

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-440

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

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Изложены основные положения методических основ системы мониторинга радиационной нагрузки корпуса реактора ВВЭР-440. Представлена разработанная расчетная модель реакторной установки. Даны описания специального оборудования для проведения дозиметрических измерений у внешней поверхности корпуса и методики расчета ряда технологических допусков.

Основные положения

Безопасная эксплуатация реактора ВВЭР-440, реализация программы управления ресурсом основного оборудования реакторной установки требуют разработки и внедрения на АЭС систем, которые обеспечивали бы на современном научно-техническом уровне регистрацию нейтронно-физических параметров, влияющих на работоспособность элементов первого контура энергоблока. К таким системам можно отнести систему мониторинга радиационной нагрузки (СМРН) корпуса реактора (КР) как одного из основных элементов первого контура.

Целью мониторинга радиационной нагрузки КР является повышение уровня безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-440 путем получения информации, необходимой для эффективного функционирования программы управления сроком службы корпуса.

Задачами СМРН корпуса ВВЭР-440 являются сбор и накопление данных, необходимых для:

- оценки периода достижения КР предельно допустимого флюенса нейтронов на корпус;
- переноса результатов испытаний образцов-свидетелей (ОС) непосредственно на металл КР;
- оценки эффективности мероприятий, направленных на снижение радиационной нагрузки КР.

Программой контроля свойств металла корпуса ВВЭР-440 в процессе эксплуатации по ОС [1], прежде всего, предусмотрено облучение образцов, изготовленных из основного металла, металла швов. В связи с этим к характерным зонам КР, т.е. зонам, где необходимо осуществлять мониторинг радиационной нагрузки, должны быть отнесены:

- зона сварного шва № 4, расположенного на уровне активной зоны реактора;
- зоны обечайки КР, где текущая и/или накопленные радиационные нагрузки имеют максимальное значение.

Контроль состояния металла КР на основе результатов испытаний ОС требует знания усло-

вий облучения характерных зон корпуса. Только в случае, если известны условия облучения КР и ОС, полученные с помощью ОС данные могут быть перенесены непосредственно на металл характерных зон корпуса.

Под условиями облучения характерных зон КР понимается набор значений функционалов нейтронного потока (ФНП) на корпус, к которым, в первую очередь, относятся:

- флюенс нейтронов с энергией $E_n > 0,5$ МэВ;
- приведенная к номинальной мощности реактора и усредненная за кампанию интегральная плотность потока нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ;
- спектральный индекс, который рассчитывается как отношение флюенса нейтронов с $E_n > E$ МэВ к флюенсу нейтронов с $E_n > 3,0$ МэВ. Значения спектральных индексов до некоторой степени характеризуют спектр нейтронов, воздействующих на КР. Обычно при определении условий облучения характерных зон корпуса ВВЭР рассчитываются отношения флюенсов нейтронов с $E_n > 0,5$ МэВ и $E_n > 3,0$ МэВ;
- число смещений на атом, вызванных нейтронами с $E_n > 0,5$ МэВ в материале КР;
- приведенная к номинальной мощности реактора и усредненная за кампанию скорость накопления смещений на атом.

Условия облучения должны определяться по периметру характерных зон КР. При этом значения ФНП должны определяться на наплавку, на внутреннюю поверхность КР, на глубинах 1/4 и 3/4 толщины стенки корпуса.

Контроль технического состояния КР требует знания не только условий облучения характерных зон корпуса, но и значений текущей и накопленной радиационных нагрузок.

Текущая радиационная нагрузка КР представляет собой максимальный флюенс быстрых нейтронов на внутреннюю поверхность характерных зон корпуса или максимальное число смещений на атом, вызванных нейтронами с $E_n > 0,5$ МэВ, за топливную кампанию. Накопленная радиационная нагрузка – это максимальный суммарный флюенс нейтронов на внутреннюю поверхность

характерных зон КР или максимальное число смещений на атом, вызванных нейтронами с $E_n > 0,5$ МэВ, за весь период эксплуатации энергоблока.

Определение значений текущей радиационной нагрузки КР позволяет контролировать динамику накопления флюенса нейтронов или число смещений на атом характерными зонами корпуса. Данные о накопленной за весь период работы энергоблока радиационной нагрузке КР дают возможность оценить допустимое время его работы.

