

С. А. Кучер, Начальник отдела прочности сосудов и насосов ядерной установки (ООО «Экспертно-технический центр «ЭНЕРГОРЕСУРС», г. Киев, Украина); М. П. Гиря, канд. техн. наук, Начальник отдела электрооборудования АЭС (МГП «Институт проблем управления НАН Украины», г. Харьков, Украина)

## Исследование параметров, определяющих старение главных циркуляционных насосов атомных станций Украины

Для исследований параметров, определяющих старение главного циркуляционного насоса атомной станции, в статье первоначально приведены назначение и краткая техническая характеристика эксплуатационных и режимных условий работы циркуляционного насоса реакторной установки. Исследования динамики изменений во времени технологических параметров, контролирующей надежную и безопасную работу насоса, а также анализ эксплуатационной и ремонтной документации, мониторинг дефектов и повреждений, которым был подвержен насос в течение периода эксплуатации, позволили методом экспертной оценки исходя из его физических свойств, провести выбор параметров, определяющих старение главного циркуляционного насоса. Анализ параметров старения насоса с точки зрения его деградации позволил установить механизмы старения, характерные для материала элементов насоса и выявил накопление процессов, которые за весь период эксплуатации насоса изменили механические свойства металла, формы и размеры элементов конструкции, повлияли на дефекты металла и утонение стенок обследуемой улитки насоса. На основании измеренных значений параметров, определяющих старение насоса и сформулированных механизмов старения, были выполнены поверочные расчеты на статическую и циклическую прочность, а также сопротивление сейсмическим воздействиям. Выбор определяющих параметров позволил также провести обследование, выполнить оценку текущего технического состояния, оценку прочности и прогнозный расчет главных циркуляционных насосов для обоснования возможности продления срока их эксплуатации. Дополнительно следует отметить, что результаты выполненных расчетов улитки главных циркуляционных насосов на статическую и циклическую прочность, а также результаты расчетов на сопротивление хрупкому разрушению и на сейсмические воздействия позволяют сделать вывод о соответствии текущих параметров технического состояния улитки насоса установленным требованиям нормативных документов. Изложенные выше подходы к исследованию параметров, определяющих старение главных циркуляционных насосов, используются авторами при разработке программ и отчетов обследования технического состояния насосов с целью продления их ресурса на энергоблоках Южно-Украинской АЭС.

**Ключевые слова:** атомная станция, главный циркуляционный насос, механизм старения, определяющий параметр, продленный ресурс.

Для досліджень параметрів, що визначають старіння головного циркуляційного насоса атомної станції, в статті спочатку наведені призначення і коротка технічна характеристика експлуатаційних і режимних умов роботи циркуляційного насоса реакторної установки. Дослідження динаміки змін у часі технологічних параметрів, які контролюють надійну і безпечну роботу насоса, а також аналіз експлуатаційної та ремонтної документації, моніторинг дефектів і пошкоджень, яким був підданий насос протягом періоду експлуатації, дозволили методом експертної оцінки виходячи з його фізичних властивостей, провести вибір параметрів, що визначають старіння головного циркуляційного насоса. Аналіз параметрів старіння насоса з точки зору його деградації дозволив встановити механізми старіння, характерні для матеріалу елементів насоса і виявив накопичення процесів, які за весь період експлуатації насоса змінили механічні властивості металу, форми і розміри елементів конструкції, вплинули на дефекти металу і утонення стінок обследуємої равліки насоса. На підставі вимірних значень параметрів, що визначають старіння насоса і сформульованих механізмів старіння, були виконані перевірочні розрахунки на статичну і циклічну міцність, а також опір сейсмічних впливів. Вибір визначальних параметрів дозволив також провести обстеження, виконати оцінку поточного технічного стану, оцінку міцності і прогнозний розрахунок головних циркуляційних насосів для обґрунтування можливості продовження терміну їх експлуатації. Додатково слід зазначити, що результати виконаних розрахунків равліки головних циркуляційних насосів на статичну і циклічну міцність, а також результати розрахунків на опір крихкому руйнуванню і на сейсмічні впливи дозволяють зробити висновок про відповідність поточних параметрів технічного стану равліки насоса встановленим вимогам нормативних документів. Викладені вище підходи до дослідження параметрів, що визначають старіння головних циркуляційних насосів, використовуються авторами при розробці програм і звітів обстеження технічного стану насосів з метою продовження їх ресурсу на енергоблоках Південно-Української АЕС.

**Ключові слова:** атомна станція, головний циркуляційний насос, механізм старіння, який визначає параметр, продовжений ресурс.

Parameters that define the aging for research of of the main circulation pump nuclear power plant, the article initially describes the purpose and brief specification of operational and performance conditions of the circulating pump reactor. Studies of the dynamics of changes in time of technological parameters that control reliable and safe operation of the pump, as well as analysis of operating and repair documentation, monitoring of defects and damages, which was subject to the pump during the period of operation allowed by the method of expert evaluation on the basis of its physical properties, to conduct the choice of parameters that determine the

aging of the main circulation pump. Analysis of parameters of aging of the pump from the point of view of its degradation has allowed to establish the mechanisms of aging, characteristic of the material elements of the pump and showed an accumulation of processes over the entire period of operation of the pump change the metal's mechanical properties, shape and dimensions of the structural elements that influenced the metal defects and thinning of the walls surveyed the volute. Based on the measured values of the parameters that determine the aging of the pump and articulated mechanisms of aging, was performed check calculations for static and cyclic strength and resistance to seismic forces. The choice of the governing parameters also allowed to conduct a survey to evaluate the current technical condition, assessment of the strength and predictive calculation of main circulation pumps to justify the possibility of extending their lifetime. Additionally, it should be noted that the results of the calculations of the pump volute of the circulating pumps for static and cyclic strength, and the results of calculations on resistance to brittle fracture and earthquake analysis allow to conclude that under the current parameters of the technical condition of the volute the requirements of normative documents. The above approaches to the study of the parameters determining the ageing of the main circulation pumps are used by authors when developing programmes and reports of inspection of technical condition of pumps to prolong their life on power units of South-Ukrainian NPP.

**Keywords:** nuclear power plant, main circulating pump, the mechanism of aging, that defines the parameter, extended service life.

### **Постановка проблемы в общем виде**

Исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлено, что продление назначенных проектом сроков службы энергоблоков атомных станций (АЭС) при частичной замене, ремонте и модернизации оборудования, в том числе и тепломеханического, становится экономически и технически целесообразным способом повышения эффективности и безопасности АЭС. Одним из направлений решения проблемы продления ресурса оборудования атомных станций является качественное улучшение оценки технического состояния оборудования, когда многие дефекты и аномальные режимы эксплуатации можно обнаружить только в результате измерения параметров и последующей обработки комплекса первичных признаков старения. Для решения задачи создания современных технологий оценки состояния оборудования необходим высокий уровень экспериментальных и теоретических исследований, связанных с изучением свойств тепломеханического оборудования (ТМО), его узлов и деталей в условиях возникновения и развития дефектов и повреждений.

Главные циркуляционные насосы типа ГЦН-195М (ГЦН) атомных электростанций Украины (АЭС) относятся к основному тепломеханическому оборудованию реакторного отделения станции. Они предназначены для создания циркуляции теплоносителя в первом контуре и отвода тепла от активной зоны реакторной установки (РУ). ГЦН являются объектами повышенной опасности, поэтому все работы, связанные с их эксплуатацией, оценкой технического состояния, продлением срока эксплуатации выполняются согласно требованиям стандартов по ядерной и радиационной безопасности [1].

В соответствии с утвержденной и действующей в Украине программой [2], которая разработана на основании существующей концепции решения проблемы продления ресурса оборудования, предусматривается эксплуатация сверх проектного срока службы отдельных видов оборудования АЭС. К данному виду оборудования относятся и ГЦН. Однако, для обоснования возможности продления назначенного срока службы каждого конкретного насоса необходимо тщательно проанализировать факторы, влияющие на его долговечность и безопасность эксплуатации.

