

© Погорлецький Д.С.¹, Грицук І.В.², Худяков І.В.³, Черненко В.В.⁴,
Поліщук О.В.⁵**ОСОБЛИВОСТІ ПРОТИДІЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИЙ КОРОЗІЇ
ГІЛЬЗИ ЦИЛІНДРІВ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДВИГУНІВ**

В статті розглядаються особливості вирішення однієї з проблем суднових малооборотних двигунів, під час роботи яких на мінімальних і часткових режимах навантаження є виникнення низькотемпературної корозії втулок циліндрів. Проведено огляд систем охолодження суднових головних двигунів та розглянуто можливі перспективи вдосконалення систем охолодження суднових дизельних двигунів. Приділена увага причинам виникнення та способам боротьби з низькотемпературною корозією суднових головних двигунів. Розглянуто способи регулювання системи охолодження суднових дизельних двигунів, визначено, що сучасна концепція регулювання у системі охолодження має передбачати як автоматичне регулювання режимних показників за рахунок встановлення насосів системи охолодження з частотним регулюванням, так і регулювання водно-хімічних параметрів системи охолодження. Також було розглянуто способи регулювання робочих параметрів насосів в системі охолодження суднового головного двигуна, в яких використовується принцип частотного регулювання відцентрових насосів, для забезпечення режимів роботи з найбільшими ККД. Таким чином, частотне регулювання є енергетично ефективним способом регулювання відцентрових насосів при змінних витратах охолоджуючої рідини в системах охолодження суднових двигунів та одним зі способів підтримання оптимального температурного стану. Розглянуто можливість модернізації системи охолодження циліндрів малооборотних двигунів по принципу системи LDCL для зменшення впливу та виникнення низькотемпературної корозії.

Ключові слова: суднова енергетична установка, малооборотний двигун, низькотемпературна корозія, система охолодження, частотне регулювання.

D.S. Pohorletsky, I.V. Gritsuk, I.V. Khudiakov, V.V. Chernenko, A.V. Polishuk. Features of low-temperature corrosion protection of cylinder sleeves of ship low-speed engines. The article examines the specifics of solving one of the problems of low-speed marine engines, during which low-temperature corrosion of cylinder liners occurs during operation at minimum and partial load modes. An overview of the cooling systems of ship's main engines was conducted and possible prospects for improving the cooling systems of ship's diesel engines were considered. Attention is paid to the causes and methods of combating low-temperature corrosion of ship's main engines. The methods of regulating the cooling system of marine diesel engines were considered, and it was determined that the modern concept of regulation in the cooling system should include both automatic regulation of operational parameters due to the installation of frequency-regulated cooling system pumps, and regulation of the water-chemical parameters of the cooling system. Methods of regulating the operating parameters of the pumps in the cooling system of the ship's main engine were also considered, which use the principle of frequency regulation of

¹ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1256-8053, pohorletskyi.dmytro@ksma.ks.ua

² д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7065-6820, gritsuk_iv@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-8900-7879, khudiakov.ihor@ksma.ks.ua

⁴ ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-6639-1102, v.chernenko18@gmail.com

⁵ аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон

centrifugal pumps to ensure the modes of operation with the highest efficiency. Thus, frequency regulation is an energy-efficient way of regulating centrifugal pumps with variable coolant flows in ship engine cooling systems and one of the ways to maintain an optimal temperature state. The possibility of modernizing the cooling system of cylinders of low-speed engines according to the principle of the LDCL system to reduce the impact and occurrence of low-temperature corrosion was considered.

Key words: *ship power plant, low-speed engine, low-temperature corrosion, cooling system, frequency control.*

Постановка проблеми. Система охолодження (СО) є об'єктом, ресурси якої задля забезпечення надійної, економічної роботи суднового двигуна з задовільними екологічними показниками мало використані. Робочий процес двигуна є, з одного боку, переміщення поршня по циліндру, з другого — безперервна зміна стану робочого тіла, характеризується температурою та тиском. Два цих одночасно протікаючих процеси супроводжуються такими явищами, як: вібрації циліндрових втулок, кавітаційно-корозійні руйнування поверхонь, що охолоджуються, накипоутворення, теплообмін між деталями двигуна і теплоносієм [1].

