кассеты ВВЭР-440, не имеющие чехла. Точнее, чехол заменен жестким каркасом, выполненным из периферийных уголков по аналогии с топливной кассетой ТВСА для ВВЭР-1000. Поэтому рассмотрение случая сдвига кассет в результате искривления актуально для ВВЭР-440 с точки зрения возможности внедрения новых типов топлива на АЭС Украины.

Реализация случая предполагает, что сдвиг кассет осуществляется в радиальном направлении вправо — к корпусу. Рассматриваются два случая: 1) сдвигается одна крайняя периферийная кассета; 2) сдвигаются все кассеты в  $60^\circ$ -м расчетном секторе симметрии. Во втором случае каждый следующий слой кассет после периферийного сдвигается не на 2 мм, а на 4 мм, 6 мм и т. д. Для ВВЭР-440, в активной зоне которого межкассетный зазор 3 мм, соответствующий сдвиг слоев кассет составляет 3, 6, 9 мм и т. д. Величина сдвига возрастает в арифметической прогрессии до центральной кассеты включительно. Смоделировать сдвиг кассет в расчете необходимо с помощью расчета источника (программа SOR на схеме рис. 1), с изменением координат центров кассет. Пример схемы сдвига одной периферийной кассеты приведен на рис. 4.

*Изменение температуры воды в опускном участке.* В процессе эксплуатации температура теплоносителя (воды) на входе в реактор может изменяться в диапазоне предельных значений, определенных в ТРБЭ энергоблока [8] и с учетом погрешности измерения температуры. При

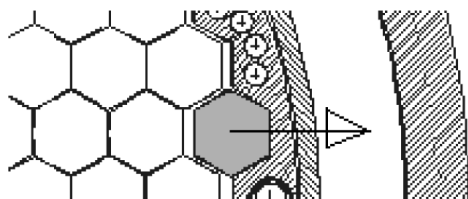


Рис. 4. Пример сдвига одной периферийной кассеты

этом плотность воды уменьшается с ростом ее температуры, и коэффициент ослабления нейтронного потока соответственно тоже уменьшается.

Для анализа зависимости относительного изменения потока нейтронов на корпус предложено провести расчеты с отклонением от проектного значения температуры воды с шагом в  $5^\circ\text{C}$  для диапазона от  $+10$  до  $-10^\circ\text{C}$  [8].

Плотность воды изменяется путем ввода других, измененных согласно расчетным формулам, ядерных концентраций водорода и кислорода в составе воды для опускного участка в файле для расчета рабочей библиотеки. Ядерные концентрации пересчитываются с учетом изменения плотности воды в зависимости от температуры (программа GIP, см. рис. 1).

*Изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе.* Концентрация борной кислоты изменяется на протяжении кампании от 0 до приблизительно 6 г/кг. Концентрация борной кислоты в модели изменяется путем ввода других, определенных процентным содержанием в воде  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , ядерных концентраций изотопов бора  $^{10}\text{B}$  и  $^{11}\text{B}$ , а также концентраций водорода и кислорода в состав материала теплоносителя для расчета рабочей библиотеки программы GIP (см. рис. 1).

*Содержание железа во внутрикорпусных устройствах.* Согласно ГОСТ 5632–72 [9], в стали 08X18H10T, используемой в выгородке и шахте реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, наибольшее содержание железа — 73,60 %, а наименьшее — 66,265 %. Внутрикорпусные устройства, изготовленные из этой марки стали, оказывают влияние на нейтронный поток. Для анализа и оценки этого влияния расчет производится для максимального и минимального значения концентраций Fe по методике, аналогичной для двух предыдущих факторов.

*Критерий сходимости значений потоков при итерациях.* Критерий сходимости потоков в расчетной ячейке, согласно рекомендациям разработчиков программы DORT [1], равен  $5 \cdot 10^{-4}$  для обеих моделей реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Для анализа чувствительности относительно этого параметра необходимо провести расчеты, уменьшая и увеличивая значения критерия на порядок в ту или иную сторону. Изменение данного параметра производится в модели DORT (см. рис. 1).

