

УДК 621.039.68:536.4

ЕВОЛЮЦІЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОБЛЕМ В КОНСТРУКЦІЯХ ГОЛОВНИХ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ НАСОСІВ РЕАКТОРІВ ВВЕР

Шараєвський Г.І.¹, канд. техн. наук, Фіалко Н.М.², член-кореспондент НАН України, Шараєвський І.Г.¹, докт. техн. наук, Зімін Л.Б.¹, докт. техн. наук

¹Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36-а, Чорнобиль, 07270, Україна

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.7>

Проаналізовано зміни конструкцій критичних з точки зору безпеки вузлів головних циркуляційних насосів (ГЦН) ядерних енергоблоків та відповідну динаміку супутніх теплогідрравлічних проблем, обумовлених цими змінами. Привернуто увагу до недостатньо вивчених складних теплофізичних процесів, що відбуваються у трибологічних парах механічного ущільнення валу і підшипників ковзання, де штатні режими тертя і змащування можуть латентно переходити до передаварійних і недостатньо контрольованих існуючими системами моніторингу технічних станів.

Проанализированы изменения конструкции критических с точки зрения безопасности узлов главных циркуляционных насосов (ГЦН) ядерных энергоблоков и соответствующая динамика сопутствующих теплогидравлических проблем, обусловленных этими изменениями. Привлечено внимание к недостаточно изученным сложным теплофизическим процессам, происходящим в трибологических парах механического уплотнения вала и подшипников скольжения, где штатные режимы трения и смазки могут латентно переходить к предаварийным и недостаточно контролируемым существующими системами мониторинга техническим состояниям.

Changes in the design of critical critical from the point of view of safety of the nodes of the main circulation pumps of nuclear power units and the corresponding dynamics of the accompanying thermohydraulic problems caused by these changes are analyzed. Attention is drawn to the insufficiently studied complex thermophysical processes occurring in tribological pairs of mechanical shaft sealing and sliding bearings, where the normal friction and lubrication conditions can latently go to pre-emergency and insufficiently controlled by existing monitoring systems technical conditions.

Бібліографія 6, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: реактори ВВЕР, головні циркуляційні насоси, вузли конструкції, теплогідрравлічні процеси, контроль технічного стану.

Вступ і огляд конструкцій

З часу введення в дослідно-промислову експлуатацію понад півстоліття тому перших зразків ядерних енергоблоків з реакторами типу ВВЕР конструкції їх ГЦН зазнали ряд істотних змін. Так, на АЕС першого покоління з реакторами ВВЕР-440 широко використовувалися герметичні ГЦН, в яких ротор насосного агрегату мав безпосередній контакт з перекачуванним теплоносієм першого контуру, а статор електродвигуна був відділений від ротора тонкою діамагнітною металевією перегородкою і не мав контакту з високорадіоактивною рідиною. На основі такої компоновки були розроблені, спроектовані і передані у виробництво кілька конструкцій агрегатів цього типу потужністю від 4,5 до 2400 кВт. Найбільш відомою розробкою є насос ГЦЕН-310, який встановлювався на енергоблоках АЕС з реакторами ВВЕР-440 першого покоління. Сумарне напрацювання агрегату ГЦЕН-310 в даний час склало понад 1800 реакторо-років, а максимальне напрацювання одинич-

ного агрегату досягло 200000 годин. Загальний вигляд ГЦН зазначеного типу представлений на рис. 1, а його основні технічні характеристики наведені в роботах [1 - 3]. Зазначений насосний агрегат, поряд з власне герметичним електронасосом ГЦЕН-310, включає: холодильник для охолодження води автономного контуру; вентилятор для охолодження лобових частин обмотки статора електродвигуна; допоміжний насос для створення циркуляції в автономному контурі під час простою ГЦЕН-310; систему трубопроводів; опорну раму; кульові опори. Слід зазначити, що ГЦН герметичного типу, в цілому, зарекомендували себе як дуже надійні в експлуатації і досить прості в обслуговуванні. Разом з тим, герметичні ГЦН характеризуються низьким значенням ККД, значними труднощами ремонту в умовах АЕС і мають малий інерційний вибіг, недостатній для зняття залишкового тепловиділення в активній зоні (АкЗ) ядерного реактору (ЯР) в разі раптового знеструмування і зупинки всіх ГЦН.

У зв'язку зі зростаючими вимогами до підвищення безпеки та надійності реакторів ВВЕР-440 виникла необхідність в розробці і створенні нового типу ГЦН з механічним ущільненням валу і оснащенні його виносним електродвигуном. Перші зразки таких ГЦН зі збільшеним інерційним вибігом (заводське позначення ГЦН-317) були встановлені в 1979 році на Вірменській АЕС. Слід зазначити, що насосні агрегати ГЦЕН-310 і ГЦН-317 мають уніфіковані між собою корпус насоса, опорну раму і кульові опори. Загальний вигляд насоса ГЦН-317 представлений на рис. 2, а в роботах [1 - 3] наведені його основні технічні характеристики. Корпус ГЦН-317 встановлений на зварній рамі, що спирається на кульові опори, які дозволяють насосному агрегатові переміщатися під дією температурних розширень труб першого контуру ядерної енергоустановки (ЯЕУ). Ротор електродвигуна має підвищену махову масу для забезпечення інерційного вибігу насоса при аварійних зупинках. Вал насоса обертається у двох підшипниках: нижньому