Цілеспрямований вплив на процеси теплообміну в порожнинах охолодження дозволяє скоротити теплові втрати з рідиною, що охолоджує, і за рахунок цього підвищити індикаторний ККД двигуна і поліпшити його паливну економічність. Додаткове підвищення ефективного ККД може бути досягнуто за рахунок зниження механічних втрат, пов'язаних з прокачуванням теплоносія (охолоджуючої рідини) замкнутими контурами систем охолодження. Збільшення ресурсу деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), зниження витрати палива в процесі експлуатації підтверджують ефективність рішень, спрямованих на ресурсо- та енергозбереження. Підвищення температурного рівня деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) сприяє скороченню періоду затримки займання, що позитивно впливає на екологічні характеристики двигуна. Якщо двигун працює неефективно на низьких обертах, особливо це відноситься до двотактних малооборотних суднових двигунів, температура гільзи циліндру нижче точки роси (суміші сірчаної кислоти та води 120...160°C). Корозійні суміші будуть конденсуватися на стінках, визиваючи низькотемпературну корозію стінок циліндру. У паливі з низьким вмістом сірки пізніше або повільніше згоряння палива збільшує теплове навантаження на деталі ЦПГ, що призведе до перегріву, проблем зі змащенням і низькотемпературною корозією.

Важке паливо, яке використовується для роботи суднових двигунів, негативно впливає на деталі двигуна (через присутні в ньому домішки), та через неповне згоряння. Корозія є основною проблемою на суднах, коли йдеться про спалювання мазуту в суднових двигунах.

Далі його можна описати так:

- Високотемпературна корозія: виникає через присутність ванадію (Va) і натрію (Na) у важкому паливі і впливає на елементи вихлопної системи двигуна [1-3].
- Низькотемпературна корозія: виникає через наявність сірки у важкому паливі і впливає на стан гільзи циліндра та інші деталі камери згоряння.

Нові енергоефективні суднові двигуни з довгим ходом поршня і більш високим тиском згоряння створюють суворі умови експлуатації при спалюванні важкого палива з низьким вмістом сірки. Застосування режиму повільного підігрівання палива, а також невеликих робочих обертів та низької робочої температури двигуна, призвело до виникнення низькотемпературної корозії в двигуні. Тепловий стан суднового двигуна, що забезпечується ефективною роботою системи охолодження, надає визначальний вплив на його техніко-економічні показники, такі як надійність, паливна економічність та екологічна безпека [1-7]. Найважливіше значення має тепловий стан деталей циліндро-поршневої групи, який визначає якість протікання робочого циклу, умови змащування цих деталей, величину механічних втрат, витрату мастила на чад та інтенсивність зношування у поєднанні втулка циліндра – поршневий комплект, швидкість газової корозії та ресурс випускних клапанів, ймовірність тріщин у кришках і втулках циліндрів, днищах поршнів, інтенсивність ерозійно-корозійних руйнувань поверхонь, що омиваються охолоджувальною рідиною, втулок і блоків циліндрів та накипоутворення в сорочці охолодження. Відцентрові насоси, які застосовуються в системах охолодження головних двигунів, зазвичай працюють з максимальною продуктивністю 24 год. на добу. Тому перевагою буде застосування автоматичного регулювання продуктивності насоса у системі. Найкращим способом регулювання робочих

параметрів відцентрового насоса є метод регулювання швидкості. Цей метод регулювання переважно здійснюється за допомогою перетворювача частоти [1-7]. Регульовані насоси використовують лише кількість енергії, яка необхідна для виконання насосом певної роботи. У порівнянні з іншими методами регулювання швидкості забезпечує максимальний ККД і, таким чином, ефективніше використання енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При розгляді теплового балансу двигуна встановлено, що частина тепла, що виділяється під час згоряння палива всередині циліндрів дизеля, перетворюється на індикаторну роботу (до 47 %). З тепла, що залишилося, приблизно 25 % виноситься з газами, а решту тепла (25...28 %) для запобігання перегріву деталей двигуна відводять охолоджувальною водою.

Система охолодження двигуна призначена для охолодження деталей (циліндрових втулок, кришок, поршнів, випускних колекторів та ін.) двигуна, забезпечуючи їм нормальні умови роботи. Водяна система охолодження є найбільш поширеною і, у свою чергу, поділяється на проточну (охолодження забортною водою) та замкнуту (охолодження прісною водою). У сучасних двигунах охолодження забортною водою майже не застосовують, у замкнутих системах прісна вода охолоджується забортною. На даний час застосовується трьох контурна система охолодження із центральним охолоджувачем прісної води, це обумовлено прагненням підвищити надійність всього обладнання, що охолоджується, де для відведення тепла використовується тільки прісна вода, яка має меншу корозійну активність. Наприклад, судно укомплектоване двигуном 5G50ME-B9, має два контури системи охолодження (низькотемпературний та високотемпературний), контур прісної води складається з двох частин. Згідно технічної документації на двигун MAN B&W 5G50ME-B9 для охолодження втулок циліндра з метою зниження теплових втрат з охолоджувальною рідиною використовується прісна вода з температурою на вході в засорочковий простір 75°C та 85°C на виході з нього. Підвищення економічності суднової енергетичної установки (СЕУ) забезпечується, головним чином, за рахунок зниження питомої ефективної витрати палива головних та допоміжних двигунів шляхом підвищення тиску наддуву P_k (до 0,6 МПа) і середнього ефективного тиску робочого циклу P_e двигунів (до 3,0 МПа) [1-7], що призводить до підвищення теплових та механічних навантажень на деталі та вузли двигуна.

