

УДК 625.5

С.Т. Мирошниченко, канд.техн.наук, доц., В.А. Коваль, канд.техн.наук, доц., С.А. Елифанов, инж.  
Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, г. Севастополь, Украина

## ОЦЕНКА КАВИТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В НАСОСНОМ ОБОРУДОВАНИИ МЕТОДОМ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

*У статті розглянуті питання застосування вібраакустичної діагностики для продовження ресурсу насосного обладнання. Проведений аналіз причин несправностей вказаного обладнання на ЗАЕС, за результатами якого надана оцінка доцільності визначення початку і розвитку кавітаційного процесу методом вібраакустичної діагностики.*

*The questions of vibroacoustic diagnostics application for the pumping equipment overhaul -period renewal have been considered. These equipment disrepairs reasons at the ZAES have been analyzed, these results enabled to estimate the determination reasonability of origin and development of cavitations process using the vibroacoustic diagnostics method.*

**ВВЕДЕНИЕ** Кавитация – один из процессов влияющих на безаварийную работу обслуживаемых реакторы систем и механизмов. При длительном воздействии кавитации разрушаются не только рабочие колеса насосов, но и проточная часть их корпусов. В настоящее время существует много способов, как конструктивных, так и организационных, уменьшающих воздействие кавитации на насосное оборудование, однако до конца исключить влияние этого процесса не удается. В этой связи вопросы целесообразности определения начала и развития кавитационного процесса в насосном оборудовании остаются актуальными и требуют оптимизации методов их диагностики.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛА И РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА** Для оценки целесообразности определения начала и развития кавитационного процесса в насосном оборудовании методом виброакустической диагностики проведен поиск и анализ причин неисправностей указанного оборудования на ЗАЭС.

Из перечня неисправностей, сгруппированного по причинам (таблица 1), видно, что основной причиной возникновения неисправностей (аварийного останова) являются ошибки персонала в организации и проведении контроля, ремонта и эксплуатации оборудования.

Следующими по значимости являются заводские дефекты подшипников, неисправности электродвигателей и конструктивные недоработки: неточность в эксплуатационной документации.

Таблица 1

Причины неисправностей насосного оборудования блока АЭС

№ П.П.	ПРИЧИНЫ НЕИСПРАВНОСТЕЙ	КОЛИЧЕСТВО	
		АБСОЛЮТНОЕ	ОТНОСИТЕЛЬНОЕ
1	Заводские дефекты:		
1.1	подшипников	9	13,4
1.2	электродвигателей	2	2,98
1.3	механической части насосов	3	4,47
2	Выход из строя:		
2.1	пускорегулирующей аппаратуры	3	4,47
2.2	электродвигателей	9	13,4
3	Конструктивные недоработки и неточности в эксплуатационной документации	6	8,95
4	Ошибки персонала в организации и проведении контроля, ремонта и эксплуатации оборудования.	28	41,79
5	Прочие	7	10,44

Причинами прочих неисправностей являются, как правило, внешние факторы (попадание в насосы абразивных частиц, рыб; неисправность сервисного оборудования – датчиков; некачественный монтаж питающих кабелей и т.д.). За рассматриваемый период в перечне не зарегистрировано ни одного аварийного останова насосного оборудования, вызванных разрушением деталей под воздействием кавитационных процессов. Из других источников известно, что кавитационные процессы (явления) существенно влияют на вибрацию насосов с относительно низким давлением на всасе и составляют проблему для определенных типов насосов, работающих в неблагоприятных условиях [1].

На АЭС большинство насосов работают в спецификационных режимах на нормальных характеристиках, с поддержанием спецификационных значений давления на всасе и нагнетании (т.е. в благоприятных условиях), чем и

объясняется отсутствие неисправностей как результатов кавитационных процессов. В основном это вспомогательные (обслуживающие) насосы относительно малой мощности.

Однако основные насосы, обеспечивающие работу реактора, такие как главный циркуляционный насос (ГЦН), конденсатно-питательный, вспомогательный циркуляционный и т.п., могут подвергаться воздействию кавитации.

На основании изложенного все насосы АЭС можно разделить на две группы:

- 1 группа – насосы, не подвергаемые воздействию кавитации;
- 2 группа – насосы, подвергаемые воздействию кавитации.

Причинами отсутствия неисправностей насосов первой группы, как результатов кавитационных процессов, могут быть:

- хорошие антикавитационные свойства центробежных насосов;
- правильная организация контроля и управления процессами и четкое выполнение персоналом инструкций по эксплуатации;
- кратковременное воздействие кавитационных процессов, не достаточное для значительного разрушения рабочего колеса (рабочих колес) и проточной части насоса;
- несколько из перечисленных причин одновременно.

