

УДК 62-233.2

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ НА ВОДЯНОЙ СМАЗКЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС

*Герасимов В.С., Никифоров С.А., Паутов Ю.М., Снетков В.Г.,
Федоров Г.П., Михайлов А.Д. (НТЦ «Энергонасос ЦКБМ»)*

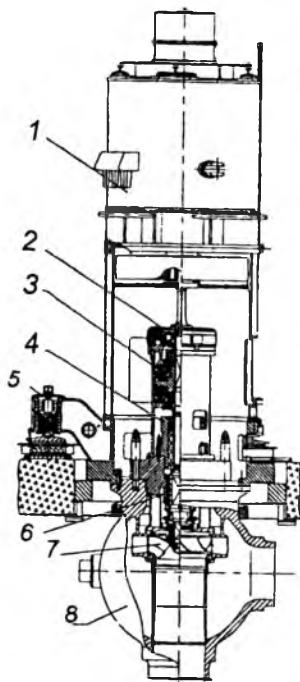
В обеспечении работоспособности, надежности и безопасной эксплуатации АЭС, ее экономических показателей важное место занимают главные циркуляционные насосные агрегаты. Они относятся к основному технологическому оборудованию АЭС, которое имеет активный принцип действия, длительно эксплуатируется и тесно связано с другим оборудованием. В настоящее время на АЭС с ВВЭР-1000 [1] установлено более 70 агрегатов ГЦН-195М, с ВВЭР-440 — более 120 агрегатов ГЦН-317. Обе модификации агрегатов созданы в ЦКБМ и по компоновке аналогичны (рис. 1).

Во всех насосных агрегатах при создании осевых подшипников с рабочей осевой нагрузкой до 700 кН пары трения смазывают и охлаждают масляной средой. Конструкция осевого подшипника для обоих вариантов насоса аналогична и представляет собой осевой подшипник с выравнивающей системой типа Кингсбери. В электродвигателях применен осевой подшипник с качающимися колодками типа Митчел. Масло в электронасосные агрегаты подается с масляной станции, которая вынесена за пределы герметичной оболочки АЭС. Для обслуживания от одной станции двух агрегатов ГЦН с ВВЭР-1000 и трех с ВВЭР-440 необходимо 10—12 м³ масла.

Вследствие наличия протяженных трасс подвода и отвода масляной смазки, проложенных через бокс парогенераторов и герметичные проходки с локализирующей арматурой, а также арматуры регулирования подачи масла, установки промежуточной емкости и системы пожаротушения и из экологических соображений, было принято решение о применении в системах смазки и охлаждения радиально-осевых подшипников, работающих на воде. Такие работы велись в ЦКБМ с 1982 г. К настоящему времени разработаны, изготовлены и успешно прошли испытания в составе агрегатов ГЦН радиально-осевые подшипники на водяной смазке. Испытания проводили на натурных стендах агрегатов ГЦН, устанавливаемых в составе как энергоблоков ВВЭР-440, так и ВВЭР-1000.

Особенности работы и конструкции осевых подшипников, работающих на воде. При работе осевого подшипника на масляной смазке в паре трения во время работы сохраняется гидродинамический режим работы, при этом, например, для агрегата ГЦН-195М минимальный зазор между рабочими колодками и упорным диском составляет 0,05 мм. Выравнивающая система подшипника типа Кингсбери позволяет отслеживать торцевой бой упорного диска и перекосы неврещающихся поверхностей подшипника. В паре трения осевого подшипника применен классический вариант пары трения, работающей на масле: баббит Б83 по стали. Касание колодок с упорным диском на выбеге насоса происходит приблизительно при 150 об./мин. Многолетний опыт эксплуатации ГЦН-195М показывает, что при хороших смазывающих свойствах масла и низком тепловыделении при указанных оборотах вала пары трения не изнашиваются.

При переходе на воду в качестве смазочно-охлаждающей жидкости минимальный расчетный зазор в гидродинамическом клине уменьшается в 10 раз. Учитывая допуски на изготовление, фактическую шероховатость рабочих поверхностей, а также деформации контактирующих поверхностей, можно сделать вывод, что пара трения работает в непосредственном контакте в полужидкостном режиме трения.