### **Краткая техническая характеристика насоса и анализ исследований и публикаций по вопросу модернизации ГЦН в атомной энергетике мира**

ГЦН представляет собой вертикальный центробежный одноступенчатый насос с гидростатическим уплотнением вала, консольным рабочим колесом, осевым подводом воды и выносным трехфазным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором. Таким образом, ГЦН состоит из корпуса, выемной части (консольное рабочее колесо, вал с уплотнением, подшипниковые узлы, устройство электромагнитной разгрузки и антиреверсное устройство), электродвигателя и вспомогательных систем (маслосистемы, системы технической воды, системы запирающего контура и др.). Выемная часть герметично соединена с корпусом насоса посредством плоской металлической прокладки с помощью фланцев и деталей крепления. Основной режим работы – длительная параллельная работа 4-х ГЦН (рис. 1) в контуре при номинальных параметрах теплоносителя.

ГЦН спроектирован таким образом, что обеспечивается: от-

сутствие выхода радиоактивного теплоносителя в атмосферу через уплотнение вала насоса, кавитационный запас во всех переходных режимах работы РУ, уровень пульсации давления и вибрации ГЦН, не приводящий к нарушениям в насосе и связанных с ним системах. Вертикальное исполнение насоса ГЦН-195М предусматривает наличие герметичного силового корпуса эллиптической формы – «улитки» (рис. 2), которая предназначена для организации подвода и отвода теплоносителя первого контура АЭС от рабочего колеса и является главным элементом, определяющим ресурс насоса. Соединение улитки ГЦН с трубопроводами осуществляется на сварке.

Проектом для главного циркуляционного насоса установлено значение ресурса 262800 часов (30 лет).

Реальное техническое состояние ГЦН и возможность продления его срока эксплуатации на АЭС во многом зависят не только от фактического времени его эксплуатации, но и от ряда эксплуатационных факторов, таких как: общее количество пусков и остановов и их частота, количество повторных включений, повышенные рабочие температуры, перегрузки, переходные процессы, высокий уровень механических вибраций, недостаточный контроль и качество технического обслуживания и др.

На всех АЭС постсоветского пространства и ближнего зарубежья эксплуатируются ГЦН производства Сумского завода насосного оборудования. Отработав практически 30 лет, насосы требуют проведения комплексного обследования, исследования механических свойств металла, изучения циклической усталости, механического износа, утонения стенок вследствие коррозии. Это влечет за собой разработку новых научных методик

