

А. В. Гриценко, В. Л. Демехин,
В. В. Илькович, В. Н. Буканов,
Е. Г. Васильева

Институт ядерных исследований
Национальной академии наук Украины

Некоторые этапы разработки дополнительной программы образцов-свидетелей для реактора ВВЭР-1000

Предложено в качестве основы дополнительной программы образцов-свидетелей для сопровождения эксплуатации корпуса ВВЭР-1000 на сверхпроектный период использовать образцы, располагающиеся в одноярусных контейнерных сборках штатных комплектов после их соответствующей модернизации. Показано, что необходимым этапом разработки дополнительной программы образцов-свидетелей является проведение метрологического эксперимента с целью определения характеристик поля нейтронов в местах расположения образцов-свидетелей в конкретном реакторе. Разработана и опробована методика определения ориентации относительно центральной оси реактора труб, предназначенных для установки штатных контейнерныхборок.

Ключевые слова: корпус реактора, образцы-свидетели, контейнерная сборка, дозиметрия образцов-свидетелей, флюенс нейтронов.

О. В. Гриценко, В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов,
Е. Г. Васильева

Деякі етапи розробки додаткової програми зразків-свідків для реактора ВВЕР-1000

За основу додаткової програми зразків-свідків для супроводу експлуатації корпусу ВВЕР-1000 на надпроектний період запропоновано використовувати зразки, розташовані в одноярусних контейнерних збірках штатних комплектів після їх відповідної модернізації. Показано, що необхідним етапом розробки додаткової програми зразків-свідків є проведення метрологічного експерименту з метою визначення характеристик поля нейтронів у місцях розташування зразків-свідків у конкретному реакторі. Розроблено й випробувано методику визначення орієнтації відносно центральної осі реактора труб, призначених для установки штатних контейнернихборок.

Ключові слова: корпус реактора, зразки-свідки, контейнерна збірка, дозиметрія зразків-свідків, флюенс нейтронів.

© А. В. Гриценко, В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов,
Е. Г. Васильева, 2011

Обязательным условием безопасной эксплуатации ядерной энергетической установки с реактором корпусного типа является сохранение целостности корпуса реактора (КР) при нормальных условиях эксплуатации, нарушении нормальных условий эксплуатации и при любых проектных авариях. Обеспечение этого условия требует контроля состояния металла корпуса в течение всего срока его службы.

Важным источником информации об изменении свойств материалов КР в условиях эксплуатации АЭС служит программа образцов-свидетелей (ОС).

Согласно штатной программе ОС [1], реализуемой на большинстве энергоблоков АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000, облучаемые образцы располагаются у внутренней стенки шахты реактора в пространстве между выгородкой и блоком защитных труб (рис. 1). В реактор загружается 6 комплектов облучаемых ОС, каждый из которых состоит из 5 контейнерныхборок (КС). В трех первых комплектах контейнеры с ОС расположены на двух ярусах один над другим, а в остальных (рис. 2) — только на верхнем. Образцы верхнего яруса предназначены для определения текущего состояния металла КР, а нижнего — для прогнозных оценок.

Исследования с применением технологии реконструкции ОС [2], облучающихся в двухъярусных КС, могут дать информацию об изменении свойств металла КР, которая обеспечивает сопровождение эксплуатации корпуса до окончания проектного срока. Вместе с тем, анализ результатов испытаний ОС и мониторинг радиационной нагрузки КР показывают возможность продления сроков эксплуатации корпусов сверх установленных проектом. Однако штатная программа ОС не обеспечивает материаловедческое сопровождение эксплуатации КР на сверхпроектный период.

Для решения этой задачи в соответствии с требованиями «Типовой программы контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям» № ПМ-Т.0.03.120-08 [3] необходимо разработать и реализовать дополнительные программы ОС, которые обеспечат бы опережающее облучение ОС по сравнению с КР.

В данной работе рассматриваются основные этапы разработки дополнительной программы ОС для реакторов ВВЭР-1000, базирующейся на использовании образцов, которые в настоящее время облучаются в одноярусных КС.

Основные этапы разработки дополнительной программы образцов-свидетелей. Согласно технической документации на ОС [1], облучающиеся в реакторе ВВЭР-1000 комплекты с двухъярусными КС обозначаются 1Л—3Л, а с одноярусными — 4Л—6Л соответственно. Для обозначения конкретной сборки дополнительно используются цифры от 1 до 5.

