

## **Некоторые актуальные вопросы оценки прочности и ресурса элементов ответственного оборудования АЭС при термосиловом нагружении**

**В. В. Харченко<sup>а</sup>, Г. В. Степанов<sup>а</sup>, С. В. Романов<sup>б</sup>, П. П. Ворошко<sup>а</sup>,  
И. В. Орынjak<sup>а</sup>**

<sup>а</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> Ассоциация “Надежность машин и сооружений”, Киев, Украина

*Отмечены общие методологические подходы к решению задач прочности и ресурса оборудования АЭС и результаты, полученные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины за последние годы в этом направлении. Показана важность решения вопросов прочности и ресурса корпусов реакторов и парогенераторов. Комплексный расчетно-экспериментальный подход к анализу напряженно-деформированного состояния проиллюстрирован на примере узлов парогенераторов с дефектами.*

**Ключевые слова:** прочность, ресурс, оборудование АЭС, корпус реактора, парогенератор, численные расчеты, испытания материалов.

**Введение.** Вклад атомной энергетики в экономику Украины очень существен – до 50% всей производимой электроэнергии вырабатывается на четырех АЭС с 13 энергоблоками типа ВВЭР-1000 и 440. Еще два энергоблока ВВЭР-1000 находятся на стадии достройки, а одна АЭС с реакторами РБМК – на стадии снятия с эксплуатации.

Для обеспечения безопасной эксплуатации АЭС, продления сроков их службы и снятия с эксплуатации требуется высококвалифицированная научно-техническая поддержка, в частности решение вопросов конструкционной прочности и ресурса оборудования АЭС [1].

Общие методологические подходы к решению проблем обеспечения прочности и управления ресурсом, известные в мировой практике, предполагают применение современных методов диагностирования, сбор и обработку данных о техническом состоянии материалов и элементов конструкций, исследование механизмов деградации и определение изменения механических характеристик металла в процессе эксплуатации, выявление основных факторов, влияющих на нагруженность конструктивных элементов, экспериментально-расчетное определение напряженно-деформированного состояния (НДС) и параметров механики разрушения, совершенствование критериев предельного состояния.

В процессе создания атомной энергетики в академических и отраслевых научных центрах были проведены обширные исследования, сформирован кадровый и материально-технический потенциал для решения подобных задач. В частности, в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины (ИПП НАН Украины) всегда уделялось большое внимание разработке методик и установок для испытаний материалов, получению механических характеристик прочности, пластичности, трещиностойкости металлов и их деградации в процессе эксплуатации. Создан уникальный

комплекс испытательного оборудования, разработаны критерии предельного состояния, а также накоплен большой объем информации о поведении материалов при различных условиях нагружения (статическое, циклическое, динамическое и т.п.) [2–5], разработаны методики и устройства для испытаний образцов непосредственно в каналах атомного реактора и в “горячих камерах” [4, 6].

В последнее время существенное развитие получили методы и программные средства расчета напряженно-деформированного состояния трехмерных конструктивных элементов сложной формы с дефектами в виде трещин при статических и динамических термосиловых условиях нагружения. В ИПП НАН Украины разработаны новые эффективные методы расчета НДС, параметров механики разрушения и конструкционной прочности сложных пространственных тел, включая корпуса реакторов, парогенераторы, с учетом воздействия термосиловых режимов нагружения, в том числе нестационарных, наличия всевозможных дефектов и деградации металла при эксплуатации, которые реализованы в программных комплексах SPACe, RELAX, ИМПРО и др. [7–12].

Применение смешанных схем метода конечных элементов (МКЭ) позволило значительно повысить точность получаемых решений [7, 10]. Поскольку расчеты коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) для трещин, находящихся в высокоградиентном либо разрывном поле напряжений (например, трещина возле наплавки, где скачок напряжений обусловлен разными упругими свойствами основного металла и наплавки), затруднены при использовании МКЭ, в [11] получено эффективное и сравнительно нетрудоемкое решение, основанное на методе точечных весовых функций и реализованное в программах расчета.

Разработанные методы расчетов тонкостенных оболочек и трубопроводных систем, включая гибы, были использованы при создании компьютерной программы “3D Pipe Master” для расчета напряженно-деформированного состояния сильно разветвленных трубопроводных систем со сложной конфигурацией [12]. Особенностью данного вычислительного комплекса является возможность учета увеличения податливости гибов вследствие овализации сечения под действием внешних изгибающих моментов и внутреннего давления, что позволяет повысить точность получаемых решений.