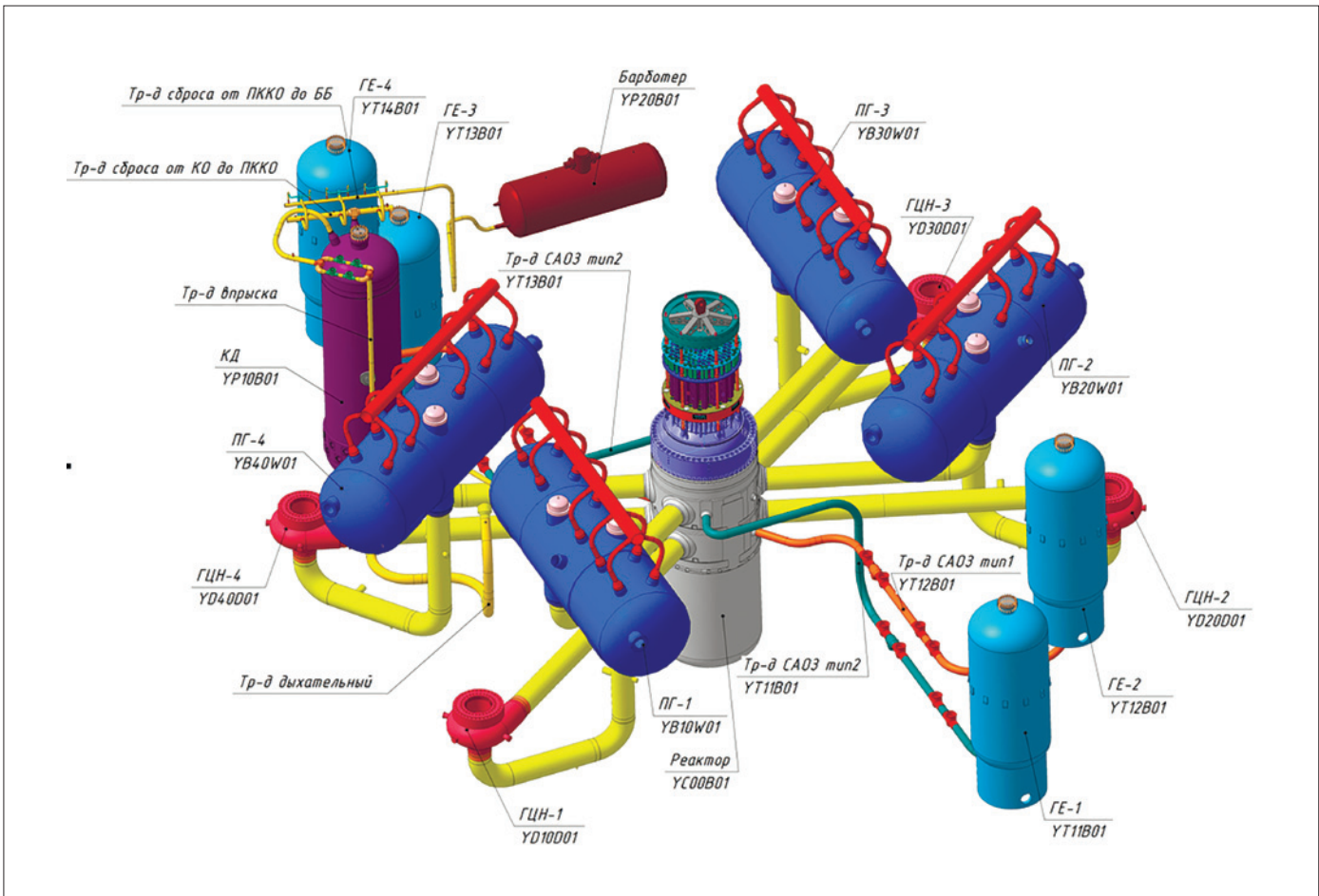


Рис. 1. Аксонометрическое изображение систем 1-го контура энергоблока

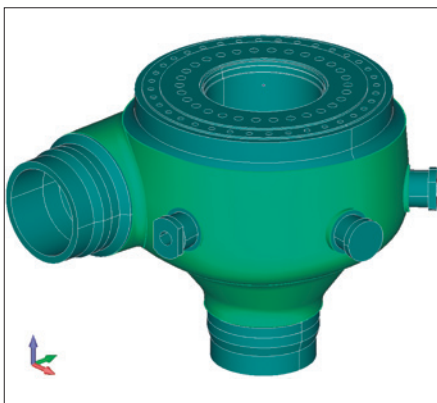


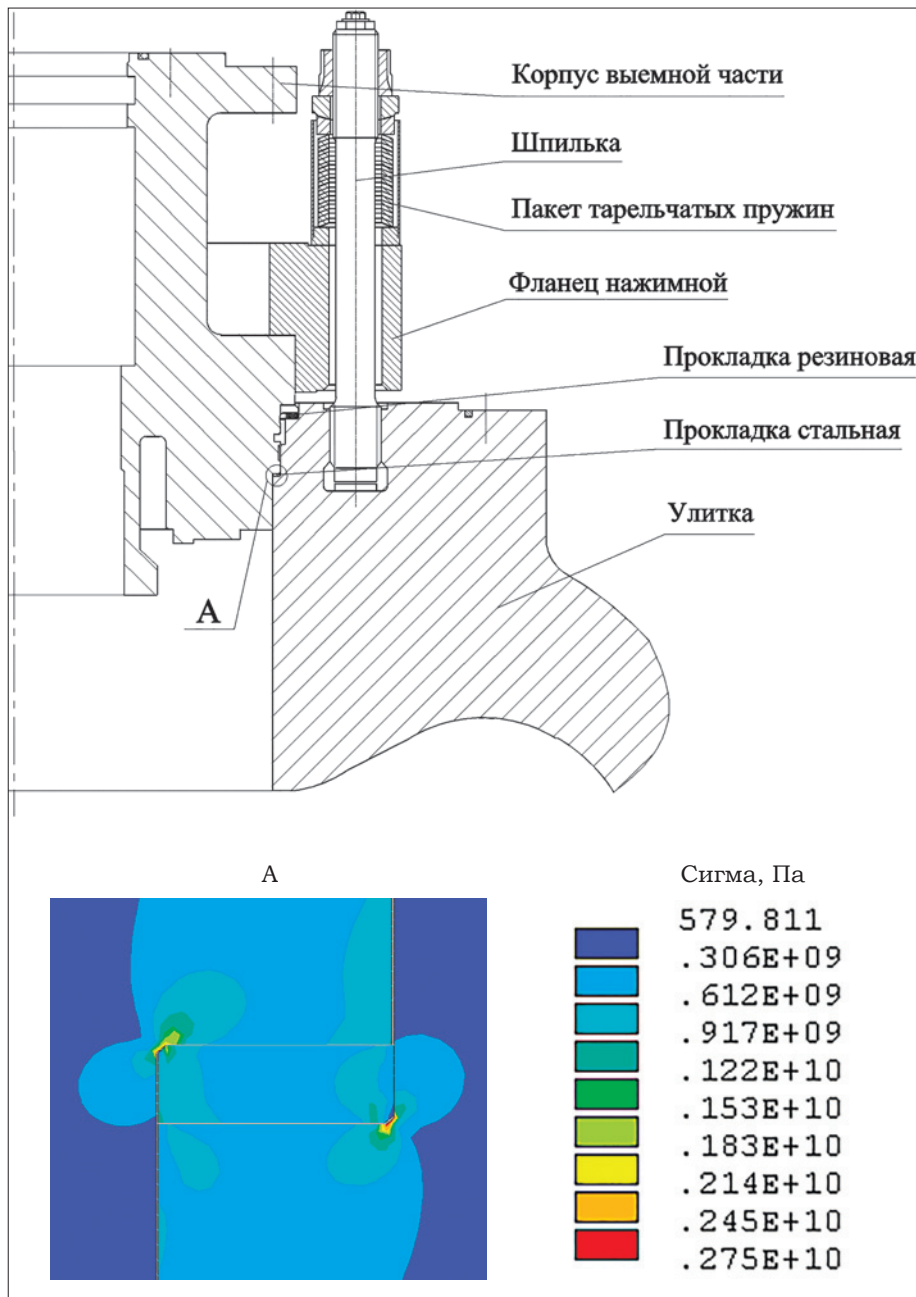
Рис. 2. Улитка главного циркуляционного насоса

для проведения теоретических и экспериментальных исследований и для выполнения комплекса работ, который должен соответствовать следующим признакам – определению функциональной пригодности ГЦН, то есть возможность выполнять возложенные на него функции с необходимым качеством.

Сегодня обследованием и модернизацией ГЦН, отработавших проектный ресурс, занимается ОАО «ЦКБМ» (РФ, г. Санкт-Петербург) [3], которое

входит в дивизион Росатома – Атомэнергомаш и является единственным разработчиком и изготовителем главных циркуляционных насосов для всех типов российских реакторов. Данное предприятие занимается модернизацией ГЦН, эксплуатируемых АЭС РФ, Венгрии, Болгарии, Чехии, Германии и др., где установлены реакторы российского производства. Так, недавно SIGMA GROUP a. s. в сотрудничестве с ОАО «ЦКБМ» успешно завершила выполнение модернизации всех 12-ти главных циркуляционных насосов на АЭС «Моховце» [4]. Данная модернизация заключалась в доработке уплотнительной поверхности и замене уплотнения направляющего аппарата, что препятствует образованию и распространению трещин, возникающих вследствие термоциклических явлений. Такая модернизация выполнена также на всех ГЦН, работающих на АЭС России. Использование эксплуатационного опыта по ГЦН и внедрение конструктивных модификаций со стороны ОАО «ЦКБМ» в сотрудничестве с SIGMA GROUP a. s. особенно с точки зрения продления работоспособности, сниже-

ния эксплуатационных расходов и повышения безопасности является современным трендом в области повышения качества оборудования первичного контура АЭС не только на территориях Чехии и Словакии. Недавно состоялась отгрузка для атомной электростанции «Козлодуй» (Болгария) комплекта модернизации главных циркуляционных насосов ГЦН-195: был модернизирован корпус выемной части и элементы крепежа главного разъема насоса. Главный разъем насоса расположен между улиткой и корпусом выемной части и разработан в конце 60-х годов прошлого столетия в условиях отсутствия нормативной базы, современных уплотнительных материалов и методов расчета [5]. Напряжения на уплотнительных поверхностях под аустенитной металлической прокладкой значительно превышают допустимые (рис. 3), вторичное уплотнение осуществляется резиновой прокладкой и не предназначено для длительной работы при нарушении герметичности основного уплотнения в процессе эксплуатации ГЦН. Необходимые для уплотнения разъема усилия обеспечиваются затяжкой 30-ти



**Рис. 3. Элементы главного разъема ГЦН-195 М:**  
 Вид А – интенсивность напряжений области стальной прокладки  
 главного разъема при затяжке, рассчитанных по программному  
 комплексу «ANSYS»

шпилек по специальному регламенту в несколько приемов с помощью гидравлического приспособления. Окончательный контроль затяжки разъема производится замером вытяжки каждой шпильки.

Средние контактные напряжения в разъеме превосходят допустимые для корпуса выемной части, равные в соответствии с [6]  $1,5 R_{\text{П0,2}}^{20}$  более чем в два раза, а интенсивность напряжений в углах контактирующих поверхностей корпусов при затяжке приводит к большому усталостному повреждению корпусов в зоне прокладки.

В конструкции модернизированного главного разъема (рис. 4) были использованы две последовательно расположенные графитовые прокладки, находящиеся в пазах фланца дообработанной улитки. Вторичная прокладка позволяет обеспечить надежную длительную работу при потере герметичности основной прокладки, а низкий уровень повреждаемости уплотнительных поверхностей корпуса позволяет обеспечить практически любой планируемый срок службы без необходимости ремонта в процессе эксплуатации насоса. Также

пакеты тарельчатых пружин были заменены на дистанционные втулки, что позволило проводить затяжку шпилек групповым гайковертом (по 15 шпилек) в два приема и уменьшить время затяжки разъема до 2-х часов.

Модернизация ГЦН является результатом многолетнего постоянного обследования и оценки требуемых параметров с целью повышения уровня ядерной и технической безопасности, достижения эффективных показателей, как с точки зрения техники, так и экономики. Новейшая разработка конструкторского бюро ОАО «ЦКБМ» – циркуляционный насос без маслосистемы (ГЦНА-1753), в котором все узлы смазываются и охлаждаются водой (в том числе – узлы электродвигателя). Отсутствие маслосистемы значительно повышает пожаробезопасность АЭС. Данное техническое решение не имеет аналогов в мире.

