

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

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев***ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 НА УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ**

Выполнен комплекс работ по определению влияния значений геометрических параметров расчетной модели реактора ВВЭР-1000 на результаты определения условий облучения его внутрикорпусных устройств. Показано, что значения соответствующих элементов матрицы чувствительности на уровне активной зоны не зависят от высотной координаты, но имеют явно выраженную азимутальную зависимость. Получены значения максимально возможных относительных смещений флюенса нейтронов в выгородке и шахте внутрикорпусной, возникающих из-за неточного знания значений геометрических параметров внутрикорпусных устройств реакторной установки ВВЭР-1000.

*Ключевые слова:* реактор ВВЭР-1000, внутрикорпусные устройства, флюенс, условия облучения, матрица чувствительности.

**Введение**

Одной из работ, выполняемых при обосновании возможности увеличения срока безопасной эксплуатации реакторов ВВЭР-1000 на сверхпроектный период, является оценка технического состояния внутрикорпусных устройств (ВКУ). Это, среди прочего, требует определения условий их облучения, которое в силу объективных причин может быть выполнено только расчетным методом.

Составной частью методики, разработанной специалистами ИЯИ НАН Украины для определения радиационной нагрузки ВКУ реактора ВВЭР-1000, является пакет программ MСРV [1], в котором транспортная программа адаптирована для определения условий облучения ВКУ. Для расчетов переноса нейтронов разработана трехмерная модель реактора ВВЭР-1000 (рис. 1), которая корректируется с учетом конструктивных особенностей конкретной реакторной установки (РУ).

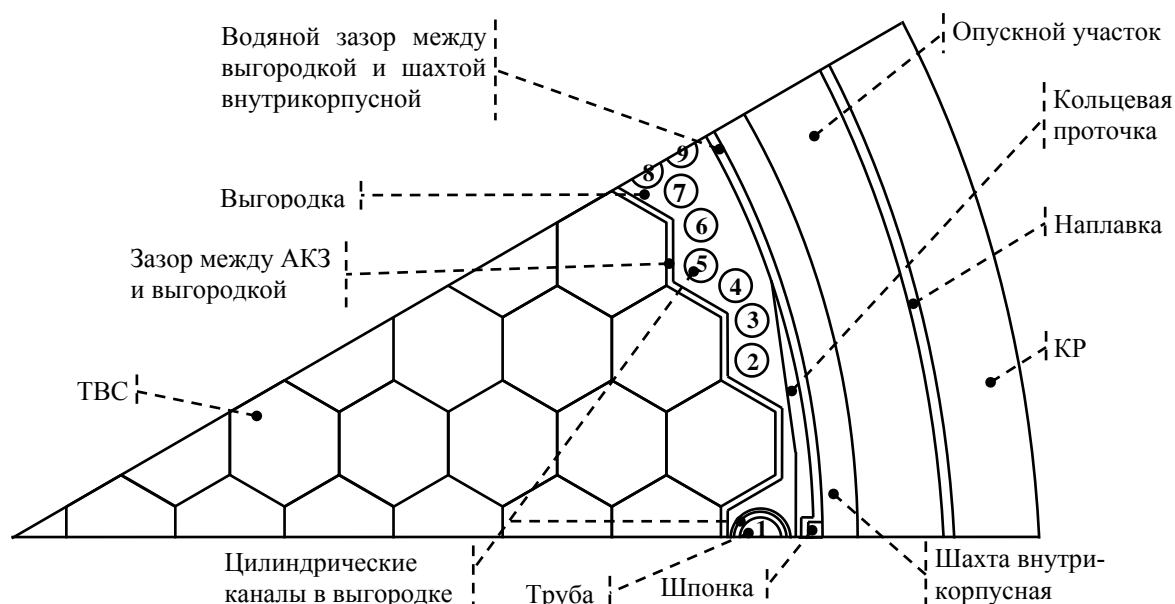


Рис. 1. Часть 30-градусного зеркального сектора симметрии горизонтального разреза 360-градусной расчетной модели РУ.

Неопределенности расчетных значений функционалов нейтронного потока (ФНП), характеризующих условия облучения ВКУ, зависят от

неопределенности входных параметров, задаваемых в транспортной программе пакета MСРV перед выполнением расчетов переноса нейтронов.

© А. М. Пугач, В. Л. Демехин, С. М. Пугач, В. Н. Буканов, 2015

Так, значения геометрических параметров, описывающие конструкционные элементы РУ, задаются согласно конструкторской документации и, в силу наличия допусков на изготовление этих элементов, могут не соответствовать реальным.

