

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ У ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА ВВЭР-1000**В. Н. Буканов, Е. Г. Васильева, В. Л. Демехин, А. М. Пугач***Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Дано подробное описание и обоснование конструкции специального оборудования, используемого в методике определения радиационной нагрузки корпуса ВВЭР-1000 для установки нейтронно-активационных детекторов у внешней поверхности корпуса. Представлена методика определения высотных координат местоположения детекторов.

Введение

Согласно правилам и нормам, действующим в атомной энергетике, на каждом энергоблоке с реактором ВВЭР должен определяться флюенс быстрых нейтронов на корпус реактора (КР) с момента пуска-наладочных работ [1]. Для этой цели используются специальные методики, которые включают численные расчеты переноса нейтронов в околокорпусном пространстве реактора и дозиметрические измерения у внешней поверхности корпуса [2]. Данные дозиметрических измерений используются для обоснования достоверности результатов определения радиационной нагрузки КР, т. е. значений флюенсов и других функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус.

В рамках методики определения радиационной нагрузки корпуса ВВЭР-1000, разработанной в ИЯИ НАН Украины [3, 4], дозиметрические измерения выполняются нейтронно-активационным методом. Реализация этого метода на действующем энергоблоке требует разработки специального оборудования для установки комплектов нейтронно-активационных детекторов (НАД) у внешней поверхности КР.

Специальное оборудование для установки НАД у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000

При разработке основных элементов специального оборудования учитывалась необходимость выполнения дозиметрических измерений на тех уровнях, где согласно нормативным документам необходимо осуществлять мониторинг радиационной нагрузки КР, т.е. на уровнях швов № 3 и № 4, а также на уровне максимальной текущей радиационной нагрузки. Кроме того, обязательным условием являлось обеспечение минимальных дозовых нагрузок для персонала, который непосредственно работает с оборудованием.

Анализ конструкторской документации реакторной установки (РУ) с реактором ВВЭР-1000 позволил разработать оптимальный вариант конструкции оборудования для установки НАД у внешней поверхности КР, схематично изображенный на рис. 1.

Кратко охарактеризуем основные элементы оборудования.

Держатели представляет собой попарно соединенные 30-градусные дуги с внутренним радиусом, равным проектному радиусу внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000. Меньшие размеры держателей не позволяют уверенно перекрыть азимутальные максимумы и минимумы флюенса нейтронов, а большие – невозможны по техническим причинам, связанным с их фиксацией в заданных положениях.

Выбор алюминия в качестве материала для изготовления держателей позволил свести к минимуму время выдержки оборудования, т.е. время между окончанием облучения и началом работы с держателями. Примерно через 80 ч после остановки реактора работа с оборудованием не сопровождается дополнительными дозовыми нагрузками. Для установки комплектов НАД в держателях предусмотрены специальные гнезда, расположенные с шагом 2°.