Разработкой, изготовлением и поставкой ГЦН на рынок атомной энергетики занимаются несколько крупных мировых корпораций. Среди них американская корпорация Flowserve – ведущий производитель специализированных насосов [7], в том числе для атомных станций. Главным достоинством корпорации является специализация на постоянной, так называемой, гидравлической модернизации насосов с применением сложных методик и программного обеспечения, а также глобальная сеть центров быстрого реагирования (QRCs), которая конкретно направлена на обеспечение и быструю доставку запасных частей, реверс-инжиниринг, обслуживание и ремонт насосов. Накопленный за 40 лет опыт разработки насосов и арматуры для атомных электростанций позволил корпорации KSB стать одним из лидеров мирового рынка [8]. Насосы KSB обеспечивают безопасное функционирование первого и второго контура АЭС. Широкий спектр научных исследований новых материалов и технологий позволил KSB предложить на рынке насосного оборудования высоконадежные компоненты для гидравлической составляющей насоса, а также не содержащие сурьмы механические уплотнения производства KSB для основных насосов теплоносителя гарантируют высокую эффективность и увеличение времени эксплуатации уплотнительной системы. Последним достижением KSB является разработка

вертикального одноступенчатого циркуляционного насоса бессальниковой конструкции с мокрой обмоткой двигателя и комплексным маховиком и отсутствующей системой маслоснабжения. Транснациональная корпорация Westinghouse за последние годы провела ряд неудачных поставок ГЦН для энергоблоков китайских АЭС «Sanmen» и «Haiyang» с реакторами AP-1000. В 2009 году во время испытаний у насосов, изготовленных для АЭС «Sanmen», разрушились подшипники и получили повреждения вольфрамовые части маховиков, а в 2011 году произошел перегрев насоса. Китайские СМИ со ссылкой на представителей компании SPI, сообщили, что во время очередных испытаний были обнаружены «небольшие трещины» в лопатках рабочих колес (impeller blades), а в январе 2013 года от лопатки рабочего колеса отвалился кусок размером 3×2,5 дюйма [9].

Таким образом, проведенный анализ исследований и публикаций по вопросу модернизации ГЦН в атомной энергетике мира, позволила выявить направления проведения исследований по определению технических параметров, характеризующих состояние ГЦН на предмет его старения.

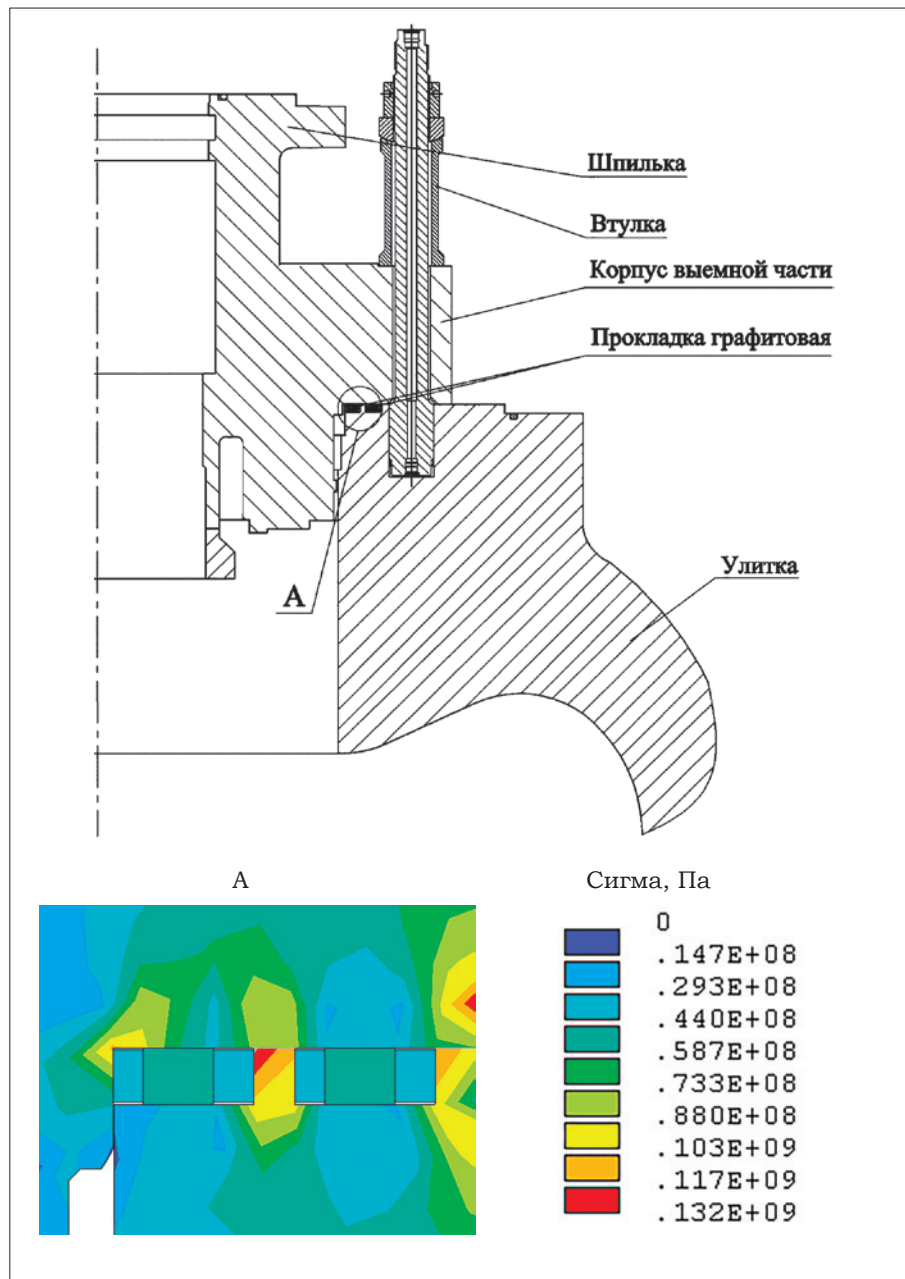
#### Постановка задачи

Основой для проведения исследований параметров, характеризующих деградацию отдельных элементов и циркуляционного насоса в целом, является накопленный авторами опыт выполнения работ, направленных на оценку технического состояния с последующим продлением срока эксплуатации ГЦН.

Проведенные исследования ставили целью выявление технических параметров, определяющих старение ГЦН для дальнейшего научного обоснования методов оценки технического состояния и остаточного ресурса ГЦН, учитывая процессы его деградации.

Для достижения поставленной задачи необходимо:

- проанализировать особенности эксплуатации и режимы работы ГЦН и провести анализ общего количества технических параметров, характеризующих надежную и безопасную работу насосов на соответствие нормативной документации (НД) и технической документации завода-изготовителя;
- на основании анализа большого объема оперативной диагностики



**Рис. 4. Элементы модернизированного главного разъема ГЦН-195М: вид А – интенсивность напряжений в области графитовых прокладок модернизированного главного разъема при затяжке**

и статистики изменений параметров во времени, дефектов и повреждений ГЦН методом экспертной оценки провести выбор параметров, определяющих старение исходя из признаков деградации насоса;

- на основании проведенных исследований деградационных параметров выявить потенциальные механизмы старения ГЦН для проведения дальнейшей работы по оценке технического состояния и определения остаточного ресурса насоса.

