

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

С. М. Пугач, В. Н. Буканов, А. В. Гриценко, В. Л. Демехин

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Представлена расчетная методика определения условий облучения внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР-1000. Используя разработанную методику, определены условия облучения внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР-1000, в первую очередь выгородки и шахты внутрикорпусной, для ряда топливных кампаний. Исследованы распределения функционалов нейтронного потока на поверхностях внутрикорпусных устройств для разных топливных кампаний.

### Введение

Определение функционалов нейтронного потока (ФНП), воздействующего на внутрикорпусные устройства (ВКУ) ядерного энергетического реактора, является одной из работ, которая необходима для обоснования увеличения срока его безопасной эксплуатации. Конструкция реактора ВВЭР-1000 практически исключает возможность экспериментального определения значений этих функционалов. Решение этой задачи требует применения специальных расчетных методик. Такая методика разработана в отделе проблем дозиметрии ядерных реакторов ИЯИ НАН Украины.

### Расчетная методика определения условий облучения ВКУ

Основой разработанной расчетной методики является пакет программ (рис. 1) для определе-

ния ФНП, характеризующих условия облучения ВКУ в реакторе ВВЭР-1000. Этот пакет программ разработан на основе пакета программ MСРV [1]. Составной частью этих пакетов программ является транспортная программа, выполняющая расчет методом Монте-Карло в многогрупповом приближении теории переноса. Применение метода Монте-Карло связано с тем, что из всех современных методов расчета данный метод имеет наиболее высокий потенциал для получения очень точных решений. Это показал проведенный нами ранее анализ [2]. Кроме того, он позволяет непосредственно работать со сложной геометрией, точными физическими моделями среды и детальной структурой ядерных данных. Расчет при применении такого метода заключается в численном моделировании процесса распространения частиц (нейтронов) в расчетной модели реакторной установки.

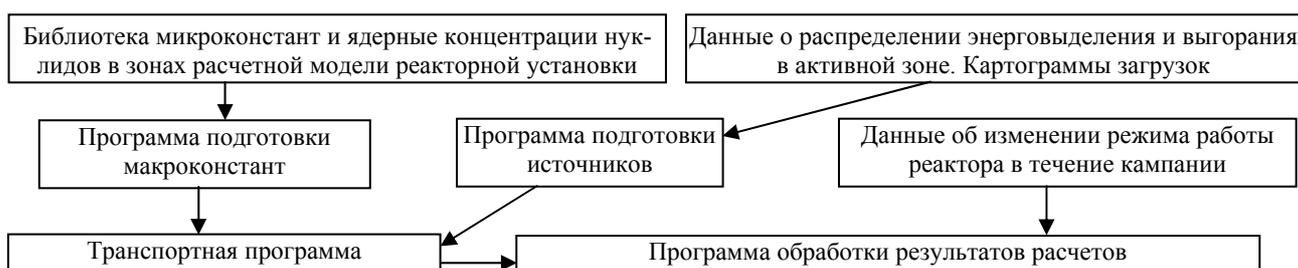


Рис. 1. Общая блок-схема пакета программ для определения ФНП, характеризующих условия облучения ВКУ.

Расчетная модель (рис. 2), достаточно подробно описывающая ВКУ, была разработана на основе конструкторской документации реакторной установки ВВЭР-1000 и отчетов генерального конструктора ОКБ “Гидропресс”. В основу

создания расчетной модели положен зонный принцип, заключающийся в том, что вся модель состоит из отдельных зон, внутри каждой из которых все материальные параметры считаются неизменными.