Р и с. 1. Общий вид агрегата ГЦН для ВВЭР-1000: 1 — электродвигатель ДВДАЗ 173/109-6-8-2АМО5; 2 — торсион с пластинчатой муфтой; 3 — радиально-осевой подшипник с водяной смазкой; 4 — блок уплотнения; 5 — роликовая опора; 6 — радиальный нижний подшипник; 7 — рабочее колесо; 8 — корпус насоса

С учетом изложенного необходимо было подобрать надежно работающую пару трения в непосредственном контакте с параметром нагрузки PV до 1600—1800, где P — удельное давление в паре трения, кгс/см²; V — окружная скорость в паре трения, м/с.

Такие работы ведутся по комплексному методу и предусматривают последовательное приближение условий испытаний материалов пар трения к эксплуатации в реальных условиях, переход от простого к более сложному, постепенный отбор перспективных материалов. В качестве первого этапа лабораторных испытаний принято изучение поведения материалов при статическом воздействии заданной среды: определение стойкости материалов к коррозии, теплостатические испытания неметаллических материалов. На втором этапе испытываются отобранные пары материалов на машинах трения — триботехнические испытания. Третий этап — стендовые испытания выбранных пар трения в условиях натуральных образцов разрабатываемых узлов. Четвертый этап — испытания в составе изделия на натуральных стендах.

Одновременно с последовательными этапами проводятся специальные испытания и исследования: изучение радиационной стойкости, стойкости к технологическим растворам, определение или уточнение физико-механических характеристик и др., чтобы к началу натуральных испытаний иметь наиболее полные характеристики материалов.

На основании исследований был выбран материал пары трения с указанным параметром нагрузки PV — силицированный графит марки СГ-П05 по ТУ48-20-81-76, работающий в качестве основной и ответной составляющих пары трения.

Положительный многолетний опыт эксплуатации насосов с блоками уплотнения, имеющими близкие параметры PV с парой трения в рабочем торце СГ-П05 по СГ-П05 на действующих ВВЭР-440 и -1000, подтвердил высокие триботехнические характеристики этой пары трения. Она и была рекомендована для высоконагруженных осевых подшипников на водяной смазке.

Ввиду того, что осевой подшипник с выравнивающей системой типа Кингсбери отслеживает торцевые бои и перекосы в агрегате ГЦН, обеспечивая при этом равномерное прилегание элементов пары трения, которые воспринимают действующее осевое усилие, при проектировании осевого подшипника на водяной смазке общий принцип системы Кингсбери был сохранен (рис. 2, 3). На колодах вместо наплавленного баббита Б83 были закреплены секторы из материала СГ-П05. Поверхность трения упорного диска набрана из отдельных секторов силицированного графита, что обусловлено особыми условиями охлаждения и смазки, а также значительными размерами (наружный диаметр упорного диска достигает 850 мм). Набор поверхности упорного диска из отдельных элементов привел к необходимости выполнить смазочные каналы с отклонением от радиального направления на некоторый угол, позволяющий исклЮчить ударный характер встречи отдельных колодок с набором секторных элементов упорного диска [1].

Радиальный подшипник узла радиально-осевого подшипника одинаков с нижним подшипником насоса по конструкции и применяемой паре трения. Его работоспособность подтверждена многолетней эксплуатацией в составе серийных насосных агрегатов.

Отработка подшипников и ресурсные испытания в составе опытных агрегатов ГЦН. Экспериментальную отработку и доводку радиально-осевого подшипника на водяной смазке проводили на натурном стенде ЦКБМ, предназначенном для испытаний агрегата ГЦН ВВЭР-1000. Стенд обеспечивает возможность работы насоса при давлении в контуре перекачиваемой жидкости от 1,96 до 17,6 МПа и температуре до 300 °С при подаче перекачиваемой среды 22 000 м³/ч. Потребляемая стендом мощность может достигать 8000 кВт. Обеспечивается проверка поведения агрегата ГЦН в режимах, связанных с перерывами в подаче охлаждающей воды, и во всех переходных режимах работы. Этот насос представляет собой агрегат ГЦН-195М с узлом радиально-осевого подшипника на водяной смазке. В течение первых 250 ч работы агрегата определено оптимальное давление в полости осевого подшипника для достижения минимальных виброускорений при подводе охлаждающей воды как от центра к периферии, так и от периферии к центру. Также проведена доводка кон-



Р и с. 2. Общий вид упорного диска осевого подшипника



Р и с. 3. Общий вид обоймы осевого подшипника

фигурации рабочих поверхностей трения, исключившая процессы образования следов эрозионного размыва рабочих поверхностей трения. Дальнейшие испытания в течение 2070 ч при номинальном давлении и температуре перекачиваемой среды каких-либо дефектов в конструкции подшипника не выявили.