Система охолодження сучасних перспективних судових дизелів повинна забезпечувати оптимальний та стабільний тепловий стан деталей та вузлів. Оптимальним слід вважати такий температурний рівень, при якому матеріали деталей зберігають свої властивості міцності, моторні масла зберігають високу змащувальну і несучу здатність, а втрати теплоти через систему охолодження мінімальні. Іншою важливою причиною є те, що нові судові двигуни розроблені відповідно до правил Tier III NO_x та інструкцій EED. Щоб відповідати цим новим нормам, циліндри двигуна повинні працювати під підвищеним тиском і зниженими робочими температурами (для зменшення викидів NO_x), створюючи таким чином умови роботи нижче точки роси, за рахунок цього вода конденсується на стінках циліндра. Потім з'єднується з сіркою в процесі згоряння, утворюючи H_2SO_4 , це призводить до низькотемпературної корозії. Постійна теплова напруга та постійний тиск, які можуть призвести до ризику виникнення низькотемпературної корозії, є більш серйозними в довгоходових малооборотних двигунах.

Двигуни старої модифікації, які встановлені на судах, часто модернізують для їх роботи на низьких обертах і малому навантаженні. Додатково встановлюються такі системи, як VTA, газові перепускні клапани, байпасні системи охолодження стінок сорочки двигуна, системи охолодження з регулюванням температури за рахунок використання насосів з частотним регулюванням [1-7]. У старих модифікація низькооборотних двигунів передбачено модифікацію для роботи під час низьких навантажень, але не передбачено ніяких додаткових систем для боротьби з низькотемпературною корозією. Використання регульованих насосів у системах охолодження забезпечує споживачеві високий рівень зручності обслуговування, автоматичне регулювання тиску та плавний пуск насосів, що дозволяє уникнути гідравлічного удару та шуму; в циркуляційних системах насоси, що регулюються, підтримують постійний перепад тиску, що дозволяє мінімізувати рівень шуму в системі. Насоси, що регулюються, можуть знижувати потребу в регулюючих вентилях в системі охолодження і, відповідно, знижувати її вартість.

Метою дослідження є обґрунтування способів модернізації системи охолодження судового головного двигуна та демонстрація можливості застосування принципу керування терморегулюючими пристроями і частотного приводу насосів системи охолодження двигуна MAN-B&W

6S60MC для підтримання оптимального температурного стану двигуна та системи охолодження. Розглянути можливість застосування технології фірми MAN-B&W для збільшення температури охолоджуючої рідини сорочки системи охолодження циліндрових втулок, задля ліквідування і зменшення виникнення низькотемпературної корозії на циліндрових втулках [3-5].

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній час причини виникнення низькотемпературної корозії мають велике значення для двотактних двигунів фірми MAN-B&W за умов роботи на таких сортах палив, як паливо з наднизьким вмістом сірки (ULSFO), не більше 0,10%; паливо з дуже низьким вмістом сірки (VLSFO), не більше ніж 0,50%; мазут, вміст сірки трохи більше 3,50%. Правила ІМО 2020 року диктують використання палива з максимумом 0,5% сірки, коли не застосовується скруббер. Робота на паливі з низьким вмістом сірки зменшує корозійний знос до ступеня, коли знос легко контролювати без підвищення температури охолоджуючої рідини. У документі SL2019-671 рекомендовано деактивувати систему JBB при використанні до 0,50% SVLSFO. У цьому листі описано, як деактивувати систему JBB для системи JBB і системи охолодження гільзи циліндрів (LDCL), робота якої залежить від навантаження на двигун, зазначено, що закриття системи LDCL та деактивації будь-якої системи JBB рекомендується при використанні палива до 0,50% SVLSFO [3-5]. На рис. 1 показана система байпасування охолоджуючої води в сорочці охолодження, кількість охолоджуючої рідини, яку потрібно перекачати, визначена на стадія проектування та розрахунку самої системи.