Результаты дозиметрии ОС, располагающихся на верхнем ярусе КС, показывают, что условия их облучения в среднем не сильно отличаются от тех, при которых облучается корпус ВВЭР-1000 [4], т. е. они имеют близкий к 1 коэффициент опережения облучения. В то же время, с учетом принципа непрерывности подтверждения безопасной эксплуатации КР в течение всего срока службы, значение коэффициента опережения облучения ОС должно быть таким, чтобы выгрузка каждого последующего комплекта с необходимым для исследований облученных образцов запасом времени предшествовала бы

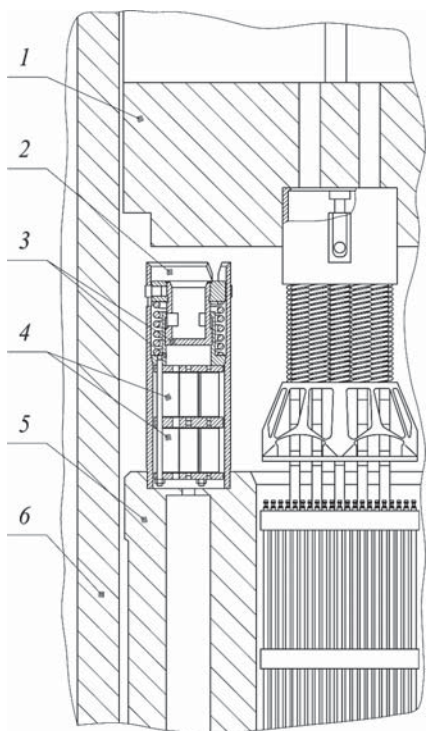


Рис. 1. Размещение контейнерных сборок в реакторе ВВЭР-1000:

1 — блок защитных труб; 2 — труба, предназначенная для установки КС; 3 — узел байонетной фиксации; 4 — контейнеры с ОС; 5 — выгородка; 6 — шахта внутрикорпусная

моменту эксплуатации реактора, для которого получены прогнозные оценки при исследовании предыдущего комплекта ОС [3].

Попытаться решить данную проблему можно либо уменьшив скорость облучения корпуса, либо ускорив облучение комплектов ОС, располагающихся на верхних ярусах КС. Первое достигается путем использования загрузок

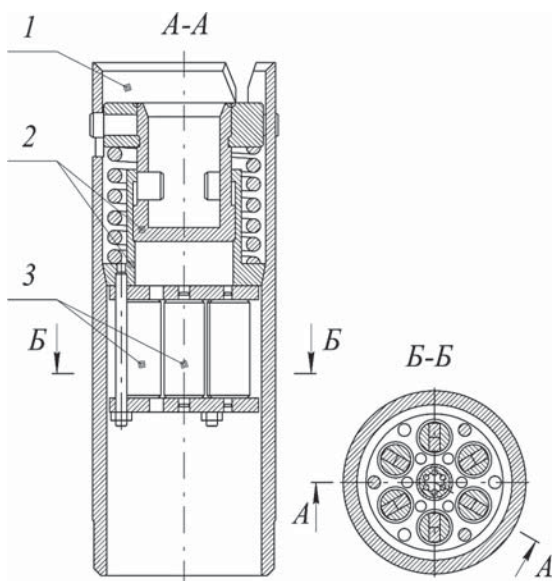


Рис. 2. Одноярусная КС:

1 — труба, предназначенная для установки КС; 2 — узел байонетной фиксации; 3 — контейнеры с ОС

с пониженной утечкой нейтронов [5]. К сожалению, такой подход хоть и позволяет существенно увеличить период достижения КР предельно-допустимого флюенса нейтронов, но при решении данной проблемы может носить только вспомогательный характер, так как скорость накопления флюенса корпусом при использовании загрузок с пониженной утечкой снижается по сравнению с обычными загрузками всего лишь примерно на 25 %.

Ускорение облучения ОС может быть достигнуто за счет их приближения к активной зоне (АКЗ) реактора, например их переносом с верхнего яруса КС на нижний. В этом — по сути, простейшем — варианте их средний коэффициент опережения увеличивается до примерно 2,5, что является достаточным для выполнения требований Типовой программы [3].