В свою очередь для оценки эффективности мероприятий, направленных на снижение воздействия нейтронного излучения на КР, следует использовать приведенную к номинальной мощности реактора и усредненную за кампанию интегральную плотность потоков нейтронов.

Анализ современных подходов к определению радиационной нагрузки корпуса ВВЭР-440 [2, 3 - 6] показал, что основу СМРН корпуса должна составлять методика, которая включает численные расчеты переноса нейтронов в околокорпусном пространстве реактора и дозиметрические измерения у внешней поверхности корпуса.

Расчетная модель реакторной установки

Для численных расчетов переноса нейтронов в околокорпусном пространстве (ОКП) реактора ВВЭР-440 наиболее оптимальной является использование программы, основанной на методе Монте-Карло. Суть метода Монте-Карло состоит в численном моделировании физического процесса распространения нейтронов в сложной по геометрическим и материальным параметрам среде путем отслеживания историй смоделированных частиц. Основу транспортной программы составляет расчетная модель реакторной установки (РМРУ), которая моделирует элементы конструкции реакторной установки (РУ), влияющие на формирование поля нейтронов в ОКП реактора. К таким элементам, в первую очередь, относятся: активная зона реактора, корзина, выгородка, шахта внутрикорпусная, корпус.

В основу создаваемой РМРУ положен зонный принцип, заключающийся в том, что вся модель состоит из отдельных зон, внутри каждой из которых все материальные параметры считаются неизменными. Полученные в результате анализа конструкторской документации позонное представление РМРУ и значения основных геометрических параметров даны на рис. 1 и 2.

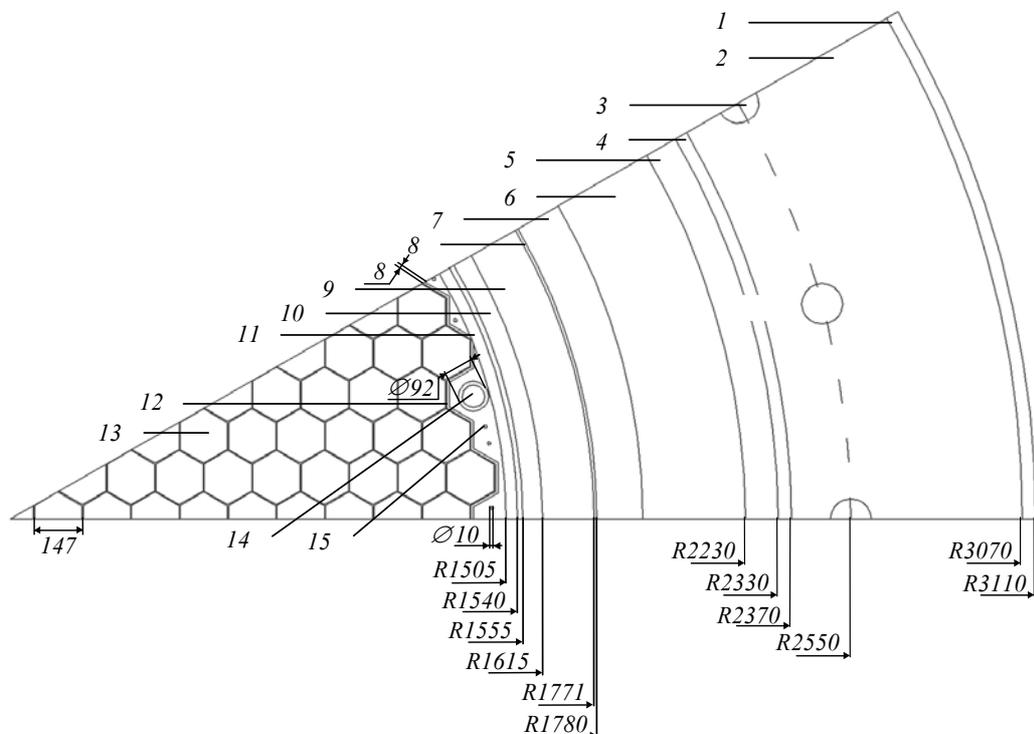


Рис. 1. 30-градусный зеркальный сектор симметрии горизонтального разреза 360-градусной расчетной модели РУ: 1 – обычный бетон; 2 – металлоконструкция сухой защиты; 3 – воздушный зазор каналов ИК; 4 – воздух; 5 – теплоизоляция; 6 – воздушный зазор; 7 – КР; 8 – наплавка на корпус; 9 – водяной зазор; 10 – шахта внутрикорпусная; 11 – корзина; 12 – выгородка; 13 – ТВС; 14 – труба для каналов системы нейтронного контроля; 15 – "горячая" вода.

