

УДК 621.426

Мацкевич Д.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

**ПОНОВЛЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ**

The possibility of renewal of the rheological characteristics of marine engine oils in the boundary lubricating layers is proven directly during the operation of the engine and its lubrication system. The tests were performed in the circulating lubrication system of the S6A2 mid-rotary diesel engine of the Mitsubishi company.

With the help of a rotary viscometer it is determined that the boundary lubricating layers that adhere to the metal surface of the triad of friction of the crankshaft - the lubricant - the attachments of the bearing, are more viscous because they have an orientational ordering of the molecules. As a result of the research, it was found that the viscosity of motor oil located in the narrow gap of the friction shaft of the bearing of the bearing and provides the maximum friction mode depends on the rate of displacement, that is, shows the "non-Newtonian" nature of the flow.

It is established that the rheological characteristics of the lubricant in a large volume and in the limit lubricant layer are different from each other. At rest, the viscosity of the boundary lubricating layer is 5...11 % higher than the viscosity in a large volume. The overlay on tribo-combination of shear stresses reduces the orientation ordering of molecules in the marginal lubricant layer and correspondingly reduces its viscosity, which can reach 5...7 %.

The method of renewal of rheological characteristics that realizes the orientation ordering of the molecules of the boundary layer of the lubricant, provides their normal position relative to the surface of the bearing of the bearing of the crank mechanism, is based on a scientifically grounded position that the rheological characteristics of marine motor oils in the boundary lubricating layer are " Its liquid crystal properties, therefore, can be renewed due to the impact on the latter.

It has been experimentally proved that by optimizing the intensity of replenishment of the circulation lubricant system, as well as by using surfactants, it is possible to control the rheological characteristics of the lubricant, which leads to increased reliability of the marine diesel engine.

Implementation of the results of research on marine vessels suggests an increase of 4.5...6 % economic and 6...7.5 % of the energy indicators of ship diesel engines, as well as improves the technical condition of the bearings of the vessel's medium-rotating diesel engine.

Ключові слова: судновий середньо-обертовий дизель, підшипники кривошипно-шатунного механізму, мастильний матеріал, в'язкість моторного мастила, реологічні характеристики, граничний мастильний шар, рідкокристалічні властивості моторного мастила

Ключевые слова: судовой среднеоборотный дизель, подшипники кривошипно-шатунного механизма, смазочный материал, вязкость моторного масла, реологические характеристики, граничный смазочный слой, жидкокристаллические свойства моторного масла

Keywords: ship medium-speed engine, crank bearings, lubricating material, engine oil viscosity, rheological characteristics, boundary lubricating layer, engine oil liquid-crystal properties

Постановка проблеми у загальному вигляді. Невід'ємною складовою будь-якої суднової енергетичної установки є середньо-обертові дизелі (СОД). На всіх без винятку морських суднах дані типи теплових двигунів використовуються як джерело електроенергії суднової електростанції, на ряді суден СОД, крім того, виконують функції головного двигуна, передаючи свою потужність на гвинт. Все це зумовлює пильну увагу, яку приділяють оптимізації роботи суднових СОД та їх систем. Однією з систем, що забезпечують надійну експлуатацію суднових дизелів (як головних, так і допоміжних) є система змащення. Дана система підтримує наявність мастильної плівки в таких відповідальних парах тертя як кулачкова шайба розподільного вала – ролик штовхача, поршневі кільця – циліндрова втулка, вкладень підшипника (рамового або мотильового) – колінчастий вал. Під час експлуатації СОД несуча здатність мастильної плівки погіршується, що негативно сприяє на контактну взаємодію названих пар тертя, та, в свою чергу, може привести до виникненню аварійної ситуації. Тому підтримка працездатного стану та функціональних властивостей мастильного матеріалу, який розподіляє контактуючі поверхні, є актуальним завданням, вирішення якого забезпечує надійну роботу суднових дизелів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основними режимами тертя і пов'язаного з ним змащення є гідродинамічний і граничний. Робота трибо-сполучень розподільного вала відбувається в режимі граничного тертя. Даний режим також характерний для циліндро-поршневої групи суднових СОД. Не дивлячись на прагнення забезпечити гідродинамічний режим змащення при роботі підшипників ковзання суднових дизелів, процес змащення цих вузлів відбувається в умовах граничного тертя. Це обумовлюється рядом причин, основна з яких – мінімізація зазору в парі тертя вал – вкладень для забезпечення її стійкої роботи. Крім того, в процесі експлуатації на поверхнях названої пари відбуваються утворення окислів і відкладення нагару, що також сприяє зменшенню зазору і переходу з гідродинамічного в режим змішаного і граничного тертя. Питанням забезпечення необхідного режиму змащення в парах тертя суднових дизелів розглядалися в роботі [1], де було визначено ефект стратифікації в'язкості при граничному терті. Завдяки дослідженням, результати яких викладені в роботі [2], було встановлено діапазон змін в'язкості моторного мастила при збільшенні потужності суднового дизеля. При цьому технологія підтримки в'язкості в необхідних межах потребує додаткового вивчення та дослідження.