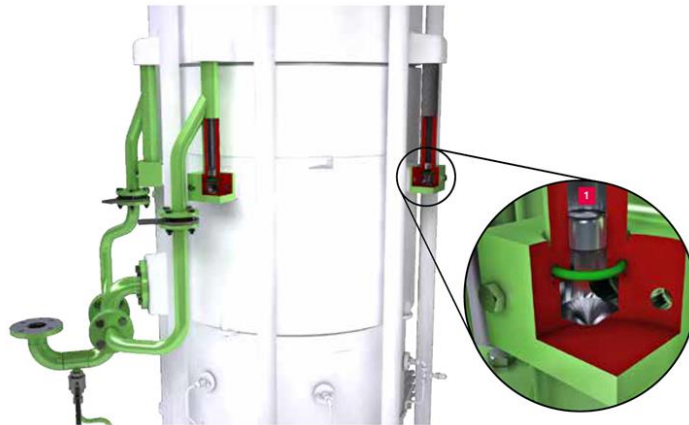


Рис. 1 – Система охолодження сорочки циліндрової втулки Basic (JBB)

Обхід 85% охолоджуючої рідини в сорочці підвищить температуру стінки гільзи приблизно на 15°C. Крім того, температура охолоджуючої рідини в сорочці збільшується до 90°C. Разом досягається підвищення температури стінки гільзи приблизно на 20°C. Тести показали, що можна байпасувати ще більшу кількість охолоджуючої рідини. Крім того, керована версія системи JBB називається JBC, у цій системі термостатичний клапан контролює кількість байпасованої охолоджуючої рідини таким чином, що при низькому навантаженні на двигун пропускається велика кількість води, а при більш високому – менше. Системи JBB і JBC можуть бути обидві легко встановлені на двигуни фірми MAN-B&W, які вже знаходяться в експлуатації [3-5]. Для новітніх двигунів використовується більш активна система байпасування охолоджуючої рідини. На даний момент ця система є стандартною для нових двигунів MAN-B&W серії S і G 80, 90 і 95. Крім того, було вирішено впровадити систему на майбутніх типах двигунів G50, G60 і G70. Система складається з двох додаткових труб охолоджуючої рідини вздовж двигуна, додаткового насоса та додаткового регулюючого клапану, вони забезпечують до 130°C охолоджуючої рідини для гільз циліндрів при підтримці 80...90°C на кришці і випускному клапані. Висока температура на гільзі циліндра підтримується до 90% навантаження головного двигуна [1-7]. Система LDCL не означає зміну підключення до системи охолодження судна та суднового двигуна. Система LDCL розроблена з додатковим контуром змішування на двигуні, що включає насос, триходовий клапан та систему керування. Температуру води в сорочці гільзи циліндра можливо контролювати відповідно до діаграми на рис. 2. Один зі способів боротьби з низькотемпературною корозією це розробка нових конструкцій гільз циліндрів та впровадження їх під

час модернізації та виробництва нових двигунів [1-7]. Метою цих заходів є взагалі підвищення температури стінки гільзи на досить великій площі у верхній частині гільзи. Завдяки цьому зменшується число циліндрового масла BN і може бути встановлена нижча необхідна швидкість подачі циліндрового масла. Для того, щоб економно збільшити термін служби гільзи циліндру, дані способи модернізації гільзи циліндрів із гарячою заміною спрямовані на використання в існуючих двигунах. Крім того, фірма MAN-B&W представила гільзи циліндрів різних конструкцій на основі рейтингу використання двигунів, двигуни зі зниженими характеристиками можуть бути оснащені гільзами циліндрів з нижчою інтенсивністю охолодження без перевищення максимально допустимої температури гільзи циліндрів під час роботи на максимальній потужності [1-7].