*Шаг расчетной сетки.* Меньший шаг расчетной сетки дает большую точность, но намного увеличивает время расчета. Поэтому на данном этапе анализа чувствительности требуется определить значение шага, при котором соотношение точности и времени расчета будет оптимальным. Шаг расчетной сетки модели изменяется для разбиения по радиусу и по углу. Для обоих параметров — радиуса и угла (по отдельности) — шаг увеличивается вдвое. Основанием для такого изменения является критерий максимального шага по радиусу в 12 мм, который предъявляет разработчик DOORS [1], и при изменении шага расчетной сетки некоторые из расчетных ячеек этому критерию соответствовать не будут. Для азимутального разбиения критерии приемлемости разработчиком не предъявлены.

*Точность расчета источников.* Точность расчета источников определяется шагом интегрирования, заложенным в программе SOR (см. рис. 1). Шаг интегрирования — это параметр, определяющий степень дискретизации каждой из ячеек расчетной сетки модели в DORT для расчета источника, попавшего в данную ячейку. На рис. 5 представлены схематично два случая сеток расчета источников с разным шагом интегрирования.

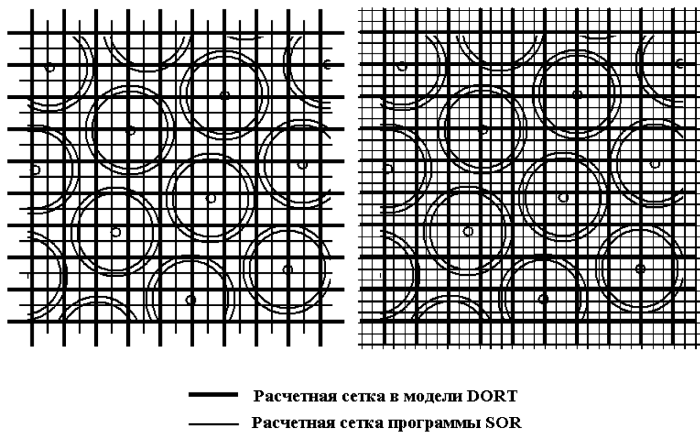


Рис. 5. Пример различных расчетных сеток для модели программы SOR

Шаг интегрирования в базовом расчете — 1 мм. Выбор рамок изменения базировался на следующем. Шаг расчетной сетки — от 4 мм в центре активной зоны до 1 мм для периферийных кассет, поэтому логично принять нижний предел шага интегрирования 4 мм, а верхний — меньше 1 мм, например 0,3 мм. Изменение этого параметра производится в файле для программы SOR.

**Полиномиальное разложение библиотеки нейтронных сечений.** В исходной библиотеке BUGGLE-96 макроскопические сечения задаются функцией в виде полиномов Лежандра. Степень разложения полинома определяет точность задания сечений для расчета. В базовой модели степень разложения равна трем. Реализация изменения параметра полиномиального разложения происходит на стадии подготовки рабочей библиотеки с помощью программы GIP, во входящих файлах для этой программы.

**Угловая дискретизация рассеяния нейтронов.** Данный параметр в модели DORT определяет степень дискретизации

угла рассеяния нейтрона. В базовой модели использовано S8 приближение. С целью анализа влияния на значения потока нейтронов, в зависимости от степени дискретизации угла рассеяния, требуется провести расчеты с S12 и S16 приближениями для получения более точного моделирования.

**Влияние детализации описания конструкции кассет-экранов (ВВЭР-440, блок № 1 РАЭС).** Для блока № 1 РАЭС кассеты-экраны моделируются как однородный материал — смесь стали и воды. Информация относительно конструкции кассет-экранов от РАЭС неоднозначна. Варианты конструкции приведены на рис. 6.

При анализе конструкции кассет-экранов допускается вероятность «прострела» потоком нейтронов. Особенно это важно для определения флюенса на внутрикорпусные устройства (ВКУ). Поэтому однородная модель кассеты-экрана может давать другие результаты расчета по сравнению с «дискретной» моделью, которая описывает конструктивные особенности кассеты-экрана. Для реализации этого случая изменения касаются модели DORT.

