

*На правах рукописи*

**РЫЖОВ**  
Сергей Борисович

**РАЗРАБОТКА, РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ОБОСНОВАНИЕ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ  
ЭКСПЛУАТАЦИЯ УЗЛОВ УПЛОТНЕНИЯ РЕАКТОРА ВВЭР-1000**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,  
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

**Автореферат**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург — 2007**

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии "Опытное конструкторское бюро "Гидропресс", г. Подольск, Московской обл.

Научный руководитель:

– доктор техн. наук, член-корр. РАН

*Драгунов Юрий Григорьевич*

Официальные оппоненты:

– доктор техн. наук

*Безлепкин Владимир Викторович*

– доктор техн. наук, профессор

*Мительман Михаил Григорьевич*

Ведущая организация: *ФГУП "Государственный научный центр РФ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского" (г. Обнинск, Калужской обл.)*

Защита диссертации состоится 27 марта 2007 г. в 18-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29  
в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан "26" февраля 2007 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)5521630

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета



*К.А. Григорьев*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Разъемные уплотнительные соединения сосудов давления и трубопроводов ВВЭР выполняют важную роль по удержанию в герметичном объеме теплоносителя первого контура. Течи через уплотнительные соединения являются исходными событиями для аварий. Разъемы отличаются от других узлов корпусного оборудования тем, что в них имеются границы раздела, и по этим границам возможны образования контактирующих поверхностей после сборки и затяжки крепежных элементов. Уплотнение осуществляется путем обжатия прокладок, которые определяют эффективность уплотнения. При проектировании уплотнительных соединений конструктору необходимо решать две «конкурирующие» задачи: обеспечение плотности соединения с некоторым не лимитированным запасом, что достигается высокими усилиями обжатия прокладки, и обоснование прочности, что, как хорошо известно, строится на критериях, ограничивающих уровень статической и циклической напряженности. При использовании металлических прокладок из никеля в оборудовании ВВЭР имеется ряд отказов. Это определяется свойствами никеля в пластическом состоянии при рабочей температуре. Наблюдаются эффекты растрескивания и заметной релаксации контактных напряжений. Для никелевых прокладок требуются большие величины усилий на крепеже, что иногда является не приемлемым с точки зрения прочности. Собственно, контактные напряжения на границе раздела прокладки и соединяемой детали также ограничиваются по критериям Норм прочности.

В связи с началом разработки РУ нового поколения, характерной особенностью которых является высокая экономичность при более высоком уровне безопасности разработка и расчетно-экспериментальное обоснование плотно-прочных разъемных соединений на основе прогрессивных материалов для уплотнений является актуальным.

**Цель и задача работы.** Цель работы заключалась в разработке методов конструирования, расчетно-экспериментального обоснования работоспособности разъемных соединений верхнего блока ВВЭР, в том числе прокладок, для снижения напряженности элементов разъемных соединений и повышения уровня плотности во всех эксплуатационных режимах, а также в проведении опытно-промышленной эксплуатации новых уплотнений на действующих АЭС.

### **Научная новизна работы.**

1) Разработаны новые подходы к конструированию прокладок из расширенного графита для разъемных уплотнительных соединений верхнего блока ВВЭР.

2) Проведены экспериментальные исследования плотности различных вариантов конструктивного исполнения уплотнительных устройств и получены новые результаты по поведению прокладок в стендовых условиях.

3) Разработаны расчетные методики анализа напряжений в разъемных соединениях верхнего блока.

4) Разработаны новые технологии изготовления и монтажа на действующих блоках АЭС прокладок из расширенного графита.

**Практическая ценность.** Разработанные подходы к конструированию, изготовлению и монтажу прокладок из расширенного графита и разработанные методики экспериментально-расчетного обоснования разъемных соединений верхнего блока внедрены на ряде действующих блоков АЭС.

**Достоверность и обоснованность** научных положений определяется использованием фундаментальных физико-математических положений механики сплошных сред для решения поставленной задачи, использованием апробированных математических методов, сопоставлением результатов расчетов по разработанным программам с аналитическими решениями, а также сравнением результатов численных расчетов с экспериментальными данными.

**Апробация работы.** В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследований докладывались на: второй, третьей и четвертой научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР" в г. Подольск в 2001, 2003 и 2005 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 3 работы.

**Структура, объем и содержание работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 113 стр., включая 41 рисунок, 5 таблиц и список литературы из 70 наименования.

Во **введении** отмечена актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертации. Дано краткое изложение содержания диссертации.

В **первой** главе выполнен анализ проектирования и эксплуатации разъемных соединений реакторных установок ВВЭР в рамках исследуемой проблемы.

Во **второй** главе описано расчетное обоснование узлов уплотнения с прокладками из расширенного графита.

**Третья** глава посвящена изложению экспериментального обоснования узлов уплотнения патрубков внутриреакторного контроля, приводов системы управления и защиты верхнего блока с прокладками из расширенного графита.

В **четвертой** главе представлены результаты опытной эксплуатации прокладок из расширенного графита на реакторах ВВЭР-1000

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы по проделанной работе.

Ниже охарактеризовано научное содержание и результаты диссертации.

**В главе 1** проводится анализ вопросов проектирования и эксплуатации разъемных уплотнительных соединений реакторных установок и, в первую очередь, верхнего блока реактора.

Конструированию и расчету разъемных соединений посвящено очень большое количество литературы. В большинстве публикаций по уплотнительным соединениям, появившимся в 60–80-е годы 20 века, главное внимание уделяется расчетным подходам к анализу напряжений, что объясняется недостаточными возможностями вычислительной техники в те времена.

Узлы уплотнения реактора ВВЭР-1000 относятся к элементам нормальной эксплуатации, важным для безопасности, что определяет сложность конструкторской задачи по разработке и обоснованию узлов уплотнений и соответствующий уровень требований к узлам уплотнения, а именно:

- обеспечение высокой надежности при эксплуатации в течение длительного времени в жестких условиях температурных перепадов и агрессивной среды;
- полное расчетное обоснование в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-002-86;
- экспериментальное обоснование для подтверждения расчетных методик и для подтверждения характеристик, по которым расчетные методики не отработаны, либо их отработка нецелесообразна;
- обеспечение удовлетворительных эксплуатационных характеристик с точки зрения минимизации дозовых затрат персонала при проведении регламентных работ с разуплотнением и уплотнением узлов;
- устойчивость конструкции к отклонению от проектных требований или ошибочных действий персонала.

Разъемные уплотнительные соединения реактора расположены за исключением главного разъема на верхнем блоке (рис. 1) и являются компонентами 1 контура в не отсекаемой его части. В связи с этим по проекту не допускаются течи разъемных соединений на реакторе при его нормальной эксплуатации. Всего в реакторе В-320 295 разъемов, номенклатура и количество которых следующая: главный разъем реактора – 1; узлы уплотнения

патрубков СУЗ верхнего блока – 61; узлы уплотнения патрубков КНИ верхнего блока – 16; узлы уплотнения патрубков ТК верхнего блока – 14; узлы уплотнения КНИ – 64; узлы уплотнения стоек ТК – 14; узлы уплотнения воздушника – 3; узлы уплотнения датчиков приводов СУЗ – 61; узлы уплотнения чехлов приводов СУЗ с "заглушкой" – 61.

Главный разъем реактора представляет собой уплотнение с никелевыми прокладками диаметром 3980 мм и далее в реферате не рассматривается.

Узлы уплотнения патрубков СУЗ (рис. 2) предназначены для механической фиксации приводов СУЗ на патрубке крышки реактора, герметизации разъемного соединения и обеспечения межпрокладочной полости для системы контроля протечек.

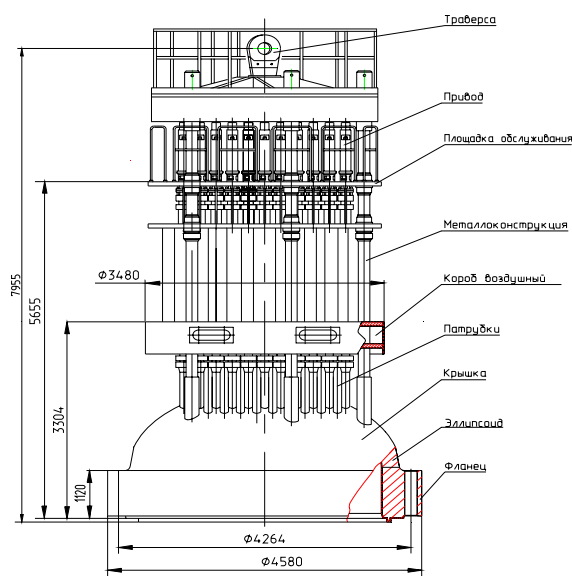


Рис. 1. Блок верхний реактора ВВЭР-1000

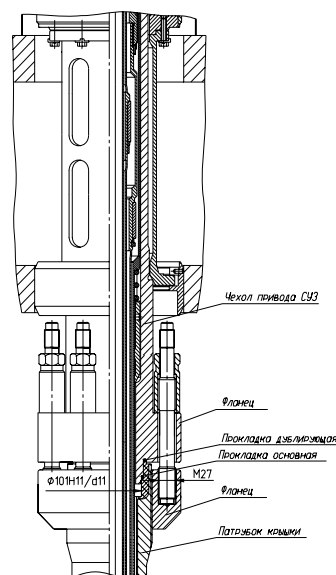


Рис. 2. Узел уплотнения патрубка СУЗ

Узлы уплотнения патрубков КНИ (рис. 3) и ТК (рис. 4) предназначены для механической фиксации и герметизации фланцев, через которые осуществляется вывод датчиков внутриреакторного контроля. По условиям периодичности перегрузок топлива узлы уплотнения патрубков КНИ и ТК переуплотняются ежегодно.