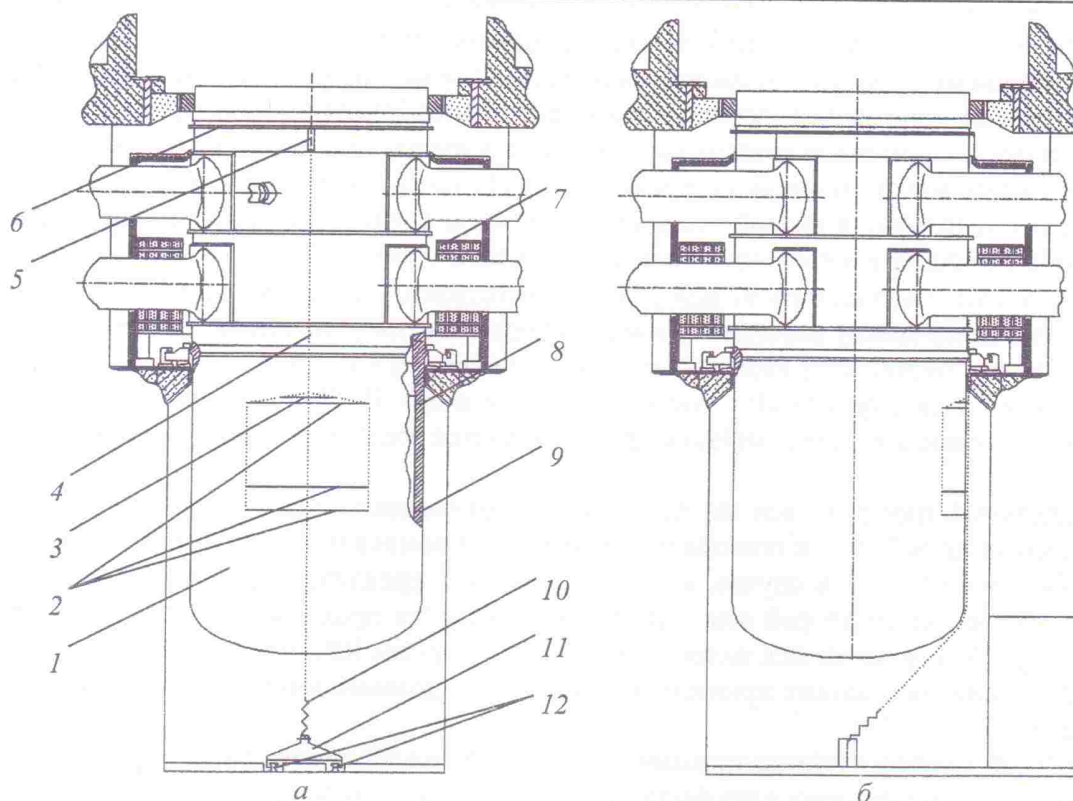


Рис. 1. Схема размещения специального оборудования для дозиметрических измерений у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000 (проект В-320): *а* – вид со стороны входа в помещение шахты реактора; *б* – вид сбоку; 1 – корпус реактора; 2 – держатели; 3 – траверса; 4 – центральный трос; 5 – верхний блок крепления; 6 – верхнее направляющее кольцо; 7 – биологическая защита; 8 – шов № 4; 9 – шов № 3; 10 – пружина; 11 – нижний блок крепления; 12 – рельсы.

С целью уменьшения искажений нейтронного поля у внешней поверхности КР при дозиметрических измерениях для установки держателей в рабочее положение была выбрана система тросовых растяжек. Поэтому между собой держатели соединены тремя тросами, один из которых проходит через центры держателей, а два других – через края. Такая система требует крепления центрального троса в двух местах – ниже шва № 3 и выше шва № 4.

Анализ проектной документации РУ показал, что нижнее крепление в таком случае можно организовать только на полу помещения шахты реактора. При этом для предотвращения отклонения центрального троса тросовой растяжки от вертикали он должен быть закреплен точно под центральной осью КР. Для решения этой задачи была разработана специальная конструкция нижнего блока фиксации держателей. Он состоит из левой и правой петли, которые соединены между собой двумя шпильками в замок. Конструкцией нижнего блока крепления предусмотрены специальные упорные винты, которые позволяют прикрепить его к рельсам, расположенным на полу помещения шахты реактора. Согласно проектной документации проекция центральной оси КР на пол помещения шахты реактора с точностью 2 – 3 см находится на пересечении линий, одна из которых проходит посередине между рельсами, а другая – посередине центрального ряда матов теплоизоляции цилиндрической части КР. Учитывая возможность удлинения центрального троса тросовой растяжки за счет нагревания в процессе работы реактора, с целью обеспечения постоянного прижима держателей к КР нижний конец троса прикрепляется к нижнему блоку крепления с помощью растянутой приблизительно в полтора-два раза пружины.

Анализ проектной документации РУ показал, что закрепление верхнего конца центрального троса тросовой растяжки произвести в помещении шахты реактора практически невозможно. Осуществить закрепление оказалось возможным только в районе биологиче-

ской защиты. В связи с этим был выбран вариант прикрепления центрального троса к верхнему направляющему кольцу, находящемуся непосредственно на КР. Для этого была разработана специальная конструкция верхнего блока крепления. Этот блок состоит из лебедки и держателя лебедки, с помощью которого она крепится к направляющему кольцу.