Улучшение антикавитационных свойств центробежных насосов на практике достигают применением ряда конструктивных и проектных мероприятий, таких как:

- понижение геометрической высоты всасывания или увеличения подпора у насоса;
- уменьшение гидравлических сопротивлений подводящего патрубка за счет увеличения его сечения и хорошей механической обработки;
- уменьшение частоты вращения вала насоса и выполнение насоса с большим числом ступеней;
- устранение резких изменений направления потока во входном патрубке насоса и у входа в рабочее колесо;
- применение рабочего колеса первой ступени с повышенными противокавитационными свойствами, у которых меридианное сечение выполняется бочкообразной формы, а входным кромкам лопастей придается заостренная форма с плавным переходом от тонкой к утолщенной части лопасти;
- предвключение добавочного насоса.

Для питательного насоса предвключенными являются конденсатные насосы с большой частотой вращения. Это улучшает их массогабаритные характеристики и повышает КПД по сравнению с единым конденсатно-питательным насосом. [4].

Кроме того, материалы проточной части должны быть устойчивыми против эрозии при максимально возможных скоростях теплоносителя. Повреждения, аналогичные эрозионным, возможны и при кавитации.

Для предупреждения эрозионно-кавитационных повреждений элементов проточной части стремятся использовать металл с повышенной твердостью или применяют соответствующие наплавки. Это, конечно, не исключает необходимости в гидродинамической оптимизации проточной части в целях предупреждения локальных эрозионных и кавитационных процессов. Опасность кавитации наиболее реальна для натриевых ГЦН из-за низкого давления в контуре [2].

В вынесенных системах обслуживания ГЦН циркуляционные баки должны быть высокими. Размещение насоса около высокого бака обеспечивает подпор жидкости на всасывании и помогает предотвратить кавитацию.

Безаварийная работа реактора напрямую зависит от работоспособности обслуживающих их насосов.

К сожалению, в настоящее время ни один из применяемых на АЭС насосов, в том числе и ГЦН, в целом не обеспечивают ресурса работы АЭС (30...40 лет) [2].

Основным эксплуатационным требованием, предъявляемым к вышеуказанным насосам, особенно к ГЦН, является высокая ресурсная надежность. Как и всё оборудование, расположенное в необслуживаемой при работе реактора зоне, ГЦН должны надежно и устойчиво работать без всякого вмешательства обслуживающего персонала в течение длительного времени, равного, по меньшей мере, периоду между плановыми остановками реактора [2]. Учитывая радиоактивность перекачиваемой среды длительность и частота ремонтных работ должны быть сведены к минимуму. В этой связи так важно продление межремонтного и остаточного ресурса ГЦН и обслуживающих их насосов.

Однако первоочередной задачей следует считать сведение к минимуму количества незапланированных остановов насосов. Такие остановки ГЦН могут происходить не только по причине неисправности самих насосов или систем их обслуживающих, но и по причине ложных срабатываний автоматической защиты системы реактора (СУЗ) и защиты самого насоса. Основной причиной появления ложных сигналов является неисправность первичных датчиков, что свидетельствует о необходимости:

- оптимизации количества и состава контрольно-измерительной аппаратуры, устанавливаемой на насосе и обслуживающих его системах;
- применения надежных первичных датчиков;
- разработки оптимальных алгоритмов контроля и управления;
- исключения ложных срабатываний систем защиты (применение троирования, т.е. трех однотипных датчиков контролирующего один параметр, сигналы от которых обрабатываются по алгоритму два из трех) [2].

На ресурс и безаварийную работу насосов второй группы существенное влияние оказывают последствия воздействия кавитации.

Наиболее старый и до сих пор самый распространенный метод обнаружения кавитации – энергетический, посредством анализа показаний высокочастотных приборов контроля давления на всасе и нагнетании, производительности, перепада давления на всасе и нагнетании и т. д. За начало кавитации принимают значение, при котором напор уменьшился на 2%. Определенное таким образом начало кавитации является условным. Более точно начало кавитации определяется по изменению виброакустических характеристик (например, по общему уровню вибраций).

Обнаружено, что изменение виброакустических характеристик происходит значительно раньше, чем энергетических, т.е. виброакустический метод дает более точную информацию о начале кавитации [3].

Следовательно, для оптимизации процессов контроля и диагностики с целью обеспечения безаварийной работы реактора и продления ресурса насосного оборудования необходимо помимо автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) или техническими средствами (АСУ ТС) применять систему контроля вибрации и вибродиагностики. При чём последняя должна иметь возможность получения информации от первых.