#### Основная часть

В большинстве нормативных документов техническое состоя-

ние оборудования определяется дискретно как «исправное», «неисправное», «работоспособное», «неработоспособное». Для концепции, основанной на принципе «безопасной эксплуатации по техническому состоянию» [10], когда оценка состояния оборудования осуществляется по параметрам технического состояния, обеспечивающим его надежную и безопасную эксплуатацию, такой подход может быть приемлемым. Однако, при анализе технического состояния для продления сроков эксплуатации оборудования, отработавшего проектный срок службы, такой подход не может быть принят, так как оборудование АЭС постоянно под-

держивается в работоспособном и исправном состоянии путем текущего контроля, испытаний и измерений множества параметров, на основе которых выполняются соответствующие ремонты и восстановления, что регламентируется общими положениями безопасности атомных станций [1]. Известно, что при оценке технического состояния ГЦН для определения остаточного ресурса и продления срока его эксплуатации, в качестве параметров должны приниматься только те физические параметры, изменение которых может привести оборудование в неработоспособное или предельное состояние из-за накопления необратимых деградиционных изменений, связанных с процессами старения. Такие физические параметры, характеризующие состояние объекта, называются определяющими [11]. Следовательно, для оценки состояния насосов с целью продления сроков их эксплуатации кроме значений технических параметров необходимо исследование динамики изменений данных параметров, необходим анализ дефектов и повреждений насосов, а также определение механизмов старения ГЦН, которые, как правило, являются многофакторными и их закономерности для данного типа оборудования еще недостаточно изучены. Поэтому характер старения ГЦН в первую очередь может быть определен только анализом режимов эксплуатации насосов и изменений его технических параметров, характеризующих необратимые деградиционные изменения за весь срок эксплуатации. Очевидно, что в рамках технического обслуживания и ремонтов (ТО и Р) провести такие исследования не представляется возможным, так как в нормативной документации на ТО и Р нет соответствующих методик для исследования, нет обоснований для выбора определяющих параметров старения и не определены механизмы старения, на основе которых можно в дальнейшем делать научно обоснованные выводы о возможности переназначения ресурса ГЦН. Для решения данных задач в ГП НАЭК «Энергоатом» разработаны инженерные программы [12–14], которые устанавливают требования к организации, процедуре, методам и объему выполнения работ по оценке технического состояния и переназначению срока эксплуатации

ГЦН РУ ВВЭР-1000 (В-320) и соответствуют требованиям нормативных документов по ядерной и радиационной безопасности.

Поэтому, для обеспечения безопасности при эксплуатации оборудования, отработавшего проектный срок, необходимы более совершенные исследования физических параметров, характеризующих процессы старения оборудования с последующей его оценкой.

Первостепенно для решения данной задачи был проведен анализ всех текущих технических параметров, характеризующих работу насоса. К общему числу конструкторских, эксплуатационных и ремонтных параметров ГЦН с учетом обеспечения безопасного выполнения главным циркуляционным насосом своих технологических функций и в соответствии с [15] относятся более 200 точек контроля, среди которых: расчетное давление гидравлических испытаний; расчетная температура теплоносителя; частота вращения; производительность насоса; температура и давление запирающей воды на входе; давление дистиллята; температура масла; расход технической воды на установку; скорость расхолаживания и др. Постоянный контроль всех параметров, мониторинг основных рабочих характеристик насоса, сравнительный анализ измеренных значений со значениями нормативных [14] и эксплуатационных документов [15] позволяет постоянно поддерживать работоспособное техническое состояние ГЦН.

Подробный анализ конструкторской, эксплуатационной документации по ГЦН на энергоблоках, а также ревизия журналов дефектов, протоколов испытаний, сведения о ремонте металлургических дефектов улиток ГЦН (места дефектов – рис. 5, размеры заваренных выборок – табл. 1), данные о химическом составе и механических характеристиках металла, сведения о проведенных технических освидетельствованиях ГЦН позволили выявить целый ряд изменений по характеристикам насосов, произошедших за весь период эксплуатации.

На основании проведенных исследований проектной, конструкторской, эксплуатационной и ремонтной документации, характеристик работ, производимых по устранению дефектов во время проведения капитальных ремонтов ГЦН, учитывая требования нормативных документов по безопасной эксплуатации насосов, методом экспертной оценки были выбраны па-

раметры, определяющие старение ГЦН. Выбор также производился с учетом технологических функций, физических свойств оборудования и на основании результатов анализа отказов и повреждений за все время его эксплуатации. При этом учитывая функциональное назначение ГЦН на энергоблоке АЭС, объем определяющих параметров должен быть достаточным для достижения поставленных целей.

Все параметры, характеризующие старение отдельных элементов и насоса в целом, можно разделить на:

- эксплуатационные параметры ГЦН;
- циклы нагружения за весь срок эксплуатации ГЦН;
- состояние основного металла и сварных соединений;
- фактические значения физико-механических свойств металла;
- степень эрозионно-коррозионного износа (утонение стенки).

Значения приведенных выше определяющих параметров старения ГЦН определяются для:

- эксплуатационных параметров ГЦН – по результатам анализа паспортов и технических условий насосов, а также графиков несения нагрузки и отчетов о расследовании нарушений в работе АЭС;
- циклов нагружения за весь срок эксплуатации ГЦН – по результатам данных, предоставленных службой наладки и испытания оборудования;
- состояния основного металла и сварных соединений – по результатам выполнения обследования и расчетов в рамках требований по специально разработанной программе [14] и сравнения с данными по этим параметрам, приведенными в НД;
- фактических значений физико-механических свойств металла – по результатам выполнения обследования и расчетов в рамках требований [14] и НД;
- степени эрозионно-коррозионного износа (утонение стенки) – по результатам выполнения обследования и расчетов в рамках требований [14] и НД.

Критериями параметров, определяющих старение ГЦН являются:

- для параметров по механическим свойствам металла (предел текучести, предел прочности, относительное сужение, относительное удлинение) – нормативно-техническая и проектная документация, паспорта, Технические условия;

Таблица 1. Координаты и размеры заваренных выборок металлургических дефектов на улитке ГЦН объемом более 300

	Вид, разрез	№ дефекта	Координаты			Размеры дефекта, мм		
			$\alpha$ , град	$R$ , мм	$Y$ , мм	длина	ширина	глубина
1	Б-Б, В-В	№ 1	204	670	-185	1000	120	60
2	Б-Б, В-В	№ 2	242	630	220	660	210	20
3	А-А, В-В	№ 3	292	680	240	640	440	20
4	А-А, В-В	№ 4	340	710	260	700	580	15
5	А-А, Г-Г	№ 5	22	1080	-95	310	280	20
6	А-А, Г-Г	№ 6	44	1140	-160	350	260	75
7	А-А, Г-Г	№ 7	79	1180	-170	790	900	30
8	Б-Б, Г-Г	№ 8	117	1260	-180	870	890	30
9	Б-Б, Г-Г	№ 9	158	1330	-210	870	930	30
10	Б-Б, Г-Г	№ 10	197	1350	-230	910	760	20
11	Вид Ж, И	№ 11	85	1280	400	410	380	45
12	Вид Ж, И	№ 12	70	1300	340	500	240	50
13	Вид Ж, И	№ 13	62	1230	600	600	110	45
14	Вид Ж, И	№ 14	45	1280	280	400	120	40
15	Вид Ж, И	№ 15	45	1530	170	620	290	35
16	Вид Ж, И	№ 16	38	1130	600	480	160	45
17	Вид Ж, И	№ 17	15	1130	600	400	200	45
18	Вид Ж, И	№ 18	28	1200	320	265	190	30
19	Вид Ж, И	№ 19	355	1440	60	220	260	40
20	Вид И, Б-Б	№ 20	274	1090	570	310	125	45
21	Вид Ж, И	№ 21	281	1200	160	330	170	50
22	Вид И, Б-Б	№ 22	248	1370	540	540	200	60
23	Вид А, Е	№ 23	133	930	-550	960	110	15
24	Вид А, Е	№ 24	133	1460	50	980	110	20
25	Вид А, Е	№ 25	208	1350	-390	145	120	100
26	Вид А, Е	№ 26	215	1395	-430	485	170	110
27	Вид Е, И	№ 27	223	843	900	460	340	235
28	Вид Е, Д	№ 28	-	542	-835	3400	170	40
29	Вид Ж, Д	№ 29	272	565	-800	1570	30	25

– для параметров по состоянию металла – требования документов по нормам оценки качества;

– для параметров и характеристики элементов конструкции, такие как: толщина металла, видимые деформации, механические повреждения, выявленные при наружном и внутреннем осмотрах (требования проектной конструкторской документации значения минимально-допустимой толщины); недопустимые деформации и повреждения, которые невозможно устранить, или которые являются недопустимыми с точки зрения условий прочности (требования проектной, конструкторской и эксплуатационной документации);