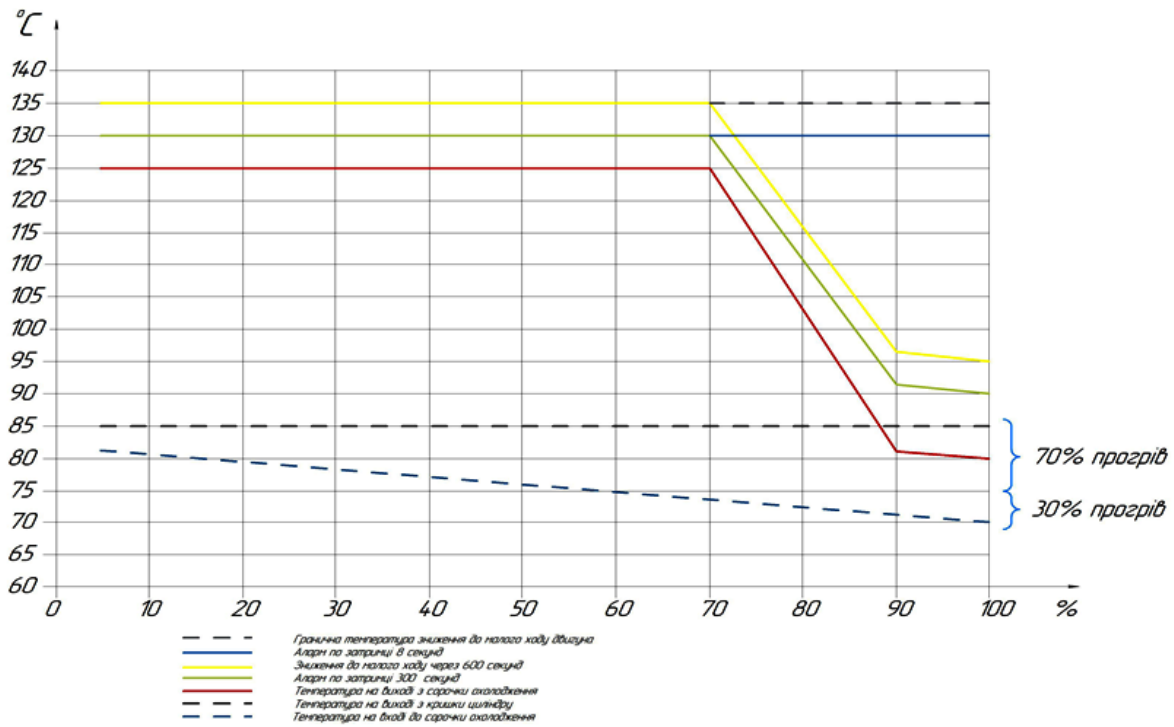


Рис. 2 – Залежність заданої температури LDCL від навантаження двигуна, S80ME-C

Виявлено ряд факторів, які впливають на ступінь виникнення низькотемпературної корозії у двотактних двигунах фірми MAN-B&W:

- Робота двигуна на низьких та часткових навантаженнях;
- Відключення роботи газотурбонагнітача при роботі на низьких навантаженнях на двигун;
- Максимальний рівень тиску;
- Застосування рециркуляції повітря у двигуні;
- Зниження температури поданого повітря;
- Нові двигуни з більш високим тиском при роботі на низьких та часткових навантаженнях.

Оптимізація роботи двигуна на низьких та часткових навантаженнях, збільшує тиск в циліндрах при менших навантаженнях, що також сприяє підвищенню виникнення низькотемпературної корозії.

Для запобігання виникненню низькотемпературної корозії розроблено ряд контрзаходів:

- обвідна сорочка охолоджувальної води втулки циліндрів, базова (JBB);
- система LDCL з додатковим контуром змішування;
- застосування нової конструкції циліндрової втулки (RDL).

Таким чином, низькотемпературній корозії гільзи циліндрів протидіють підвищенням температури відкритих частин гільзи циліндрів у допустимих межах шляхом внесення змін до конструкції гільзи циліндрів та внесення змін в систему охолодження циліндрової втулки [1-7].

Принцип роботи системи LDCL полягає в тому, щоб отримати змінну температуру сорочки охолодження циліндрової втулки залежно від навантаження двигуна шляхом введення циркуляційного контуру до системи охолодження сорочки. Цей циркуляційний контур має змінну температуру (до 130°C), яка контролюється заданим значенням для змінного триходового клапана. Уставка визначається навантаженням двигуна. Це означає, що коли двигун працює при низьких навантаженнях чи при високих навантаженнях двигуна, температура буде нормальною. Принципова схема роботи LDCL зображена на рис. 3 [3-5]. На судні «Bering Sea» встановлено двигун MAN-B&W 6S50MC, пропонується розглянути можливість виконання модернізації системи охолодження циліндрів за принципом системи LDCL для зменшення впливу та виникнення низькотемпературної корозії, але одним недоліком роботи даної системи охолодження та регулювання температури є постійно працюючий циркуляційний відцентровий насос з постійною продуктивністю. Регулювання продуктивності даного насосного агрегату виконується шляхом дрослювання за рахунок автоматичної засувки. Даний принцип регулювання температури системи охолодження циліндрів не є економічно доцільним, так як набагато простіше виконувати температурне регулювання за рахунок зміни частоти обертання електродвигуна циркуляційного насосу, встановивши на нього частотний перетворювач.