Закрепление верхнего конца центрального троса тросовой растяжки можно осуществить в районе четвертой или второй оси реактора. В этом случае удастся обеспечить максимальное приближение троса к корпусу из-за наличия на его внешней поверхности лыски, середина которой имеет координату 97 или 277° соответственно. По той же причине трос можно пропустить в зазор между корпусом и направляющими кольцами. Расположение опорных лап реактора в этих местах дает возможность провести трос между ними.

Подъем и спуск держателей с расположенными в них НАД осуществляются с помощью лебедки, которая, как уже отмечалось ранее, является составной частью верхнего блока крепления.

Центральный трос разделен на три участка, соединенных карабинами. Это упрощает процедуру снятия держателей и позволяет вынести их из помещения шахты реактора для извлечения облученных НАД в случае, если верхний блок крепления прикреплен к направляющему кольцу в районе второй оси реактора, находящейся практически напротив входа в шахту реактора. Четвертая же ось находится с другой стороны КР, что существенно затрудняет процедуру снятия и может привести к увеличению дозовых нагрузок на обслуживающий персонал.

Составной частью системы тросовых растяжек является специальная траверса, которая изготовлена из алюминиевого профиля. Она не позволяет краям держателей, находящимся в рабочем положении, опускаться за счет собственного веса. С этой целью края верхнего держателя крепятся тросами к краям траверсы, длина которой 110 см. Эти края, в свою очередь, тросами соединены с центральным тросом. Размеры траверсы и всех, отходящих от нее тросов, рассчитывались с учетом того, что эта часть конструкции размещена на уровне опорной фермы, внутренняя часть которой отстоит от КР всего на $2,5$ см.

Согласно [4, 5] специальное оборудование должно обеспечивать точное позиционирование комплектов НАД у внешней поверхности КР для обеспечения достоверности результатов сравнения расчетных и экспериментальных данных. Поэтому необходимым условием такого сравнения является знание азимутальной и высотной координат точек, где располагались детекторы во время облучения.

Определение высотных координат комплектов НАД

Определение высотных координат комплектов НАД опирается на тот факт, что конструкция оборудования для установки детекторов у внешней поверхности КР выполнена таким образом, чтобы специальные держатели располагались строго горизонтально. Учитывая технологические допуски на различные элементы оборудования, можно утверждать, что отличие высотной координаты комплекта НАД от предполагаемой высотной координаты держателя, в котором он находится, не превышает 2 см.

В таком случае для определения высотной координаты НАД достаточно знать высотную координату центра соответствующего держателя, т.е. точки, где он присоединяется к центральному тросу, относительно низа активной зоны (АКЗ) реактора. Очевидно, что она равна сумме высотных координат сварного шва № 4 относительно низа АКЗ H_1 и центра соответствующего держателя относительно сварного шва № 4 H_2 . Шов № 4 выбран за точку отсчета на внешней поверхности КР в связи с тем, что его положение относительно низа АКЗ наиболее жестко задано в проектной документации. Оно составляет $297,5$ см для "горячей" зоны.

Значение высотных координат держателей определяются как размерами частей центрального троса, так и параметрами РУ. Но при установке специального оборудования отсчет можно производить только от тепловой изоляции пола помещения шахты реактора, а

измерять – только длины частей троса, который, как видно на рис. 2, имеет сложную геометрическую конфигурацию. Это означает, что для вывода держателей специального оборудования на заданные высоты необходимо заранее рассчитать длину центрального троса от нижнего блока крепления до шва № 4, т.е. до верхнего держателя. В этом случае высотные координаты среднего и нижнего держателей рассчитываются очевидным образом.

Как видно из рис. 2, для того чтобы найти расстояние от тепловой изоляции пола помещения шахты реактора до шва № 4 h , достаточно из сдаточной или проектной документации получить значение h_3 и измерить расстояние от тепловой изоляции пола помещения шахты реактора до днища корпуса h_2 . Необходимо отметить, что хотя диапазон возможных значений этого расстояния и можно получить из проектной документации на РУ, но он достаточно широк.