Очевидно, что при разработке дополнительной программы этот перенос должен быть выполнен так, чтобы минимизировать существующие недостатки штатной программы ОС [6]. Один из них обусловлен большими градиентами нейтронного потока в местах расположения ОС и неудачной конструкцией штатных КС (рис. 1 и 2). Он проявляется в невозможности подобрать представительную группу ОС для проведения испытаний, которая в соответствии с [7] должна состоять, как минимум, из 12 образцов при условии, что значения накопленного ими флюенса нейтронов с $E_n > 0,5 \text{ МэВ}$ $\Phi_{0,5}$ будут отличаться от среднегруппового не более чем на 10 %.

Повысить представительность результатов испытаний ОС позволяет использование технологии реконструкции [2]. Однако, как показали наши исследования [8], реконструкция ОС не дает 100 %-й гарантии получения представительных групп для проведения испытаний.

Таким образом, при разработке дополнительной программы необходимо обеспечить выравнивание значений флюенса $\Phi_{0,5}$, накопленного образцами за все время облучения. Данная задача усложняется еще одним недостатком штатной программы ОС, заключающимся в отсутствии достоверной информации об ориентации КС относительно центральной оси реактора.

В этой ситуации при разработке дополнительной программы необходимо опираться на общие закономерности поля нейтронов в местах расположения ОС [4], [9]. Оказывается, что наиболее простое решение возникшей проблемы заключается в повороте КС на 180° вокруг собственной оси при переносе ОС с верхнего яруса на нижний (рис. 3).

Реализация предлагаемой схемы означает, что модернизированные комплекты ОС дополнительной программы следует выгрузить из реактора для проведения испытаний в момент выравнивания значений флюенсов, накопленных образцами. Очевидно, что это единое выровненное значение в два раза больше среднего значения флюенса, накопленного ОС до их модернизации (переноса на нижний ярус). Следовательно, штатные комплекты 4Л—6Л следует выгружать из реактора и модернизировать по одному исходя из условия, что удвоение флюенса должно наступить за некоторое время до момента эксплуатации КР*, для которого получены прогнозные оценки при испытаниях предыдущего комплекта ОС.

* Имеется в виду время, необходимое на проведение всего комплекса работ по получению прогнозных оценок. Предположительно эти работы будут выполнены в течение периода времени, включающего не более двух топливных кампаний.

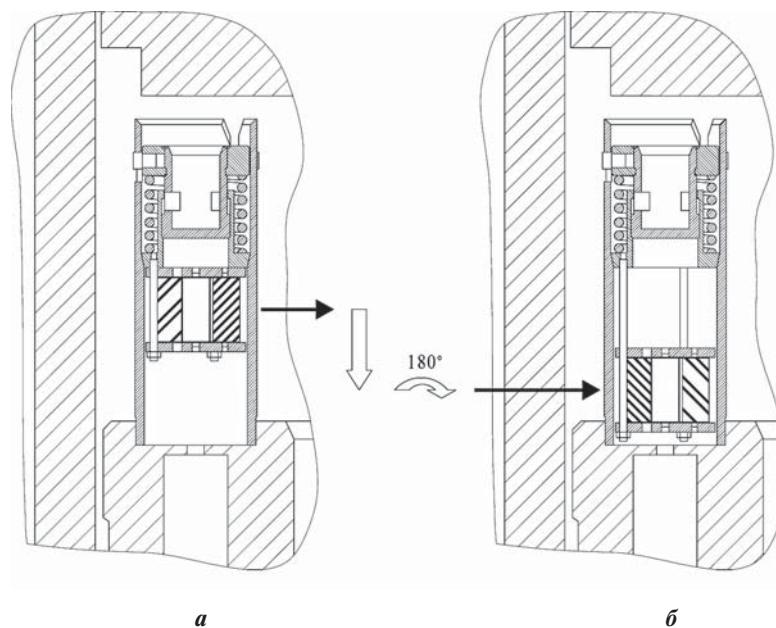


Рис. 3. Схема модернизации программы ОС:
 а — размещение контейнеров с ОС в реакторе до модернизации; б — размещение контейнеров с ОС этой же КС в реакторе после модернизации

Выгрузка (загрузка) ОС из реактора возможна только во время проведения планово-предупредительных ремонтов. Поэтому при реализации дополнительной программы необходимо обеспечить достаточно хорошее совпадение моментов выравнивания значений $\Phi_{0,5}$ между ОС в каждой из пяти КС одного комплекта и момента окончания кампании, после которой планируется выгрузка данного модернизированного комплекта для испытаний. При этом необходимо учитывать, что значения $\Phi_{0,5}$, накопленные образцами из разных металлов КР, в силу отличий условий облучения между сборками будут разными. В результате прогнозные оценки для основного металла и металла шва будут получены для разных значений $\Phi_{0,5}$. Естественно, что опорным в таком случае будет минимальное значение $\Phi_{0,5}$.