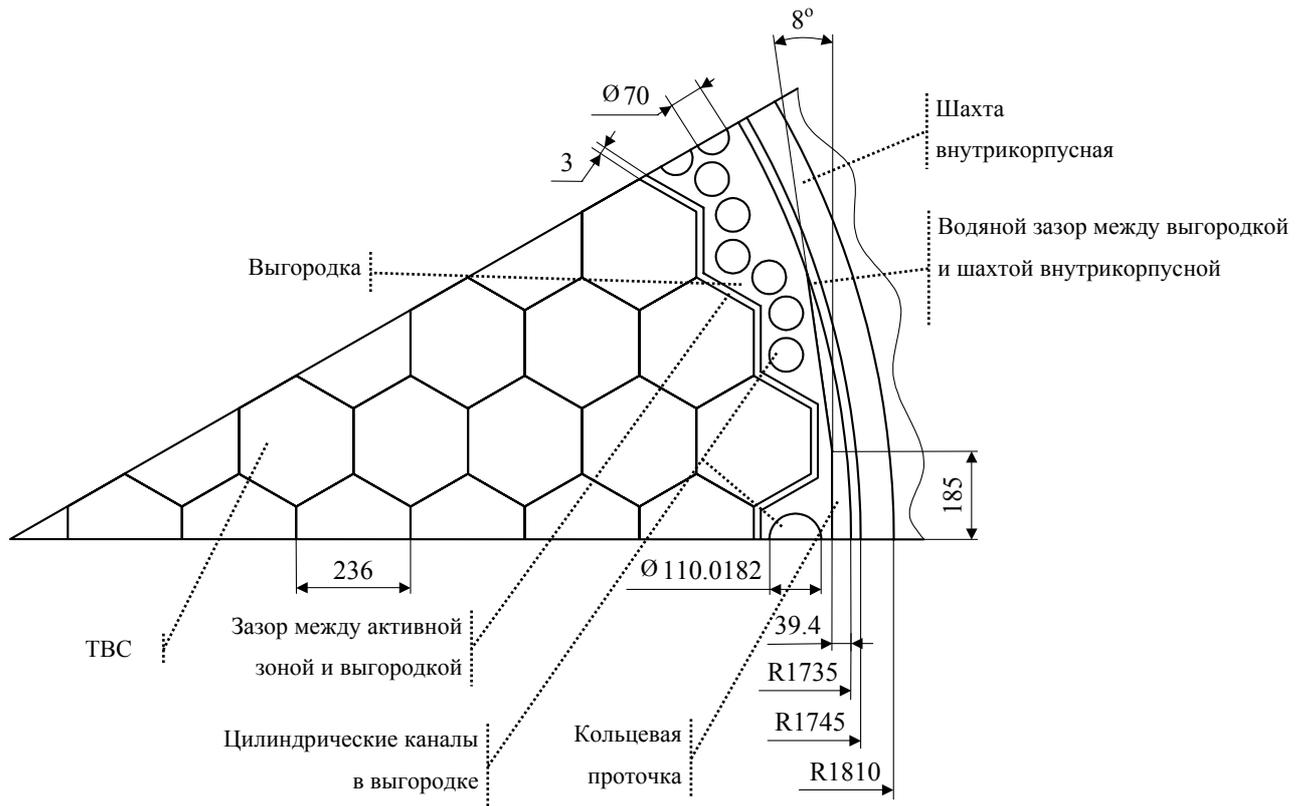


Рис. 2. Часть 30-градусного зеркального сектора симметрии горизонтального разреза 360-градусной расчетной модели реакторной установки от центра активной зоны до опускного участка. Указанные геометрические параметры считаются неизменными по высоте.

### Условия облучения ВКУ

Определение условий облучения ВКУ выполнялось для ряда топливных кампаний. Под условиями облучения понимается набор значений ФНП, к которым, в первую очередь, относятся:

флюенс нейтронов с энергией  $E_n > 0,5$  МэВ  $\Phi_{0.5}$ ;

приведенная к номинальной мощности реактора и усредненная за кампанию интегральная плотность потока нейтронов (ППН) с  $E_n > 0.5$  МэВ  $\Phi_{0.5}$ ;

спектральный индекс, который рассчитывается как отношение флюенса нейтронов с  $E_n > E$  МэВ к флюенсу нейтронов с  $E_n > 3,0$  МэВ ( $SI_E$ ).