Для нахождения требуемой длины центрального троса l необходимо знать длины его частей l_1 , l_2 и l_3 (см. рис. 2).

Согласно проектной документации на ВВЭР-1000 нижняя часть его днища в вертикальном разрезе представляет собой полуэллипс. Его большую a_{rf} и малую b_{rf} полуоси можно найти из сдаточной документации.

Используя формулы для геометрии на плоскости [6], можно вычислить требуемые длины частей центрального троса:

$$l_1 = \sqrt{\left(1 - \frac{b_{rf}^2}{[b_{rf} + (h_2 - h_1)]^2}\right) \left[a_{rf}^2 + 2b_{rf}(h_2 - h_1) + (h_2 - h_1)^2 \right]}, \quad (1)$$

$$l_2 = \int_{\eta}^0 \sqrt{a_{rf}^2 \sin^2 l' + b_{rf}^2 \cos^2 l'} dl' = a_{rf} \int_{\eta}^0 \sqrt{1 - \varepsilon^2 \cos^2 l'} dl', \quad (2)$$

где

$$\eta = \arcsin\left(\frac{y_0}{b_{rf}}\right) = -\arcsin\left(\frac{b_{rf}}{[b_{rf} + (h_2 - h_1)]}\right), \quad (3)$$

$$\varepsilon^2 = 1 - \left(\frac{b_{rf}}{a_{rf}}\right)^2 \quad (4)$$

и

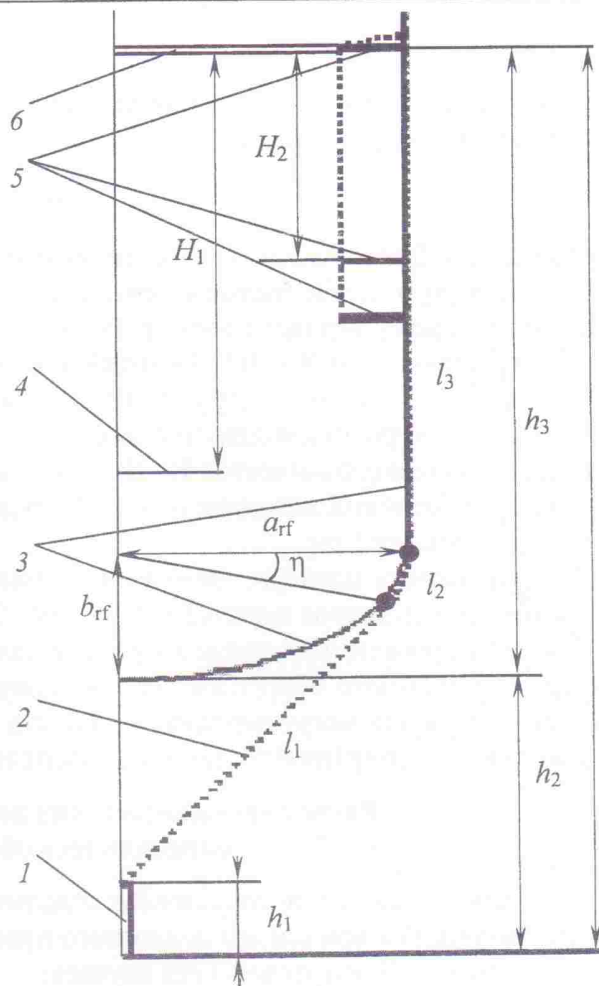


Рис. 2. Геометрическая модель прохождения центрального троса специального оборудования для дозиметрических измерений у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000: 1 – нижний блок крепления; 2 – центральный трос; 3 – внешняя поверхность корпуса реактора; 4 – уровень низа активной зоны; 5 – держатели; 6 – шов № 4.

$$l_3 = h_3 - b_{\text{ff}}. \quad (5)$$

Таким образом, если длина центрального троса от верхнего держателя до места нижнего крепления будет равна

$$l = l_1 + l_2 + l_3, \quad (6)$$

то держатель будет находиться на уровне шва № 4.