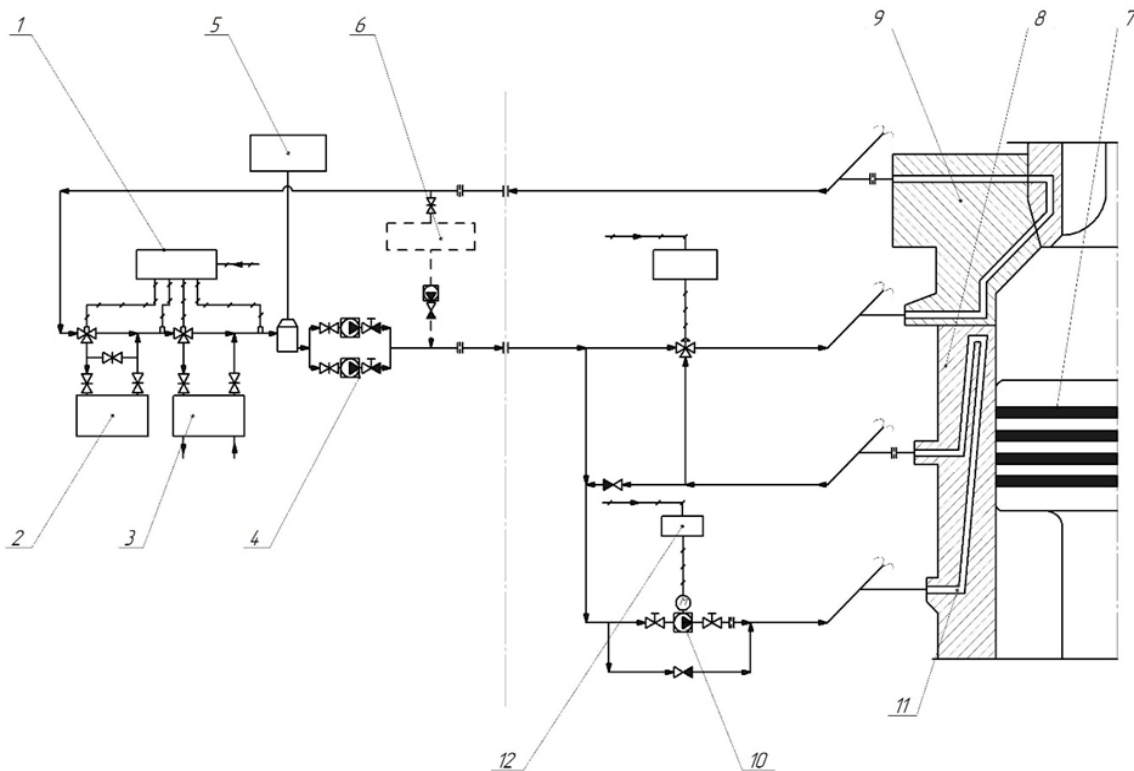


Рис. 3 – Принципова схема роботи LDCL: 1 – клапанний контролер; 2 – водоохолоджувальна установка; 3 – теплообмінний апарат; 4 – циркуляційний насос системи охолодження; 5 – розширювальний бак; 6 – підігрівач; 7 – поршень; 8 – циліндрова втулка; 9 – циліндрова кришка; 10 – циркуляційний насос системи LDCL; 11 – канал охолодження циліндрової втулки; 12 – перетворювач частоти обертання насосу

Для цього проведено розрахунки перевірки відповідності встановленого відцентрового насосу марки (Desmi RSV 400...280) та його характеристик для забезпечення теплообміну системи охолодження і розраховано необхідну продуктивність відцентрового насосу у відповідності до навантаження головного двигуна від 50% до 100%, результати представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків потужності електродвигуна в залежності від продуктивності насоса

Потужність ГД, %	N_{er} , кВт	$W_{п}$, м ³ /год	$N_{ел.}$, кВт
1	2	3	4
100	8310	86,6	33,1
95	7895	82,3	29,8
90	7479	78	26,8
85	7064	73,6	23,9
80	6648	69,3	21,1
75	6233	65	18,6
70	5817	60,6	16,2
65	5402	56,3	13,9
60	4986	52	11,9
55	4571	47,6	10
50	4155	43,3	8,2

Результати розрахунків потужності електродвигуна системи охолодження суднового двигуна в залежності від продуктивності представлено в графічному вигляді на рис. 4. За допомогою частотно-регульованого приводу насоса можна реалізувати схему без застосування клапана (автоматичної засувки), що, без всяких сумнівів, зробить систему більш економічною. Однак слід пам'ятати, що для нормальної роботи системи регулювання велике значення має швидкість забортової води, що прокачується через холодильник. На всіх режимах роботи енергетичної установки судна повинна забезпечуватись швидкість, що перешкоджає інтенсивному відкладенню солей у каналах холодильника. Для вирішення цієї проблеми можна регулювати швидкість насосів і в системі охолодження прісної води, але при цьому необхідно пам'ятати про вимоги до систем [3-6].