#### **Оценка конструкционной прочности элементов оборудования АЭС.**

В настоящее время в Украине такая оценка выполняется на основании ПНАЭ Г-7-002-86 [13] (далее ПНАЭ). Однако этот документ разработан для расчетов при проектировании оборудования без учета имеющегося мирового опыта эксплуатации АЭС и новых знаний по оценке состояния металла, его прочности и ресурса за последние 20 лет, поэтому необходимо совершенствовать нормативные подходы.

При решении вопросов надежности эксплуатации и продления срока службы АЭС в первую очередь следует рассматривать корпус реактора (КР) [14].

Для оценки прочности и ресурса корпусов ВВЭР по заказу эксплуатирующей организации – НАЭК “Энергоатом” в Ассоциации “Надежность машин и сооружений” и ИПП НАН Украины начаты работы по совершенст-

вованию существующей нормативной базы, а также расчеты для типового корпуса ВВЭР-1000. При этом следует принимать во внимание, что развитие методической базы и последующее проведение работ по оценке конструкционной прочности и ресурса КР с учетом условий эксплуатации должны основываться на результатах специальных обширных исследований для корректного учета влияния ключевых факторов, в частности радиационного охрупчивания металла с высоким содержанием легирующих элементов (Ni, Cu, P и др.), формы и размеров возможных дефектов, их распространения и останки. Для установления резервов прочности и ресурса таких высоконагруженных элементов конструкций необходимо также использовать усовершенствованные критерии предельного состояния (например, двухпараметрические критерии), подходы вероятностного анализа конструкционной прочности, повышение представительности и информативности результатов испытаний образцов-свидетелей (ОС) за счет реконструирования разрушенных ОС, применения инструментированных испытаний на ударную вязкость и подходов типа "Master Curve".

Выполнение международных проектов ТАРЕГ при тесном взаимодействии украинских, российских и западных ученых должно существенно помочь в решении проблемных вопросов радиационного охрупчивания металла и конструкционной целостности КР.

Среди другого ответственного оборудования АЭС в наиболее жестких условиях эксплуатации работают парогенераторы (ПГ). В парогенераторах на АЭС с ВВЭР дефекты наиболее часто возникают в коллекторах и теплообменных трубках. В 1998-2001 гг. в узлах сварного соединения № 111 "горячего" коллектора с патрубком ПГ № 1 и 2 блока № 1 Южно-Украинской АЭС, ПГ № 1 и 3 блока № 5 Ново-Воронежской АЭС были обнаружены трещиноподобные дефекты [15].

Проведенные на стадии проектирования в соответствии с требованиями ПНАЭ [13] прочностные расчеты этого узла ПГ свидетельствовали о возможности его безопасной эксплуатации в пределах расчетного срока 30 лет. После обнаружения первых случаев повреждения данного узла при длительности эксплуатации гораздо ниже указанного срока были выполнены повторные расчеты в соответствии с принятыми нормами, а также дополнительные исследования, в том числе материаловедческие [15], но они не дали однозначного ответа на вопрос о причинах возникновения повреждений.

Поскольку все обнаруженные повреждения (трещины) были локализованы практически в одном и том же месте на узлах, изготовленных по разным технологиям, можно заключить, что существует общая причина разрушений, а в проведенных ранее расчетах недостаточно полно учитывались особенности нагружения, деформирования и повреждения материала в области узла приварки.

В связи с этим были выполнены уточненные оценка НДС узла и расчет ресурса его работы с более полным учетом реальных условий эксплуатации [16–19]. Основными отличительными моментами проведенного исследования были:

уточнение нагрузок на узел с учетом изгибающего момента из-за некомпенсированного термического расширения петли главного циркуляционного контура (ГЦК);

трехмерная расчетная модель узла сварного соединения, которая позволила учесть влияние корпуса ПГ и установить существенную немонотонность НДС в окружном направлении;

применение оригинальных программных средств, повышающих точность определения НДС;

сопоставление результатов расчетов с данными натурных измерений с помощью специально разработанной многоканальной системы тензо- и термометрии с целью подтверждения корректности расчетных схем и гипотез;

применение для оценки ресурса критерия исчерпания пластичности металла при повторно-статическом нагружении с учетом влияния среды.

При построении расчетных моделей узла сварного соединения и задании условий нагружения необходимо было из множества факторов корректно учесть ключевые. В качестве основных расчетных режимов нагружения выбраны: гидроиспытания (ГИ) на плотность с давлением теплоносителя в первом контуре  $p_1 = 18$  МПа, во втором –  $p_2 = 8$  МПа (далее 18/8 МПа); ГИ на прочность при давлениях 25/11 МПа и нормальные условия эксплуатации (НУЭ) при давлении 16/6 МПа. Детальный анализ поведения рассматриваемой конструкции при разогреве и расхолаживании с использованием инженерных и численных методов расчета свидетельствует о наличии дополнительного существенного фактора нагружения данного узла изгибающим моментом, что связано с некомпенсированным термическим расширением элементов петли ГЦК.