Для того чтобы нижний держатель находился на уровне шва № 3, он должен быть расположен ниже верхнего держателя на расстоянии, равном высоте верхней обечайки конкретного корпуса ВВЭР-1000. Расстояние между средним и нижним держателями зависит от характеристик топливной загрузки и легко вычисляется для каждой из них.

Анализ проектной документации на реактор ВВЭР-1000 и на специальное оборудование для установки комплектов НАД на внешней поверхности КР показал, что при использовании разработанной методики ошибка определения высотной координаты центров держателей не превышает 3 см.

Проектные размеры элементов специального оборудования рассчитываются, исходя из проектных размеров корпуса ВВЭР-1000. Однако размеры конкретного корпуса 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 КР. Следовательно, необходимо определение и обоснование допустимых отходов держателей от поверхности корпуса.

Расчет технологических допусков на отход держателей специального оборудования от КР

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 трех случаев:

- различие внешнего радиуса КР и внутреннего радиуса держателя;
- отклонение держателя от горизонтального положения;
- несовпадение центров окружностей, на которых лежат дуги, объединенные в держатель.

При этом, учитывая высокую точность изготовления КР и специального оборудования, для упрощения задачи возможно обособленное рассмотрение каждой из этих причин в предположении отсутствия двух других. Кроме того, во всех случаях можно предполагать, что КР в плане является идеальной окружностью радиуса r_{pv} , каждая дуга держателя является дугой идеальной окружности радиуса r_{h} , определяемой центральным углом α , дуги расположены симметрично относительно линии, соединяющей центральный трос и центральную ось реактора. Для упрощения дальнейшего рассмотрения заметим, что на рисунках нижний индекс 1 относится к КР, индекс 2 – к держателю, а используемые при выводах геометрические и тригонометрические формулы взяты из [6].

Первый случай – различие внешнего радиуса КР и внутреннего радиуса держателя – схематично представлен на рис. 3, где O_1 – центр окружности, описывающей внешнюю поверхность КР ($\cup CB_1$ или $\cup C_1B$), O_2 – центр окружности, которой принадлежит дуга ($\cup CB_2$ или $\cup C_2B$), описывающая держатель.

Если $r_{\text{h}} - r_{\text{pv}} = \Delta > 0$, то отходят края держателя (см. рис. 3, а). Из $\Delta O_1 O_2 B_2$ после несложных математических преобразований получаем величину отхода краев держателя

$$\Delta_{11} = r_{\text{pv}} \left(\sqrt{1 + 2 \frac{\Delta r_{\text{h}}}{r_{\text{pv}}^2} (1 - \cos \alpha)} - 1 \right). \quad (7)$$

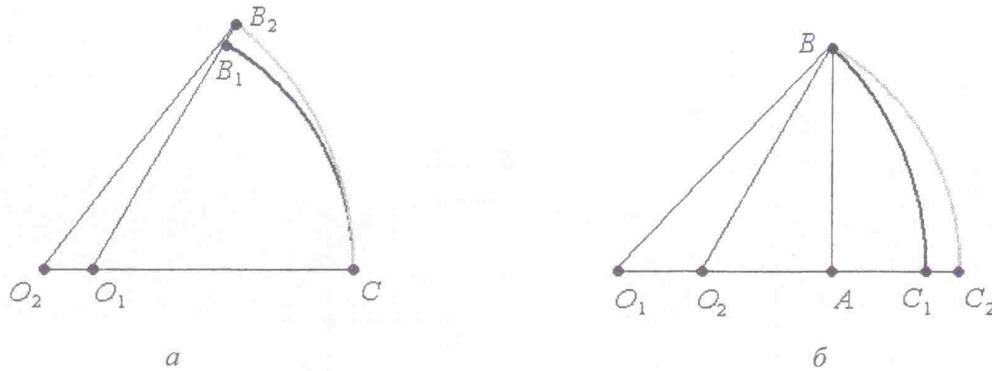


Рис. 3. Геометрическая модель неплотного прилегания держателя к КР в случае различия внешнего радиуса КР r_{pv} и внутреннего радиуса держателя r_h :

a – случай $r_{pv} < r_h$; b – случай $r_{pv} > r_h$.