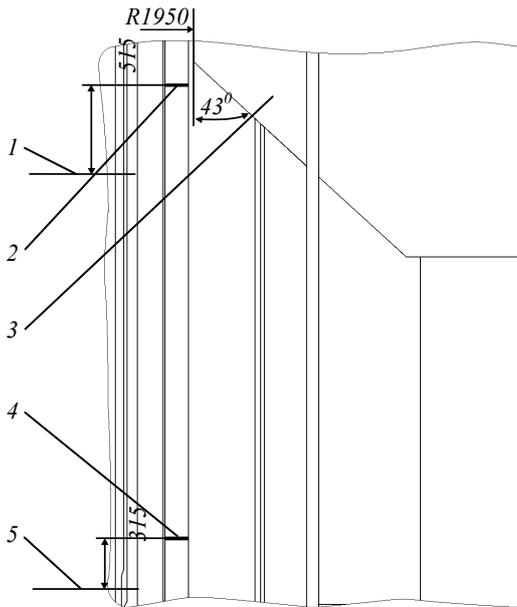


Рис. 2. Часть вертикального разреза расчетной модели РУ: 1 – верхний уровень активной зоны; 2 – шов № 5; 3 – ферма опорная; 4 – шов № 4; 5 – нижний уровень активной зоны.

Сложная функциональная зависимость результатов расчетов переноса нейтронов в ОКП реактора ВВЭР-440 от геометрических и материальных параметров РУ и параметров взаимодействия нейтронов с веществом, а также отсутствие необходимой информации о погрешностях многих из этих параметров не позволяют на сегодняшний день получить значения погрешностей ФНП, характеризующих условия облучения КР. Поэтому для обоснования достоверности результатов определения радиационной нагрузки КР необходимо использовать экспериментальные данные, полученные с помощью дозиметрических измерений у внешней поверхности корпуса.

Дозиметрические измерения у внешней поверхности корпуса ВВЭР-440

Наиболее оптимальным методом для проведения дозиметрических измерений у внешней поверхности КР действующего энергоблока является нейтронно-активационный метод [2, 7, 8]. Выбор нейтронно-активационных детекторов (НАД) для дозиметрических измерений обусловлен особенностями решаемой задачи [2, 8].

Комплекты НАД облучаются в течение топливной кампании у внешней поверхности на уровнях характерных зон КР. Азимутальная схема размещения детекторов на этих уровнях определяется характеристиками конкретной топливной загрузки и результатами сравнения расчетных и экспериментальных данных, полученных за другие кампании, если таковые имеются.

Для установки комплектов детекторов необходимо использование специального оборудования, которое должно обеспечивать точное позиционирование комплектов детекторов, возможность установки и извлечения их, отсутствие помех как для эксплуатации РУ, так и при проведении инспекции КР.

Анализ возможных вариантов установки НАД у внешней поверхности КР показал, что наиболее оптимальным способом фиксации детекторов в заданных местах является размещение их в специальных держателях. Поэтому специальное оборудование СМРН корпуса ВВЭР-440 включает в себя следующие основные элементы:

- два держателя, которые предназначены для позиционирования НАД у внешней поверхности КР на уровне характерных зон корпуса;
- систему тросовых растяжек с траверсой и пружиной;
- нижний блок крепления;
- верхний блок крепления.

Каждый держатель представляет собой 65-градусную сплошную дугу с внутренним радиусом несколько меньшим, чем проектный радиус внешней поверхности корпуса ВВЭР-440, что обеспечивает плотное прилегание держателя к внешней поверхности КР при натяжении тросов. Дуги изготовлены методом полной механической обработки алюминиевых дуг из проката. Специальные ребра жесткости, предусмотренные в конструкции дуг, обеспечивают сохранность их формы во время эксплуатации.