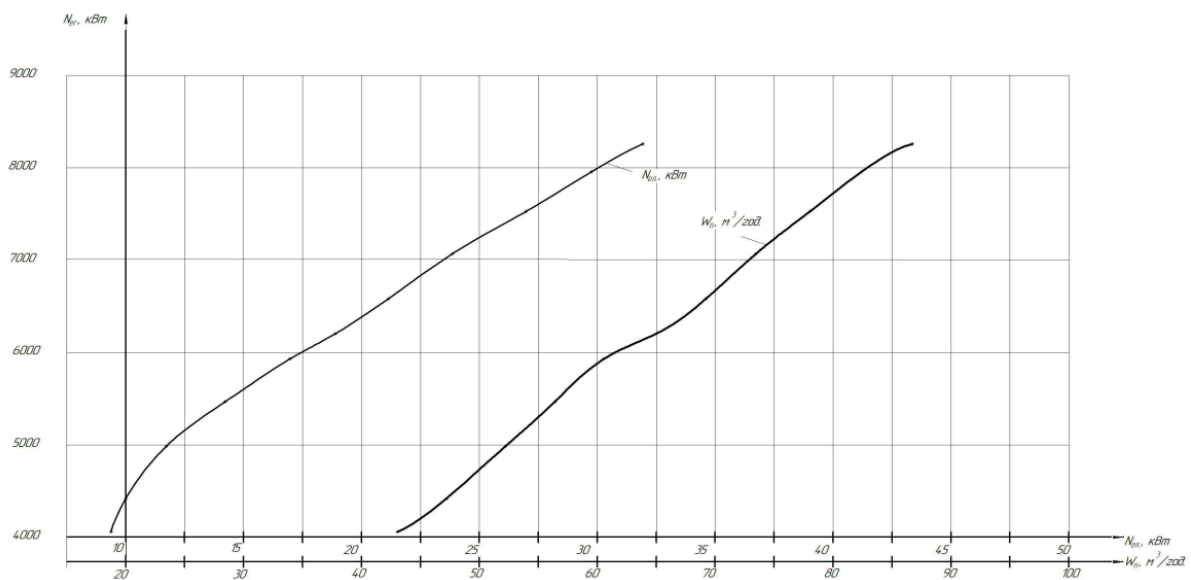


Рис. 4 – Результат розрахунків потужності електродвигуна в залежності від продуктивності

При цьому форма цієї характеристики повинна бути такою, щоб на будь-якому режимі роботи двигуна дотримувалися такі умови:

– температура дзеркала втулки циліндра, навпроти верхнього компресійного кільця при положенні поршня у верхній мертвій точці за умови збереження масляної плівки та забезпечення

нормальних умов мащення, не повинна перевищувати 180°C. Перевищення температури 200°C поверхні тертя призводить до різкого наростання швидкості механічного зносу;

- інтенсивне нагароутворення відбувається, якщо паливо потрапляє на стінку камери згоряння, температура якої нижче 500°C;

- у разі експлуатації двигуна на важких сортах палива визначальною має бути точка роси парів води. Її вважають нижчою допустимою межею температури дзеркала циліндра;

- щоб уникнути фазового перетворення, вибирають такі режими та способи охолодження, при яких забезпечується температура стінки на 10...15°C нижче температури фазових змін теплоносія.

Можна припустити, що одночасна заміна терморегулюючого пристрою клапанного типу (автоматичної засувки) на частотно-керовані електроприводи насосів та принципу регулювання керованої величини (з регулювання за принципом відхилення на регулювання за принципом обурення або на комбінований принцип регулювання) дозволить підвищити як економічність системи охолодження суднового ДВЗ, так і енергоефективність СЕУ.

Висновки

Розглянута можливість комплексної модернізації системи охолодження головного суднового двигуна MAN-B&W 6S50MC, а саме виконання модернізації системи охолодження циліндрів по принципу системи LDCL для зменшення впливу та виникнення низькотемпературної корозії. Таким чином, низькотемпературній корозії гільзи циліндрів протидіють підвищенням температури відкритих частин гільзи циліндрів у допустимих межах шляхом внесення змін до конструкції гільзи циліндрів та внесення змін в систему охолодження циліндрової втулки. Також розглянуто можливість встановлення насосів з частотним регулюванням до системи охолодження головного суднового двигуна, застосування перетворювача частоти в судновій техніці обумовлено реальною економічною доцільністю, з боку економії витрати палива дизель-генераторних установок та економії електроенергії на судні.