Очевидно, что различные конструкционные элементы РУ неодинаково влияют на формирование нейтронного потока, воздействующего на ВКУ. Поэтому был проведен анализ конструкторской документации и результатов расчетов переноса нейтронов с целью выбора критических геометрических параметров, т.е. тех, изменения значений которых в пределах допусков может оказывать наибольшее влияние на результаты расчетов. Было выявлено, что, исходя из физических принципов распространения нейтронов в многокомпонентной среде ядерного реактора, к таким геометрическим параметрам в первую очередь можно отнести те, которые задают основные габариты выгородки и шахты внутрикорпусной в направлении градиента нейтронного потока, т.е. зазор между активной зоной (АКЗ) и выгородкой ( $Z$ ), ее внешний диаметр ( $2R_1$ ), глубину кольцевой проточки ( $C_1$ ), внутренний ( $2R_2$ ) и внешний ( $2R_3$ ) диаметры шахты внутрикорпусной (см. рис. 1).

Для определения влияния размеров указанных элементов РУ на результаты расчетов переноса нейтронов в околокорпусном пространстве (ОКП) реактора ВВЭР-1000 использовалась ранее разработанная методика [2]. Она базируется на том, что малые изменения геометрических параметров расчетной модели РУ не коррелируют с любыми другими. Очевидно, что если, например, некий параметр  $X_i$  не коррелирует со всеми остальными входными параметрами и изменение функционала  $\Phi_j$  есть следствием только изменения входного параметра  $X_i$ , то элементы матрицы чувствительности имеют вид

$$S_{ij} = \frac{\Delta\Phi_j}{\Phi_j^* \cdot \Delta X_i}. \quad (1)$$

Т.е. для получения этого элемента матрицы чувствительности необходимо проведение двух расчетов переноса нейтронов, в которых при прочих равных условиях параметр  $X_i$  принимает значения, например  $X_i^*$  и  $X_i^* + \Delta X_i$ .

Для выявления влияния неточного знания геометрических параметров, задаваемых в транспортной программе, на результаты определения условий облучения ВКУ необходимо проведение расчетов переноса нейтронов для топливных кампаний, для которых существует воз-

можность получения ФНП, значения которых будут перекрывать весь возможный на практике диапазон. Такие значения ФНП могут быть получены, если топливные кампании, для которых выполняются расчеты переноса нейтронов, будут представлять собой некие предельные случаи из всех реальных вариантов.

В результате сравнительного анализа массива данных, полученных при мониторинговании радиационной нагрузки ВКУ реакторов ВВЭР-1000 АЭС Украины, был выбран ряд топливных кампаний различных энергоблоков, которые существенно отличаются друг от друга характеристиками АКЗ.

Для выявления влияния неточного знания критических геометрических параметров, задаваемых в транспортной программе, на результаты определения условий облучения ВКУ было выполнено более 150 расчетов переноса нейтронов.

Комплексный анализ результатов расчетов показал, что для различных линейных ФНП, характеризующих условия облучения ВКУ, при соответствующих изменениях критических геометрических параметров принципиальные отличия в «поведении» элементов матрицы  $S_{ij}$  отсутствуют.

#### Элементы матрицы чувствительности

Высотные зависимости значений элементов матрицы чувствительности для флюенсов нейтронов выше энергии 0,5 МэВ ( $\Phi_{0,5}$ ) для различных зон регистрации приведены на рис. 2.

Как видно из рисунка, значения величин  $S_{ij}$ , полученные для расчетных детекторов с одинаковыми радиальной и азимутальной координатами на различных уровнях АКЗ реактора, в подавляющем большинстве случаев отличаются друг от друга в пределах статистической погрешности, что дает возможность выполнить усреднение по соответствующим расчетным детекторам и тем самым повысить достоверность получаемых результатов. Различия имеют место только для ряда точек на уровнях верха и низа АКЗ, что обусловлено отсутствием там кольцевой проточки на внешней поверхности выгородки.

На рис. 3 для примера представлены азимутальные распределения значений величин  $S_{ij}$ , полученных для различных состояний АКЗ реактора при  $\Delta X_z = +1,0$  мм. Из рисунка видно, что значения  $S_{ij}$  имеют явно выраженную азимутальную зависимость и при этом практически не зависят от состояния АКЗ, что дает возможность проводить усреднение соответствующих значений величины  $S_{ij}$  с целью уменьшения ошибки их определения.