Поскольку

$$\left| \frac{\Delta}{r_{pv}} \right| \ll 1, \quad (8)$$

то формулу (7) можно записать как

$$\Delta_{11} \approx (r_h - r_{pv})(1 - \cos \alpha). \quad (9)$$

В случае $r_h - r_{pv} = \Delta < 0$ от КР будет отходить центр держателя (см. рис. 3, б).

Используя формулы геометрии на плоскости и учитывая, что AC_2 – высота сегмента с центральным углом 2α окружности радиуса r_h , получаем величину отхода центра держателя

$$\Delta_{12} = AC_1 - AC_2 = r_h(1 - \cos \alpha) - r_{pv} + \sqrt{r_{pv}^2 - r_h^2 \sin^2 \alpha}, \quad (10)$$

что при выполнении условия (8) дает

$$\Delta_{12} \approx (r_{pv} - r_h) \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{\cos \alpha}. \quad (11)$$

Второй случай – отклонение какого-либо держателя от горизонтального положения вследствие несоответствия параметров держателей и системы тросовых растяжек. Очевидно, что в случае $r_{pv} = r_h$ ситуация, когда один край держателя провис, а другой – задрался, практически невозможна из-за натяжения центрального троса. Поэтому рассмотрим ситуацию, когда провисание краев держателя одинаково и равно h . Такая ситуация схематически представлена на рис. 4, где $AA' = h$ и $O_1C = r_{pv} = r_h$.

Учитывая, что $A'C$ – высота сегмента с центральным углом 2α окружности радиуса r_h , $A'B_2$ – половина его хорды и $O_1A' = O_1A$, применяя несколько раз теорему Пифагора, легко вычислить величину отхода

$$\begin{aligned} \Delta_{21} = EB_2 &= \sqrt{A'B_2^2 + \left(O_1C - \sqrt{A'C^2 - AA'^2} \right)^2} - O_1C = \\ &= \sqrt{r_h^2 \sin^2 \alpha + \left(r_h - \sqrt{r_h^2 (1 - \cos \alpha)^2 - h^2} \right)^2} - r_{pv} \end{aligned} \quad (12)$$

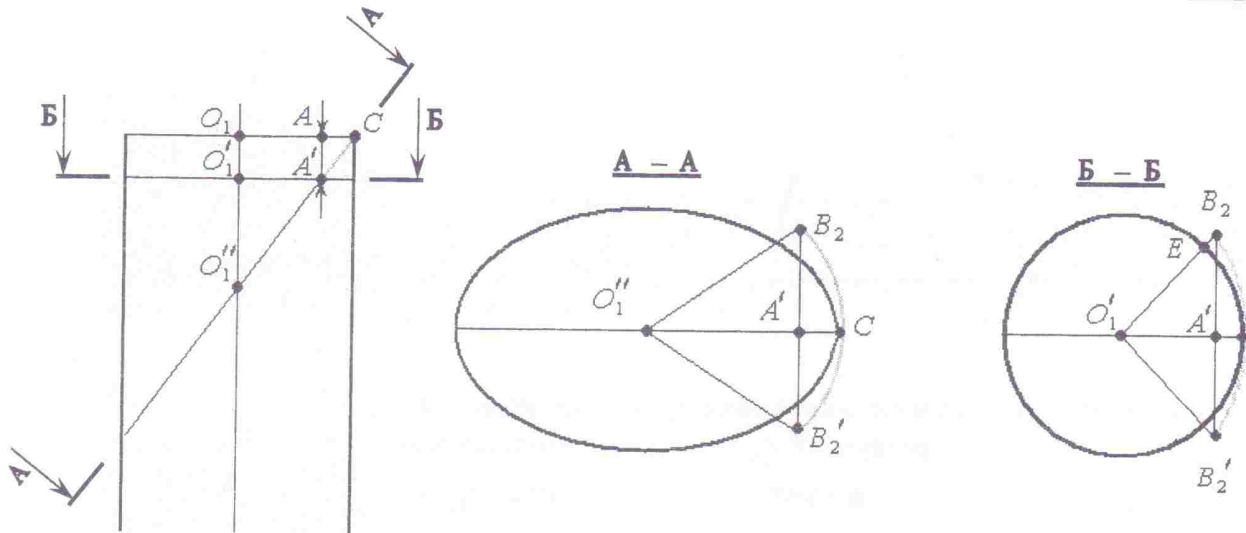


Рис. 4. Геометрическая модель отхода краев держателя от КР в случае их провисания.