После изготовления опытного агрегата ГЦН-1391, предназначенного для установки в составе ВВЭР-1000, испытания конструкции радиально-осевого подшипника на водяной смазке были продолжены в составе этого насоса в течение более 1000 ч. По ходу испытаний проведены пуски и остановки при номинальных параметрах перекачиваемой среды, проверена работа в переходных режимах, при регламентированных перерывах в подаче охлаждающей воды в течение 3 мин согласно требованиям технических условий. После достижения ресурса ~ 1000 ч испытания были приостановлены.

Для экономии средств дальнейшие испытания проводили в течение 4500 ч без рабочего колеса и маховика с имитацией номинального уровня осевой нагрузки на подшипник давлением уплотняемого контура перекачиваемой среды. После первых 1500 ч испытаний электродвигатель, подшипники которого работали на масляной смазке, заменили на электродвигатель с подшипниками на водяной смазке, причем конструкция осевого подшипника аналогична конструкции подшипника насоса. Таким образом, в течение последних 3000 ч испытывали электронасосный агрегат без использования масла в качестве смазочной жидкости. В процессе ресурсных испытаний проведены плановые ревизии. Замечаний о состоянии рабочих поверхностей подшипников, работающих на водяной смазке, не зафиксировано. Износов по рабочим поверхностям трения не обнаружено.

Из сравнения состояния рабочих поверхностей подшипника после наработки 5500 ч с состоянием рабочих поверхностей пары трения уплотнений после аналогичных периодов наработки с учетом многолетней работы в составе блоков уплотнения серийных электронасосных агрегатов следует прогнозировать надежную работу элементов пары трения высоконагруженных осевых подшипников в течение не менее 30 тыс. ч. Это свидетельствует о создании и возможности установки в составе ВВЭР-1000 электронасосных агрегатов на водяной смазке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чехович В.С., Федоров Г.П., Снетков В.Г. и др. Упорный подшипниковый узел скольжения. А.с. № 1745004 от 1 марта 1992 г.
2. Chekhovich V.S., Mukhailov A.D., Pautov Y.M. Operating reliability evaluation of the reactor coolant pumps and a course of updating as a constituent in improving the NPP reliability and safety as a whole. — In: The 3 RD JSME/ASME Joint Intern. Conf. on Nuclear Engineering, April 23—27, 1995, Kyoto.

Поступило 28.04.99

В окончательной редакции 16.11.2000

УДК 621.039.534.25

ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТВЭЛОВ

*Смолин В.Н., Шишов В.П., Емельянов А.И., Саввин С.Ю. (НИКИЭТ),
Балашов С.М. (Центр ЭЛНАТР)*

Трубчатые электронагреватели широко применяют как для научных исследований в области реакторной теплофизики, так и в оборудовании АЭС. Твэл часто моделируют имитатором — электронагревателем, оснащенным термопарами и имеющим близкие к твэлу характеристики: температуру оболочки, мощность, распределение теплового потока и др. В отличие от трубок прямого нагрева имитатор не имеет потенциала на оболочке, что дает возможность его использования в токопроводящих средах. Такие имитаторы используют в исследованиях с жидкометаллическими теплоносителями, материаловедческих опытах, при изучении тяжелых аварий и также на стендах при изучении теплогидравлики и аварийных режимов реакторов с водяным теплоносителем. На больших стендах их число может достигать до 2000. Известны эксперименты, когда электронагреватели работают в канале исследовательского реактора при номинальных параметрах, моделируя тепловыделение ядерного топлива в твэльных трубках из сплава циркония.

Выпускаемые нагреватели общепромышленного назначения с электроизолятором в виде порошка периклаза (MgO) при большом ресурсе имеют невысокие характеристики ($T_{\text{max}}^{\text{об}} = 700^\circ\text{C}$, $q_{\text{max}} = 0,15 \text{ МВт/м}^2$). Применение новой технологии и материалов, таких, как нитрид бора, позволило достичь высоких результатов, например, тепловых потоков $\sim 3\text{—}5 \text{ МВт/м}^2$. Улучшить характеристики нагревателей можно и посредством применения наряду с традиционной спиралью в качестве нагревательных элементов стержней, трубок, параллельных прутков и др.