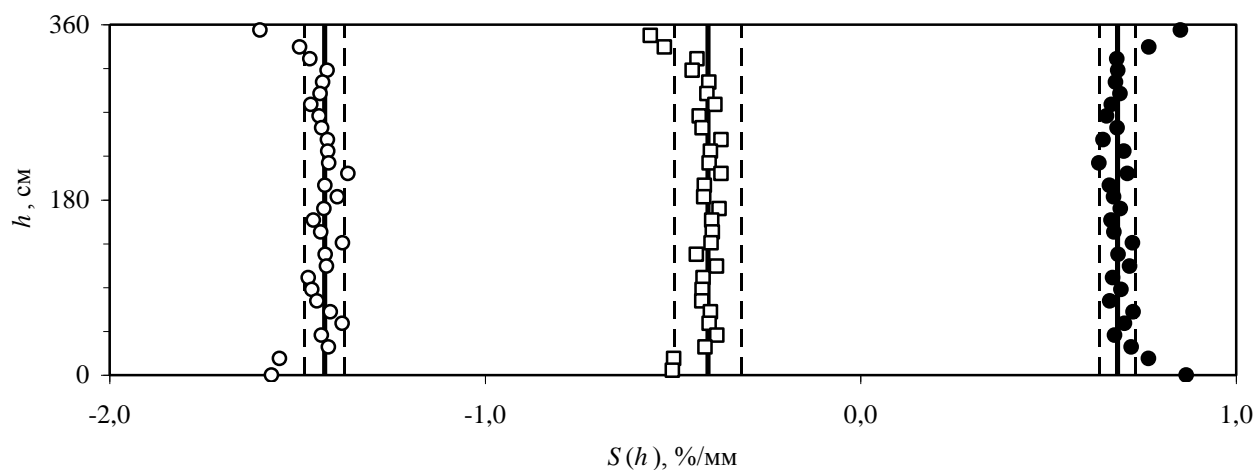


Рис. 2. Высотное распределение усредненных по азимуту значений элементов матрицы чувствительности  $S(h)$  для  $\Phi_{0,5}$  на внешней поверхности выгородки при  $\Delta X_z = +1,0$  мм ( $\square$ ), на внутренней поверхности шахты внутрикорпусной при  $\Delta X_{2R_1} = -2,2$  мм ( $\bullet$ ) и  $\Delta X_{2R_2} = -2,2$  мм ( $\circ$ ); среднее значение соответствующих  $S(h)$  для  $\Phi_{0,5}$  (—) и границы 95 % доверительного интервала (---).

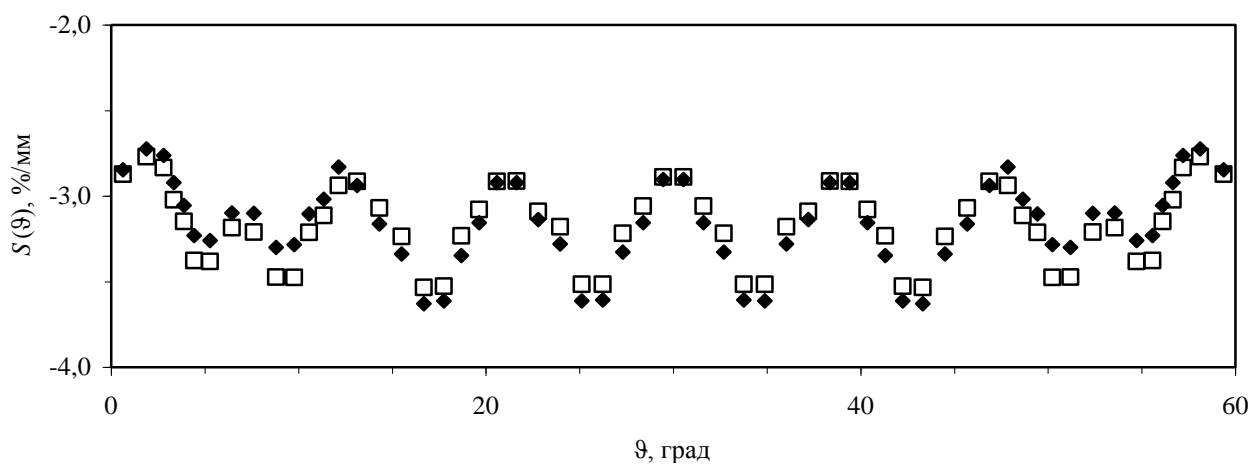


Рис. 3. Азимутальные распределения значений элементов матрицы чувствительности  $S(\theta)$  для  $\Phi_{0,5}$  на внутренней поверхности выгородки при  $\Delta X_z = +1,0$  мм для 4-й ( $\square$ ) кампании энергоблока № 2 Южно-Украинской АЭС и 23-й ( $\blacklozenge$ ) кампании энергоблока № 1 Запорожской АЭС.