радіальному, змащуваному теплоносієм першого контуру, що відбирається з головного циркуляційного контуру (ГЦК) і охолоджується в теплообміннику автономного контуру, та верхньому радіально-осьовому (упорному), який змащується турбінним маслом Т-50, що подається від зовнішньої маслосистеми. Ротор електродвигуна обертається у підшипниках ковзання, які змащуються турбінним маслом від маслосистеми. Блок механічного ущільнення валу, що запобігає протіканню води першого контуру, складається з розділового, кінцевого ступенів і двох основних ступенів гідростатичного типу, на які подається замикаюча вода. ГЦН-317 були встановлені на 16-и енергоблоках з реакторами ВВЕР-440, а їх загальна кількість складала 96 примірників. Сумарне напруцювання цих насосних агрегатів перевищило 1500 реакторо-років, а максимальний експлуатаційний ресурс досяг 140000 годин.

У 1980 році було введено в експлуатацію перший зразок вітчизняного реактору ВВЕР-1000. Дослідно-промислому

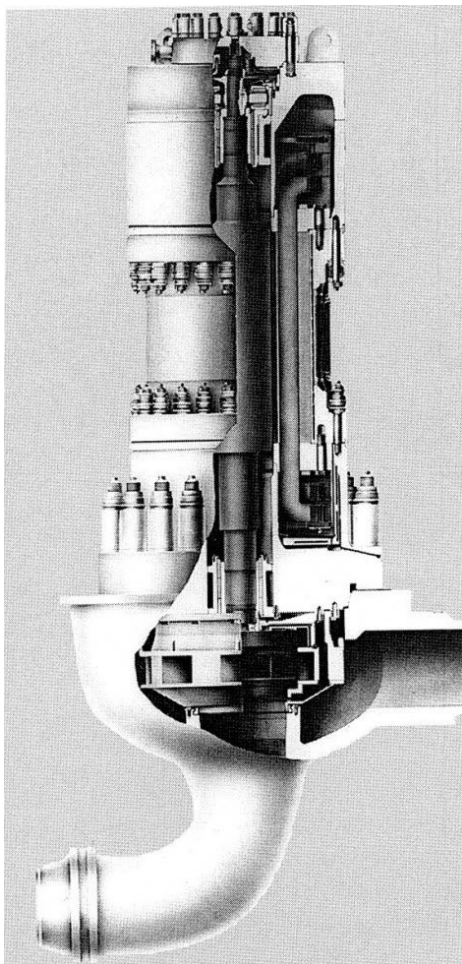


Рис. 1. Герметичний насосний агрегат типу ГЦЕН-310.

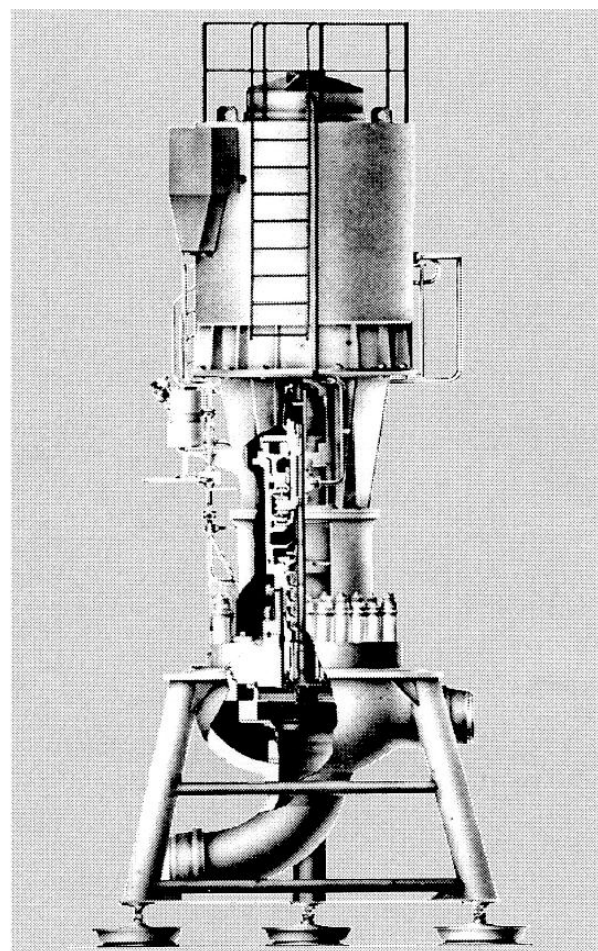


Рис. 2. Насосний агрегат типу ГЦН-317 з механічним ущільненням валу.

реакторну установку (РУ) було оснащено розробленим насосом ГЦН-195 з механічним ущільненням валу і нижнім гідростатичним підшипником. Подальшим розвитком цієї конструкції став ГЦН-195М, оснащений нижнім радіальним підшипником ковзання гідродинамічного типу. Зазначена модифікація насосного агрегату першого контуру для ядерних енергоблоків, оснащених реакторами ВВЕР-1000, в даний час набула найбільшого поширення у вітчизняній атомній енергетиці. Слід зазначити, що насосні агрегати ГЦН-195 і ГЦН-195М майже ідентичні. Основні технічні характеристики ГЦНА зазначених типів (ГЦН-195 і ГЦН-195М) наведені в таблиці.