Поскольку

$$\left(\frac{h}{r_h}\right)^2 \ll 1, \quad (13)$$

то формулу (12) можно записать в приближенном виде как

$$\Delta_{21} \approx \frac{h^2 \cos \alpha}{2r_h (1 - \cos \alpha)}. \quad (14)$$

Так как ситуации симметричного провисания или задирания краев держателя геометрически идентичны, то формула (14) может быть использована в обоих этих случаях. Легко подсчитать, что провисание или задирание краев держателя на 1 и 5 см приводит к их отходу от КР приблизительно на 0,15 и 3,5 мм соответственно. Следовательно, отклонение держателя от горизонтального положения также не может привести к значительному его отходу от КР.

Третий случай – несовпадение центров окружностей, на которых лежат дуги, объединенные в держатель, – имеет место при несоответствии геометрических параметров места соединения дуг проектным, что обусловлено, прежде всего, тем, что соединяемые поверхности не являются идеально плоскими. В результате этого касательные к дугам в месте их соединения образуют угол 2β .

Вначале рассмотрим ситуацию, когда центр держателя C прилегает к КР плотно, а симметрично отходят его край B_2 (см. рис. 5, а). На этом рисунке $O_1B_1 = O_1C = O_2B_2 = O_2C = r_h$, $\angle CO_1B_1 = \angle CO_2B_2 = \alpha$ и $\angle O_1CO_2 = \beta$. Поскольку CB_2 – хорда окружности радиуса r_h , определяемая центральным углом α , то из $\triangle CO_1B_2$ имеем

$$\Delta_{31} = EB_2 = r_h \left(\sqrt{1 + 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2} - 4 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left(\frac{\alpha}{2} - \beta \right)} - 1 \right). \quad (15)$$

С учетом того, что

$$\beta \ll \alpha, \quad (16)$$

получаем приближенную формулу

$$\Delta_{31} \approx \beta r_h \sin \alpha, \quad (17)$$

в которой β измеряется в радианах. Суммарный отход правого и левого краев держателей будет равен

$$\Delta_{31}^+ \approx 2\beta r_h \sin \alpha. \quad (18)$$

Легко убедиться, что формула (18) верна даже в случае несимметричного отхода краев держателя от КР, т.е. несимметричного положения держателя относительно линии, соединяющей центральный трос и центральную ось реактора. Принимая $2\beta = 3^\circ \approx 0,05236$ рад, получаем $\Delta_{31}^+ \approx 6$ см.

Вторая ситуация, когда края держателя прилегают к КР плотно, а отходит его центр, представлена на рис. 5, б. На этом рисунке $O_1B = O_1C_1 = O_2B = O_2C_2 = r_h$, $\angle BO_1C_1 = \angle BO_2C_2 = \alpha$ и $\angle O_1C_2O_2 = \beta$. Поскольку BC_2 – хорда окружности радиуса r_h , определяемая центральным углом α , то из ΔBO_1C_2 имеем

$$\Delta_{32} = EC_2 = r_h \left(\sqrt{1 - \left(2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) \right)^2} - \left(1 - 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) \right) \right). \quad (19)$$