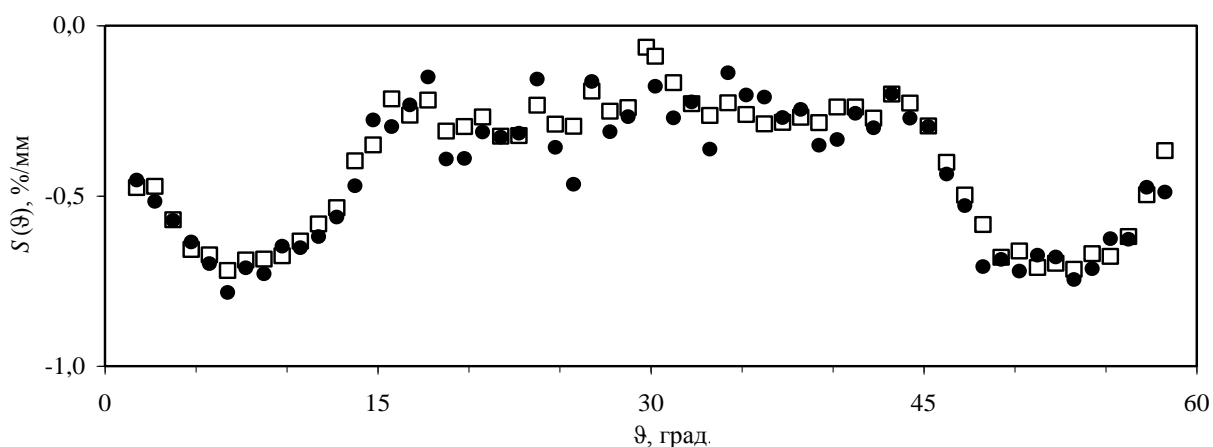


Рис. 4. Азимутальное распределение значений элементов матрицы чувствительности  $S(\theta)$  для  $\Phi_{0,5}$  на внешней поверхности выгородки при  $\Delta X_z = +1,0$  мм ( $\bullet$ ) и  $\Delta X_z = +2,0$  мм ( $\square$ ).

Значения одних и тех же элементов матрицы чувствительности, рассчитанные при двух различных изменениях любого критического геометрического параметра, также отличаются в пределах погрешности (рис. 4), что подтверждает допущение о малости изменения параметров, лежащее в основе используемой методики. Кроме того, как видно из того же рисунка, значения элементов матрицы чувствительности практически симметричны относительно оси зеркальной симметрии 60-градусного сектора реактора. Все это дает возможность усреднить значения элементов матрицы чувствительности  $S_{ij}$  по трем указанным параметрам, повысив тем самым достоверность получаемых результатов.

### Азимутальные зависимости элементов матрицы чувствительности

Используя вышеописанную методику, исследовался массив азимутальных зависимостей элементов матрицы чувствительности, связанных с неточным знанием геометрических параметров РУ реактора ВВЭР-1000 АЭС Украины.

Как пример на рис. 5 представлены азимутальные зависимости значений элементов матрицы чувствительности  $S_{ij}$  для  $\Phi_{0,5}$  на различных поверхностях выгородки при изменении зазора между выгородкой и АКЗ. Из рисунка видно, что наибольшее влияние неопределенность данного геометрического параметра оказывает на результаты определения флюенса нейтронов на внутренней поверхности выгородки, что в первую очередь обусловлено близостью данной поверхности к источнику нейтронов (АКЗ). При этом распределение значений  $S_{ij}$  имеет явно выраженную азимутальную зависимость, связанную со сложной конфигурацией внутренней поверхности выгородки (см. рис. 1). В зонах локальных максимумов  $\Phi_{0,5}$ , которые для данной поверхности расположены на азимутах  $\sim 2, 13, 21$  и  $30^\circ$ , наблюдается минимальное отклонение значений  $S_{ij}$ , а максимальное в зонах локальных минимумов  $\sim 5, 9, 17$  и  $26^\circ$ . На внешней поверхности выгородки максимальное отклонение наблюдается в области кольцевой проточки ( $\sim 0 - 20^\circ$ ), а в остальной части значения элементов матрицы чувствительности практически не зависят от азимутальной координаты. Азимутальные распределения значений элементов матрицы, связанные с неопределенностью параметра  $Z$  на поверхностях шахты внутрикорпусной, имеют подобную форму и близкие значения к распределению на внешней поверхности выгородки.

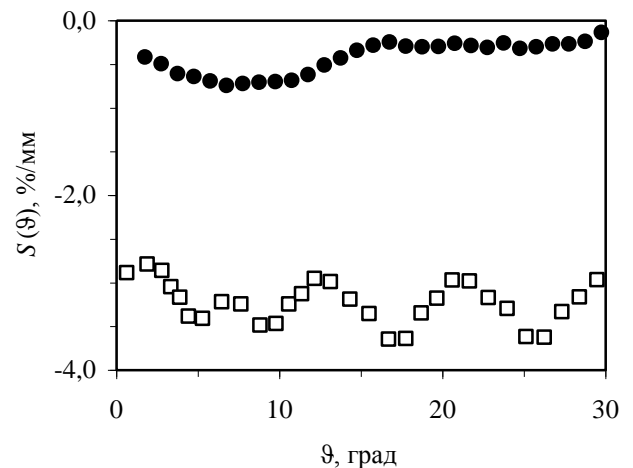


Рис. 5. Азимутальные распределения значений элементов матрицы чувствительности  $S(\vartheta)$  для  $\Phi_{0,5}$ , связанные с неопределенностью параметра  $Z$  на внутренней ( $\square$ ) и внешней ( $\bullet$ ) поверхностях выгородки.