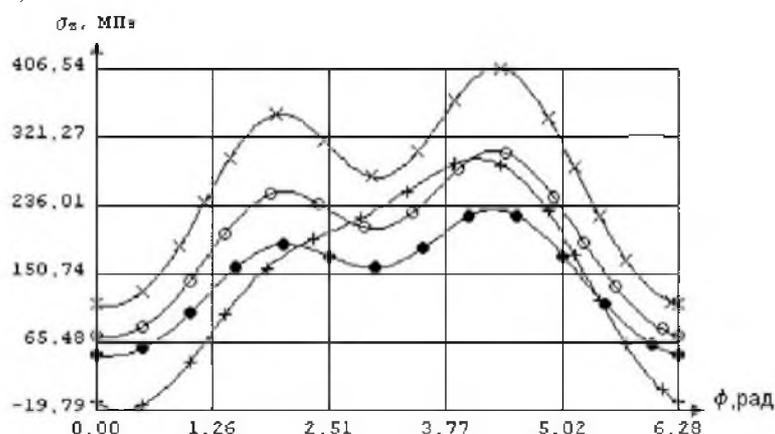
С целью получения уточненной оценки изгибающего момента выполнено численное моделирование поведения полной ветви первого контура реактора, включая все ее элементы (корпус реактора, “горячая” и “холодная” ветвь главного циркуляционного трубопровода, главный циркуляционный насос, корпус ПГ, коллекторы, опоры), с учетом нагружения давлением и температуры с помощью вышеуказанного специализированного вычислительного комплекса для расчетов трубопроводов сложной пространственной конфигурации, базирующегося на методе начальных параметров [12]. Полученные уточненные данные о величине изгибающего момента при различных режимах нагружения использовались при расчете НДС узла.

Определение НДС узла ПГ основывалось на положениях линейной теории упругости и теории малых упругопластических деформаций для трехмерных изотропных и кусочно-неоднородных тел. Решение краевых задач осуществлялось методом конечных элементов на основе смешанных вариационных постановок, реализованных в программном комплексе SPACE [9].

Было проведено тщательное обоснование применяемых расчетных схем и точности получаемых решений. Сопоставление результатов расчетов с данными натурных измерений НДС на наружной поверхности узла приварки в области сварного шва свидетельствует о правомерности использованных моделей узла ПГ и расчетных схем [16]. Измерения выполнялись с применением специально разработанной многоканальной системы тензо- и термометрии элементов конструкций. Регистрирующая система, созданная на современной элементной базе, обеспечивала непрерывное измерение, накопление и хранение результатов и использовалась для регистрации упру-

гих деформаций и температуры узла приварки “горячего” коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 в течение длительного периода времени между планово-предупредительными ремонтами [17].

Анализ результатов расчетов показал, что наиболее неблагоприятное влияние на НДС узла сварного соединения № 111 оказывает давление во втором контуре (в корпусе ПГ), при этом значительно повышается уровень растягивающих напряжений. Давление в первом контуре снижает уровень максимальных растягивающих напряжений на поверхности “кармана” от давления во втором контуре. Изгибающий момент, вызванный некомпенсированным термическим расширением элементов петли первого контура, существенно повышает уровень максимальных растягивающих напряжений у поверхности “кармана” и асимметрию распределения напряжений по азимуту (рисунок).



Распределение по окружности напряжений  $\sigma_z$  на внутренней стенке патрубка ПГ на высоте 20 мм от дна “кармана”, вызванное совместным действием давления и изгибающего момента: + –  $p_1 = 16$  МПа,  $p_2 = 6$  МПа,  $M = 2,279$  МН·м; × –  $p_1 = 25$  МПа,  $p_2 = 11$  МПа,  $M = 1,082$  МН·м; ○ –  $p_1 = 18$  МПа,  $p_2 = 8$  МПа,  $M = 0,977$  МН·м; ● –  $p_1 = 16$  МПа,  $p_2 = 6$  МПа,  $M = 0,827$  МН·м (окружная координата отсчитывается от более длинной стороны патрубка против часовой стрелки).