Узлы уплотнения стоек ТК предназначены для механической фиксации и герметизации стоек температурного контроля блока защитных труб. Переуплотнение всех узлов уплотнения стоек ТК производится при каждой перегрузке реактора, т.е. через 1 год эксплуатации. Базовая конструкция узлов уплотнения КНИ и стоек ТК предусматривала никелевые прокладки.

Узлы уплотнения воздушника реактора предназначены для механической фиксации и герметизации съемного участка трубопровода отвода

воздуха, парогазовой смеси и теплоносителя из подкрышечного пространства в режимах нормальной эксплуатации и при авариях. Конструкция узлов до модернизации представлена на рис. 5, после модернизации на рис. 6. По условиям эксплуатации узлы без переуплотнения работают в течение 1 года.

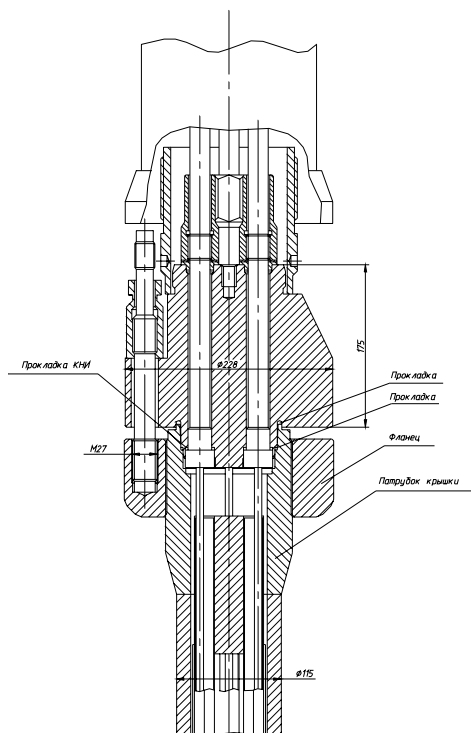


Рис. 3. Узел уплотнения патрубка КНИ

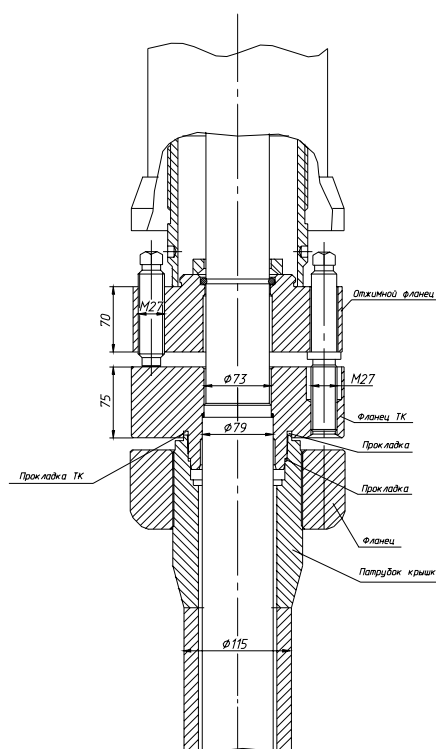


Рис. 4. Узел уплотнения патрубка ТК

Узлы уплотнения датчиков приводов СУЗ предназначены для механической фиксации и герметизации датчиков положения органов регулирования СУЗ при установке их на "заглушке" привода. Конструкция узла представлена на рис. 7.

Переуплотнение узла производится ежегодно. При модернизации никелевая прокладка в базовом проекте была заменена на прокладку из РГ. Узлы уплотнения чехлов приводов СУЗ с "заглушкой" предназначены для механической фиксации и герметизации блоков перемещения приводов при установке их на чехлы приводов. Конструкция после модернизации представлена на рис. 8. Продолжительность работы до переуплотнения – 6 лет. Базовая конструкция включала коническую никелевую прокладку и для применения прокладок из РГ узел подвергся существенной переработке.

**Вторая глава** посвящена расчетному обоснованию узлов уплотнения с прокладками из расширенного графита.

В соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-002-86 узлы уплотнения реактора должны быть обоснованы с помощью поверочных расчетов с учетом всех расчетных нагрузок и всех расчетных режимов эксплуатации.

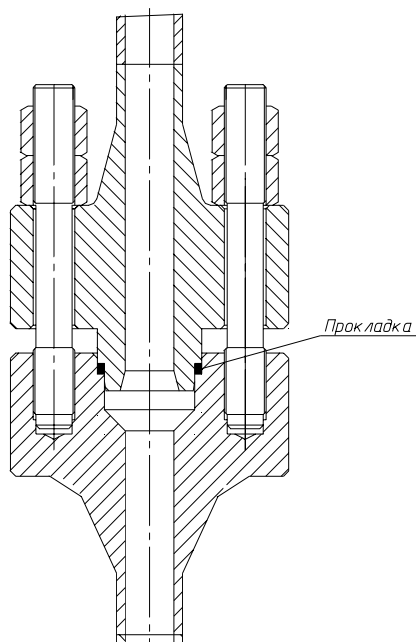


Рис. 5. Узел уплотнения патрубка воздушника до модернизации

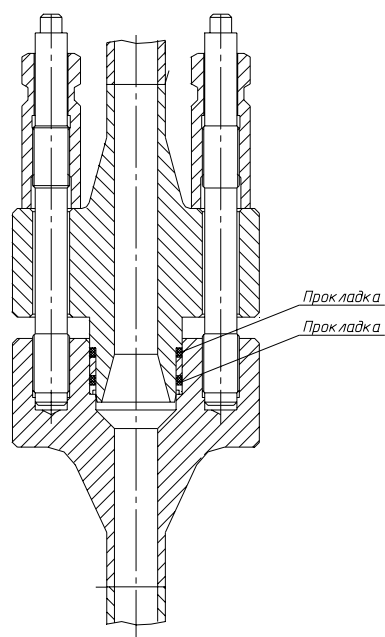


Рис. 6. Узел уплотнения патрубка воздушника после модернизации

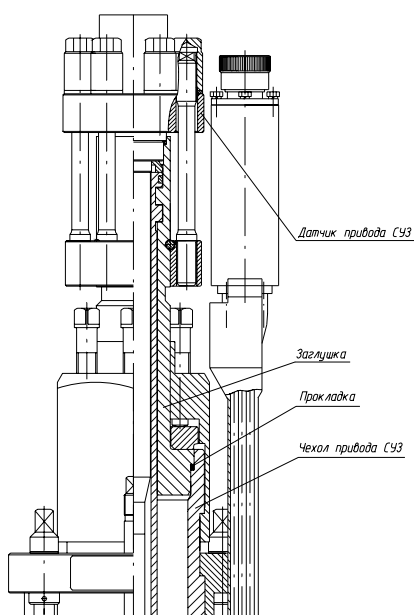


Рис. 7. Узлы уплотнения датчиков приводов СУЗ и чехлов приводов СУЗ с «заглушкой» после модернизации

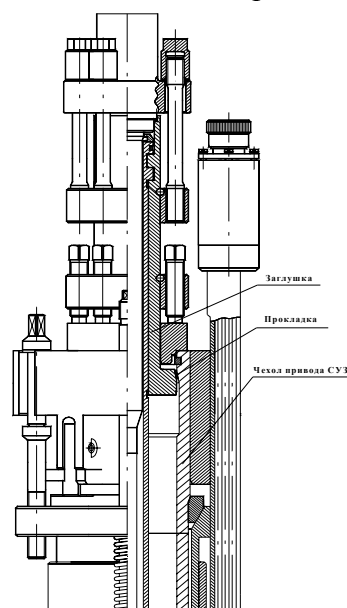


Рис. 8. Узел уплотнения чехла привода СУЗ с «заглушкой» до модернизации

Для определения исходных данных по каждому узлу проводился расчетный анализ эксплуатационных режимов и определялись граничные условия по температуре. Далее, из всего перечня проектных режимов, определенных для реакторной установки выбирались расчетные режимы, кото-



рые с необходимым консерватизмом описывают все возможные температурные состояния рассмотренного узла. Для обоснования циклической прочности к выбранным режимам добавлялись режимы, связанные с «холодным» состоянием и стационарным «горячим» состоянием узла. На основе полученных исходных данных проводились расчеты температурных полей, которые в свою очередь являлись исходными данными для расчетов статической и циклической прочности.