Если параметры насосов первой группы можно контролировать только АСУ ТП или АСУ ТС, то параметры насосов второй группы должны контролироваться всем комплексом систем. Наиболее точный метод определения противокавитационных свойств центробежных насосов основан на экспериментальном определении их кавитационных характеристик.

Учитывая выше сказанное, при заключении контракта с заводом-поставщиком в технических требованиях на закупку насосов второй группы необходимо оговорить стендовые испытания и запись виброакустических характеристик, которые характеризуют начало и развитие процесса кавитации.

В случае невозможности проведения подобных испытаний на стенде завода-поставщика - необходимо провести эти испытания во время входного контроля купленного оборудования на своём стенде. Подобные испытания необходимо проводить и после ремонта, так как виброакустические характеристики насосов после замены той или иной детали изменяются.

Для проведения этих испытаний стенд должен быть оборудован приборами, позволяющими определять начало кавитации энергетическим методом, а именно приборами контроля давления на всасе и нагнетании, приборами замера производительности – расходомерами, дифференциальными манометрами высокой чувствительности и точности, амперметрами.

Полученные калибровочные виброакустические характеристики необходимо ввести в систему вибродиагностики для последующего сравнения с текущими.

Система сравнения текущего состояния с определенным заранее известным образом нормального или аномального состояния наиболее распространена в качестве систем мониторинга технического состояния оборудования. Однако на этот метод существенно влияет переход насоса на другой режим работы, изменение нагрузки, работа нескольких механизмов в связке (бустерные насосы). Следовательно, накопление информации надо проводить на каждом конкретном агрегате, установленном на своём рабочем месте [5].

**Оценка кавитационного процесса** Данное утверждение не исключает использование заводских калибровочных виброакустических характеристик, которые должны поставляться вместе с изделием как основы для последующей корректировки.

Мало того, при неправильном монтаже оборудования (установка агрегата не на плоскость без амортизаторов, а для агрегатов большой мощности при подключении трубопроводов без компенсаторов) виброакустические характеристики изменяются, что говорит о неблагоприятном состоянии установленного оборудования. Возникающие при этом напряжения в корпусе могут стать причиной выхода из строя любой вращающейся детали и скорейшему проявлению скрытых дефектов.

Поэтому при монтаже оборудования необходимо максимально уменьшить влияние указанных факторов.

В процессе кавитации, действующие на детали усилия значительно превышают спецификационные, и скрытые дефекты выявляются быстрее, чем при обычной эксплуатации. Этим и опасно наличие дефектов в деталях насосов второй группы. Сама кавитация, её начало, развитие (единичное проявление), никоим образом не влияет на остаточный ресурс. При её проявлении бракованная деталь может сломаться сразу или в течение короткого времени. Так как начало кавитации предваряется значительным увеличением вибрации, то аварийный останов насоса должен производиться либо сразу, либо через незначительный промежуток времени, обеспечивающий идентификацию процесса.

На качественные детали единичная кавитация также не оказывает влияния. Разрушение рабочего колеса, например, происходит при значительной суммарной длительности кавитационных процессов.

Поэтому оценку остаточного ресурса оборудования, проработавшего какое-то время в процессе кавитации, необходимо проводить не во время её проявления, а в нормальном режиме эксплуатации, при котором дефекты детали, возникшие в результате кавитационных процессов, будут максимально заметны.

#### **Выводы**

1. Определение начала и развития кавитационных процессов методом виброакустической диагностики целесообразно для центробежных насосов второй группы (т.е. подвергаемых воздействию кавитации).
2. Для насосов первой группы (т.е. не подвергаемых воздействию кавитации), достаточен контроль энергетических параметров АСУ ТП (АСУ ТС).
3. Для оптимизации контроля, управления и диагностики насосного оборудования должна использоваться комбинированная система, т.е. система диагностики должна быть интегрирована в АСУ ТП (АСУ ТС).

#### **Список литературы**

1. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. М.: Машиностроение, 1999 г.
2. Ф.М. Митенков, Э.Г. Новинский, В.М. Будов. Главные циркуляционные насосы АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1984 г.
3. В.М. Будов Судовые насосы: Справочник.- Л.: Судостроение, 1988 г.
4. Горбачев Ю.Ф., Карасев В.Н., Крастелев М.М. Насосы: Учеб. Пособие. Часть 1. ВМФ, 1986 г.
5. Мынцов А.А. (ЗАО «Промсервис») Инвариантность методики диагностирования к конструктивным особенностям объектов <http://www.yandex.ru/> вибродиагностика /для начинающих и специалистов.