Анализ конструкции штатных КС (рис. 1 и 2) показал, что контейнеры с ОС комплектов 4Л—6Л не обязательно перемещать строго на уровень нижнего яруса. По отношению к этому положению контейнеры могут быть смещены приблизительно до 3 см вниз (ближе к АКЗ) и практически неограниченно вверх. Следовательно, за счет высотного положения контейнеров возможна корректировка средней скорости накопления флюенса для каждой модернизированной КС с тем, чтобы максимально сблизить между собой моменты выравнивания значений $\Phi_{0,5}$ каждой сборки и момент окончания соответствующей топливной кампании, в идеальном варианте — вплоть до их полного совпадения.

Очевидно, что правильность подбора оптимальных сроков выгрузки из реактора комплектов 4Л—6Л и высотного положения контейнеров с ОС после модернизации непосредственно зависит от надежности имеющихся данных как об общих закономерностях поля нейтронов в местах расположения ОС, так и о его параметрах в конкретном реакторе ВВЭР-1000. Однако, как известно [6], одним из существенных недостатков штатной программы является

ее дозиметрическая часть, которая не позволяет с необходимой точностью определить условия облучения ОС в реакторе.

В связи с этим в ИЯИ НАН Украины была разработана специальная методика определения условий облучения ОС в реакторе ВВЭР-1000, в основе которой лежит пакет программ MCSS [10]. Данная методика позволяет с необходимой точностью определять значения различных функционалов нейтронного потока на ОС штатной программы, что подтверждено в рамках международного проекта TAREG [11], выполняемого при поддержке Европейской комиссии российскими и украинскими научно-исследовательскими организациями.

Как показал опыт, полученный при дозиметрии ОС штатной программы, условия облучения образцов могут существенно отличаться в разных реакторах ВВЭР-1000. Обусловлено это, скорее всего, отсутствием точной информации обо всех особенностях конструкции данного реактора, которые могут повлиять на условия облучения ОС. При определении условий облучения извлеченных из реактора образцов это влияние учитывается корректировкой расчетной модели, основанной на полученной после разборки КС экспериментальной информации. При разработке дополнительной программы ОС такой возможности нет или она крайне ограничена.

Поэтому одним из первых этапов разработки дополнительной программы ОС для конкретного реактора ВВЭР-1000 должно быть проведение дозиметрического эксперимента, целью которого является получение надежной информации об условиях облучения ОС в рассматриваемом реакторе. Отметим, что в соответствии с [12] проведение такого эксперимента запланировано на энергоблоке № 3 Ровенской АЭС. Для этого предполагается изготовить три двухъярусные, соответствующие штатным, метрологические КС, оснащенные расширенным по номенклатуре

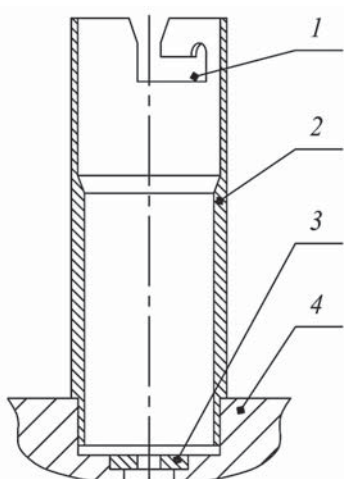


Рис. 4. Основные элементы трехмерной модели:
1 — паз; 2 — труба;
3 — дросселирующая шайба;
4 — выгородка

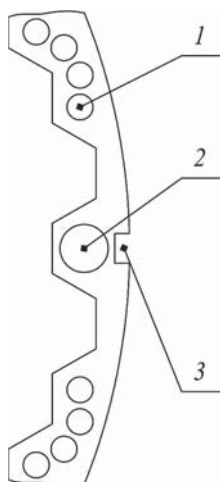


Рис. 5. Модель выгородки:
1 — вертикальный канал диаметром 70 мм; 2 — вертикальный канал диаметром 130 мм; 3 — вертикальный паз

и составу комплектом нейтронно-активационных детекторов (НАД), установить их в реактор на позиции Л1/Л5, Л2/Л4, Л3 и облучить в течение одной кампании. Комплексное исследование всех облученных НАД даст необходимую информацию для оптимизации схемы размещения модернизированных КС дополнительной программы ОС в реакторе ВВЭР-1000 энергоблока № 3 РАЭС.