Расчеты температурных полей проводились методом элементарных балансов по программе «ТЕМП», аттестованной Госатомнадзором РФ. При проведении расчетов статической и циклической прочности напряжения в элементах узла уплотнения определялись с использованием вычислительной программы «РАЗЪЕМ», аттестованной Госатомнадзором РФ.

Для реактора ВВЭР основные рекомендации по выбору геометрических размеров, характеристик материалов и процедур затяжки крепежа содержатся в ПНАЭ Г-7-002-86, что позволяет при соблюдении этих рекомендаций обеспечивать плотность проектируемых соединений и прочность составных элементов и крепежа при затяжке, ГИ и в номинальном режиме. Однако для поверочного расчета, в котором учитываются все расчетные и эксплуатационные нагрузки, упрощенные одномерные зависимости из ПНАЭ Г-7-002-86 не позволяют учесть нестационарную теплопроводность, концентрацию напряжений и контактное взаимодействие элементов, составляющих разъемное соединение. В большинстве случаев наиболее нагруженными элементами разъемных соединений являются крепежные детали (шпильки, болты), а на поверхностях обжатия прокладок возникают локальные пластические области. В отдельных конструкциях, например, в разъемах на крышке реактора, при стеснении деформаций имеют место высокие напряжения в составных элементах. Поэтому в обоснованиях прочности и плотности разъемных соединений применяются более сложные в сравнении с ПНАЭ Г-7-002-86 методические подходы, которые можно условно разделить на два. Первый подход основывается на ряде упрощающих допущений. Задача формулируется как осесимметричная, что является вполне приемлемым для большинства конструкций разъемных соединений РУ. При этом элементы разъемного соединения рассматриваются или как набор оболочек, колец и брусьев, или как осесимметричные тела произвольной формы. При построении решения в соответствии с этим подходом решается вопрос о сведении трехмерной задачи деформирования к осесимметричной. Поскольку трехмерность задачи деформирования разъемного соединения РУ в основном связана с дискретным расположением крепежных деталей и отверстий (гнезд) под эти детали, а также с не-

равномерностью температурного поля в окружном направлении, то при сведении ее к осесимметричной принимается, что взаимодействие крепежных элементов с другими деталями разъемного соединения является непрерывным с применением усреднения функций задачи. Поэтому наиболее применяемой в обоснованиях узлов уплотнений верхнего блока реактора ВВЭР вычислительной программой, основанной на данном подходе, является программа РАЗЪЕМ.

Второй подход, достаточно широко применяемый в последнее время, основан на решении трехмерной задачи с помощью МКЭ, что означает и трехмерное описание взаимодействия шпильки (болта) с соединяемыми элементами разъема. Численная реализация такого подхода с возможностью учета трехмерной физической и геометрической нелинейностей деформирования разъемного соединения возможна только с помощью универсальных компьютерных кодов типа ANSYS. Вторым подходом применяется для расчетного обоснования главного разъема реактора.

Сведение трехмерной задачи к двумерной в программе РАЗЪЕМ основано на возможности замены дискретного распределения крепежных деталей и резьбовых гнезд осесимметричным. Приближенно считается, что функции перемещений и напряжений не зависят от окружной координаты  $\varphi$ . В расчетную схему вводится эквивалентный осесимметричный элемент (эквивалентная шпилька), имеющий свойства бруса, который при осесимметричном деформировании усредненно статически и кинематически эквивалентен крепежным деталям. Если в произвольном сечении шпильки (болта) действуют три силовых фактора, показанные на рис. 9 ( $Q_r$  – перерезывающая сила;  $Q_z$  – осевая сила;  $M_u$  – изгибающий момент), то в эквивалентной шпильке – обобщенные силы  $Q_{r\vartheta}$ ,  $Q_{z\vartheta}$  и  $M_{u\vartheta}$ , равномерно распределенные по окружности радиуса  $r_{ш}$ .

Зависимости между усилиями в шпильке и обобщенными силами в эквивалентной шпильке устанавливаются из условий статической эквивалентности:

$$Q_r = \frac{2\pi r_{ш}}{n} Q_{r\vartheta}; \quad Q_z = \frac{2\pi r_{ш}}{n} Q_{z\vartheta}; \quad M_u = \frac{2\pi r_{ш}}{n} M_{u\vartheta}; \quad (1)$$

где  $r_{ш}$  – радиус окружности, на которой находятся центры тяжести поперечных сечений шпилек (болтов), мм;  $n$  – количество шпилек (болтов).

Из условий кинематической эквивалентности следуют равенства линейных перемещений  $u_r$ ,  $u_z$  и углов поворота поперечных сечений шпильки (болта)  $\vartheta$  и эквивалентной шпильки. Перемещения выбранного поперечного сечения шпильки постоянного сечения (рис. 9б) равны:

$$u_r = \frac{Q_r l^3}{3EJ} - \frac{M_u l^2}{2EJ}; \quad u_z = \frac{Q_z l}{EF}; \quad \vartheta = -\frac{Q_r l^2}{2EJ} + \frac{M_u l}{EJ}; \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;  $J$  – момент инерции сечения на изгиб,  $\text{мм}^4$ ;  $F$  – площадь поперечного сечения шпильки,  $\text{мм}^2$ ;  $l$  – эффективная длина шпильки, мм.

Поскольку шпилька может рассматриваться как ступенчатый брус (например, шпилька М18 в узле уплотнения ДПШ с заглушкой, представляет собой брус из 3 участков), то формулы (2) принимают вид:

$$\begin{aligned} u_r &= -Q_r \sum_{i=1}^I \frac{l^3}{3EJ_i} [(1-\xi_{i+1})^3 - (1-\xi_i)^3] + M_u \sum_{i=1}^I \frac{l^2}{2EJ_i} [(1-\xi_{i+1})^2 - (1-\xi_i)^2] \\ u_z &= Q_z \sum_{i=1}^I \frac{l}{EF_i} (\xi_{i+1} - \xi_i); \\ \vartheta &= Q_r \sum_{i=1}^I \frac{l^2}{2EJ_i} [(1-\xi_{i+1})^2 - (1-\xi_i)^2] + M_u \sum_{i=1}^I \frac{l}{EJ_i} (\xi_{i+1} - \xi_i); \end{aligned} \quad (3)$$

где  $i$  – число участков шпильки;  $J_i$  – момент инерции сечения на изгиб на  $i$ -ом участке,  $\text{мм}^4$ ;  $F_i$  – площадь поперечного сечения на  $i$ -ом участке,  $\text{мм}^2$ ;  $\xi_i = \frac{l_i}{l}$  – безразмерная координата начала  $i$ -ого участка;  $\xi_{i+1} = \frac{l_{i+1}}{l}$  – безразмерная координата конца  $i$ -ого участка.

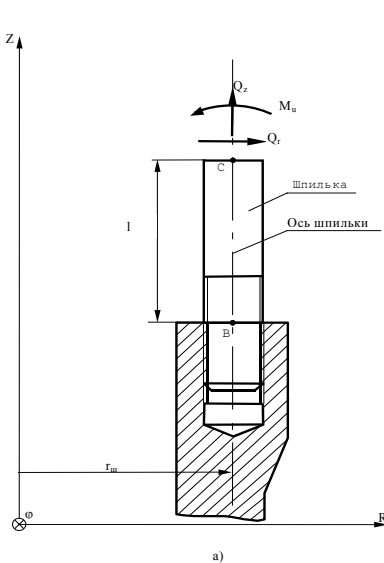


Рис. 9. Шпилька в цилиндрической системе координат

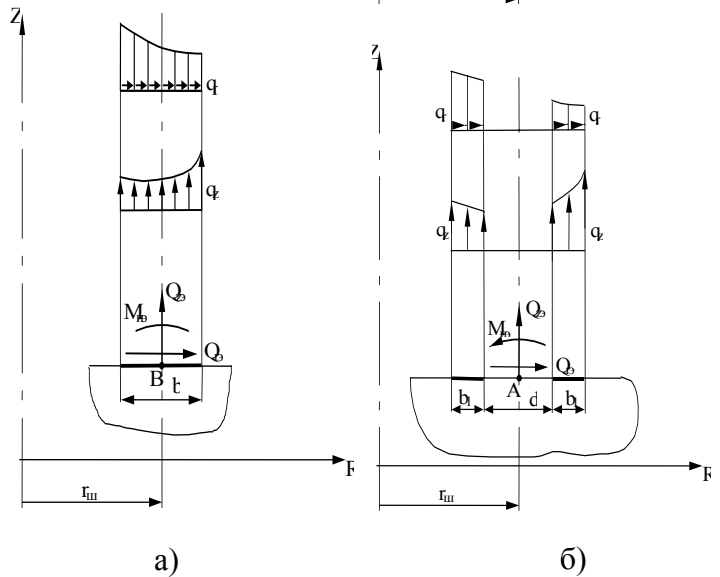


Рис. 10. Обобщенные и распределенные силы на плоскостях взаимодействия

Аналогично определяются обобщенные перемещения сечения эквивалентной шпильки, содержащего точку  $C(u_{r3}, u_{z3}, \vartheta_3)$ . В случае шпильки постоянного сечения выражения для обобщенных перемещений имеют вид:

$$u_{r3} = \frac{Q_{r3} l^3}{3E(h^3/12)} - \frac{M_{u3} l^2}{2E(h^3/12)}; \quad u_{z3} = \frac{Q_{z3} l}{Eh}; \quad \vartheta_3 = -\frac{Q_{r3} l^2}{2E(h^3/12)} + \frac{M_{u3} l}{E(h^3/12)}, \quad (4)$$

где  $h$  – толщина эквивалентного бруса, мм.

Из условий эквивалентности крепежных деталей и эквивалентной шпильки при работе на растяжение и изгиб определяются значения толщин эквивалентной шпильки. В случае шпильки постоянного сечения выражения для толщин эквивалентной шпильки имеют вид:

$$\text{- для растяжения } h_p = \frac{nF}{2\pi r_{ш}}; \text{ для изгиба } h_u = \sqrt[3]{\frac{6nJ}{\pi r_{ш}}}.$$

Поскольку деформирование осесимметричной эквивалентной шпильки описывается обобщенными функциями сил и перемещений, а осесимметричная часть разъемного соединения рассматривается как континуум, на функции перемещений которого не накладываются кинематические ограничения типа условий Бернулли (гипотезы плоских сечений), стыковка решений в пространствах сил (шпилька или болт) и напряжений (осесимметричная часть) не может быть реализована тривиальным способом. Так, хорошо известный в технических приложениях метод совместности перемещений, применяемый в расчетах на прочность стержневых и оболочечных конструкций и позволяющий составить систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных внутренних обобщенных сил, предполагает в рассматриваемой задаче предварительное описание обобщенных функций для осесимметричной части. В этом случае задача, рассматриваемая в целом в пространстве обобщенных сил, будет статически неопределимой, если пользоваться терминологией теории стержневых систем. Для осесимметричного одноконтурного разъемного соединения число неизвестных, определяемых стыковкой эквивалентной шпильки и осесимметричной части, равно трем. Это – перерезывающая сила, осевая сила и изгибающий момент. Раскрытие статической неопределимости проводится путем введения условной плоскости разреза или стыковки, в которой должны выполняться условия равенства между обобщенными перемещениями эквивалентной шпильки и обобщенными перемещениями осесимметричной части разъемного соединения.

Таким образом, задаче о деформировании разъемного соединения в пространстве напряжений ставится в соответствие эквивалентная задача в пространстве обобщенных сил.

Для определенности считается, что разрез шпильки осуществляется в верхней для вертикальных разъемов части по плоскости стыковки шайбы с фланцем. В болтовых соединениях с отжимным винтом плоскость разреза должна совпадать с плоскостью контакта стебля болта с фланцем.

На плоскостях взаимодействия эквивалентной шпильки с фланцами действуют внутренние распределенные силы, которые после операции

"отделения" эквивалентной шпильки становятся внешними для осесимметричной части разъемного соединения. В разъемных соединениях элементов оборудования АЭС, имеющих шпильки, оси которых коллинеарны по отношению к оси вращения, выделяется два способа стыковки:

- шпилька ввернута во фланец; силы распределены по кольцу шириной  $b$  (рис. 10а);

- шпилька контактирует с фланцем через прокладку или гайку; силы распределены по кольцу шириной  $b_1$  каждое (рис. 10б).

Силы, распределенные на фланцах, и обобщенные силы в шпильках статически эквивалентны друг другу, что позволяет установить следующие соотношения:

- первый способ стыковки:

$$Q_{r3} = \frac{1}{r_{ш}} \cdot \int_{r_{ш}-\frac{b}{2}}^{r_{ш}+\frac{b}{2}} q_r r dr; \quad Q_{z3} = \frac{1}{r_{ш}} \cdot \int_{r_{ш}-\frac{b}{2}}^{r_{ш}+\frac{b}{2}} q_z r dr; \quad M_{u3} = \frac{1}{r_{ш}} \int_{r_{ш}-\frac{b}{2}}^{r_{ш}+\frac{b}{2}} q_z (r - r_{ш}) dr; \quad (5)$$

- второй способ стыковки:

$$Q_{r3} = \frac{1}{r_{ш}} \left( \int_{r_{ш}-\frac{d}{2}-b_1}^{r_{ш}-\frac{d}{2}} q_r r dr + \int_{r_{ш}+\frac{d}{2}}^{r_{ш}+\frac{d}{2}+b_1} q_r r dr \right); \quad Q_{z3} = \frac{1}{r_{ш}} \left( \int_{r_{ш}-\frac{d}{2}-b_1}^{r_{ш}-\frac{d}{2}} q_z r dr + \int_{r_{ш}+\frac{d}{2}}^{r_{ш}+\frac{d}{2}+b_1} q_z r dr \right);$$

$$M_{u3} = \frac{1}{r_{ш}} \left( \int_{r_{ш}-\frac{d}{2}-b_1}^{r_{ш}-\frac{d}{2}} q_z (r - r_{ш}) r dr + \int_{r_{ш}+\frac{d}{2}}^{r_{ш}+\frac{d}{2}+b_1} q_z (r - r_{ш}) r dr \right); \quad (6)$$

где  $b$  и  $b_1$  – ширина колец, мм;  $d$  – диаметр отверстия, мм;  $q_r$  – распределенные касательные силы, Н/мм;  $q_z$  – распределенные силы, нормальные к плоскостям фланцев, Н/мм.

С помощью выражений (5) и (6) однозначно решается прямая задача нахождения обобщенных сил по распределенным силам. Для решения обратной задачи принимаются допущения о характере изменения распределенных сил:

-  $i$ -ой обобщенной силе  $Q_{i3}$  соответствует только одна распределенная сила  $q_i = q_i(Q_{i3})$ ;

- при подстановке сил  $q_i$  в выражения статической эквивалентности полученные обобщенные силы приложены к точкам, лежащим на окружности радиуса  $r_{ш}$ .

Простейший вид функций распределенных сил, удовлетворяющих условиям статической эквивалентности, будет:

$$q_r = q_{rc} \frac{r_{ш}}{r}; \quad q_{zQ} = q_{zQc} \frac{r_{ш}}{r}; \quad q_{zM} = q_{zMc} \frac{r - r_{ш}}{r}; \quad q_z = q_{zQ} + q_{zM}, \quad (7)$$

-для первого способа стыковки:

$$q_{rc} = \frac{Q_{r3}}{b}; q_{zQc} = \frac{Q_{z3}}{b}; q_{zMc} = \frac{12r_{ш} M_{ш3}}{b^3}; \quad (8)$$

-для второго способа стыковки:

$$q_{rc} = \frac{Q_{r3}}{2b_1}; q_{zQc} = \frac{Q_{z3}}{2b_1}; q_{zMc} = \frac{12r_{ш} M_{ш3}}{(2b_1 + d)^3 - d^3}. \quad (9)$$

Обобщенные силы  $Q_{r3}$ ,  $Q_{z3}$  и  $M_{ш3}$  и соответствующие им обобщенные перемещения  $u_r$ ,  $u_z$  и  $\vartheta$ , показанные на рисунке 18, являются главными. Работа обобщенных сил на своих обобщенных перемещениях равна работе соответствующих им распределенных сил на перемещениях материальных точек фланцев в плоскостях взаимодействия.