Для установки комплектов НАД в держателях имеются специальные гнезда, расположенные с шагом 2°. Конфигурация гнезд и флажковые фиксаторы исключают возможность выпадения комплектов при установке держателей в рабочее положение у внешней поверхности КР, в процессе облучения и при снятии.

Для установки и удержания держателей в рабочем положении у внешней поверхности КР используется система тросовых растяжек (рис. 3). Применение системы тросовых растяжек обусловлено необходимостью уменьшения искажений нейтронного поля в местах облучения НАД.

Составной частью системы тросовых растяжек является специальная траверса длиной 110 см, которая изготовлена из алюминиевого профиля. Края траверсы соединены наклонными тросами с центральным тросом. Края верхнего держателя крепятся наклонными тросами к краям траверсы. Такая конструкция не позволяет краям держателей, находящимся в рабочем положении, опускаться за счет собственной массы.

Расчет технологических допусков на отход держателей специального оборудования от поверхности КР

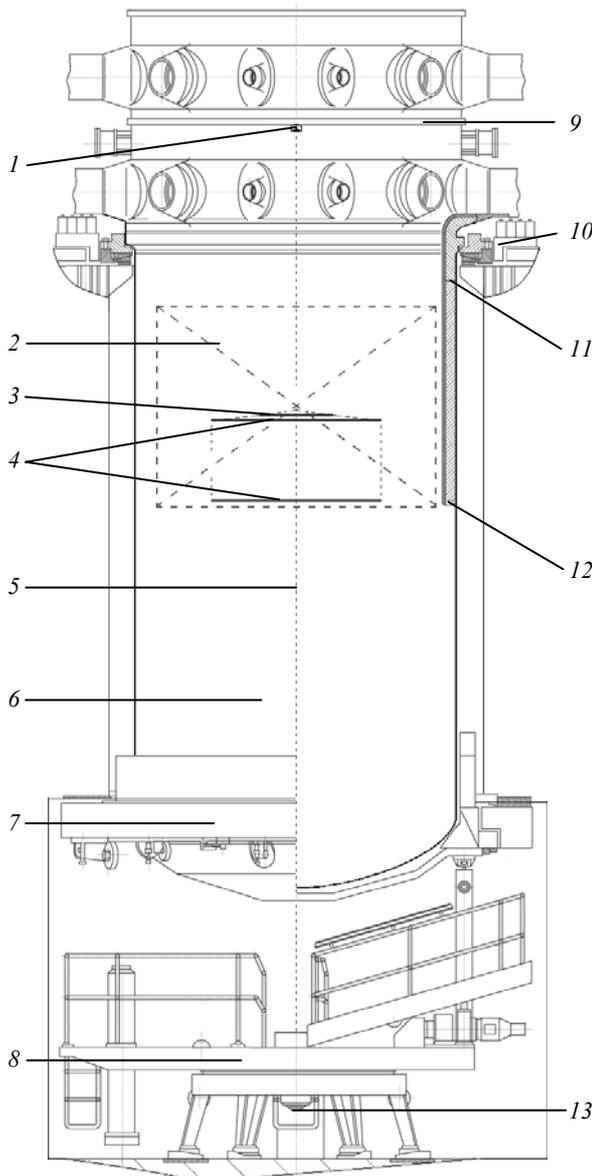


Рис. 3. Схема размещения оборудования СМРН корпуса ВВЭР-440: 1 – верхний блок крепления; 2 – активная зона; 3 – траверса; 4 – держатели; 5 – центральный трос; 6 – КР; 7 – крупногабаритная деталь защиты; 8 – площадка; 9 – направляющее кольцо; 10 – защита биологическая нижняя; 11 – шов № 5; 12 – шов № 4; 13 – нижний блок крепления.

Проектные размеры элементов специального оборудования рассчитываются исходя из проектных размеров корпуса ВВЭР-440. Однако размеры конкретного КР не равны в точности проектным, а лежат в пределах допусков. Кроме того, допуски имеются и на элементы специального оборудования для установки комплектов НАД. Все это приводит к тому, что держатели могут неплотно прилегать к поверхности КР. Следовательно, необходимо обоснование допустимых отходов держателей от внешней поверхности корпуса ВВЭР-440.

Анализ геометрии размещения отдельного держателя возле КР показывает, что может существовать ряд причин его неплотного прилегания к корпусу. Однако они могут быть сведены к рассмотрению только двух случаев: недостаточное натяжение центрального троса, негоризонтальность положения держателя.