Наибольший уровень напряжений на поверхности “кармана” имеет место в области по окружности с координатой  $\phi = 4,1 \dots 4,3$  рад ниже линии сопряжения галтели с внутренней цилиндрической поверхностью патрубка ПГ, что соответствует расположению дефектов, наблюдавшихся на ПГ в 1998–2001 гг. На максимальный уровень напряжений также влияют термические напряжения, которые возникают из-за градиента температур в узле при нормальных условиях эксплуатации вследствие разности температур теплоносителя в первом и втором контурах, а также в результате продувки “кармана” узла [18].

В работе [19] показано, что при ГИ на прочность и плотность максимальные напряжения с учетом концентрации напряжений у дефектов от механической обработки и сварки превышают предел текучести, что приводит к пластической деформации, накопление которой при повторных циклах нагружения снижает ресурс пластичности металла, особенно с учетом влияния среды, и стимулирует зарождение трещин.

**Заключение.** Таким образом, чтобы обеспечить безопасную эксплуатацию оборудования в такой сложной и наукоемкой отрасли, как атомная, необходимо решить ряд важных проблем, в частности обеспечение конструкционной целостности и продление срока службы наиболее ответственного оборудования АЭС, в первую очередь корпусов реакторов и парогенераторов, путем проведения значительного объема исследований при тесном сотрудничестве и координации усилий не только украинских, но и российских, а также западных ученых.

## Резюме

Відмічено загальні методологічні підходи до розв'язку задач міцності та ресурсу обладнання АЕС і результати, що отримано в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України за останні роки у цьому напрямку. Показано важливість вирішення питань міцності та ресурсу корпусів атомних реакторів і парогенераторів. Комплексний розрахунково-експериментальний підхід до аналізу напружено-деформованого стану проілюстровано на прикладі вузлів парогенераторів із дефектами.

1. *Денисов В. П., Драгунов Ю. Г.* Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИзДАТ, 2002. – 480 с.
2. *Троценко В. Т.* Прочность материалов в экстремальных условиях // Прогресивні матеріали і технології. – Київ: Академперіодика, 2003. – Т. 2. – С. 546 – 573.
3. *Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др.* Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
4. *Киселевский В. Н.* Прочность конструкционных материалов ядерных реакторов / Отв. ред. А. А. Лебедев. – Киев: Наук. думка, 1990. – 168 с.
5. *Прочность* материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях. В 2 т. / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1980. – Т. 1. – 535 с.; Т. 2. – 771 с.
6. *Ballesteros A., Strizhalo V. A., Grinik E. U., et al.* Determination of reference temperature  $T_0$  for steel JRQ in an unirradiated state and construction of Master Curve // Пробл. прочности. – 2002. – № 1. – С. 41 – 51.
7. *Уманский С. Э.* Оптимизация приближенных методов решения краевых задач механики. – Киев: Наук. думка, 1983. – 168 с.
8. *Харченко В. В.* Моделирование процессов высокоскоростного деформирования материалов с учетом вязкопластических эффектов. – Киев: Логос, 1999. – 280 с.
9. *Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)” // Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA 1.017.0084261-02. – 2002.*

10. Чирков А. Ю. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. – Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2003. – 250 с.
11. Krasowsky A. Ja., Orynyak I. V., and Gienko A. Y. Approximate closed-form weight function for elliptic crack in an infinite body // Int. J. Fract. – 1999. – 99. – P. 123 – 134.
12. Орыняк И. В., Торон В. М., Ромащенко В. А., Жураховский В. Н. Расчет пространственного разветвленного трубопровода в программном комплексе оценки прочности оборудования АЭС // Пробл. прочности. – 1998. – № 2. – С. 87 – 100.
13. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
14. Davies L. M. Aspects of nuclear power plant life management // Ядерні та радіаційні технології. – 2002. – № 1. – С. 43 – 70.
15. Зубченко А. С., Разыграев Н. П., Харина И. Л. и др. Результаты исследований характера эксплуатационных повреждений металла в зоне сварных узлов коллекторов с патрубками Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000: Тр. VII Междунар. конф. “Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”. – СПб., 2002. – 225 с.
16. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС // Пробл. прочности. – 2003. – № 5. – С. 142 – 153.
17. Романов С. В., Степанов Г. В., Харченко В. В. и др. Многоканальная система тензо- и термометрии элементов конструкций // Там же. – № 4. – С. 143 – 147.
18. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Оценка термодинамического нагружения в узле приварки “горячего” коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 // Там же. – 2002. – № 1. – С. 146 – 148.
19. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Расчет долговечности сварного соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС с учетом реальных условий эксплуатации // Пробл. прочности. – 2004. – № 3 (в печати).

Поступила 26. 05. 2003