Интегральные зависимости между обобщенными перемещениями и перемещениями узловых точек устанавливаются на основе условий равенства работ и с учетом (7)–(9):

- для первого способа стыковки (рис. 11а)

$$u_r = \frac{1}{b} \int_{r_{ш}-\frac{d}{2}}^{r_{ш}+\frac{d}{2}} w_r dr; u_z = \frac{1}{b} \int_{r_{ш}-\frac{d}{2}}^{r_{ш}+\frac{d}{2}} w_z dr; \vartheta = \frac{12}{b^3} \int_{r_{ш}-\frac{d}{2}}^{r_{ш}+\frac{d}{2}} (w_z - u_z)(r - r_{ш}) dr; \quad (10)$$

- для второго способа стыковки (рис. 11б):

$$u_r = \frac{1}{2b_1} \left( \int_{r_{ш}-\frac{d}{2}-b_1}^{r_{ш}-\frac{d}{2}} w_r dr + \int_{r_{ш}+\frac{d}{2}}^{r_{ш}+\frac{d}{2}+b_1} w_r dr \right); u_z = \frac{1}{2b_1} \left( \int_{r_{ш}-\frac{d}{2}-b_1}^{r_{ш}-\frac{d}{2}} w_z dr + \int_{r_{ш}+\frac{d}{2}}^{r_{ш}+\frac{d}{2}+b_1} w_z dr \right);$$

$$\vartheta = \frac{12}{(2b_1 + d)^3 - d^3} \left( \int_{r_{ш}-\frac{d}{2}-b_1}^{r_{ш}-\frac{d}{2}} (w_z - u_z)(r - r_{ш}) dr + \int_{r_{ш}+\frac{d}{2}}^{r_{ш}+\frac{d}{2}+b_1} (w_z - u_z)(r - r_{ш}) dr \right) \quad (11)$$

где  $u_r$ ,  $u_z$  – линейные обобщенные перемещения, мм;  $\vartheta$  – угол поворота плоскости стыковки, рад;  $w_r$  и  $w_z$  – перемещения материальных точек в плоскостях взаимодействия эквивалентной шпильки с фланцами, мм.

Ослабление элементов разъемных соединений отверстиями под крепежные детали учитывается путем введения сплошных кольцевых зон, материалы которых имеют приведенный модуль упругости. Приведенный модуль упругости определяется из условия сохранения жесткости элементов, ослабленных отверстиями:

$$(E)^T = \frac{A - A_{отв}}{A} \cdot E_{\phi}^T, \quad (12)$$

где  $A$  – площадь сечения кольца, внутренний радиус которого равен разности радиуса оси крепежной детали и радиуса отверстия, а внешний – сумме радиуса оси крепежной детали и радиуса отверстия, мм<sup>2</sup>;  $A_{отв}$  – площадь осевого сечения отверстия под крепежные детали, мм<sup>2</sup>;  $E_{\phi}^T$  – модуль упру-

гости материалов элементов конструкции, ослабленных отверстиями, МПа.

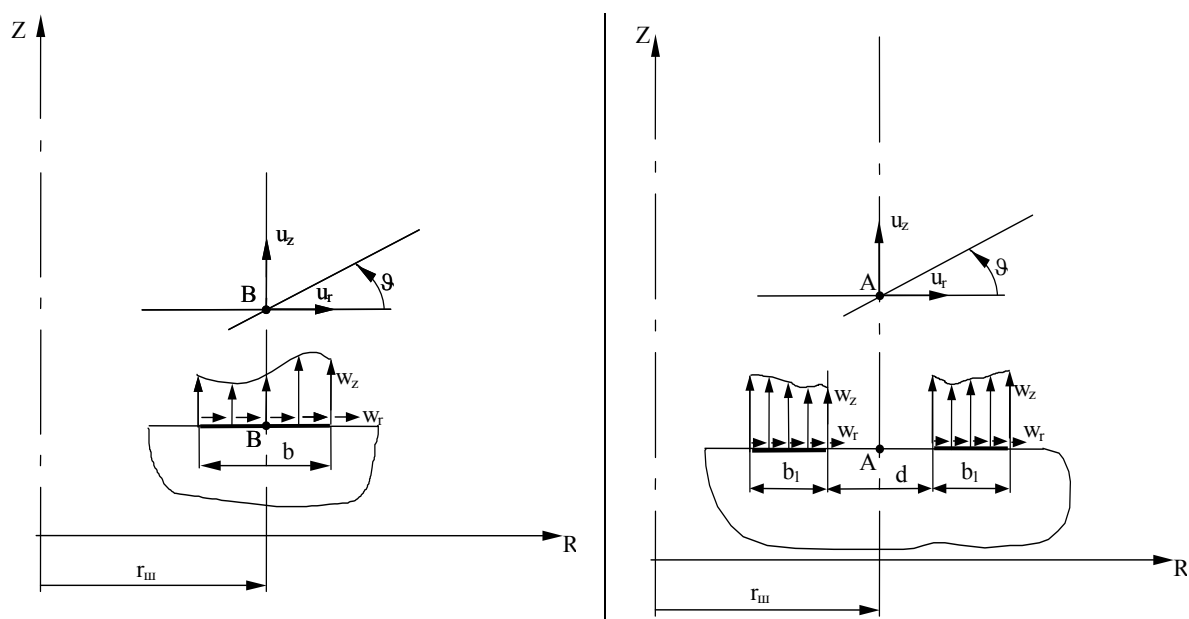


Рис. 11. Обобщенные и распределенные перемещения на плоскостях взаимодействия

Для осесимметричных элементов конструкции применяются основные соотношения теории упругости. Напряжения  $\sigma_{ij}$  связаны с деформациями  $\varepsilon_{ij}$  линейной зависимостью:

$$\sigma_{ij} = d_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^T), \quad (13)$$

где  $d_{ijkl}$  – компоненты тензора модулей упругости, МПа;  $\varepsilon_{kl}^T = \delta_{kl}\alpha t$  – начальные температурные деформации;  $\delta_{kl}$  – символ Кронекера;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $t$  – начальная температура,  $^\circ\text{C}$ ; по повторяющимся индексам  $i, j, k$  и  $l$  проводится суммирование.

Деформации являются малыми и связаны с перемещениями соотношениями:

- для декартовой системы координат

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (14)$$

где  $u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ;  $u_i$  – перемещение точки тела, вызванное деформацией, мм;  $x_j$  –

компонента декартовой системы координат, мм.

- для цилиндрической системы координат  $(R, \varphi, Z)$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \cdot (\partial_i u_j + \partial_j u_i) - \Gamma_{ij}^k u_k, \quad (15)$$

где  $i, j, k=1,2,3$ ;  $u_1 = u_r, u_2 = r \cdot u_\varphi, u_3 = u_z$ ;  $\Gamma_{ij}^k$  – символ Кристоффеля второго рода.

Граничные условия на части поверхности  $S_F$  заданы в напряжениях (граничные условия Неймана):

$$\sigma_{ij}\alpha_{vj}=F_{iv} \text{ на } S_F, \quad (16)$$

а на другой части  $S_U$  – в перемещениях (граничные условия Дирихле):

$$u_i=u_i^* \text{ на } S_U, \quad (17)$$

где  $\alpha_{vj}$  – направляющие косинусы нормали к поверхности;  $F_{iv}$  – поверхностные распределенные силы, МПа;  $u_i^*$  – известные перемещения точек поверхности, мм.

Решение задачи о деформировании разъемного соединения проводится комбинированным методом, в соответствии с которым обобщенные усилия в крепежных элементах определяются в соответствии с принципом Кастильяно, а распределение напряжений и деформаций в осесимметричных элементах – по методу конечных элементов с учетом жесткостей приведенных эквивалентных осесимметричных крепежных элементов. При численном решении применяются стандартные процедуры метода сил и метода конечных элементов в форме метода перемещений. Аппроксимация полей перемещений и топологии осуществляется на основе квадратичных изопараметрических конечных элементов. В результате применения процедуры МКЭ формируется система уравнений относительно неизвестных перемещений  $\{q\}$  узловых точек КЭС

$$[K]\{q\}=\{F\}, \quad (18)$$

где  $[K]$  – матрица жесткости СЛАУ, Н/мм;  $\{F\}$  – вектор (матрица-столбец) нагрузок, Н.

Из решения системы (18) находятся перемещения  $\{q\}$ . По данным перемещениям определяются обобщенные перемещения в плоскости стыковки эквивалентной шпильки и осесимметричной части фланцевого соединения. Из уравнений совместности для эквивалентной шпильки и осесимметричной части находятся обобщенные силы в шпильке.

Определенные обобщенные силы наряду с давлением и температурной нагрузкой участвуют в дальнейшем решении статически определимой задачи, в результате которого определяется напряжения в узловых точках КЭС. Напряжения в крепежных деталях вычисляются по формулам для бруса.

В программе РАЗЪЕМ применяются стандартные процедуры МКЭ для двумерных и осесимметричных задач теории упругости. Дискретная схема (конечно-элементная сетка) состоит из однотипных изопараметриче-



ских квадратичных элементов. Поскольку задача является линейно-упругой, необходимое число степеней свободы дискретной схемы, т. е. удвоенное число узловых точек конечно-элементной сетки, устанавливается опытным путем. Сравниваются последовательно две сетки с числом степеней свободы  $n$  и  $n_1$ , где  $n_1 > n$ . Используются два критерия: интегральный и локальный.