Критерием выбора кампаний были характеристики топливной загрузки, влияющие на величину потока нейтронов из активной зоны (АКЗ) реактора. В результате анализа топливных загрузок, реализованных на АЭС Украины, были выбраны несколько кампаний, которые имеют следующие характерные особенности:

1-я кампания энергоблока № 1 ХАЭС, которая характеризуется использованием при компоновке АКЗ только тепловыделяющих сборок (ТВС) первого года службы;

1-я кампания энергоблока № 6 ЗАЭС. Хотя как и для указанной выше кампании при компо-

новке АКЗ используются ТВС только первого года службы, но сама компоновка существенным образом отлична;

7-я кампания энергоблока № 1 ХАЭС, которая характерна тем, что выступающие ТВС в АКЗ имеют высокое начальное обогащение по  $^{235}\text{U}$  и находятся в эксплуатации первый год;

11-я кампания энергоблока № 1 ХАЭС, которая имеет довольно уникальную компоновку периферийного ряда ТВС в АКЗ: среди выступающих ТВС есть как "выгоревшие" с высоким начальным обогащением, так и "свежие" с низким;

кампания 2а энергоблока № 2 ЮУАЭС, которая также имеет нетипичную компоновку периферийного ряда АКЗ. В данном случае выступающие ТВС имеют низкое начальное обогащение и находятся в эксплуатации второй год.

Далее для удобства на графиках будут использоваться следующие обозначения упомянутых выше топливных кампаний: Х-1-1, 3-6-1, Х-1-7, Х-1-11, ЮУ-2-2а соответственно.

Анализ полученных результатов показал, что можно считать постоянной форму аксиального распределения ФНП, основной характеристикой которого является наличие "полки" приблизительно между 80 и 280 см от низа АКЗ (рис. 3). Как можно увидеть на рисунке, в некоторых слу-

чаях эта "полка" может иметь небольшой наклон в сторону уменьшения значений ППН при увеличении высоты. При этом ее размер немного уменьшается при отдалении от АКЗ, а наклон остается практически неизменным.

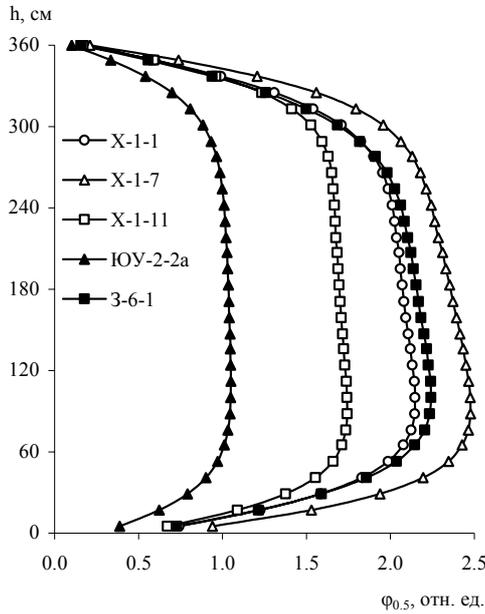


Рис. 3. Аксиальное распределение ППН с  $E_n > 0,5$  МэВ на внутренней поверхности выгородки для азимутального угла  $0^\circ$  для различных кампаний.