– для количества циклов нагружения – не превышение до-

пустимого количества циклов нагружения, установленного в проектной и эксплуатационной документации;

– для номинального расхода допустимое значение установлено требованиями пункта 4.3.13 НД [15];

– для напора допустимое значение установлено требованиями пункта 4.3.13 НД [15];

– для температуры подшипников допустимое значение установлено требованиями пункта 3.16 НД [15];

– для вибрационных характеристик допустимое значение установлено требованиями пункта 5.2.30 НД [15];

– для накопленного усталостного повреждения – не превышение допускаемого по [6] значения накопленного усталостного по-

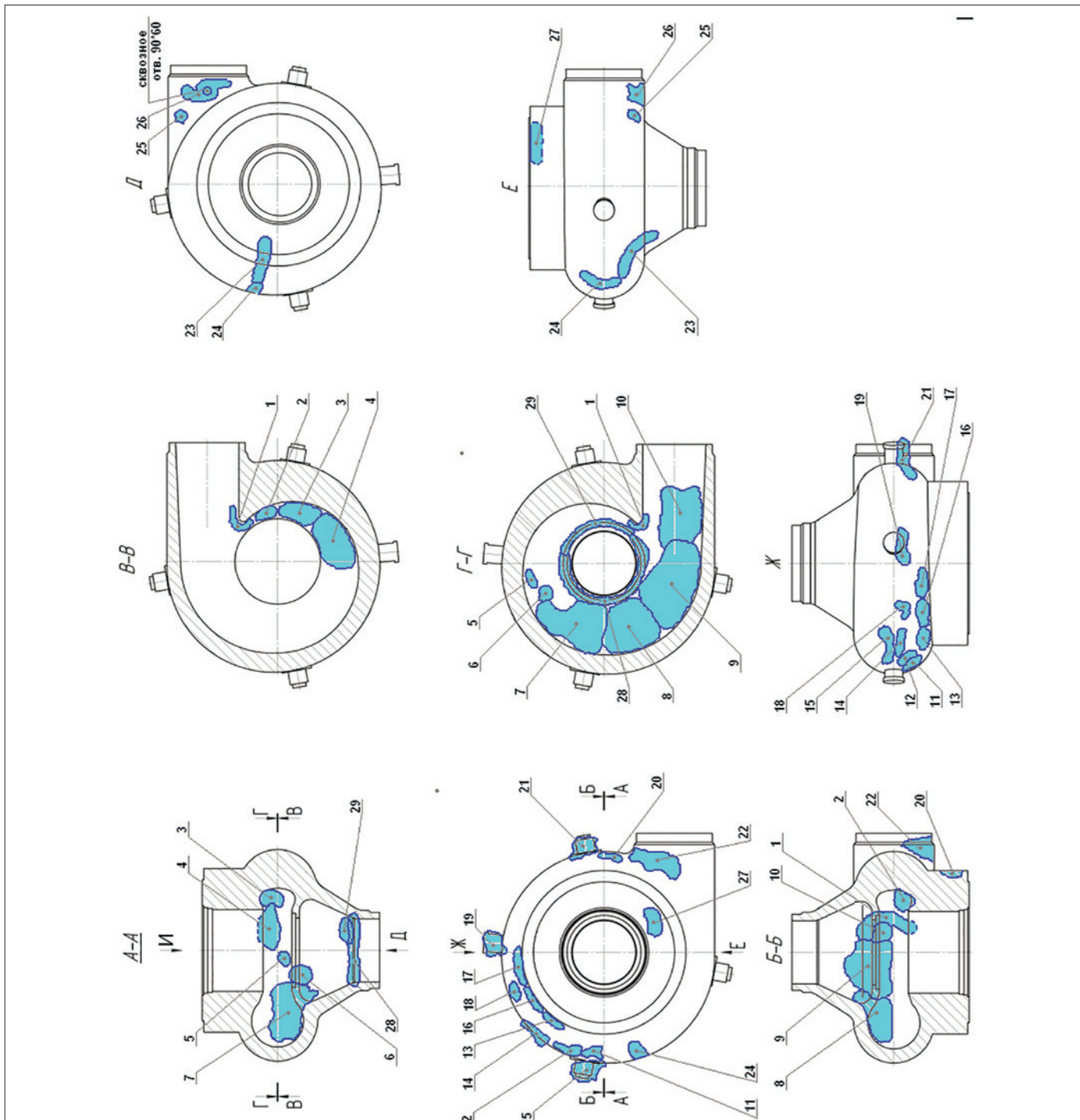
вреждения на момент окончания переназначенного срока эксплуатации;

– для температуры хрупкости – не превышение фактической температуры хрупкости  $T_k$  металла ГЦН на момент окончания переназначенного срока эксплуатации.

Перечень параметров, определяющих старение ГЦН приведен в табл. 2.

Мониторинг основных эксплуатационных характеристик насоса выполняется постоянно.

При детальном исследовании типовой последовательности протекания режимов эксплуатации ГЦН очевидно, что эксплуатация рассматриваемого оборудования фактически возможна по двум циклам:



**Рис. 5. Места расположения заваренных выборок металлургических дефектов улитки за время эксплуатации ГЦН**

- цикл 1 (нормальной эксплуатации, безаварийный);
- цикл 2 (аварийный).

Анализ данных регистрации эксплуатационных циклов нагружения выполняется в соответствии с положениями пункта 4.2 [16] и проводится с целью:

- сопоставления параметров реализованных на блоке эксплуатационных режимов с параметрами расчетных режимов, которые рассмотрены в поверочном расчете на циклическую прочность ГЦН;

- прогноза времени исчерпания допустимого количества циклов нагружения, регламентированного технической документацией;

- прогноза времени превышения проектного суммарного числа нарушений нормальной эксплуатации и/или суммарного числа аварийных ситуаций.

При выполнении контроля параметров старения элементов ГЦН используются следующие методы неразрушающего контроля в рамках работ по продлению ГЦН:

- наружный осмотр;
- визуальный контроль;
- ультразвуковая толщинометрия;

- контроль механических свойств по твердости.

Наружный осмотр насоса (в доступных местах) проводится на предмет выявления трещин, непредусмотренного раскрепления, заземления, удлинения, укорочения или остаточных деформаций.

Толщинометрия при технической возможности проводится для



Таблица 2. Перечень параметров, определяющих старение ГЦН

1 Эксплуатационные параметры ГЦН	
1.	Номинальная подача, м <sup>3</sup>
2.	Давление на всасывании, кгс/см <sup>2</sup>
3.	Напор, кгс/см <sup>2</sup>
4.	Расчетная температура рабочей среды, °С
5.	Температура подшипников, °С
6.	Вибрационные характеристики, мкм
2 Количество циклов нагружения ГЦН при нормальных условиях эксплуатации	
7.	Все режимы нормальной эксплуатации
2.1 Количество циклов нагружения ГЦН при нарушении нормальных условий эксплуатации	
8.	Все режимы эксплуатации ненормальной эксплуатации
2.2 Количество циклов нагружения ГЦН при аварийных режимах	
9.	Все аварийные режимы эксплуатации
3 Состояние основного металла и сварных соединений	
10.	Состояние основного металла и сварных соединений улитки ГЦН
11.	Состояние основного металла и сварных соединений переходников улитки ГЦН
12.	Накопленное усталостное повреждение
13.	Температура хрупкости металла
4 Фактические значения механических свойств металла	
14.	Корпус улитки. Материал – высокохромистая сталь мартенситно-аустенитного класса 06X12H3ДЛ: – $R_{p,0,2}^T$ , МПа – $R_m^T$ , МПа
15.	Патрубки корпуса улитки. Материал – легированная сталь перлитного класса 10ГН2МФА: – $R_{p,0,2}^T$ , МПа – $R_m^T$ , МПа – $A^T$ , %
5 Степень эрозивно-коррозионного износа (утонение стенки)	
16.	Толщина стенок улитки ГЦН
17.	Толщина стенок переходников улитки ГЦН

участков, возможно подвергающихся коррозионно-эрозийному и механическому изнашиванию в процессе эксплуатации. В районе сварных соединений замер толщины стенок производится с обеих сторон сварного шва в следующих зонах:

– околошовная зона (ОЗ) – на расстоянии до 20 мм от края сварного шва;

– основной металл (ОМ) – на расстоянии от 20 до 50 мм от края сварного шва.