**В третьей главе** изложены вопросы модернизации узлов уплотнения реактора ВВЭР-1000 и экспериментальное обоснование выбранных решений.

При модернизации были определены следующие цели и задачи:

- Изменение конструкции механических компонентов должно быть минимальным, либо отсутствовать. По возможности необходимо ограничиваться заменой материала прокладки.

- Модернизированная конструкция должна быть обоснована проверочным расчетом прочности и удовлетворять требованиям ПНАЭ Г-7-002-86.

- Методы и объем экспериментального обоснования должны обеспечить получение механических характеристик новых прокладочных материалов и гарантировать надёжную работу узлов уплотнений как в стационарных, так и в переходных режимах в течении времени эксплуатации узла на реакторе без переуплотнения.

- Модернизированная конструкция должна обеспечивать пониженную чувствительность к отклонениям от проектных требований или ошибочных действий персонала.

Исходя из поставленных целей и задач, после анализа современных прокладочных материалов для дальнейших исследований был выбран расширенный графит. Использована известная технология изготовления прокладок из графитовой фольги ГФ–Д, ГФ–1Д марки «ГРАФЛЕКС» толщиной 0,2 мм. При этой технологии из фольги наматывается цилиндрическая заготовка, которая затем прессуется в прессформе в направлении, перпендикулярном слоям намотки в исходной заготовке. Полученная при такой технологии прокладка имеет специфические упруго-пластические свойства, выгодно отличающиеся от свойств металлических прокладок. Кроме этого прокладки из РГ имеют следующие положительные свойства: высокая герметизирующая способность; термостойкость; широкий температурный диапазон эксплуатации; способность выдерживать высокие давления; устойчивость к агрессивным средам; стойкость к радиационному облучению; малая чувствительность к шероховатости уплотнительных поверхностей; отсутствие адгезии к уплотнительным поверхностям; отсутствие коррозионного влияния на детали узлов уплотнений; стойкость к ста-

рению; малая чувствительность к перепадам температур; экологическая чистота.

Прокладки из расширенного графита располагаются в закрытых зазорах типа "замок", "шип-паз" и "плоскость-паз". В таких соединениях прокладки из расширенного графита находятся в замкнутом объеме. С целью предотвращения проникновения графита в зазоры и другие полости соединения, прокладку из графита следует оснащать запирающими кольцами или обтюраторами, изготавливаемыми из фольги.

Для отработки технологии изготовления прокладок и получения некоторых характеристик узлов уплотнения с прокладками из РГ, которые необходимы для расчётов прочности, в ОКБ «Гидропресс» были спроектированы модели узлов уплотнений с учетом их модернизации и проведены испытания по специальным программам и методикам на стендах. В процессе подготовки испытаний по каждому типоразмеру прокладок проводилась подготовка производства, для чего были спроектированы и изготовлены пресс-формы, необходимая оснастка и фактически создан новый участок по производству этих прокладок.

Испытания узла уплотнения патрубка СУЗ проводились в составе привода СУЗ на стенде горячей обкатки В-1000. Основной циркуляционный контур стенда включает в себя колонку с внутрикорпусными устройствами, насос циркуляционный, фильтр механический и соединительные трубопроводы с арматурой. Для создания давления в контуре и компенсации объема воды при изменениях температуры служит газовый компенсатор давления. Разогрев стенда до рабочих параметров осуществляется сильноточным электронагревателем со ступенчатым регулированием мощности и за счет тепла, выделяемого в потоке воды за счет гидравлического трения. Плавная регулировка температурного режима в колонке производится с помощью теплообменника. На стенде предусмотрены также системы подпитки и химводоподготовки, и измерительно-регулирующие приборы. На колонку устанавливается привод, при испытании которого в колонке поддерживаются теплогидравлические условия близкие к проектным.

Усилия в шпильках узлов уплотнения патрубков СУЗ и КНИ при испытаниях определялись по их удлинению. Для этого каждая шпилька оснащалась центральным ненагруженным стержнем, закрепленным на нижней торцевой поверхности шпильки. Измерение удлинения шпильки относительно центрального ненагруженного стержня производилось с помощью индикатора перемещения часового типа, закрепленного в специальной оправке. Для определения связи между усилием в шпильке и ее удлинением производилась предварительная градуировка шпилек. Момент за-

тяжки гаек узла уплотнения патрубка СУЗ и КНИ замерялся с помощью динамометрического ключа.

Контроль усилия на прокладках узла уплотнения КНИТ осуществлялся по замерам моментов закручивания и откручивания гаек нажимных с помощью динамометрического ключа. Перемещения фланцев СУЗ и КНИ относительно патрубка при затяжке определялись при помощи индикатора. С целью определения температур элементов в процессе проведения горячих испытаний модели оснащались термопреобразователями.

При испытаниях узлов уплотнения патрубка СУЗ в составе привода СУЗ на стенде горячей обкатки производились следующие операции: входной контроль и сборка узлов уплотнения; разогрев и проведение гидравлических испытаний давлением 20 МПа при температуре 130 °С (верхний предел, ограниченный возможностями стенда); разогрев колонки стенда до температуры 320 °С и повышение давления до 15,7 МПа со скоростью 20 °С/ч; стационарные испытания в течение 50 ч при давлении 15,7 МПа и температуре 320 °С; расхолаживание колонки со скоростью 30 °С/ч до температуры 130 °С; гидравлические испытания при температуре 130 °С и давлении 20 МПа; расхолаживание до температуры 20 °С со скоростью 30 °С/ч с замером остаточных усилий в шпильках.

Горячие циклические испытания проводились до стабилизации усилий в шпильках в количестве 5 циклов. После завершения горячих циклических испытаний производилось ступенчатое снижение усилий в шпильках проводились до полной разгрузки. При этом на каждой ступени усилий в шпильках ступенчатые гидравлические испытания до давления 20 МПа с шагом подъема давления 1 МПа и временем выдержки на каждой ступени – 10 мин. Контроль за разгерметизацией производился по повышению давления в межпрокладочной полости.

Учитывая идентичность геометрических характеристик узлов уплотнения патрубков СУЗ и патрубков КНИ, ТК, на узлах уплотнения КНИ был проведен расширенный объем испытаний, результаты которого были распространены на узлы патрубков СУЗ и узлы уплотнений патрубков ТК.

С целью определения полной и упругой деформации основной прокладки из РГ в зависимости от усилия на прокладке проводились холодные деформационные испытания этих прокладок в прессформе для их изготовления. Этим испытаниям подверглись три основные прокладки с исходными плотностями графита  $\rho_0^0 = 1,5; 1,7; 1,9 \text{ г/см}^3$ . Каждая прокладка ступенчато нагружалась усилиями, соответствующими средним усилиям в шпильках, равных  $\bar{F}_w = 14,65; 24,42; 34,19 \text{ кН}$ . Деформация прокладок измерялась с помощью индикаторов перемещения. На каждой ступени нагружения проводилось измерение полной деформации прокладки, далее

производилась полная разгрузка прокладки с замером упругой деформации и дальнейшее нагружение до усилия следующей ступени.

Для определения оптимальных геометрических размеров с учетом допусков при изготовлении, а также начальной плотности основной и резервной прокладок были проведены исследования с вариациями максимальной и минимальной высоты ( $H_0^0$ ) и плотности ( $\rho_0^0$ ) основной и резервной прокладок. При проведении этих исследований проводилась сборка узла уплотнения КНИ с исходной плотностью резервной прокладки  $\rho_n^p=1,1 \text{ г/см}^3$  и исходной высотой  $H_0^p=6,5 \text{ мм}$  без установки основной прокладки. Ступенчатая затяжка гаек узла уплотнения патрубка КНИ проводилась усилиями, соответствующими полным деформациям резервной прокладки  $\delta_n^p=0,70; 1,05; 1,40; 2,10 \text{ мм}$ . Деформации резервной прокладки измерялись с помощью индикаторов перемещения. На каждой ступени затяжки производились гидравлические испытания резервной прокладки при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  до давления ее разгерметизации, при этом максимальное давление гидроиспытаний составило  $24,53 \text{ МПа}$ . Из условий работоспособности системы контроля протечек резервная прокладка обеспечивала герметичность до давления  $0,5 \text{ МПа}$ .

Далее программа испытаний повторялась для дублирующей прокладки с исходной плотностью  $\rho_0^p=1,3 \text{ г/см}^3$  и исходной высотой  $H_0^p=6,5 \text{ мм}$ .