Азимутальное распределение ФНП на цилиндрических поверхностях выгородки и шахты для различных кампаний может иметь существенные отличия. Но, как показал сравнительный анализ результатов расчетов нейтронного потока в среде ядерного энергетического реактора, любое азимутальное распределение всех ФНП на всех цилиндрических поверхностях в пределах уровня АКЗ достаточно близко к зеркальной 30-градусной симметрии даже при отсутствии такой симметрии в топливной загрузке. В качестве примера, на рис. 4 - 6 приведены некоторые азимутальные распределения ППН на внешней поверхности выгородки, внутренней и внешней поверхностях шахты. На них также видно, что азимутальные распределения ППН на этих поверхностях имеют глобальные максимумы при  $\sim 8^\circ$  и  $\sim 52^\circ$ , а также локальные минимумы при  $0^\circ$  ( $60^\circ$ ). Крутизна склона пика максимума зависит как от расстояния от АКЗ до соответствующей цилиндрической поверхности, так и от топливной загрузки. При этом общим правилом являются уменьшение крутизны склона и "расширение" самого пика при отдалении от АКЗ.

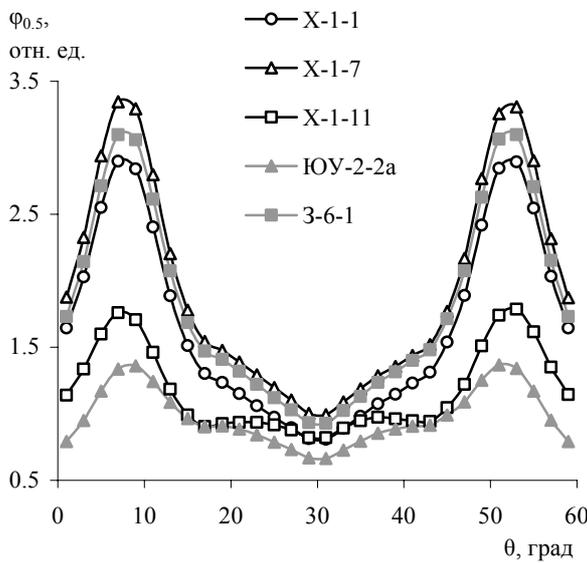


Рис. 4. Азимутальное распределение ППН с  $E_n > 0,5$  МэВ на внешней поверхности выгородки на высоте 171 см от низа АКЗ для различных кампаний.

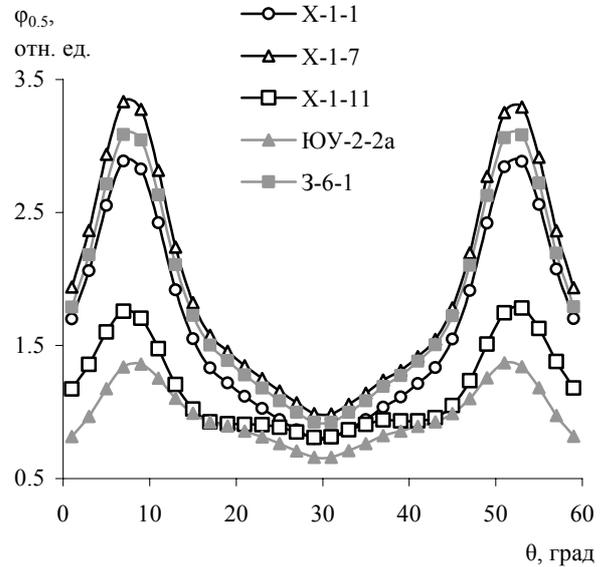


Рис. 5. Азимутальное распределение ППН с  $E_n > 0,5$  МэВ на внутренней поверхности шахты на высоте 171 см от низа АКЗ для различных кампаний.

Между азимутами  $15^\circ$  и  $45^\circ$  распределения ППН на всех цилиндрических поверхностях имеют глобальный минимум, который располо-

жен на азимуте  $30^\circ$ , но вообще ведут себя по-разному. Для трех кампаний (X-1-1, X-1-7, 3-6-1) наблюдается непрерывное уменьшение значений ППН в направлении от границ указанного диапа-

зона к его центру. Для кампании ЮУ-2-2а такая ситуация имеет место только за выгородкой, а на ее внешней поверхности возле границ диапазона на протяжении нескольких градусов значения ППН практически неизменные. Еще более интересную ситуацию можно наблюдать на этой же поверхности для X-1-11: сначала значение ППН спадает и достигает локального минимума на азимутах 17 и 43°, потом возрастает и достигает локального максимума на азимутах 23 и 37°, а потом уже окончательно спадает к глобальному минимуму на азимуте 30°.