**Пример расчета при реализации консервативного набора исходных параметров.** Как пример влияния неопределенностей исходных данных приведем результаты расчетов для реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 с учетом трех факторов, наиболее влияющих на увеличение нейтронного потока в области корпуса реактора: повышение температуры теплоносителя в опускном канале на 10 °С, уменьшение внутреннего радиуса корпуса на 6 мм, сдвиг всех кассет сектора вправо к корпусу. Результаты расчета с консервативными исходными параметрами представлены на рис. 7, рис. 8 и в табл. 1.

Для расчета в случае с реактором типа ВВЭР-1000 было выбрано состояние на середину 14-й кампании блока № 2 Южно-Украинской АЭС. Мощность реактора — номинальная, составляет 3000 МВт тепловых. Загрузка активной зоны из 163 топливных кассет типа ТВСМ. Загрузка

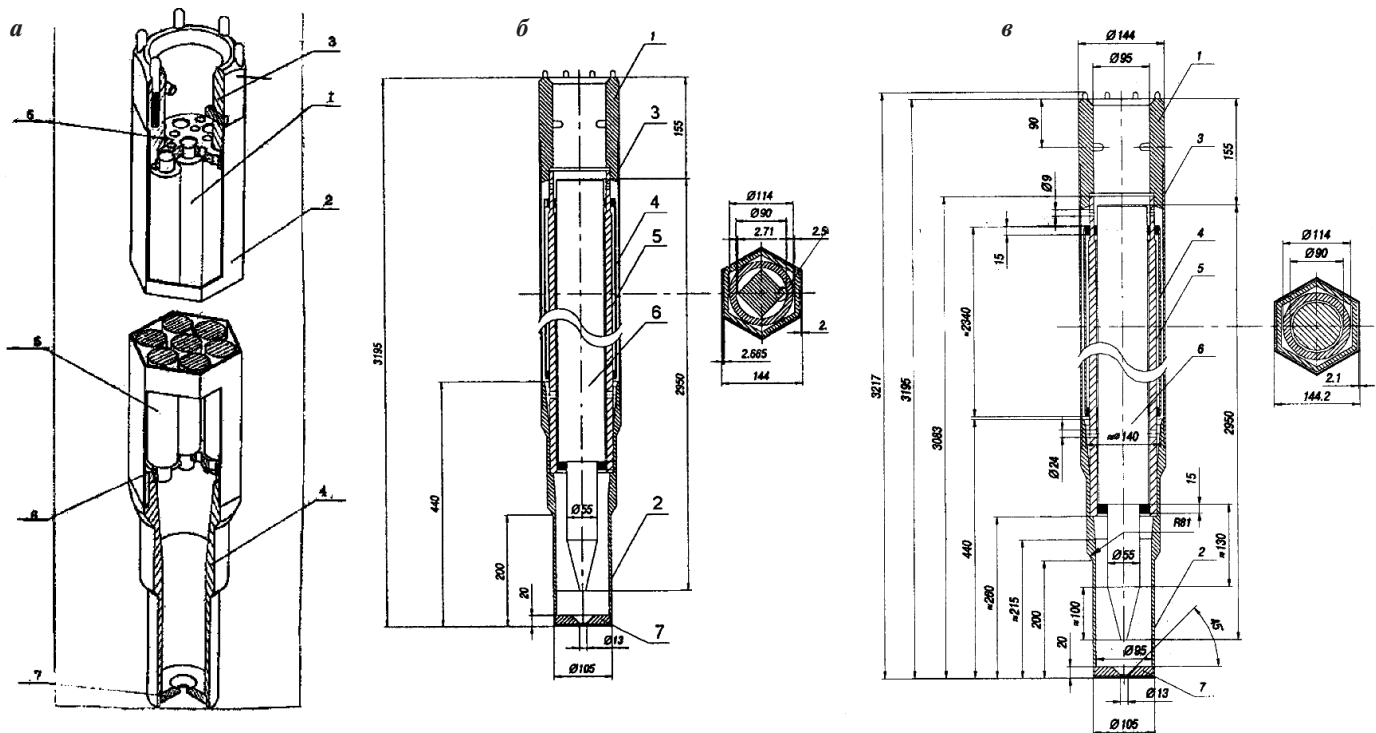


Рис. 6. Варианты исполнения кассет-экранов:

а — вариант исполнения № 1: 1 — пучок; 2 — чехол; 3 — головка; 4 — хвостовик; 5 — пучок стержней (7 шт.); 6 — опорная плита; 7 — заглушка;  
 б, в — варианты исполнения № 2 и № 3: 1 — головка; 2 — хвостовик; 3 — чехол; 4 — шестигранная труба; 5 — цилиндрическая труба; 6 — стержень; 7 — заглушка

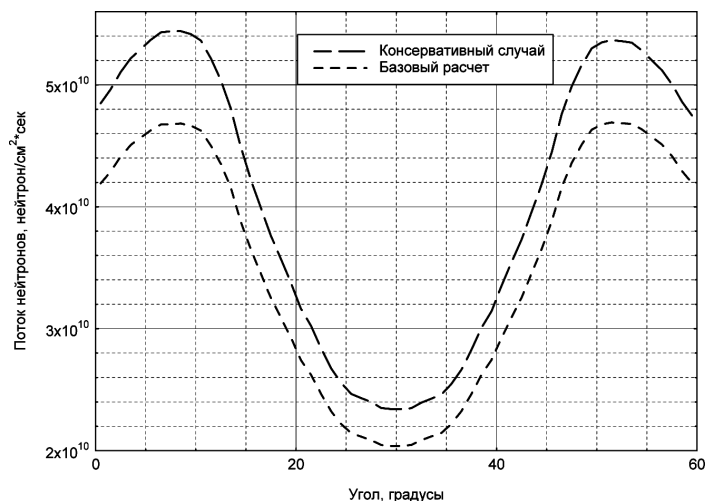


Рис. 7. Азимутальное распределение потока нейтронов энергией больше 0,5 МэВ на внутренней поверхности корпуса реактора ВВЭР-1000 на уровне 60 см ниже середины активной зоны

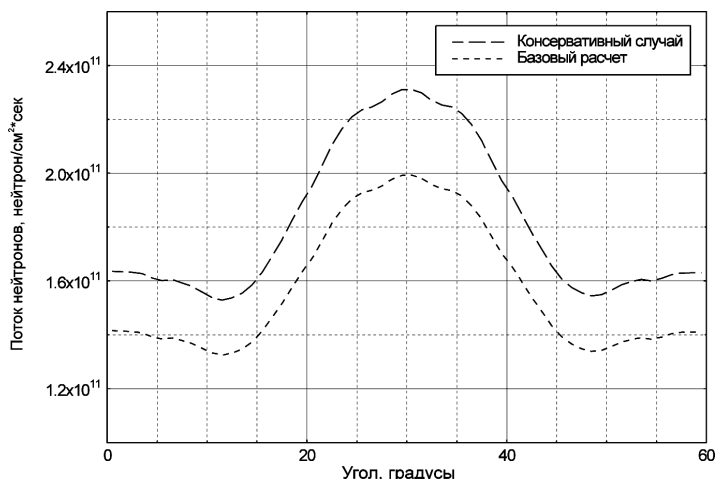


Рис. 8. Азимутальное распределение потока нейтронов энергией больше 0,5 МэВ на внутренней поверхности корпуса реактора ВВЭР-440 на уровне 31,5 см ниже середины активной зоны

активной зоны в этой кампании близка к стационарной загрузке для этого проекта реакторной установки (В-320). Для расчета в случае с реактором типа ВВЭР-440 было выбрано состояние на середину 27-й кампании блока № 2 Ровенской АЭС. Мощность реактора — номинальная, составляет 1375 МВт тепловых.