На следующем этапе проводилась сборка узла уплотнения патрубка КНИ с основной прокладкой с исходной высотой  $H_0^0=5,2 \text{ мм}$  и исходной плотностью  $\rho_0^0=1,7 \text{ г/см}^3$  и резервной проводилась с  $H_0^p=6,4 \text{ мм}$  и  $\rho_0^p=1,2 \text{ г/см}^3$  (номинальные значения  $H_0$  и  $\rho_0$ ). Проводилась ступенчатая затяжка по перекрестной схеме до среднего усилия в шпильках  $F_w=17,10 \text{ кН}$ . Далее проводились ступенчатые гидравлические испытания основной прокладки до максимального давления  $24,53 \text{ МПа}$  при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . После этого межпрокладочная полость соединялась с контуром модели через вентиль отсечной и проводились ступенчатые гидравлические испытания резервной прокладки до давления ее разгерметизации, при этом максимальное давление гидроиспытаний составило  $24,53 \text{ МПа}$ .

Далее проводилась сборка узла с основной прокладкой с  $H_0^0=4,9 \text{ мм}$  и  $\rho_0^0=1,5 \text{ г/см}^3$  (минимальное значение) и резервной –  $H_0^p=7,5 \text{ мм}$  и  $\rho_0^p=1,3 \text{ г/см}^3$  (максимальное значение), после чего проводились ступенчатые гидравлические испытания основной и резервной прокладок по описанной выше программе. После снижения давления до атмосферного производилась дозатяжка узла уплотнения до усилия в шпильках  $F_w=24,42 \text{ кН}$  и цикл испытаний повторялся.

Таким образом, были исследованы характеристики узла уплотнения с сочетанием минимальных размеров и плотности основной прокладки и максимальных размеров и плотности резервной прокладки. Аналогичным образом были проведены исследования для другого крайнего сочетания допусков.

После проведения «холодных» испытаний с вариацией начальной высоты и плотности основной и дублирующей прокладок узла уплотнения КНИ были проведены ступенчатые теплогидравлические и горячие циклические испытания узла с геометрией и начальной плотностью основной и дублирующей прокладок, близкими к номинальным при средней величине усилий в шпильках  $F_w = 24,42$  кН с замером момента затяжки гаек.

Исходное среднее усилие затяжки шпилек в результате испытаний узла уплотнения патрубков СУЗ составило  $\bar{F}_w = 25,28$  кН. При гидравлических испытаниях, проводимых до горячих циклических испытаний, при самих горячих циклических испытаниях, а также при снижении усилий в шпильках до  $F_w = 0$  после ГЦИ, протечек через основную прокладку не обнаружено. Разборка узла уплотнения происходила без затруднений. Прокладки после разборки остались на фланце чехла привода СУЗ.

При данных испытаниях исходная максимальная высота резервной прокладки выбиралась из условия нарушения герметичности основной прокладки при ее гидравлических испытаниях при исходном среднем усилии затяга шпилек  $F_w = 17,10$  кН, а минимальная высота резервной прокладки – из условия нарушения герметичности резервной прокладки при давлении 0,5 МПа и при  $\bar{F}_w = 17,10$  кН.

По зависимостям  $F_p = f(\delta_n^p)$ , полученным по результатам испытаний и с учетом соотношения  $N_0^p \rho_0^p = N_k^p \rho_k^p$ , определялись усилия  $F_p$  для значений  $\delta_n^p$  и  $N_0^p$ , где  $N_k^p$  и  $\rho_k^p$  – соответственно, конечная высота и конечная плотность резервной прокладки при усилии на ней  $F_p$ . По полученным значениям  $F_p$  определялось усилие на основной прокладке  $F_0 = F_{ow} - F_p$ .

Результаты ступенчатых гидравлических и горячих циклических испытаний узла уплотнения патрубка КНИ показали отсутствие течи через основную прокладку.

По результатам замеров моментов затяжки гаек  $\bar{M}_3$  при затяжке узла уплотнения патрубка КНИ средний коэффициент  $\bar{\eta}$  в зависимости  $\bar{M}_3 = \bar{\eta} \bar{F}_w d$  составил  $\bar{\eta} = 0,26$ , где  $d = 0,27$  мм – диаметр резьбы шпилек.

При исходных средних усилиях затяжки шпилек  $\bar{F}_{wo} = 29,65$  кН и  $\bar{F}_{wo} = 14,65$  кН снижение усилия в процессе горячих циклических испыта-

ний составило 36 %, причем стабилизация усилий в шпильках происходит после первого цикла горячих циклических испытаний.

Прокладочный коэффициент основной прокладки узла уплотнения патрубка ВРК по результатам гидравлических испытаний при ступенчатом снижении усилия затяжки шпилек составил:

$$m = \frac{q_{pr}}{P_T} = \frac{1}{P_T \cdot S_{pr}} [F_{ow} - (1 - \chi)F_{ph} + P_T S_{pr}] = \frac{F_{ow}}{P_T S_{pr}} - (1 - \chi) \frac{D_H^2}{4(D_H) - b} + 1 =$$

$$= \frac{20520}{24,5 \cdot 980,2} - (1 - 0,93) \frac{107^2}{4(107 - 3)3} = 1,21$$

где  $q_{pr}$  – удельная нагрузка на прокладке при гидравлических испытаниях давлением  $q_{pr}$ , МПа;  $P_T = 24,5$  МПа – давление течи;  $S_{pr} = \pi(D_H - b)b = \pi(107 - 3)3 = 980,2$  мм<sup>2</sup> – площадь поперечного сечения прокладки;  $D_H = 107$  мм – наружный диаметр прокладки;  $b = 3$  мм – ширина прокладки;  $F_{ow} = n\bar{F}_{wo} = 6 \cdot 3,42 \cdot 10^3 = 20520$  Н – исходное усилие на прокладке;  $n = 6$  – количество шпилек в узле уплотнения;  $\chi = \frac{(\bar{F}_{wh} - \bar{F}_{wo}) \cdot n}{F_{ph}} = \frac{4(\bar{F}_{wh} - \bar{F}_{wo}) \cdot n}{\pi \cdot D_H^2 \cdot P_T} = \frac{4(37,6 - 3,42) \cdot 6 \cdot 10^3}{\pi \cdot 107^2 \cdot 24,5} = 0,93$  – коэффициент нагрузки;  $\bar{F}_{wh} = 37,6$  кН – среднее усилие в шпильках при гидравлических испытаниях давлением  $P_T = 24,5$  МПа при исходном среднем усилии в шпильках.

Основные результаты анализа испытаний узлов уплотнений патрубков СУЗ и КНИ получены для реализации теплогидравлических режимов. Исходное усилие на основной прокладке  $F_0 = \bar{F}_{wo} \cdot h = 14,65 \cdot 6 = 89$  кН является достаточным для обеспечения ее герметичности для режимов, реализованных при проведении испытаний.

Исходное усилие на резервной прокладке  $F_p = 3$  кН достаточно для обеспечения ее герметичности при давлении в межпрокладочной полости  $P = 0,5$  МПа.

С учетом неблагоприятного сочетания допусков на начальную толщину и плотность основной и резервной прокладок, усилия  $F_{ow} = 139,9$  кН достаточно для герметизации узлов уплотнений патрубков СУЗ и КНИ. Максимальное допустимое усилие затяжки узлов уплотнения патрубков СУЗ и КНИ исходя из условия неперевышения напряжений смятия составляет  $[F_{ow}] = 250$  кН.

При выбранном проектном моменте затяжки шпилек  $M_3 = 200^{+30}$  Н·м максимальное усилие затяжки узлов уплотнения составило

$F_{0W_{max}} = 203,3$  кН, что меньше допускаемого  $[F_{0W}] = 250$  кН. Минимальное усилие затяжки узлов уплотнения составит  $F_{0W_{min}} = 164$  кН, что больше  $F_{0W} = 139,9$  кН. Это позволяет сделать вывод о том, что при затяжке гаек узлов уплотнения СУЗ, КНИ моментом на ключе  $M_3 = 200^{+30}$  Н·м статическая прочность и герметичность узлов уплотнений СУЗ и КНИ в исследованных режимах испытаний обеспечивается.

Испытания узлов уплотнения КНИ и воздушника реактора проводились на стенде. Отличия заключаются в конструкции моделей узлов уплотнения, которые соответствуют штатным узлам после доработки, а также в специфике условий эксплуатации узлов. К примеру для узла уплотнения воздушника был дополнительно исследован режим быстрого разогрева "холодного" узла подачей теплоносителя с температурой 320 и 150 °С. Полученные параметры, характеризующие среднее усилие в шпильках, среднюю температуру шпилек узла уплотнения и температуру подводимой среды в различные моменты времени.

В результате проведенных исследований узлов уплотнения воздушника определены: зависимость между усилием в шпильке и вытяжкой; зависимость между усилием в шпильке и моментом на ключе; полная и упругая деформация прокладок; усилия догрузки в шпильках и температура элементов модели в процессе проведения гидравлических испытаний; величина снижения усилия затыга в процессе горячих циклических испытаний (составила 35 %); коэффициент догрузки шпилек в процессе гидроиспытаний; прокладочный коэффициент ( $m = 1$ ).