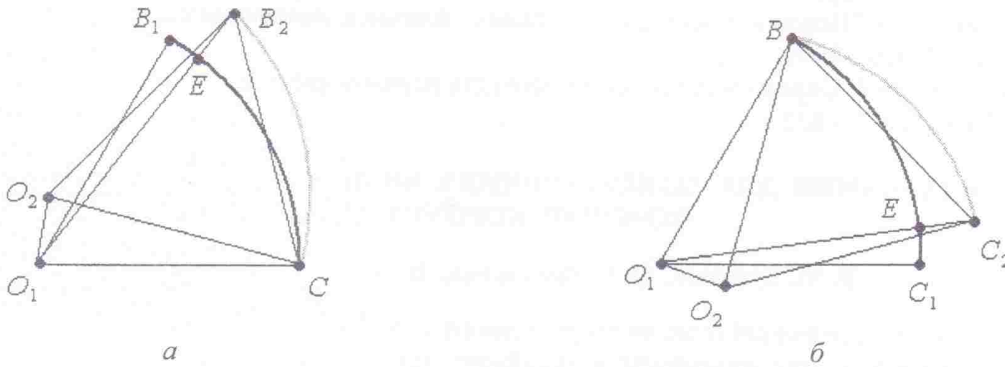


Рис. 5. Геометрическая модель неплотного прилегания держателя к КР в случае несовпадения центров окружностей, на которых лежат дуги, объединенные в держатель: а - прилегание центра и отход края держателя; б - прилегание края и отхода центра держателя.

Легко проверить, что при равных значениях β отход центра держателя Δ_{32} должен быть приблизительно равен отходу одного из его краев Δ_{31} . Однако технологические допуски на изготовление и соединение дуг таковы, что для рассматриваемой ситуации величина 2β меньше 1° , что может привести к отходу центра держателя приблизительно до 1 см.

Таким образом, можно утверждать, что сумма отходов правого и левого краев одного держателя от корпуса ВВЭР-1000 не должна превышать 6 см, а в случае их плотного прилегания к КР возможен отход центра держателя до 1 см.

Выводы

Согласно основным принципам организации работ по определению радиационной нагрузки корпуса ВВЭР-1000 [4, 5] реализована возможность выполнения дозиметрических измерений нейтронно-активационным методом у внешней поверхности КР. Суть реализации состоит в следующем:

1. Разработана и обоснована конструкция специального оборудования для установки комплектов НАД у внешней поверхности корпуса ВВЭР-1000.

2. Разработана методика определения размеров частей центрального троса тросовой растяжки с целью выведения держателей с комплектами НАД на заранее заданные высоты.

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

Следует отметить, что описанные в данной работе специальное оборудование и методика определения высотных координат комплектов НАД вошли в качестве составных частей в систему мониторинга радиационной нагрузки корпуса ВВЭР-1000, внедренную на энергоблоках № 2 Хмельницкой АЭС и № 4 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. *Minutes of WGRD-VVER Workshop on RPV Neutron Dosimetry*. Sandanski, Bulgaria, 29 Sept. - 3 Oct. 1997. - 4 p.
3. *Буканов В.Н., Васильева Е.Г., Гриценко А.В., и др.* Методика определения радиационной нагрузки корпуса реактора ВВЭР-1000 // *Ядерная и радиационная безопасность*. - 2000. - № 3. - С. 33 - 42.
4. *СТП 640.02.340.002-2003*. Система качества. Определение радиационной нагрузки корпуса реактора ВВЭР-1000 / ИЯИ НАН Украины, 2003. - 22 с.
5. *Программа модернизации АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000 (В-320)*. Ревизия 2. - Мероприятие 12311 "Недостаточная точность оценки флюенса, накопленного критическими зонами реактора" / КИЭП, 1996.
6. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров): Пер. с англ. - М.: Наука, 1977. - 832 с.

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ БІЛЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ КОРПУСУ ВВЕР-1000

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

Наведено докладний опис та обґрунтування конструкції спеціального обладнання, що використовується в методиці визначення радіаційного навантаження корпусу ВВЕР-1000 для встановлення нейтронно-активаційних детекторів біля зовнішньої поверхні корпусу. Представлено методику визначення висотних координат місць розташування детекторів.

EX-VESSEL DOSIMETRY MEASUREMENT EQUIPMENT FOR WWER-1000 REACTOR

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

The detailed description and the background of the construction of the special equipment used in the WWER-1000 pressure vessel radiation exposure determination technique for placement of neutron-activation detectors at the outer surface are given. The detector high coordinate determination technique is presented.

Поступила в редакцію 28.03.05,
после доработки – 24.10.05.