Учитывая, что значения $\Phi_{0,5}$ на ОС в пределах одного яруса штатной КС могут отличаться приблизительно в два раза, очень важно правильно установить как модернизированные, так и метрологические КС в реактор. Поэтому одной из основных задач запланированного на энергоблоке № 3 РАЭС метрологического эксперимента является разработка и реализация мероприятий по обеспечению достаточно малых отклонений углов ориентации КС от заданных значений при их установке в реактор. В частности предполагается доработка конструкции узла байонетной фиксации (рис. 1 и 2) и разработка специального приспособления для установки заданного угла ориентации КС.

Как видно на рис. 1, штатные КС устанавливаются в трубы, приваренные к верхнему торцу выгородки. Следовательно, ориентация КС непосредственно зависит от ориентации симметричных пазов в этих трубах относительно центральной оси реактора. Однако в большинстве случаев трубы для установки КС сориентированы произвольно. Это значит, что для успешного проведения метрологического эксперимента в частности и для удачной реализации дополнительной программы ОС в целом необходимо определить ориентацию симметричных пазов в трубах для КС относительно центральной оси рассматриваемого реактора. Проведенный нами анализ зависимости значений функционалов нейтронного потока на ОС от величины отклонения реальной ориентации КС от заданной показал, что ориентация труб должна быть определена с точностью не хуже $\pm 5^\circ$.

Методика определения ориентации труб, предназначенных для установки штатных КС. С целью определения ориентации труб для установки штатных КС относительно центральной оси конкретного реактора на энергоблоке № 1 Южно-Украинской АЭС с помощью телевизионной

системы на перегрузочной машине МП-1000 была проведена фотосъемка этих труб.

Поскольку фотография является двухмерным представлением (перспективной проекцией) трехмерных объектов, при таком проецировании длины отрезков и значения углов не сохраняются. Поэтому непосредственно выполнить необходимые измерения на фотографиях или хотя бы сопоставить их с чертежами невозможно. Кроме того, изображение на фотографиях искажается из-за низкого разрешения, дисторсии при фотосъемке в воде.

Решения подобных задач достаточно хорошо известны в машиностроении, архитектуре, компьютерной графике. В таких случаях обычно используют трехмерную цифровую модель (ТЦМ), разработанную в системе автоматического проектирования (САПР). Поэтому в САПР, в соответствии с технической документацией на внутрикорпусные устройства реактора энергоблока № 1 ЮУАЭС, была разработана трехмерная модель выгородки и труб, в которые устанавливаются КС.

Разработанная ТЦМ включает только те элементы конструкции выгородки и труб, которые видны на полученных фотографиях. Основными элементами для построения трехмерной модели являются трубы с симметричными пазами для фиксации КС, дросселирующие шайбы и часть выгородки (рис. 4).

Трехмерная модель выгородки (кольцо верхнее) и труб, в которые устанавливаются КС, представлена на рис. 6.

С помощью САПР контур разработанной трехмерной модели был наложен на фотографии. Суть наложения заключается в том, что фотографии устанавливаются в этом программном обеспечении в качестве фона и виртуальная камера наводится на ТЦМ. Эта работа выполняется в перспективной проекции, что существенно увеличивает точность наведения. Наведение виртуальной камеры — наиболее ответственный этап, поскольку его качество зависит от подобранных координат положения камеры и фокусного расстояния, которые, в свою очередь, зависят от субъективного мнения. Виртуальная камера наводится по ориентирам на фотографии. Такими ориентирами являются внутренняя граненая поверхность выгородки, ее вертикальные каналы и пазы, верхние торцы труб.