Проведенные испытания подтвердили герметичность узла уплотнения и статическую прочность шпилек во всем спектре моделируемых режимов при затяжке шпилек усилием  $\bar{F}_w = 17,7$  кН. Рекомендован момент затяжки шпилек  $M_{кл} = 115 \pm 5,75$  Н·м.

Испытания узлов уплотнения датчика положения ОР СУЗ и узла уплотнения чехла привода с заглушкой проводились в составе привода СУЗ ШЭМ-3 на стенде горячей обкатки. В результате испытаний подтверждено, что в режимах гидравлических испытаний и горячих циклических испытаний протечек через узлы уплотнений не обнаружено. Разборка узлов уплотнений привода происходила без затруднений. Таким образом, модернизированные узлы рекомендованы к внедрению в проект привода СУЗ ШЭМ-3.

По результатам экспериментальных исследований можно сделать ряд выводов. Проведенный комплекс работ по исследованию модернизированных узлов уплотнений реактора ВВЭР-1000 подтвердил достижение тех целей и задач, которые ставились при модернизации узлов уплотнения.

Были получены и подтверждены следующие преимущества модернизированной конструкции: повышенная надежность узлов уплотнений при нормальных условиях эксплуатации; снижение напряженно-деформированного состояния узлов уплотнений за счет значительного (до 50 %) снижения усилий затяга узлов уплотнений; менее жесткие требования к уплотнительным поверхностям; неповреждаемость уплотнительных поверхностей; увеличение срока эксплуатации и сокращение трудозатрат и дозовых нагрузок персонала АЭС при проведении ремонтно-восстановительных работ.

Одной из основных характеристик, полученных при модернизации, является устойчивость конструкции к отклонениям от проектных требований в виде отклонений геометрических размеров и параметров шероховатости уплотнительных поверхностей, а также устойчивость к ошибочным действиям персонала, которые заключаются в недостаточно хорошей очистке и подготовке деталей узлов уплотнений и превышении момента затяжки этих узлов.

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы опытной эксплуатации прокладок из РГ на реакторах ВВЭР-1000.

В процессе проведения экспериментальных работ по каждому типу прокладок разрабатывалась рабочая конструкторская документация (РКД) опытного образца. В состав РКД входили спецификация, сборочный чертеж, чертежи деталей. Для прокладок из расширенного графита всех типоразмеров были разработаны технические условия. Вся РКД изначально имела литеру О. При изготовлении опытных изделий для стендовых испытаний проводилась так же технологическая подготовка производства. Для каждого типоразмера были разработаны и изготовлены пресс-формы для изготовления прокладок, таким образом, уже на стадии изготовления опытных изделий для стендовых испытаний проводилась технологическая отработка и подготовка серийного изготовления.

После выбора окончательного варианта модернизации узла уплотнения, оформления расчетов прочности и отчетов по экспериментальному обоснованию по каждому узлу уплотнения при его модернизации оформлялось специальное техническое решение о проведении опытной эксплуатации модернизированных узлов уплотнения на действующих блоках АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Эти решения согласовывались в органах Госатомнадзора РФ и утверждались в Росэнергоатоме, как эксплуатирующей организации.

Для проведения ознакомления с новыми прокладками и приобретения необходимого опыта обращения с прокладками эксплуатационного персо-



нала первые сборки узлов и проведение гидравлических испытаний проводились при авторском сопровождении специалистов ОКБ «Гидропресс».

Продолжительность опытной эксплуатации по каждому типу узла уплотнения в соответствии с решениями была определена не менее 1 года, т.е. в течение 1 кампании топливного цикла.

Это позволило получить результаты эксплуатации на всех этапах, включая этап разборки узла уплотнения, его ревизии и подготовки к сборки на следующую топливную кампанию.

При опытной эксплуатации все типы узлов уплотнений после модернизации эксплуатировались без замечаний и таким образом были подтверждены выводы, полученные при стендовых исследованиях и расчетных обоснованиях.

Практически не было выявлено ни одного случая течи ни в процессе гидравлических испытаний, ни во время работы реактора на мощности, причем опытная эксплуатация проводилась параллельно на нескольких блоках. Учитывая большое количество узлов, проходивших опытную эксплуатацию, получена надежная статистика, подтверждающая высокую надежность и низкую чувствительность модернизированных узлов к отклонениям от проектных требований, т.к. специальных мероприятий по замене изношенных компонентов узлов уплотнений не проводилось.

Успешные результаты опытной эксплуатации модернизированных узлов уплотнений реактора с применением прокладок из РГ явились основой для принятия решений по введению модернизации узлов уплотнений в проект реакторной установки, по организации серийного изготовления прокладок из РГ с простановкой литеры О<sub>1</sub> и переходу к промышленной эксплуатации модернизированных узлов. Такие решения оформлялись по каждому из модернизируемых узлов, решения согласованы органами Госатомнадзора РФ и утверждены Росэнергоатомом как эксплуатирующей организацией. Опытная и промышленная эксплуатация на действующих реакторах ведется с 1992 года по настоящее время на 24 реакторах ВВЭР-1000 в России, Украине и Болгарии. Энергоблоки, введенные в эксплуатацию в последнее время (3 блок Калининской АЭС, 1 блок Волгодонской АЭС, 2 блок Хмельницкой АЭС и 4 блок Ровенской АЭС) изначально оснащены модернизированными узлами уплотнений. Результаты разработок использованы в новых модификациях реакторов для Контрактных АЭС в Китае, Иране и Индии. В этих проектах изначально закладывались решения, опробованные на действующих энергоблоках (там, где это было возможно). При этом по каждому узлу был выполнен заново комплекс поверочных расчетов прочности, учитывающий специфику контракта. Эта специфика заключалась в том, что во всех трех контрактных проектах исполь-

зованы исходные данные по сейсмическим воздействиям, характерным для конкретных площадок. Также для каждого проекта был установлен свой перечень проектных режимов и количество циклов этих режимов. Отличия этих перечней обусловлены специфическими требованиями Инозаказчиков и различным сроком службы этих АЭС.

Длительный период эксплуатации модернизированных узлов подтвердил эффективность принятых при модернизации технических решений. За весь период эксплуатации практически не отмечено случаев течи реакторов при работе на мощности. Комплекс работ по разработке и внедрению модернизированных узлов уплотнений с прокладками из расширенного графита был высоко оценен Министерством Атомной Энергии и Промышленности в связи с чем группа разработчиков была удостоена отраслевой Премии им.Н.А.Доллежала.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработка и внедрение в эксплуатацию прокладок из РГ и основанная на них модернизация узлов уплотнения верхнего блока реактора ВВЭР-100 является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение.

Основные причины перехода с никелевых прокладок на графитовые состоят в необходимости снизить напряженность уплотнительного соединения и повысить надежность как по прочности, так и по герметичности.

При замене никелевых прокладок на графитовые были выполнены следующие работы НИР и ОКР: изменение конструкции прокладок; выбор и обоснование материала прокладок из РГ; экспериментальное исследование герметичности (плотности) узлов верхнего блока с прокладками из расширенного графита; расчетное обоснование конструкции с прокладками из расширенного графита; опытно-промышленная эксплуатация уплотнительных соединений (разъемных узлов) верхнего блока на действующих блоках.

Для изготовления прокладок из расширенного графита с заданными характеристиками в ОКБ "Гидропресс" было организовано вначале опытное, а затем серийное производство.

Основные преимущества замены никелевых прокладок из расширенного графита для узлов уплотнения элементов верхнего блока состоят в следующем: более высокая технологичность; повышенная надежность по плотности; меньшая напряженность за счет снижения усилия затяга в крепежных деталях; увеличение запаса по статической и циклической прочности; более высокая экономичность.

### **Основные публикации по теме диссертации:**

1. Модернизация узлов уплотнения верхнего блока реактора ВВЭР-1000 / С.Б. Рыжов, Н.А. Кирилук, О.В. Титов и др. // Сборник трудов 2-ой Всероссийской конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", г. Подольск, 2001.

2. Уплотнительные устройства разъемных соединений оборудования реакторных установок ВВЭР / В.Г. Русьянов, В.П. Денисов, Ю.Г. Драгунов, А.В. Селезнев, С.Б. Рыжов, А.Е. Геронтьев, А.Г. Конюшков. М.: ИКЦ "Академкнига", 2004. 134 с.

3. Пат. 2034344 России. Узел герметизации приборов внутриреакторного контроля / Н.А. Кирилук, Н.Н. Задерей, С.Б. Рыжов и др. 1995. Бюл. № 12. 5 с.