Азимутальное распределение  $S_{ij}$ , связанное с неопределенностью геометрического параметра  $C_1$ , представлено на рис. 6. Как видно из данного рисунка, форма азимутального распределения имеет подобную форму практически для всех исследуемых поверхностей, кроме внутренней поверхности выгородки, где наблюдается незначительное отклонение от нуля в районе выступающей ТВС. Для внешней поверхности выгородки, а также внешней и внутренней поверхностей шахты внутрикорпусной в области кольцевой проточки значения элементов матрицы чувствительности практически не зависят от азимутальной координаты.

Из рис. 7 видно, что значения элементов матрицы чувствительности для  $\Phi_{0,5}$  на внутренней поверхности выгородки, связанные с неопределенностью ее внешнего диаметра  $2R_1$ , имеют незначительное отклонение от нуля в районе выступающей ТВС. На внешней поверхности выгородки значения  $S_{ij}$  отрицательные в данной области и положительные в остальной части. На внутренней и внешней поверхностях шахты внутрикорпусной распределения значений  $S_{ij}$  имеет подобный вид и наблюдается «полка» распределения в области кольцевой проточки.

Значения элементов матрицы чувствительности для  $\Phi_{0,5}$ , связанные с неопределенностью внутреннего диаметра шахты внутрикорпусной  $2R_2$  на внутренней поверхности выгородки, нулевые. Для других поверхностей, как видно из рис. 8, форма азимутального распределения  $S_{ij}$

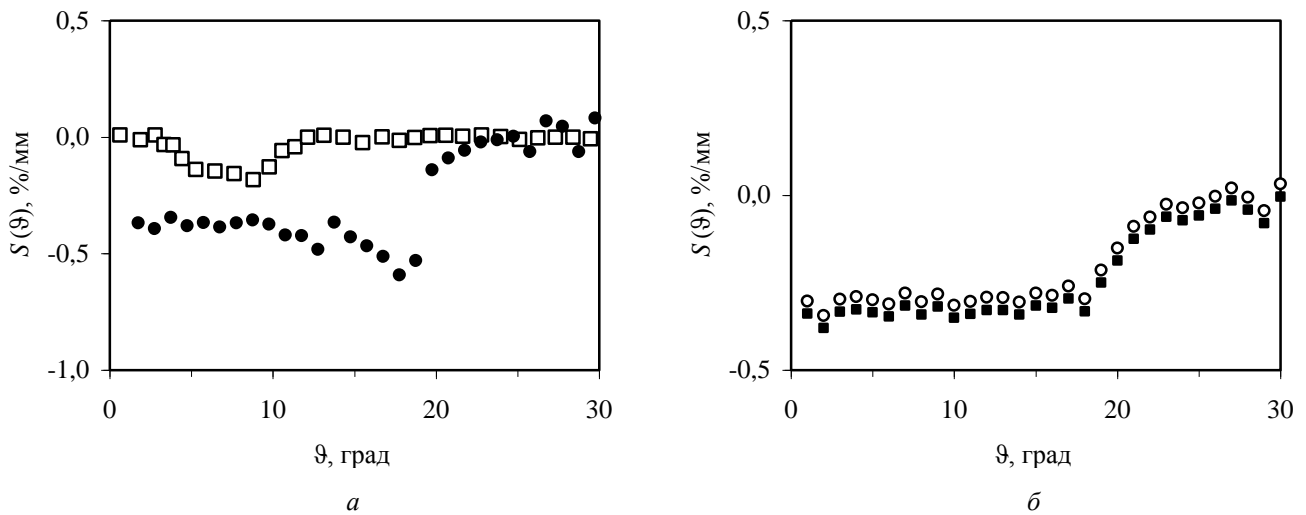


Рис. 6. Азимутальные распределения значений элементов матрицы чувствительности  $S(\vartheta)$  для  $\Phi_{0,5}$ , связанные с неопределенностью параметра  $C_1$  на внутренней ( $\square$ ) и внешней ( $\bullet$ ) поверхностях выгородки (а) и внутренней ( $\blacksquare$ ) и внешней ( $\circ$ ) поверхностях шахты внутрикорпусной (б).