При неудовлетворительных результатах (при обнаружении толщин ниже минимально-допустимых) количество точек измерения увеличивают так, чтобы можно было точнее определить размеры области износа.

Определение твердости металла на обследуемых элементах ГЦН проводится с целью проверки со-

ответствия механических характеристик значениям, установленным НД и ТД, и выявления отдельных участков с неудовлетворительными значениями. Измерение твердости осуществляется непосредственно на наружной поверхности улитки ГЦН, переходников всасывающего и напорного патрубков, на шлифованной плоской площадке. В каждой зоне контроля выполнено по 5 измерений твердости по Бринеллю. Твердость в каждой зоне контроля определяется как среднее арифметическое из пяти измерений. По полученной твердости металла в каждой зоне контроля в соответствии с требованиями НД определяются фактические механические характеристики основного металла улитки и основного металла, сварных швов и околошовных зон переходников всасывающего и напорного патрубков ГЦН. При полу-

чении результатов твердости, выходящих за пределы нормативных значений, необходимо в этих зонах произвести снятие поверхностного слоя с удалением возможно обезуглероженного или наклепанного слоя металла и с обеспечением требуемой шероховатости поверхности, но не выводя толщины за минимально-допустимые значения, после чего провести повторное измерение твердости. Если при повторном измерении получены показатели, не удовлетворяющие установленным нормам, необходимо при дополнительных измерениях определить размеры участка с измененными показателями.

По результатам замера твердости металла ГЦН дается косвенная оценка их прочностных характеристик: предела прочности  $R_m^T$ , предела текучести  $R_{p,0,2}^T$ , относительного сужения  $Z^T$ , относительного удлинения  $A^T$ . Характеристики механических свойств металла в соответствии с измеренными значениями твердости определяются по корреляционным соотношениям. На основе измеренных механических характеристик сварных швов и полученных характеристик основного металла производятся расчеты напряженно-деформированного состояния ГЦН с использованием компьютерной программы «APM Structure» (WinMachine). По результатам расчета определялись наиболее нагруженные его элементы на соответствие [6].

В ходе проведенного анализа эксплуатационной и ремонтной документации, а также исследований параметров, определяющих старение ГЦН, было установлено, что материалы элементов ГЦН наиболее вероятно, могут быть подвержены следующим механизмам старения (табл. 3):

– циклическая усталость – процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящих к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению материала. Усталость ГЦН может возникнуть в результате повторяющихся циклов напряжений/деформаций, вызванных колебаниями нагрузок и температур;

– механический износ – обычно характеризуется механическими воздействиями. Колебания ГЦН являются вынужденными и обусловлены, в основном, колебаниями, исходящими от вращения вала.

При эксплуатации ГЦН, под действием эксплуатационных нагрузок, одновременно подвергается воздействию различных механизмов старения. В таком случае, для каждого обследуемого насоса в соответствии с требованиями [12] должны быть установлены доминирующие механизмы старения, которые вносят основной вклад в процесс его старения.

Во время эксплуатации, кроме отмеченных выше механизмов старения, металл ГЦН может подвергаться воздействию дополнительных факторов (стрессоров),

способствующих ускоренному старению и деградации.

### Выводы

На основании подробного исследования конструкторской, эксплуатационной документации по ГЦН на энергоблоках АЭС Украины, а также данных постоянного мониторинга полного объема точек контроля, характеризующих надежную и безопасную работу насоса, были выбраны технические параметры, определяющие старение ГЦН. Выбор определя-

ющих параметров осуществлялся для конкретного типа оборудования, исходя из его физических свойств, анализа оперативной диагностики и статистики изменений параметров во времени.

В работе предложено систему технико-экономических показателей (параметров), которые определяют старение оборудования. Данная система позволяет:

– провести анализ последующей динамики их изменения и оценить статистические данные их изменений во времени с целью определения конкретных процес-

Таблица 3. Механизмы старения материала ГЦН

Механизмы старения	Эффект старения	Параметр, определяющий старение	Метод контроля эффекта старения
Циклическая усталость	Изменение физико-механических свойств	Предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение	Неразрушающие методы контроля механических свойств
	Растрескивание	Отсутствие/наличие дефектов, их геометрические параметры, координаты	Периодический неразрушающий контроль состояния металла
	Разрушение	Значение накопленного усталостного повреждения. Допустимое количество циклов нагружения	Расчеты на циклическую прочность. Контроль количества циклов нагружения
Механический износ	Растрескивание	Отсутствие/наличие дефектов (повреждений)	Периодический контроль состояния металла