После наведения камеры на ТЦМ осуществляется поворот модели трубы вокруг ее центральной оси до полного совмещения пазов на фотографии и модели. Наведение камеры и поворот трубы выполняются независимо для всех фотографий. Поворот в каждом случае осуществляется с одного и того же исходного значения. Независимость наведений камеры и независимость поворотов моделей труб обеспечивают достоверность определения ориентации труб

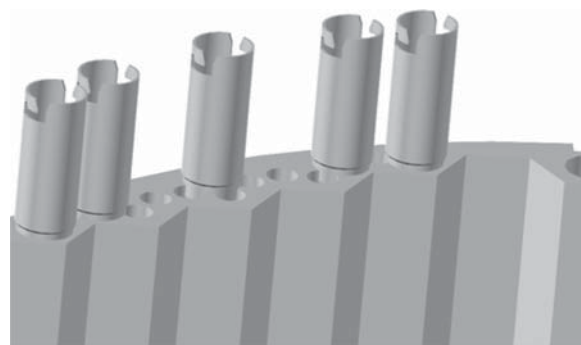


Рис. 6. ТЦМ выгородки и труб для установки штатных КС

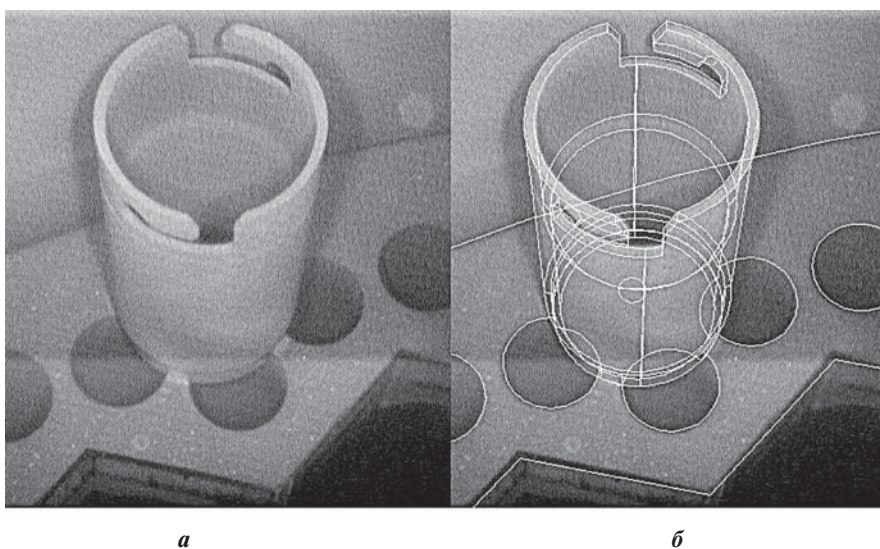


Рис. 7 Фотография (а), полученная с помощью телевизионной системы на перегрузочной машине МП-1000, и наложение контура трехмерной модели на фотографию (б)

для КС. В качестве примера на рис. 7 представлены фотография, полученная с помощью телевизионной системы на перегрузочной машине МП-1000, и наложение контура трехмерной модели на эту фотографию.

Затем с помощью средств используемой САПР измеряется угол, определяющий ориентацию симметричных пазов в трубах относительно центральной оси реактора. Этот угол отсчитывается против часовой стрелки между плоскостями, одна из которых проходит через центральные оси реактора и рассматриваемой трубы, а другая — через центральную ось этой трубы и середины ее вертикальных пазов (рис. 8).

Значение угла α вычисляется САПР автоматически. Анализ значений этого угла, полученных для каждой трубы на нескольких (не менее трех) наложениях, позволил оценить величину погрешности определения ориентации труб для КС по разработанной методике. Она не превышает 3° . Таким образом, достаточно строгое требование к точности определения ориентации труб для КС было выполнено.

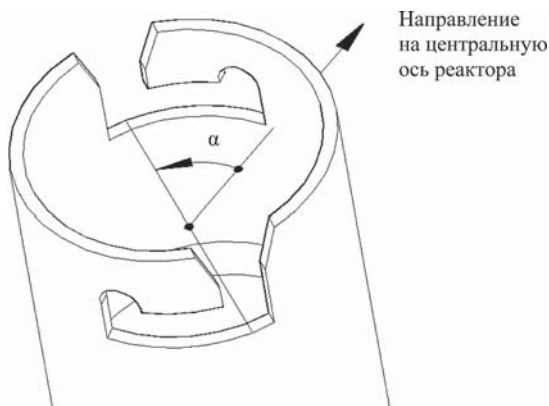


Рис. 8. Измерение угла α , определяющего ориентацию симметричных пазов в рассматриваемой трубе относительно центральной оси реактора

Выводы

Таким образом, в качестве основы дополнительной программы ОС, которая согласно требованиям [3] должна обеспечить контроль состояния металла корпусов ВВЭР-1000 на сверхпроектный период, предложено использовать ОС штатных одноярусных комплектов 4Л—6Л после их соответствующей модернизации. Суть модернизации заключается в переносе контейнеров с ОС с верхнего яруса на нижний с одновременным поворотом всей КС на 180° .