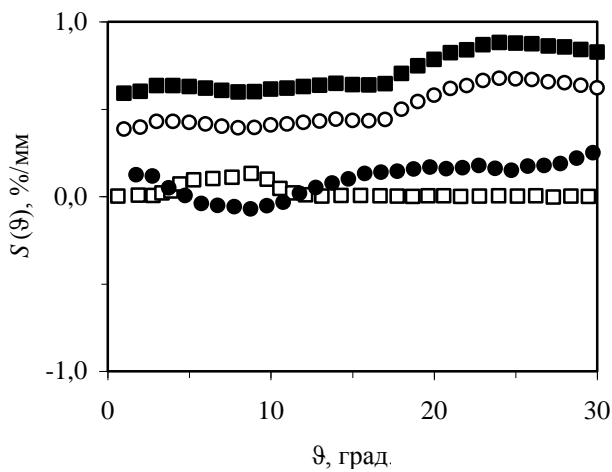


Рис. 7. Азимутальное распределение значений элементов матрицы чувствительности  $S(\vartheta)$  для  $\Phi_{0,5}$ , связанные с неопределенностью параметра  $2R_1$  на внутренней ( $\square$ ) и внешней ( $\bullet$ ) поверхностях выгородки и внутренней ( $\blacksquare$ ) и внешней ( $\circ$ ) поверхностях шахты внутрикорпусной.

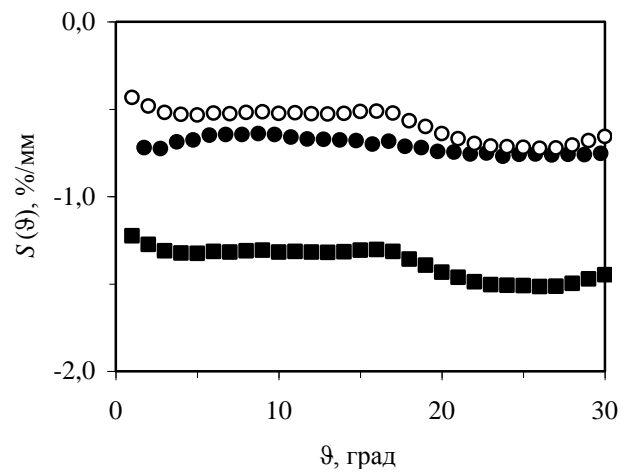


Рис. 8. Азимутальное распределение значений элементов матрицы чувствительности  $S(\vartheta)$  для  $\Phi_{0,5}$ , связанные с неопределенностью параметра  $2R_2$  на внешней ( $\bullet$ ) поверхности выгородки, внутренней ( $\blacksquare$ ) и внешней ( $\circ$ ) поверхностях шахты внутрикорпусной.

имеет подобный вид, при этом наблюдается «полка» распределения в области кольцевой проточки. Максимальное отклонение значений  $S_{ij}$  от нуля наблюдается на внутренней поверхности шахты внутрикорпусной.

Значения  $S_{ij}$  для  $\Phi_{0,5}$ , связанные с неопределенностью внешнего диаметра шахты внутрикорпусной  $2R_3$ , нулевые для поверхностей выгородки и имеют незначительные отклонения от нуля для внутренней поверхности шахты внутрикорпусной. На внешней поверхности шахты внутрикорпусной значения  $S_{ij}$  практически не зависят от азимутальной координаты.

На рис. 9, как пример, представлены азимутальные распределения значений элементов матрицы чувствительности на внутренней поверхности первого канала выгородки. В остальных каналах выгородки азимутальные распределения  $S_{ij}$  имеют подобную форму, которая незначительно зависит от местоположения канала. Как видно из рисунка, в зоне максимального флюенса возникает максимальное смещение, связанное с неопределенностью параметра  $Z$ . При изменении других геометрических параметров имеем практически нулевые значения элементов матрицы чувствительности в зоне максимального флюенса нейтронов  $\Phi_{0,5}^{\text{макс.}}$ , смещение возникает только в зоне минимума.