При этом, учитывая высокую точность изготовления КР и специального оборудования, для упрощения задачи возможно отдельное рассмотрение каждой из этих причин. Кроме того, во всех случаях можно предполагать, что КР в плане является идеальной окружностью радиуса r_{pv} , каждый держатель является дугой идеальной окружности радиуса r_h , определяемый центральным углом 2α . Держатель можно рассматривать, как две дуги, расположенные симметрично относительно линии, соединяющей центральный трос и центральную ось реактора. Для упрощения дальнейшего рассмотрения заметим, что на рис. 4 и 5 нижний индекс 1 относится к КР, индекс 2 – к держателю, а используемые при выводах геометрические и тригонометрические формулы взяты из [9].

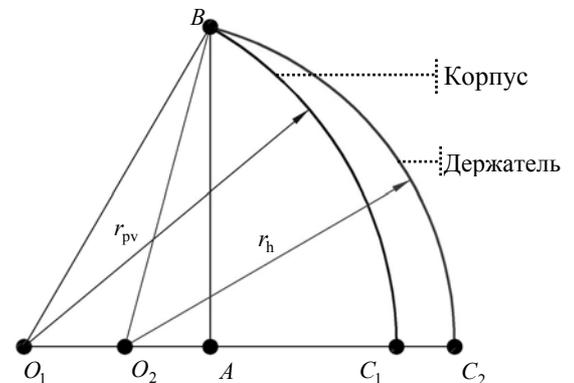


Рис. 4. Геометрическая модель неплотного прилегания держателя к КР в случае недостаточного натяжения центрального троса.

Первый случай – недостаточное натяжение центрального троса, что в результате приводит к отходу центра держателя, схематично это представлено на рис. 4, где O_1 – центр окружности, описывающей внешнюю поверхность КР ($\cup C_1B$), O_2 – центр окружности, которой принадлежит дуга ($\cup C_2B$), описывающая держатель. В этом случае отход центра держателя можно рассчитать по формуле

$$A_1 \approx (r_{pv} - r_h) \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{\cos \alpha} \quad (1) \quad \text{по формуле}$$

Второй случай – негоризонтальность положения какого-то держателя вследствие несоответствия параметров держателей и системы тросовых растяжек. Рассмотрим ситуацию, когда провисание краев держателя одинаково и равно h , а центральный трос достаточно натянут, чтобы прижать центр держателя к поверхности КР. Такая ситуация схематически представлена на рис. 5, где $AA' = h$ и $O_1C = r_{pv}$. Для этого случая отход края держателя можно рассчитать

$$A_2 \approx \frac{h^2}{2r_{pv}} \frac{\cos \alpha'}{1 - \cos \alpha'} \quad (2)$$

Анализ проектной документации показал, что величина допуска на внешний диаметр корпуса ВВЭР-440 не превышает $+7$ мм. Это дает возможность утверждать, что отход любой точки держателя от поверхности корпуса не должен превышать 1 см.

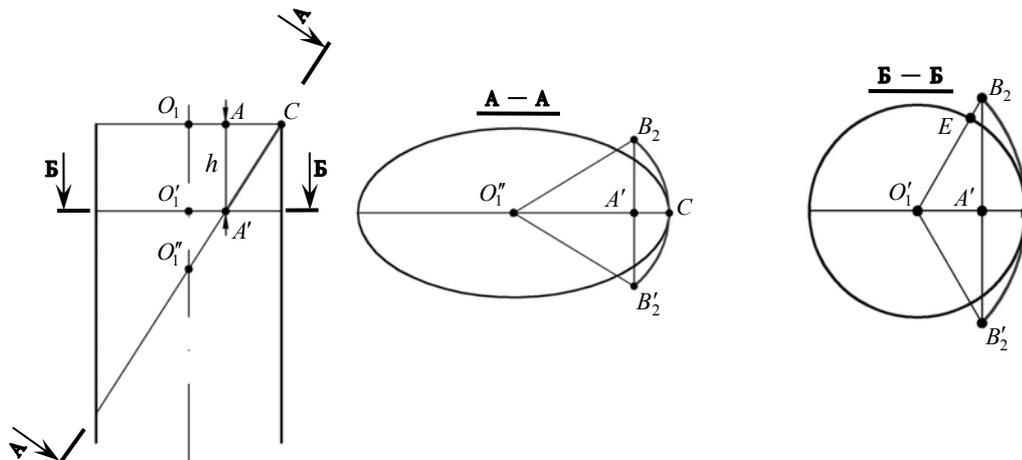


Рис. 5. Геометрическая модель отхода краев держателя от КР в случае их провисания.