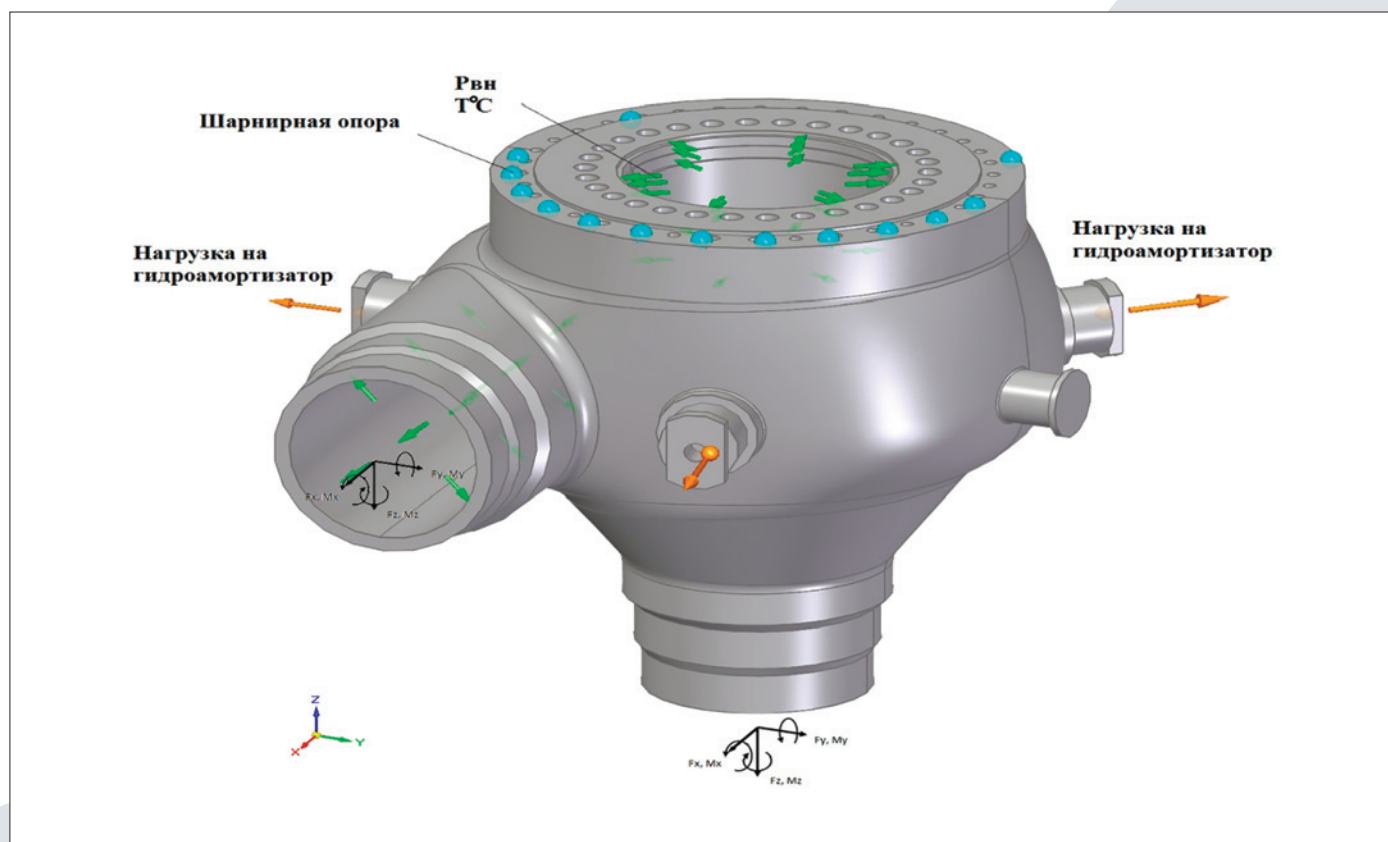


Рис. 6. Модель корпуса улитки ГЦН с указанными условиями закрепления и нагружения

сов, которые постепенно изменяют характеристики материала элементов ГЦН в результате эксплуатации;

- установить вероятный механизм старения;
- выполнить по значениям определяющих параметров поверочные расчеты на статическую и циклическую прочность, а также сопротивление сейсмическим воздействиям;
- formalizovat критерии оценки технического состояния ГЦН с последующим решением вопроса о продлении ресурса эксплуатации оборудования.

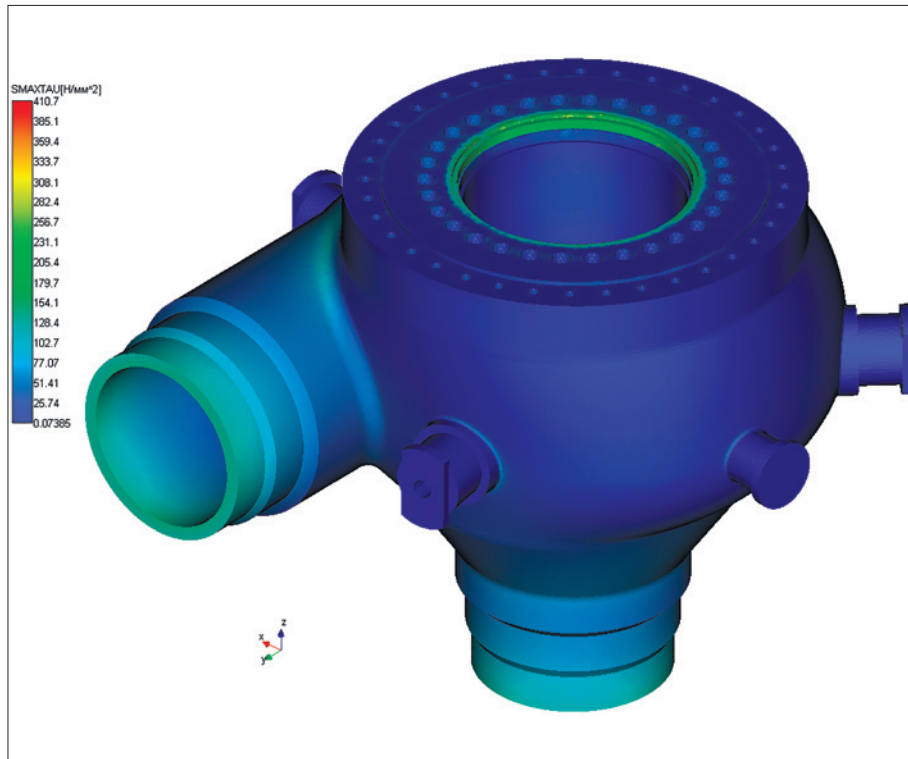
Правильный выбор определяющих параметров старения ГЦН позволит по специальной методике и программе выполнить комплексную оценку текущего технического состояния насоса, определить параметры надежности и оценку остаточного ресурса для получения научно обоснованных объективных выводов о возможности продления ресурса ГЦН.

Так же установлено, что при выполнении работ, направленных на продолжение ресурса ГЦН необходимо учитывать наличие и воздействие следующих эксплуатационных факторов:

- вибрационные нагрузки;
- сейсмические нагрузки;
- неучтенные проектными расчетами нагрузки;
- высокий уровень механических напряжений;
- эрозионно-коррозионный износ;
- усталостные повреждения;
- дефекты основного металла, а также сварных швов и наплавов во время изготовления и монтажа.

#### Список литературы:

1. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. – Введ. 08.04.01. – К.: ГКЯР України, 2008. – 62 с.
2. Комплексная (сводная) программа повышения уровня безопасности энергоблоков атомных станций» (КСПБ). – Введ. 07.12.10. – К.: ГКЯР України, 2010.
3. АО «ЦКБМ» Официальный веб-сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – URL: <http://www.ckbt.ru/> (дата обращения: 28.01.2016).
4. Модернизация главных циркуляционных насосов ГЦН-317 на АЭС «Моховце 3, 4» [Электронный ресурс]. – Режим доступа. –



**Рис. 7. Распределение приведенных напряжений  $\sigma_{1-3}$  в корпусе улитки ГЦН: режим нормальной эксплуатации,  $P=18,0$  МПа,  $T=350$  °С, нагрузка – внутреннее давление, вес и температура**

URL: <http://www.sigmagroup.cz/ru/> (дата обращения: 28.01.2016).

5. Герасимов, В. С. Модернизированный главный разъем ГЦН-195М для ВВЭР-1000, РУ В-320. / [В. С. Герасимов, Ю. М. Паутов, С. П. Евтушенко и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: матер. конф. ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 26–29 мая 2009.

6. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Утверждены ГАЭН СССР, 1987.

7. Bulletin FPD-2g (E) February 2014. © 2014 Flowserve Corporation.

8. Expertise you can trust: pumps, valves and services for nuclear power stations 0361.037 / 02-EN / 05.13 / © KSB Aktiengesellschaft 2013 Subject to technical modification without prior notice.

9. Насос истины. Независимое электронное периодическое издание AtomInfo.RU, 2013.

10. Гиря М. П. Выбор определяющих параметров старения электротехнического оборудования АЭС для оценки его технического состояния и остаточного ресурса / М. П. Гиря, Л. М. Штабский // Энергетика и Электрификация. – 2006. – № 6. – С. 18–22.

11. Надежность техники. Анализ надежности. Основные положения: ДСТУ 2861-94. – [Введ. 01.01.97]. – К.: Изд-во стандартов, 1995. – 32 с.

12. ПМ-Д-0.08.222-14. Типовая программа по управлению старением элементов блока АЭС. – [Введ. 19.03.15]. – К.: НАЭК «Энергоатом» Украины, 2015.

13. ПМ-Т. 0.08.159-05. – Типовая программа оценки технического состояния и переназначения ресурса / срока службы главных циркуляционных трубопроводов и главных запорных задвижек ЯУ ВВЭР.

14. ПМ-Т. 0.03.404-14. Типовая программа оценки технического состояния и продления срока эксплуатации главных циркуляционных насосов ГЦН-195М. – [Введ. 26.05.15]. – К.: НАЭК «Энергоатом» Украины, 2015.

15. 195-00-0013 РЭ. Главный циркуляционный насос ГЦН-195М. Руководство по эксплуатации.

16. МТ-Т. 0.08.155-14. Методика переназначения допустимого количества циклов нагружения и оценка техсостояния по прочности тепломеханического оборудования и трубопроводов при циклических нагрузках. – [Введ. 2014]. – К.: НАЭК «Энергоатом» Украины, 2015.