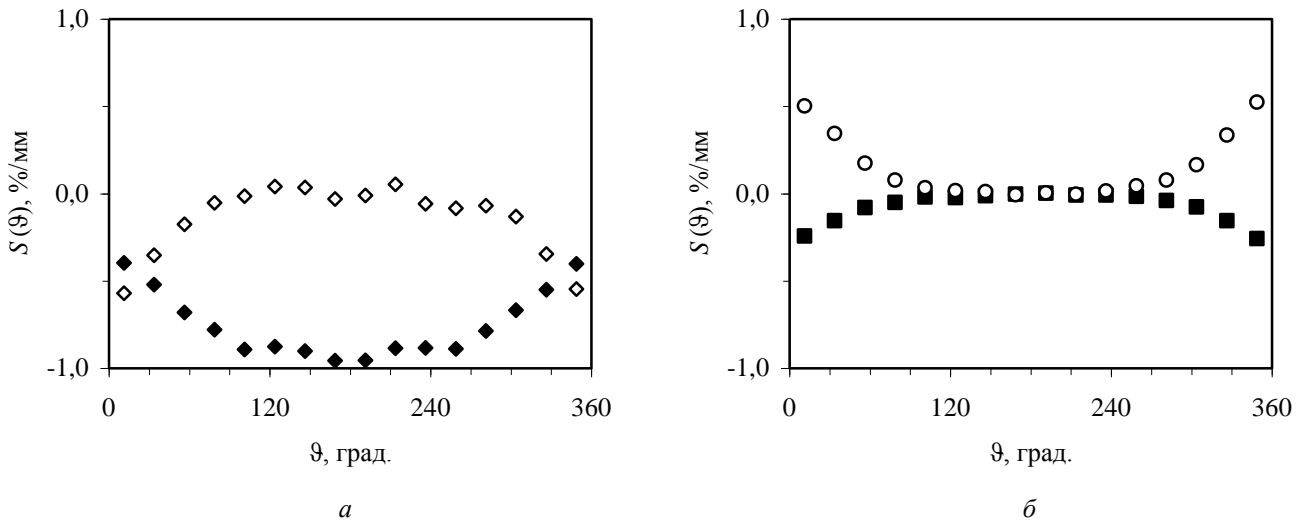


Рис. 9. Азимутальные распределения значений элементов матрицы чувствительности  $S(\varphi)$  для  $\Phi_{0,5}$  на поверхности первого канала выгородки, связанные с неопределенностью параметров  $Z$  (◆),  $C_1$  (◇),  $2R_1$  (○) и  $2R_2$  (■).

**Расчетные значения величин относительных смещений  $\Phi_{0,5}^{\text{макс}}$ , связанных с неточным знанием значения геометрических параметров, %**

Зона регистрации	Геометрический параметр реакторной установки						
	Зазор между выгородкой и АКЗ	Внешний диаметр выгородки	Эквивалентная глубина кольцевой проточки	Внутренний диаметр шахты	Внешний диаметр шахты		
	Значение $X_i$ , мм						
	3,0	3470,0	39,4	3490,0	3620,0		
	Допуск $\Delta X_i$ , мм						
	+1,0	-2,2	+1,0	-1,0	+2,6	-2,6	
Внутренняя поверхность выгородки	-3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Внешняя поверхность выгородки	-0,7	0,1	-0,4	0,4	-1,7	0,0	
Внутренняя поверхность шахты	-0,6	-1,3	-0,3	0,3	-3,4	-0,2	
Внешняя поверхность шахты	-0,6	-0,9	-0,3	0,3	-1,4	1,4	
Каналы в выгородке	1	-1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2	-0,9	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0
	3	-0,9	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0
	4	-0,9	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0
	5	-0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	6	-0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	7	-0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	8	-0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	9	-0,4	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0

**Величины относительных смещений**

Используя значения элементов матрицы чувствительности, можно было бы получить такую меру неопределенности величины флюенса

нейтронов на ВКУ, как ее погрешность, связанную с неточным знанием того или иного геометрического параметра РУ. Однако это требует знания не величины допуска, а плотности веро-

ятности распределения значений соответствующего геометрического параметра [3], данные о которой в настоящее время отсутствуют. А на основании данных о величинах допусков можно получить другую меру неопределенности – максимально возможное смещение, т.е. математическое ожидание максимально возможного отличия истинных и полученных при определении условий облучения ВКУ значений флюенса нейтронов [4, 5]. Величины максимально возможных относительных смещений  $\Phi_{0,5}^{\text{макс.}}$ , связанные с неточным знанием значения того или иного геометрического параметра из-за наличия допусков на изготовление конструктивных элементов РУ, представлены в таблице.

Как видно из таблицы, наибольшее влияние на результаты определения  $\Phi_{0,5}^{\text{макс.}}$  на внутренней поверхности выгородки оказывает неопределенность геометрических размеров зазора между выгородкой и АКЗ, при этом с увеличением расстояния от АКЗ реактора влияние уменьшается. Для внешней поверхности выгородки и внутренней поверхности шахты максимальное значение величин относительных смещений  $\Phi_{0,5}^{\text{макс.}}$  связано с неточным знанием значения геометрических размеров внутреннего диаметра шахты. В свою очередь для внешней поверхности шахты максимальное значение величин относительных смещений  $\Phi_{0,5}^{\text{макс.}}$  связано с неточным знанием значения ее внешнего диаметра. В зоне максимального флюенса на внутренней поверхности каналов выгородки максимальное смещение связано с изменении зазора между выгородкой и

АКЗ, при этом неопределенность значений других геометрических параметров практически не влияет на значения  $\Phi_{0,5}^{\text{макс.}}$ .