Особливості вищевказаних компоновальних рішень сучасних ГЦН водоохолоджуваних ЯР ілюструє рис. 3, на якому зображений загальний вигляд ГЦН-195М. Представлений на цій ілюстрації ГЦН включає наступні основні структурні елементи конструкції: а) власне відцентровий насос, оснащений комплексом допоміжних технологічних систем, які забезпечують його функціонування; б) приводний асинхронний електродвигун (тип ВА3215/109-6-АМ05), встановлений на циліндричній рамній конструкції і з'єднаний з насосом за допомогою зубчастої муфти.

Як зазначено вище, сучасні ГЦН, якими оснащуються двоконтурні ЯЕУ великої потужності з вітчизняними водо-водяними некиплячими реакторами ВВЕР, а також зарубіжні РУ типу PWR характеризуються низкою відрізняючих конструктивно-компоновальних рішень [1 - 3]. Так, наприклад, всі сучасні ГЦНА цього типу є вертикальними одноступінчастими відцентровими насосами з механічним ущільненням валу, консольно розташованим робочим колесом, виносним приводним електродвигуном і осьовим підведенням перекачаного теплоносія. Конструктивно близькі до цих насосних агрегатів і ГЦН, якими оснащуються одноконтурні РУ з киплячими каналними реакторами типу РБМК.

При цьому штатне функціонування насосного агрегату ГЦН-195М забезпечують такі його наступні найбільш важливі допоміжні технологічні системи: 1) автономний контур, призначений для подачі деякої частини перекачаного теплоносія з проточної частини до нижнього радіального підшипника ковзання для змащення зони фрикційного контакту цього трибоспряження; 2) маслосистема, яка забезпечує подачу мастильного

Таблиця. Основні технічні характеристики насосних агрегатів ГЦН-195 та ГЦН-195М реакторної установки ВВЕР-1000.

Параметри	ГЦН-195	ГЦН-195М
Подача номінальна, м ³ /г	20000	20000
Напір номінальний, м (кгс/см ²)	93+3,5 (6,75±0,25)	93+3,5 (6,75±0,25)
Тиск на всасі, МПа (кгс/см ²)	15,3 (160)	15,3 (160)
Температура теплоносія на всасі, °С	300	300
Потужність насосного агрегату, кВт:		
-на гарячій воді	5300	5100
-на холодній воді	7000	6800
Витрата охолоджуючої води на установку, м ³ /ч, в тому числі:	190	121,5
-на електродвигуні	90	70
-на маслоохолоджувачі	100	100
-на електромагніті	1,5	1,5
Частота обертання (синхронна), об/мин	1000	1000
Маса (маса електродвигуна), т	118(43)	121,5 (41,2)
Напруга мережі, В	6000	6000
Частота мережі, Гц	50	50
Габаритні розміри, мм:		
- загальна висота (від осі патрубку всасу до таходатчика електродвигуна)	11470	10657
Підшипники:		
- нижній радіальний	гідростатичний, бабіт	гідродинамічний
- осьовий і верхній радіальний	по сталі з охолодженням мастилом	бабіт по сталі з охолодженням мастилом
Термін служби, років	30	30

агенту (турбінне масло марок Т-22, Тп-22 або негорюче мастило типу ОМТІ) до підшипників ковзання валу ротора, включаючи зони трибоспряжень головного упорного підшипника (ГУП), а також підшипникових вузлів електродвигуна; 3) система подавання замикаючої води до механічного ущільнення валу, яке запобігає протіканню радіоактивного теплоносія з ГЦК у бокс ГЦН та інші приміщення реакторного відділення. Конструктивно базова модифікація насосного агрегату ГЦН-195М, що розглядається, включає такі основні елементи: спіральний корпус (або равлик) насоса, виймальна частина, нижня проставка, опорний пристрій, верхня проставка, торсіонна муфта, автономний контур, маслосистеми, система подачі замикаючої води, біологічний захист і приводний електродвигун з маховиком. При цьому у ГЦН-195М (див. рис. 3) равлик (1) як елемент його

проточної частини виконано в суцільнолитому варіанті. Для захисту від нейтронного випромінювання передбачено захисне кільце (2) товщиною 315 мм із сталі, а встановлений на ньому сталевий опорний циліндр (3) товщиною 300 мм служить опорою для нижньої проставки (4), яка є основним несучим елементом всієї конструкції. Електропривод насоса здійснюється через торсіонну муфту (5) від валу електродвигуна (6), причому інерційний вибіг ротора насосного агрегату після знеструмлення приводу забезпечується маховиком (7). У розглянутій конструкції верхня проставка (8) є опорою приводного електродвигуна (6). Три кронштейни (9) проставки (8) за допомогою опорних пристроїв (10) передають навантаження на фундамент насосного агрегату в боксі ГЦН. З метою забезпечення проведення ремонтних операцій вищевказані структурні елементи