Перелік використаних джерел:

1. Koch F.W., Haubner F.G. Cooling System Development and Optimization for DI Engines. *SAE Technical Paper Series*. 2000. Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0283>.
2. Low-heat rejection engines – a concept review / R.A. Churchill, J.E. Smith, N.N. Clarc, R.A. Turton. *SAE Technical Paper Series*. 1989. Pp. 25-36.
3. Костишин В.С. Моделювання режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогідрравлічної аналогії. Івано-Франківськ, 2000. 163 с.
4. Service letter SL2019-671/JAP. URL: <https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019-671.pdf>.
5. Service Letter SL2019-687/NHN. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019_687.pdf?sfvrsn=4fba319_6.
6. Service Experience - MAN B&W Two-stroke Engines. URL: https://maritimeexpert.files.wordpress.com/2016/service_experience.pdf.
7. Погорлецький Д.С., Грицук І.В., Худяков І.В. Особливості експлуатації лубрикаторної системи мащення суднового двигуна MAN - B&W 5S70ME-C. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*: матеріали 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 16-18 березня 2023 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2023. – С. 402.

References:

1. Koch F.W., Haubner F.G. Cooling System Development and Optimization for DI Engines. *SAE Technical Paper Series*, 2000, pp. 1-16. doi: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0283>.
2. Churchill R.A., Smith J.E., Clarc N.N., Turton R.A. Low-heat rejection engines – a concept review. *SAE Technical Paper Series*, 1989, pp. 25-36.
3. Kostyshyn V.S. *Modeling of operating modes of centrifugal pumps based on electro-hydraulic analogy*. Ivano-Frankivsk, 2000. 163 p. (Ukr.)
4. Service letter SL2019-671/JAP Available at: <https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019-671.pdf>. Last accessed 2023/08/11 (accessed 25 November 2022).

5. Service Letter SL2019-687/NHN Available at: https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019_687.pdf?sfvrsn=4fba319_6 (accessed 25 November 2022).
6. Service Experience - MAN B&W Two-stroke Engines Available at: https://maritimeexpert.files.wordpress.com/2016/service_experience.pdf (accessed 01 February 2023).
7. Pohorletskyi D.S., Khudiakov I.V., Gritsuk I.V. Features of operation of the MAN - B&W 5S70ME-C marine engine lubrication system. Modern power plants in transport and technologies and equipment for their maintenance: proceedings of the 14-th Int. sci.-pract. conf. Kherson, 2023, pp. 402. (Ukr.)

Рецензент: Є.В. Білоусов
д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 05.05.2023

Стаття прийнята 13.06.2023

УДК 656.621

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288182

© Дубинець О.І.*

РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ФОРМАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ НАВІГАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПІДВОДНОГО РОБОТА НА МАЛИХ ГЛИБИНАХ

Метою статті є підвищення ефективності вирішення завдань стабілізації підводних робіт на невеликих глибинах на основі комплексної обробки навігаційної інформації та її фільтрації з використанням теорії Калмана. Поставлена мета досягається шляхом визначення набору математичних залежностей для формалізації процесу фільтрації навігаційної інформації підводних робіт на основі комплексної обробки даних. У даному випадку фільтрація здійснюється за допомогою розподіленого набору фільтрів Калмана різної структури, які були підібрані з урахуванням характеристик оцінюваних даних. Встановлено, що на теперішній час підводні роботи на невеликих глибинах широко використовуються по всьому світу для різноманітних завдань, у тому числі пошукові операції та перевірки під водою. Однак експлуатація цих робіт характеризується складними умовами. Серед таких умов можна виділити невідомі параметри підводної навігації, вплив зовнішніх збурень, зміни маси, розмірів та гідродинамічних характеристик робіт під час роботи у воді. На теперішній час перспективним підходом до автоматизації управління рухомими об'єктами вважається концепція управління, що базується на інтелектуальних методах. Однак застосування таких регуляторів для підводних робіт разом із проблемами отримання актуальної навігаційної інформації ще не досягло достатньої ефективності. До того ж питання, пов'язані з розробкою системи обробки навігаційної інформації з використанням нелінійних фільтрів і створенням інтелектуальних регуляторів для підводних робіт, досі недостатньо висвітлені в науково-технічній літературі. Найбільш суттєвим результатом є отримання набору математичних залежностей для формалізації процесу фільтрації навігаційної інформації підводних робіт за допомогою набору розподілених фільтрів Калмана різної структури. Такі набори тісно корелюються з відповідними характеристиками оцінюваних даних. У цьому контексті інерційний модуль з алгоритмами фільтрації Калмана може використовуватись для вимірювання кутових параметрів руху та вирішення завдань стабілізації крену, диференту і рискання. У зв'язку з низькими швидкостями руху підводних робіт на невеликих глибинах і відсутністю високочастотних перешкод

* д-р технічних наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-3270-1218