Выводы

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы.

Разработаны и обоснованы основные элементы СМРН КР ВВЭР-440, которая позволит получить данные, необходимые для реализации программы управления сроком службы корпуса.

Разработана и обоснована конструкция специального оборудования для установки комплектов НАД у внешней поверхности корпуса ВВЭР-440.

Рассчитан допустимый отход держателей от КР с учетом технологических допусков на изготовление специального оборудования и корпуса.

Следует отметить, что представленные в данной работе результаты являются основой СМРН КР ВВЭР-440, которая в настоящее время внедряется на энергоблоках № 1 и № 2 Ровенской АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПН АЭ Г-7-008-89)*. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 168 с.
2. *Regulatory Guide 1.190 Computational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence* // US Nuclear Research Commission, 2001.
3. *Brumovsky M., Erben O. et al. Neutron dosimetry for VVER reactor pressure vessels in the Czech Republic* // Proc. of the 10th Int. Symp. on Reactor Dosimetry. (Osaka, Japan, 12 - 17 Sept. 1999). - Philadelphia, PA - 2001. - P. 93 - 100.
4. *Ilieva K., Apostolov T., Belousov S.I. et al. Verification of Neutron Fluence on VVER-440/320 Vessel of Unit 1 at Kozloduy NPP* // Proc. of the 9th Int. Symp. on Reactor Dosimetry. (Prague, Czech Republic, 2 - 6 Sept. 1996). - Singapore: World Scientific - 1998. - P. 19 - 26.
5. *Vikhrov V.I., Erak D.Yu., Kochkin V.N. et al. Measurement and Calculation of WVER-440 Pressure Vessel Templates Activity for Support of*

- Vessel Dosimetry // Proc. of the 12th Int. Symp. on Reactor Dosimetry. (Gatlinburg, TN, USA, 8 - 13 May, 2005). - P. 7.03.
6. *Ošmera et al.* Experimental Validation of Neutron Calculations for VVER Pressure Vessel Neutron Exposure Evaluation // Proc. of the Sixth ASTM Euratom Symp. on Reactor Dosimetry, ASTM STP 1001, 1989.
 7. *Minutes* of WGRD-VVER Workshop on RPV Neutron Dosimetry. (Sandanski, Bulgaria, 29 Sept. - 3 Oct. 1997). - 4 p.
 8. *Методика* нейтронного контролю на зовнішній поверхності корпусів водо-водяних енергетических реакторів АЭС (РБ-018-01) // Вест. Госатомнадзора России. - 2001. № 6 (19).
 9. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Пер. с англ. - М.: Наука, 1977. - 832 с.
 - 10.

РОЗРОБКА МЕТОДИЧНИХ ОСНОВ СИСТЕМИ МОНІТОРУВАННЯ РАДІАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-440

О. М. Пугач, В. М. Буканов, О. Г. Васильева, О. В. Гриценко, В. Л. Демьохин, С. М. Пугач

Викладено основні положення методичних основ системи моніторингу радіаційного навантаження корпусу реактора ВВЕР-440. Представлено розроблену розрахункову модель реакторної установки. Дано опис спеціального обладнання для проведення дозиметричних вимірювань біля зовнішньої поверхні корпусу та методика розрахунку ряду технологічних допусків.

DESIGN OF METHODOICAL BASIS OF THE SYSTEM FOR MONITORING OF WWER-440 PRESSURE VESSEL RADIATION EXPOSURE

A. M. Pugach, V. N. Bukanov, E. G. Vasylyeva, O. V. Grytsenko, V. L. Dyemokhin, S. M. Pugach

Main issues of methodical basis of the monitoring system of WWER-440 pressure vessel radiation exposure are formulated. The designed calculational model of reactor facility is presented. Description of the special equipment for carry out of dosimetry measurements at the outer surface and the procedure for some technological tolerances determination are given.

Поступила в редакцію 26.06.06,
после доработки – 03.10.06.