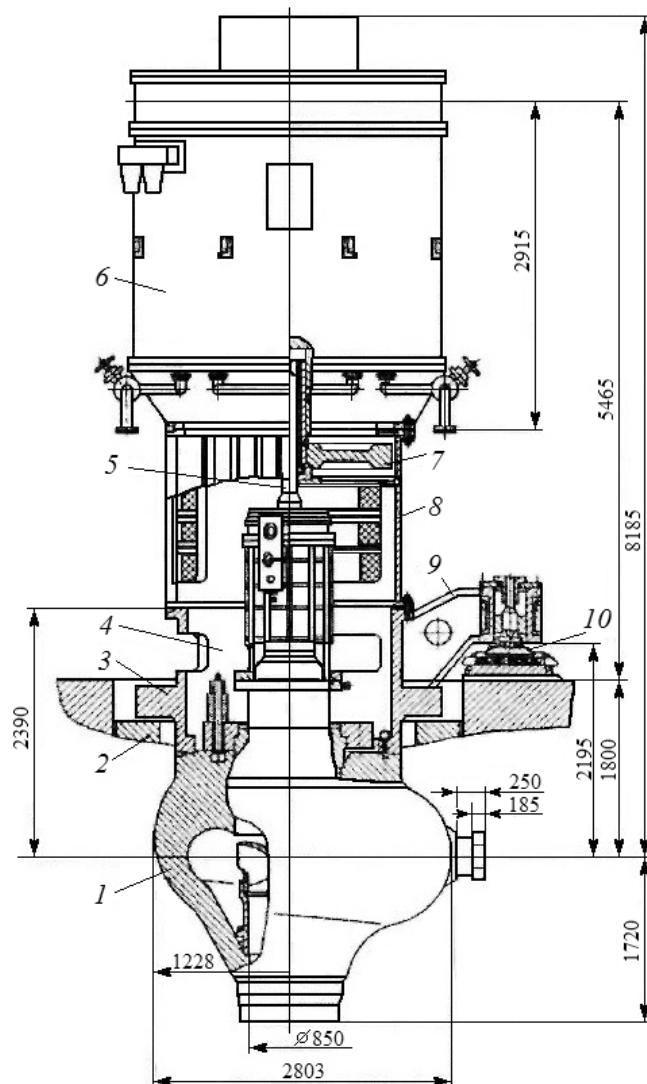


Рис. 3. Загальний вигляд насосного агрегату ГЦН-195М.

насоса агрегатовані у його виймальну частину (рис. 4), яка при виконанні ремонту і після демонтажу приводного електродвигуна може бути знята з равлику (1). Виймальна частина ГЦН-195М включає дві основні агрегатні зони: а) нижню, що знаходиться у безпосередній близькості від ГЦК з радіоактивним теплоносієм; б) верхню, розміщену в боксі ГЦН і винесену таким чином з області високих температур в зоні ГЦК. При цьому нижня агрегатна зона виймальної частини (див. рис. 4) конструктивно складається з корпусу (1); валу ротора (2); нижнього радіального підшипника (3); робочого колеса (4); захисного теплового екрана (5); нижнього радіального підшипникового вузла; імпелера допоміжного насоса (6), який забезпечує змащування нижнього радіального підшипникового вузла; теплового екрану (7) для захисту від перегріву вкладиша нижнього радіального

підшипникового вузла. Таким чином, функціонально теплові екрани (5) і (7) мають на меті забезпечити зниження робочих температур в зоні нижнього радіального підшипника і тим самим уберегти від перегріву не тільки ці трибоспряження, але також і елементи автономного контуру, який забезпечує змащування зон їх фрикційних контактів.

У свою чергу верхня агрегатна зона виймальної частини ГЦНА включає: блок механічного ущільнення вала торцевого типу (8), а також корпус ГУП з встановленим у ньому радіально-осьовим підшипником (9); електромагнітний розвантажувальний пристрій (10); храпове колесо (11); упори (12); маховик (13); верхній радіальний підшипник ГУП (14); верхні опорні колодки ГУП (15); упорний диск (16); нижні упорні колодки ГУП (17); нижній радіальний підшипник ГУП (18).

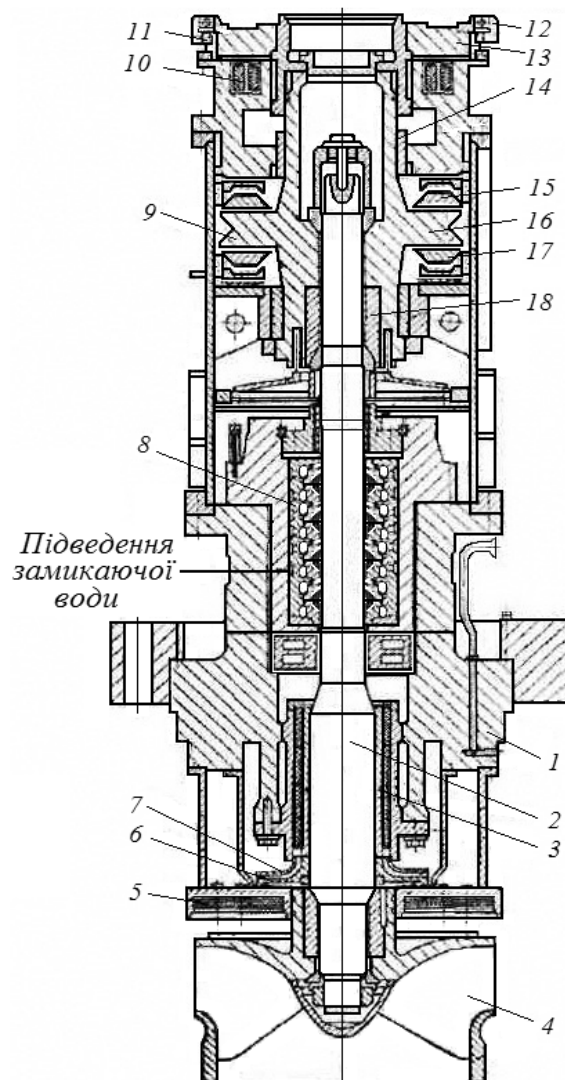


Рис. 4. Виймальна частина ГЦН-195М (пояснення в тексті).