Реализация предложенной схемы позволит, прежде всего, обеспечить опережающее облучение ОС по отношению к КР, и, как следствие, получить представительные прогнозные оценки состояния металла корпуса ВВЭР-1000 в течение длительной эксплуатации, включая возможное продление срока службы до 60 лет и более.

Важнейшим этапом разработки дополнительной программы ОС является проведение метрологического эксперимента с целью получения надежной информации об условиях облучения ОС в конкретном реакторе.

Одной из работ, необходимых для успешной разработки дополнительной программы ОС, является определение ориентации труб для установки КС относительно центральной оси реактора с точностью не хуже $\pm 5^\circ$.

Сотрудниками отдела проблем дозиметрии ядерных реакторов ИЯИ НАН Украины разработана методика определения ориентации труб для КС. Данная методика опробована на реакторе ВВЭР-1000 энергоблока № 1 ЮУАЭС. В результате ориентация труб в этом реакторе определена с точностью не хуже $\pm 3^\circ$.

Список литературы

1. Образцы-свидетели. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1152.75.00.000 ТО. — 60 с.
2. РД ЭО 0352-2. Методика реконструкции образцов для испытаний на ударный изгиб и трехточечный статический изгиб материалов корпусов реакторов типа ВВЭР.

3. Типовая программа контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям. № ПМ-Т.0.03.120-08.
4. *Bukanov V. N., Dyemokhin V. L., Grytsenko O. V., Vasylyeva E. G., Pugach S. M.* Comparison of Irradiation Conditions of VVER-1000 Reactor Pressure Vessel and Surveillance Specimens for Various Core Loadings // Reactor Dosimetry: State of the Art 2008 (Proc. 13th Intern. Symp. on Reactor Dosimetry, Hotel Akersloot, the Netherlands, 25-30 May 2008) — World Scientific, 2009. — P. 318-324.
5. *Буканов В. Н., Демехин В. Л., Коренной А. А.* Использование топливных загрузок с пониженной утечкой нейтронов для ослабления радиационной нагрузки на корпус ВВЭР-1000 // Атомная энергия. — 2006. — Т. 101, вып. 2. — С. 93-97.
6. *Буканов В. Н., Васильева Е. Г., Вишневский И. Н., Гриценко А. В., Демехин В. Л.* Проблемы дозиметрии образцов-свидетелей, облученных в реакторе ВВЭР-1000 // Ядерная и радиационная безопасность. — 2000. — № 2. — С. 35-42.
7. **Принципиальные положения по контролю свойств металла корпуса реактора типа ВВЭР в процессе эксплуатации по образцам-свидетелям: Руководящий документ.** — Инв. № 62-1872. — М., 2002. — 18 с.
8. *Grytsenko O. V., Bukanov V. N., Pugach S. M.* Irradiation Conditions for Surveillance Specimens Located into Plane Containers Installed in the WVER 1000 Reactor of Unit 2 of the South-Ukrainian NPP // Reactor Dosimetry: State of the Art 2008 (Proc. 13th Intern. Symp. on Reactor Dosimetry, Hotel Akersloot, the Netherlands, 25-30 May 2008) — World Scientific, 2009. — P. 243-259.
9. *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.
10. *Grytsenko O. V., Bukanov V. N., Dyemokhin V. L., Vasylyeva E. G., Mahlers Yu. P.* Dosimetry of Surveillance Specimens Irradiated at WVER-1000 Reactor // Proc. of Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Part II, Kyiv, 29 May — 03 June 2006. — К.: INR, 2007. — P. 686-691.
11. Project TAREG 2.01/00 Validation of neutron embrittlement for VVER 1000 & 440/213 RPVs with emphasis on integrity assessment. Task 3.1.1 Development of the procedure for neutron doses upgrading and the neutron dose calculations for a reference unit. INR of NAS of Ukraine Report, Kyiv, 2008.
12. **Рабочая программа контроля свойств металла КР блока № 3 Ровенской АЭС с применением модернизации 4-6 комплектов ОС / РНЦ «Курчатовский институт».** — Инв. № 180-16/158. — М., 2008.

Надійшла до редакції 07.12.2010.