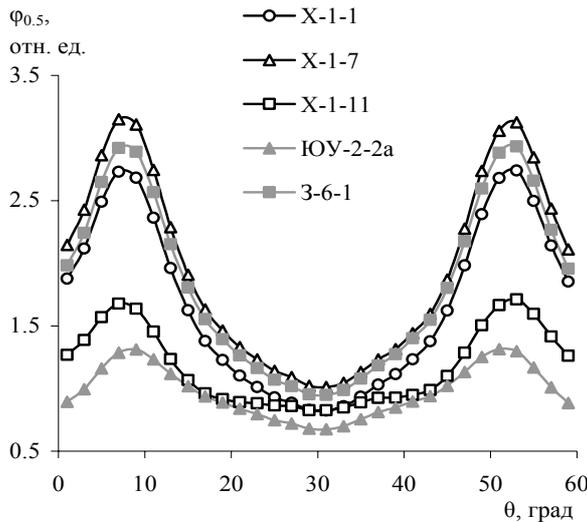


Рис. 6. Азимутальное распределение ППН с  $E_n > 0,5$  МэВ на внешней поверхности шахты на высоте 171 см от низа АКЗ для различных кампаний.

Как можно увидеть на рис. 7, совсем другая картина имеет место на внутренней поверхности выгородки. В 60-градусном секторе симметрии топливной загрузки распределение ППН имеет два симметричных минимума на азимутах 7 и 53° и два максимума на азимутах 0 (60°) и 30°. При этом максимумы на азимуте 30° для кампаний X-1-1 и 3-6-1 являются достаточно условными, так как значение ППН почти неизменные в диапазоне между азимутами 19 и 41°, а для ЮУ-2-2а не только слабо выраженный, но и больший, чем остальные максимумы. Наиболее ярко этот максимум выражен для X-1-11.

Азимутальные распределения других линейных ФНП (флюенс, с.н.а. и др.) имеют те же самые характерные особенности, как и распределения ППН для тех же поверхностей. Более сложными, как можно увидеть на рис. 8, являются азимутальные распределения спектральных индексов: для всех исследуемых поверхностей ВКУ в 60-градусном секторе они имеют по шесть максимумов и минимумов. Из рисунка видно, что

распределение спектральных индексов остается почти постоянным от кампании до кампании.

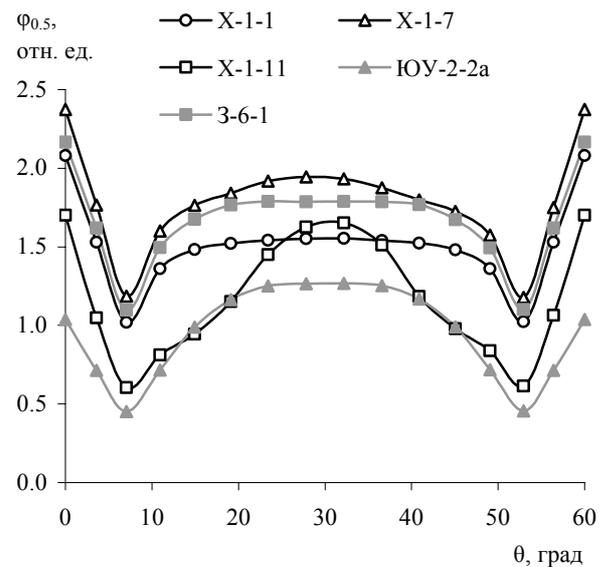


Рис. 7. Азимутальное распределение ППН с  $E_n > 0,5$  МэВ на внутренней поверхности выгородки на высоте 171 см от низа АКЗ для различных кампаний.