Особливості перебігу теплогідралічних процесів

Як свідчить досвід експлуатації зазначених насосних агрегатів [1 - 6], основними вузлами, що визначають експлуатаційну надійність ГЦН вищевказаних модифікацій, є механічне ущільнення валу і підшипникові вузли. В якості механічного ущільнення валу застосовано блок з чотирьох ступенів торцевих ущільнень: розділового та кінцевого ступенів та двох основних ступенів з рівномірним дроселюванням тиску. Як пари тертя торцевих ущільнень використовується силіційований графіт. В ущільнення подається замикаюча вода від зовнішніх станційних систем. Організовані протікання замикаючої води становлять близько 800 л/год, максимальний зовнішній витік замикаючої води не перевищує 50 л/год.

Стосовно підшипникових вузлів ГЦН-195М необхідно відзначити наступне. Навантаження на вал насосу, що виникає через перепад тисків в першому контурі і навколишньому середовищі (по розвантажувальному діаметру ущільнення) сприймається осьовим підшипником, що охолоджується і змащується турбінним маслом. Для вирівнювання навантажень на колодки осьових підшипників використовується балансірна система, а верхній радіальний підшипник суміщений з осьовою підшипниковою опорою в одному блоці і змащується турбінним маслом. Нижній радіальний підшипник ГЦН-195М є підшипником ковзання гідродинамічного типу, який змащується водним теплоносієм першого контуру РУ, що надходить після попереднього охолодження в теплообміннику автономного контуру безпосередньо у підшипниковий вузол. При цьому верхній радіально-осьовий підшипник, а також підшипникові вузли ковзання електродвигуна і насосу змащуються турбінним маслом від зовнішніх маселосистем.

Переходячи до короткої характеристики двох груп найбільш відповідальних елементів конструкції ГЦН, необхідно відзначити наступне. Першу з цих критичних груп складає блок механічного ущільнення валу, призначений для запобігання протікання радіоактивної води з першого контуру ЯЕУ по валу насосу до боксу ГЦН. З цією метою торцеве ущільнення включає корпус, в якому встановлено два основні ступеня ущільнення, а також розділовий та кінцевий ступені, що їх доповнюють. При цьому ущільнювальними парами всіх ступенів системи механічного ущільнення валу є кільця з силіційованого графіту, одне з яких закріплено на статорі, а інше - на роторі блоку торцевого ущільнення. Слід зазначити, що у всіх режимах експлуатації ущільнення торцеві робочі

поверхні пар кілець знаходяться в безпосередньому контакті за рахунок підтискання їх пружинами, встановленими на статорі.

Другу групу критичних елементів конструкції ГЦНА складають його підшипникові вузли, а саме: верхній і нижній підшипники ковзання. При цьому функціональне призначення цих трибоспряжень, а також їх конструктивне оформлення істотно розрізняються. Так, для сприйняття осьових і радіальних зусиль, що впливають на вал, разом з нижнім радіальним підшипником, передбачений блок радіально-осьового підшипника. Цей підшипниковий вузол складається з корпусу, упорного гребеня, верхніх і нижніх колодок, що спираються через важільно-балансиру систему на опорні кільця. Упорні колодки залито бабітом марки Б-83, товщина шару якого становить 3 мм. При цьому радіальні підшипники конструктивно оформлені у вигляді циліндричних втулок з антифрикційною заливкою бабітом тієї ж марки. Внаслідок високого рівня робочого тиску, що розвивається в ГЦК, на ротор ГЦН діє значна осьова сила, спрямована аксіально вгору і фізично прикладена безпосередньо до валу. Крім того, на вал насосу впливають масові сили всіх елементів ротору, а також аксіальна складова сили гідродинамічної невривноваженості робочого колеса. Часткову компенсацію значної частини вищевказаних зусиль забезпечують елементи розвантажувального пристрою, який призначений для зниження робочого навантаження, що впливає на осьовий елемент ГУП. З цією метою електромагніт розвиває аксіальне зусилля в діапазоні 28...30 тон, що забезпечує істотне зниження величини сили, що виштовхує, яка впливає на ротор насосного агрегату. Некомпенсована частина цієї сили сприймається осьовим підшипником ГЦН. Конструктивно подібний до вищевказаних радіальних підшипникових елементів ГУП нижній радіальний підшипник, змащування якого, як зазначено вище, здійснюється теплоносієм першого контуру, що подається імпульсом безпосередньо з ГЦК. Інше призначення має встановлений на валу насосного агрегату антиреверсний пристрій, який служить для запобігання роботи насоса у турбінному режимі. Цей пристрій складається з храпового колеса, жорстко пов'язаного з корпусом осьового підшипника, і упорів). Принцип дії антиреверсного пристрою полягає в наступному. Після пуску ГЦНА упори під дією відцентрової сили виходять із зачеплення з зубцями храпового колеса, не перешкоджаючи обертанню вала. Навпаки, при зупинці насоса упори знову входять в зачеплення з зубцями і тим самим фіксують ротор.