Таблица 1. Относительное расхождение между базовым и консервативным расчетами

Случай расчета	Координаты измерения относительно середины активной зоны, см	Относительное изменение потока нейтронов $\frac{\delta\Phi}{\Phi}$ , % (внутренняя стенка корпуса, перед наплавкой)
Консервативный расчет для ВВЭР-1000	-60,0	16,19
Консервативный расчет для ВВЭР-440	-31,5	16,08

### Выводы

В статье представлены подходы и методы выполнения анализа чувствительности расчетной модели для оценки флюенса быстрых нейтронов на корпус реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 к исходным параметрам.

Результаты расчета при реализации консервативного набора исходных параметров показали существенную разницу в сравнении с результатами базового расчета. Различие значений потока нейтронов на максимуме распределения достигает 16,19 % для ВВЭР-1000 и 16,08 % для ВВЭР-440, что неоспоримо доказывает необходимость проведения анализа чувствительности моделей к каждому из параметров отдельно. Выполнение данной работы запланировано в ГНТЦ ЯРБ. Представленные результаты могут быть использованы регулирующим органом Украины при разработке рекомендаций или нормативных документов, определяющих процедуру выполнения расчета радиационной нагрузки на корпус реакторов ВВЭР и ВКУ в рамках оценки ресурса.

### Список литературы

1. DOORS 3.2: One-, Two- and Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code System. RSIC Code package CCC-650.
2. Regulatory guide 1.190 "Calculation and dosimetry methods for determining pressure vessel neutron fluence", US nuclear regulatory commission, 2001.
3. Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs "VERLIFE", M. Brumovskiy, European Commission, 2002.
4. Studsvik® Scandpower, HELIOS methods, Version 1.8, November 2003.
5. Rhodes, J., Edenius, M. CASMO-4, A Fuel Assembly Burnup Program, User's Manual, SSP-01/400 Rev.3.
6. Grundmann, U., Rohde, U., Mittag, S., Kliem, S. DYN3D Version 3.2. Code for Calculation of Transients in Light Water Reactors (LWR) with Hexagonal or Quadratic Fuel Elements. Description of Models and Methods, FZR 434, August, 2005.
7. Паспорт сосуда реактора ВВЭР-1000. Схема замора корпуса. Документ № 1152.02.70.000 Д7.
8. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока № 2 ЮУ АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-338) РГ.2.3810.0018.
9. ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионноустойчивые, жаростойкие и жаропрочные.
10. Multigroup One-Dimensional Discrete Ordinates Code System with Anisotropic Scattering.
11. Комплекс кассет ВВЭР-1000 (тип В-302, В-320, В-338). Каталогное описание У 0401.04.00.000 ДКО (ТВСМ).
12. Moller, A., Agte, H., Becker, R., Heinrich, H., Moller, W., Tomas, S. GDR Program Package for Calculating Stationary Neutron-Physical Characteristics of WWER Nuclear Reactors. — KFKI-ZR6-548/1987.
13. Moller, A. DERAB Code Manual, K.A.B.GmbH, Berlin, 1998.
14. Звіт про науково-дослідну роботу за контрактом No. 60040 (Task 3.2) «Розвиток ліцензійних та інспекційних можливостей. Модернізація пакету програм DOORS та розрахункових можливостей ДНТЦ ЯРБ для розрахунків флюенса нейтронів на корпуси реакторів ВВЕР АЕС України» — К.: ДНТЦ ЯРБ, 2003.
15. Ieremenko, M., Bilodid, Y., Ovdienko, Y. Technical Review in SSTC N&RS under new WWER fuel implementation. experience of carrying out of independent verifying calculations: Proceedings of the 8th International Conference WWER Fuel Performance, Modelling And Experimental Support. 26 September — 4 October 2009, Helena Resort, Bulgaria. p. 221-226.
16. Комплекс кассет ВВЭР-440 (тип В-213): каталожное описание У 0440.00.00.000 ДКО.

Надійшла до редакції 07.12.2010.