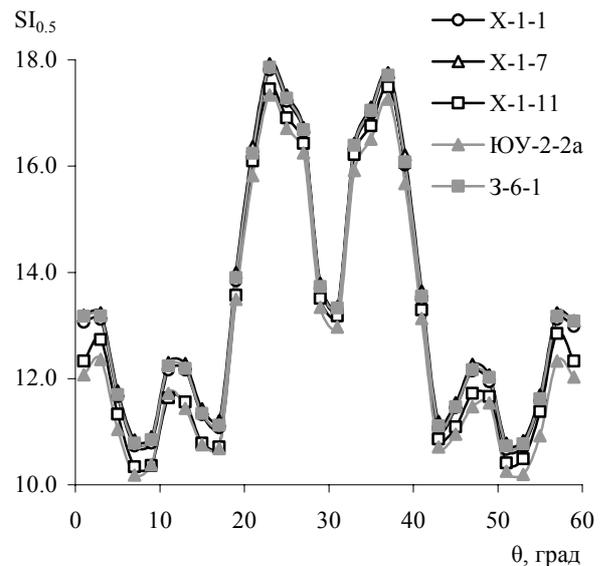


Рис. 8. Азимутальное распределение спектрального индекса на внешней поверхности выгородки на высоте 171 см от низа АКЗ для различных кампаний.

### Выводы

Определены условия облучения ВКУ реактора ВВЭР-1000, в первую очередь выгородки и шахты внутрикорпусной. Максимальное значение ППН быстрых нейтронов на поверхностях ВКУ реактора ВВЭР-1000 зависит от характеристик топливной загрузки, а форма аксиального распределения ППН практически не изменяется от кампании к кампании. Азимутальное распре-

деление какого-либо ФНП на всех цилиндрических поверхностях в пределах уровня АКЗ достаточно близко к зеркальной 30-градусной симметрии даже при отсутствии такой симметрии в топливной загрузке.

Полученные максимальные значения ППН на

поверхностях выгородки и шахты внутрикорпусной показывают, что использование топливных загрузок с пониженной утечкой нейтронов, как правило, приводят к уменьшению максимального флюенса быстрых нейтронов на ВКУ реактора ВВЭР-1000.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буканов В. Н., Гриценко А. В., Демехин В. Л., Пугач С. М. Пакет программ MСРV для расчета функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус ВВЭР-1000. - Киев, 2005. - 28 с. - (Препр. / НАН Украины. Ин-т ядерных исследований; КИЯИ-05-6).
2. Гриценко А. В. Определение функционалов нейтронного потока на образцах-свидетелях металла корпуса реактора ВВЭР-1000: Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.16. - К., 2003. - 170 с.

#### ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ОПРОМІНЮВАННЯ ВНУТРІШНЬОКОРПУСНИХ ПРИБОРІВ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

С. М. Пугач, В. М. Буканов, О. В. Гриценко, В. Л. Демьохін

Представлено розрахункову методику визначення умов опромінювання внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000. Використовуючи розроблену методику, визначено умови опромінювання внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000, у першу чергу вигородки й шахти внутрішньокорпусної, для ряду паливних кампаній. Досліджено розподіли функціоналів нейтронного потоку на поверхнях внутрішньокорпусних пристроїв для різних паливних кампаній.

#### DETERMINATION OF IRRADIATION CONDITIONS OF WWER-1000 REACTOR INTERNALS

S. M. Pugach, V. N. Bukanov, O. V. Grytsenko, V. L. Dyemokhin

The calculational procedure for determination of irradiation conditions of WWER-1000 reactor internals is presented. Using developed procedure, irradiation conditions of WWER-1000 reactor internals, first of all, baffle and barrel, are determined for a set of fuel cycles. Distributions of neutron flux functionals on surfaces of internals are analyzed for different fuel cycles.

Поступила в редакцію 26.06.06,  
после доработки – 03.10.06.