До конструкції ГЦН-195М в значній мірі подібний і агрегат ГЦНА-1391 – сучасна модифікація цього насосу. Його конструктивну компоновку у боксі для ГЦН ілюструє рис. 5. В цілому, виймальна частина цієї модифікації насоса не зазнала істотних змін. У той же час, конструктивне спрощення корпусу призвело до деякого погіршення гідродинамічних характеристик проточної частини. Ця обставина зумовила незначне (на 1 ... 1,5 %) зниження ККД цього агрегату в порівнянні з ГЦН-195М.

При цьому комплекс інших найважливіших експлуатаційних показників і характеристик модернізованого агрегату ГЦНА-1391 істотних змін також не зазнав. Разом з тим, головна відміна розглянутих ГЦНА пов'язана не тільки з реалізованими в зазначених насосах схемами змащування радіально-осьового підшипника, але, в першу чергу, з видом мастильного агента, що подається

у корпус ГУП. Ним є мінеральне масло в ГЦН-195М або вода в ГЦНА-1391. Інші конструктивні відмінності радіально-осьового підшипника є несуттєвими.

В даний час у атомній енергетиці Росії та України в експлуатації знаходиться 20 енергоблоків, на яких тривалий час експлуатуються понад 80 екземплярів насосів ГЦН-195М. Сумарне напрацювання ГЦН-195М перевищило 1000 реакторо-років. Максимальний ресурс агрегату ГЦН-195М досягає 130000 годин. Аналіз накопиченого досвіду експлуатації ГЦН з механічним ущільненням валу, виконаний організаціями-розробниками стосовно специфіки експлуатації реакторів ВВЕР, дозволив конкретизувати ряд напрямків подальшого вдосконалення ГЦН. Таким чином, конструкція ГЦНА-1391 стала продовженням розвитку конструкції ГЦН-195М, в яку внесено такі зміни: 1) на відміну від ГЦН-195М, що має суцільнолитну конструкцію спірального корпусу, корпус

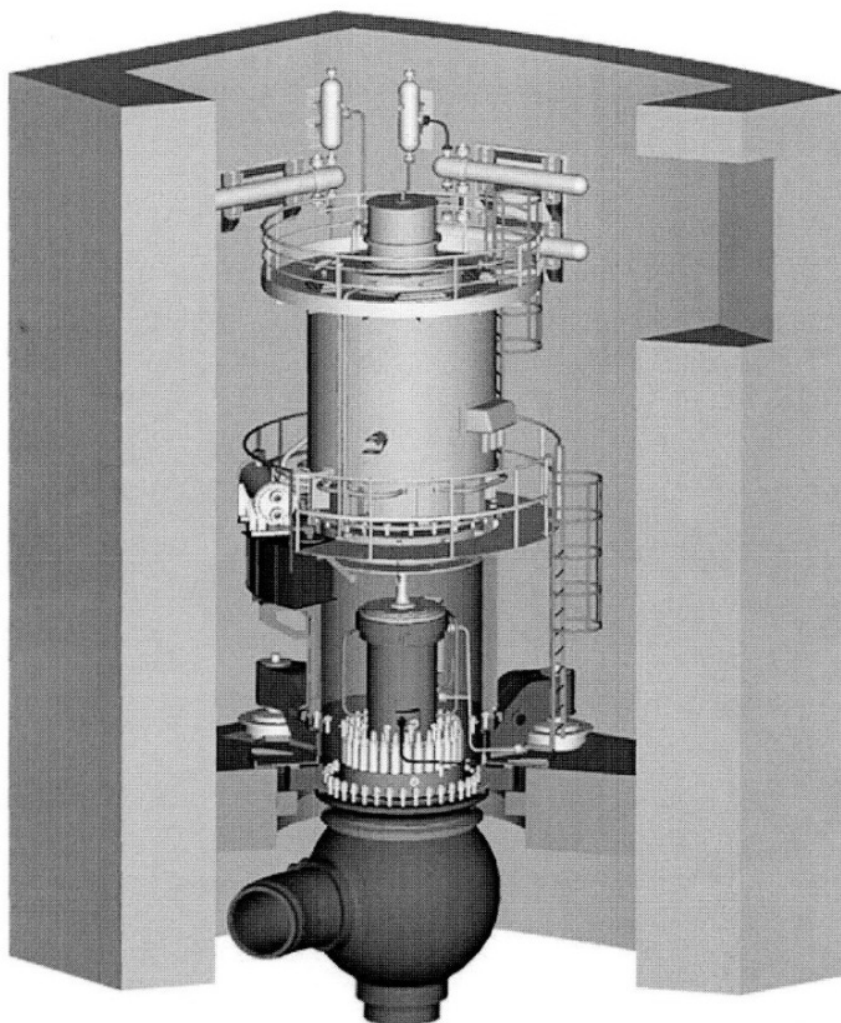


Рис. 5. Компоновка насосного агрегату ГЦНА-1391 у боксі для ГЦН.