### Выводы

1. В рамках решения проблемы оценки неопределенностей результатов мониторинга радиационной нагрузки ВКУ ВВЭР-1000 на различных поверхностях определены значения элементов матрицы чувствительности, относящиеся к геометрическим параметрам расчетной модели РУ.

2. Значения элементов матрицы чувствительности на различных уровнях АКЗ отличаются друг от друга, как правило, в пределах статистической погрешности.

3. Значения элементов матрицы чувствительности, относящихся к геометрическим параметрам расчетной модели РУ, имеют явно выраженную азимутальную зависимость.

4. Мерой неопределенности результатов определения ФНП, возникающей из-за неточного знания значений геометрических параметров расчетной модели РУ, является максимально возможное смещение.

5. Используя значения элементов матрицы чувствительности, получены значения максимально возможных относительных смещений флюенсов нейтронов на выгородку и шахту внутрикорпусную реактора, возникающих из-за наличия технологических допусков на изготовление конструктивных элементов РУ 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 // Препр. / НАН Украины. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-05-6. - К., 2005. - 28 с.
2. Демехин В.Л., Пугач А.М., Буканов В.Н. Влияние геометрических параметров элементов конструкции ВВЭР-1000 на величину флюенса нейтронов на корпус // Ядерная и радиационная безопасность. - 2007. - № 4. - С. 41 - 47.
3. Демехин В.Л. Определение радиационной нагрузки корпуса ядерного реактора на основе Байесовского подхода: дис. канд. техн. наук: 01.04.16. - К., 2003. - 147 с.
4. Regulatory Guide 1.190. Calculational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence // US Nuclear Research Commission, 2001. - 53 p.
5. Математическая энциклопедия, т. 5. Слу-Я. - М., Советская энциклопедия, 1984. - С. 51 - 52.

**О. М. Пугач, В. Л. Демехин, С. М. Пугач, В. М. Буканов**

*Институт ядерних досліджень НАН України, Київ*

### **ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ РЕАКТОРА ВВЕР-1000 НА УМОВИ ОПРОМІНЕННЯ ВНУТРІШНЬОКОРПУСНИХ ПРИСТРОЇВ**

Виконано комплекс робіт по визначенню впливу значень геометричних параметрів розрахункової моделі реактора ВВЕР-1000 на результати визначення умов опромінення його внутрішньокорпусних пристроїв. Показано, що значення відповідних елементів матриці чутливості на рівні активної зони не залежать від висотної ко-

ординати, але мають явну азимутальну залежність. Отримано значення максимально можливих відносних зміщень флюенсу нейтронів у вигородці та шахті внутрішньокорпусній, що виникають за рахунок неточного знання значень геометричних параметрів внутрішньокорпусних пристроїв реакторної установки ВВЕР-1000.

*Ключові слова:* реактор ВВЕР-1000, внутрішньокорпусні пристрої, флюенс, умови опромінення, матриця чутливості.

**O. M. Pugach, V. L. Diemokhin, S. M. Pugach, V. N. Bukanov**

*Institute for Nuclear research, National Academy of Sciences, Kyiv*

### **INFLUENCE OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE VVER-1000 REACTOR CONSTRUCTION ELEMENTS TO INTERNALS IRRADIATION CONDITIONS**

Investigations to determine the influences of geometrical parameters of the calculational VVER-1000 reactor model to the results of internal irradiation condition determination are carried out. It is shown that the values of appropriate sensitivity matrix elements are not depended on a height coordinate for any core level, but there is their azimuthal dependence. Maximum possible relative biases of neutron fluence due to inexact knowledge of internal geometrical parameters are obtained for the baffle and the barrel.

*Keywords:* VVER-1000 reactor, internals, fluence, irradiation conditions, sensitivity matrix.

#### REFERENCES

1. *Bukanov V.N., Gritsenko A.V., Demekhin V.L., Pugach S.M.* MCPV software package to calculate the neutron flux functionals acting on the VVER-1000 // Prepr. / National Academy of Sciences of Ukraine. Institute for Nuclear Research; KINR-05-6. - Kyiv, 2005. - 28 p. (Rus)
2. *Demekhin V.L., Pugach A.M., Bukanov V.N.* // *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*. - 2007. - No. 4. - P. 41 - 47. (Rus)
3. *Demekhin V.L.* Determination of radiation exposure of the reactor vessel, based on Bayesian approach: PhD Thesis: 01.04.16. - Kyiv, 2003. - 147 p. (Rus)
4. *Regulatory Guide 1.190.* Calculational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence // US Nuclear Research Commission, 2001. - 53 p.
5. *Encyclopedia of Mathematics*, Vol. 5. Slu-Ya. - Moskva, Soviet Encyclopedia, 1984. - P. 51 - 52. (Rus)

Надійшла 06.04.2015

Received 06.04.2015