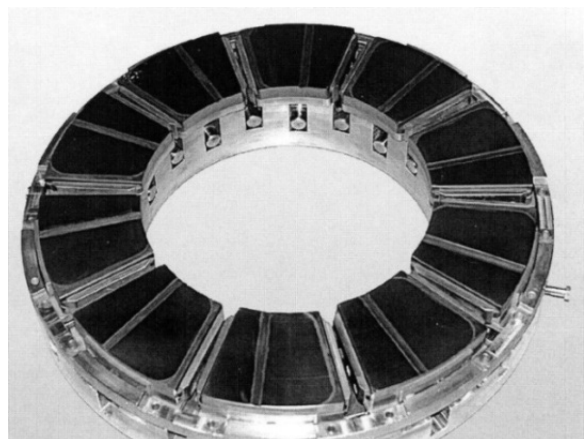
ГЦН-1391 виконано у вигляді сферичної штампо-зварної конструкції, що дозволило відмовитися від застосування лиття та підвищило надійність і суттєво посилило технологічність конструкції; 2) змінено конструкцію головного роз'єму ГЦН і передбачено контроль його герметичності, що дозволило виявляти факт протікання і підвищити тим самим надійність експлуатації; 3) радіально-осьовий підшипник в ГЦН-1391 переведений на змащування водою замість турбінного масла, оскільки маслосистема є досить складною і вразливою конструкцією.

Необхідно також підкреслити наступне. Під час штатного функціонування радіального або осьового підшипника ковзання на масляному змащенні у парі тертя зберігається гідродинамічний режим роботи, причому для ГЦН-195М мінімальний зазор між робочими колодками і упорним диском складає 0,5 мм. Вирівнююча система підшипника типу «Кінгсбері» дозволяє компенсувати торцеві переміщення упорного диску і перекося поверхонь, що не обертаються. Оскільки у трибоспряженні ГУП ГЦН-195М застосований традиційний для турбомашин варіант матеріалів пари тертя ковзання, що працює на турбінному маслі, радіально-осьовий підшипник, як показує досвід експлуатації, має досить тривалий ресурс. Разом з тим, вплив ряду негативних факторів, таких, наприклад, як порушення штатних режимів маслосистеми, здатний привести до розвитку аварійної ситуації при експлуатації ГЦН та істотно знизити зазначений ресурс. Крім того, використання води в якості мастильного агента для ГУП ГЦН-1391 зумовило виникнення низки експлуатаційних

проблем. Так, при переході на воду в якості мастильно-охолоджувальної рідини мінімальний розрахунковий зазор в гідродинамічному клині зменшується майже у 10 разів. З урахуванням допусків на виготовлення, фактичну шорсткість робочих поверхонь, а також деформації контактуючих поверхонь можна зробити висновок, що така пара тертя функціонує в напіввідинному режимі тертя, який, в силу ряду визначаючих фізичних особливостей функціонування, безпосередньо межує з передаварійним режимом трибоспряжень, а саме: режимом граничного тертя. Слід також зазначити, що при конструюванні ГУП ГЦН-1391 стояло завдання вибору матеріалів для пари тертя, яка надійно працює у напіввідинному режимі трибоспряжень з параметром навантаження $PV < 1600 \dots 1800$ (де P – питомий тиск у парі тертя, $\text{кг}/\text{см}^2$; V – окружна швидкість в парі тертя, $\text{м}/\text{с}$). З урахуванням цієї вимоги і на підставі проведених досліджень був обраний матеріал пари тертя, а саме: – силіційований графіт марки СГ-П05. У зв'язку з цим на колодках обойми під'ятника упорного підшипника ГЦН-1391, на відміну від ГЦН-195М, замість наплавленого бабіту встановлені сектори з вищевказаного матеріалу, що обумовлено особливими умовами охолодження і змащування, а також значними розмірами (діаметр упорного диску досягає 850 мм). Набір поверхні диску з окремих елементів зумовив необхідність виконання мастильних каналів з відхиленням від радіального напрямку на фіксований кут, що дозволяє виключити ударний характер зустрічі колодок з секторними елементами. Загальний вигляд упорного диску і обойми під'ятника осьового підшипника ГЦН-1391 представлений на рис. 6.



а



б

Рис. 6. Загальний вигляд упорного диску (а) та обойми під'ятника (б) осьового підшипника насосного агрегату ГЦНА-1391.

Слід зазначити також той факт, що в цьому насосному агрегаті радіальний підшипниковий вузол ГУП аналогічний нижньому підшипникові за конструктивними елементами і матеріалами, що застосовуються в парі тертя, а також мастильним агентом (вода). Експериментальне відпрацювання і доведення ГУП на водяному змащуванні було проведено на натурному стенді ЦКБМ (м. Нижній Новгород). На цьому ж стенді нами свого часу було виконано експериментальне дослідження діагностичних параметрів підшипників ковзання.

Висновки

За результатами виконаного аналізу сучасних тенденцій розвитку конструкцій ГЦН та тісно пов'язаною з ними актуальною теплофізичною проблематикою необхідно підкреслити наступне.

1. Конструкція ГЦН з системою механічного ущільнення валу є базовою для всіх сучасних зразків насосних агрегатів першого контуру ЯЕУ, оснащених реакторами типу ВВЕР.

2. В даний час відсутня альтернатива традиційним конструктивним рішенням критичних елементів конструкції ГЦН, якими продовжують залишатися система механічного ущільнення валу та підшипники ковзання ротору.

3. Застосування водяного змащування у радіально-осьовому підшипнику ГЦН-1391 зумовило перехід цього трибоспряження від рідинного тертя у напіврідинний режим, який безпосередньо межує з передаварійною зоною граничного тертя.

4. Зміщення робочої зони в режим напіврідинного змащування зумовлює необхідність невідкладної розробки нових засобів оперативної діагностики режимів експлуатації, які повинні бути здатні забезпечити автоматичне виявлення в реальному масштабі часу передаварійних режимів тертя.

5. Перспективна система автоматичного розпізнавання режимів тертя в підшипниках ковзання ГЦН та механічному ущільненні його валу має стати складовою частиною створюваного програмно-технічного комплексу для автоматичної діагностики насосної групи першого контуру ЯЕУ з інтелектуальними функціональними можливостями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Будов В.М. Насосы АЭС. М: Энергоатомиздат. 1986. – 408 с.
2. Марцинковский В.А., Ворона П.Н. Насосы атомных электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 250 с.
3. Насосы АЭС: Справочное пособие / П.Н. Пак, А.Я. Белоусов, А.И. Тимшин и др. / Под общ. ред. П.Н. Пака. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.
4. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 279 с.
5. Абабян А.А., Воронин Л.М., Филимонцев Ю.П. Проблемные вопросы эксплуатации АЭС // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. 2-я Межд. Конф. Москва, ВНИИАЭС, 22-23 марта 2001. – Ч.1, С. 49-52.
6. Справочник по ядерной энерготехнологии: Пер. с англ. / Ф. Ран, А. Адамантиадес, Дж. Кентон, И. Браун: под ред. В.А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 752 с.

**EVOLUTION OF THERMOPHYSICAL PROBLEMS
IN CONSTRUCTIONS OF VVER REACTORS
MAIN CIRCULATION PUMPS**

**Sharaevsky G. I.¹, Fialko N. M.², Sharaevsky I. G.¹,
Zimin L. B.¹**

¹*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of
the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Kirova,
36-a, Chornobyl, 07270, Ukraine*

²*Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhel-yabova, 2a,
Kyiv, 03680, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2019.7>

In the context of the history of domestic atomic energy, changes in the design of safety-critical aggregate assemblies of the main circulation pumps (MCP) of nuclear power units with large-capacity water-cooled reactors and the corresponding dynamics of the accompanying thermal-hydraulic problems caused by these changes are analyzed. Special attention is paid to the aggregate units of the MCP, in which the control and diagnostics of their current technical condition are difficult. The features of the friction and lubrication processes in tribological pairs of such nodes as the steps of the shaft MCP mechanical seal system and sliding bearings are noted. Due to the specifics of the course and achievement of the crisis of heat transfer processes in slotted annular channels of sliding bearings and, especially, end seals of the mechanical shaft sealing system, the risk of uncontrolled operational disturbances is quite high. In order to improve the existing monitoring and diagnostics systems of the current technical condition of these nodes, an analysis of the possibility of creating new, more effective diagnostic systems is performed. The stochastic nature and spectral characteristics of the sensor signals of the existing deterministic monitoring systems contain very valuable diagnostic information, but this information is currently being lost.

The use of modern statistical algorithms and spectral analysis methods in monitoring and diagnostic systems will increase the efficiency and speed of these systems, and therefore the reliability and safety of nuclear power units. The conclusion is made about the urgent need to develop methods and tools for the operational automatic control of the current technical condition of the entire MCP, and especially the critical nodes, since the development of their damage proceeds quickly and avalanchely, and is also poorly controlled by existing systems.

References 6, figures 6, tables 1.

Keywords: VVER reactors, main circulation pumps, construction units, thermo-hydraulic processes, technical condition control.

1. *Budov V.M.* Nasosy AES [Pumps of NPP] Moskva: Energoanomizdat. 1986. 408 p. (in Russ.)

2. *Marcinkovsky V.A., Vorona P.N.* Nasosy atomnykh elektrostancij [Pumps of nuclear power plants]. Moscow, 1987, Energoanomizdat. 250 p. (In Russ.)

3. *P.N. Pak, A.Ya. Belousov, A.I. Timishin et. al. / ed. P.N. Pak.* [Pumps of NPP: Reference Guide], Nasosy AES: Spravochnoe posobie, Moscow, Energoanomizdat. 1989, 328 p. (in Russ.)

4. *Samoiliv O.B., Usynin G.B., Bakhmet'ev A.M.* Bezopasnost' yadernykh energeticheskikh ustanovok [Safety of nuclear power plants]. Moscow, Energoanomizdat, 1989), 279 p. (in Russ.)

5. *Abagian A.A., Voronin L.M., Filimoncev Yu.P.* Problemnye voprosy ekspluatatsii AES // Besopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoj energetiki [Problematic issues of NPP operation // Safety, efficiency and economics of nuclear energy]. Moscow, VNIIAES, 22-23 march 2001. Part 1, pp. 49–52. (in Russ.)

6. *F. Ran, A. Adamantiades, Dj. Kenton, I. Brown: ed. V.A. Legasov.* Spravochnik po yadernoj energo-tekhnologii [Handbook of Nuclear Power Technology] Trans. from engl. (1989), Moscow, Energo-anomizdat, 1989. 752 p. (in Russ)

Отримано 14.08.2019

Received 14.08.2019