Постановка завдання. Робота моторного мастила, що забезпечує режими тертя та охолодження елементів суднових дизелів, супроводжується зміною його фізичних і хімічних властивостей. Крім того, при цьому змінюються і його реологічні характеристики, і в першу чергу в'язкість. Метою роботи було визначення можливості управління реологічними характеристиками моторних мастил, що використовуються в циркуляційних системах змащення суднових дизелів, а також вивчення реологічних особливостей моторного мастила, яке знаходиться у вузькому зазорі пари тертя вал – вкладень підшипника.

Виклад основного матеріалу дослідження. Більшість дисперсних систем (до яких відносяться і моторні мастила) має аномальний характер в'язкості, тобто вони не підкоряються закону Ньютона для так званих істинно-в'язких (ньютонівських) рідин. В'язкість таких систем є функцією напруги, або зсуву. Основною причиною аномальної в'язкості є просторова структура, що виникає при взаємодії частинок дисперсної фази між собою. За своїм реологічними характеристиками структуровані системи займають проміжне положення

між рідинами і твердими тілами і мають властивості рідких кристалів. До подібних систем можна віднести структуровані тонкі шари мастильного матеріалу, що знаходиться у вузькому зазорі металевих пар тертя втулка – поршень і особливо вал – вкладень. Наявність просторової структури надає цим системам своєрідні механічні властивості: пружність, міцність, пластичну в'язкість.

Неодноразово зазначалося, що характеристики тонких мастильних шарів, що утворюються в умовах граничного тертя, залежать не тільки від структурного стану мастила, але і від дії твердої поверхні, поблизу якої вони знаходяться.

Утворення поблизу твердої поверхні (особливо металевої) структурованих рідкокристалічних шарів з анізотричною формою молекул призводить до помітної відмінності фізичних властивостей тонких прошарків рідини від їх властивостей в «об'ємній» фазі. Для таких шарів в'язкість в граничному шарі відрізняється від в'язкості «об'ємної» рідини. Помітна структурна неоднорідність граничних мастильних шарів, визначаючи неньютонівський характер в'язкої течії, значним чином впливає на дисипативні властивості мастильного матеріалу, особливо в трибо-вузлах, що працюють в режимі граничного і змішаного тертя [3].

Дослідження проводилися для моторного мастила MLC30 фірми Castrol, що має такі основні характеристики:

густина – 897 кг/м^3 ;

кінематична в'язкість при 40°C – 107 сСт;

кінематична в'язкість при 100°C – 11,5 сСт;

загальне лужне число – 12 мгКОН/г;

клас SAE – 30

і використовується в циркуляційній системі суднового дизеля S6A2 фірми Mitsubishi (рис. 1). Подачу мастила до вузлів тертя дизеля 1 забезпечують два мастильних насоса 5 і 6, один з яких є навішеним. Мастило до насосів надходить з стічно-циркуляційної цистерни 2

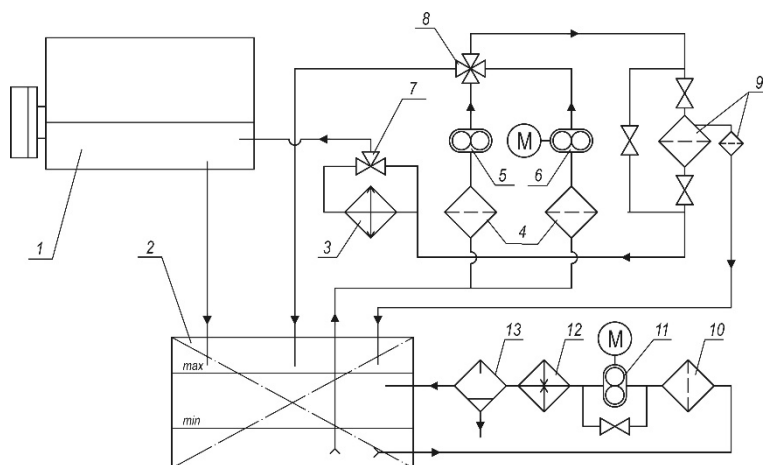


Рис. 1. Система змащення суднового дизеля S6A2 фірми Mitsubishi:

- 1 – дизель; 2 – стічно-циркуляційна цистерна; 3 – охолоджувач;
 4 – магнітний фільтр; 5 – навішений мастильний насос; 6 – мастильний насос з електричним приводом; 7 – перепускний клапан охолоджувача;
 8 – перепускний клапан насоса; 9 – фільтр, який самоочищається;
 10 – фільтр; 11 – насос сепаратора; 12 – підігрівач; 13 – сепаратор

через магнітний фільтр 4. В залежності від положення перепускного клапан 8 мастило може або повертатися в систему, або направлятися до дизелю (через фільтр, який самоочищається 9 і охолоджувач 3). Температура мастила, що надходить до дизелю, регулюється шляхом зміни положення перепускного клапан 7. Дизель забезпечений автономною системою сепарації мастила, що складається з сепаратора 13, підігрівача 12 і насоса 11. Мастило в систему сепарації поступає через фільтр 10.

В результаті проведених досліджень було встановлено залежність в'язкості від швидкості зсуву (рис. 2), яка підтвердила «неньютонівській» характер поведінки мастильного матеріалу у вузькому зазорі пари тертя вал – вкладень підшипника. Крім того, результати, що були отримані підтвердили твердження, висловлене в [4], про те, що граничні мастильні шари, які прилягають до металевої поверхні тріади тертя, більш в'язкі і володіють орієнтаційною впорядкованістю молекул.

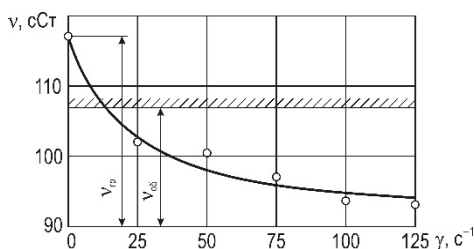


Рис. 2. Залежність в'язкості моторного мастила MLC30 фірми Castrol від швидкості зсуву при товщині мастильного шару 20 мкм

Експлуатація моторного мастила в дизелі відбувається тривалий період часу, протягом якого його реологічні характеристики постійно змінюються. Завдання їх відновлення, і особливо управління ними, є актуальним і сприяє підвищенню надійності роботи комплексу дизель – моторне мастило – мастильна система. Для визначення динаміки зміни в'язкості в процесі експлуатації моторного мастила її вимір виконувався з різним часовим інтервалом. При цьому вимірювалася як «об'ємна», так і «пристінна» в'язкість відібраних проб. В обох випадках збільшення в'язкості носило експонентний характер і представлено на рис.3. Як випливає з рис. 2, збільшення швидкості зсуву (тобто частоти обертання колінчастого вала дизеля) призводить до зниження в'язкості моторного мастила. В цьому проявляється негативна властивість «неньютонівського» характеру поведінки мастильного матеріалу в зоні тертя (в'язкість граничного мастильного шару залежить від швидкості зсуву). Підтримання заданого рівня в'язкості можливо здійснити різними способами. Для судових умов найбільш оптимальними є використання оптимального доливання мастила в систему і застосування поверхнево-активних речовин.

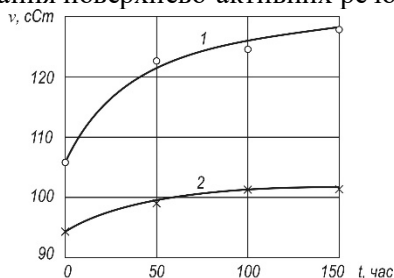


Рис. 3. Зміна в'язкості моторного мастила MLC30 фірми Castrol в процесі експлуатації:

1 – «об'ємна» в'язкість; 2 – «пристінна» в'язкість при швидкості зсуву 125 с^{-1}

Для підтвердження висловлених припущень був проведений наступний експеримент. Випробуванням були піддані три дизеля S6A2 фірми Mitsubishi, що входять до складу допоміжної суднової енергетичної установки. Кожен дизель мав свою автономну систему змащення, що дозволяло виконувати дослідження його роботи з різним мастильним матеріалом. Технічний стан всіх дизелів був ідентичним, окрім того, умови експлуатації дозволяли зробити одночасну заміну всього мастила, що знаходиться в їх мастильній системі.

Перший дизель був «контрольним» і після заміни мастила в його системі інших технічних заходів з ним не проводилося і відповідно до вимог заводу-виготовлювача його експлуатація здійснювалася протягом 150 годин роботи без проміжного поповнення мастила в системі. За це період експлуатації рівень мастила в картері дизеля не знижувався нижче гранично допустимого.

Мастильна система другого дизеля поповнювалася свіжим мастилом через кожні 10 годин роботи до верхнього рівня, що рекомендується в картері дизеля. Цей період поповнення було визначено в якості оптимального при проведенні попередніх експериментів з вивчення реологічних характеристик даного мастильного матеріалу.

Мастильна система третього дизеля спочатку заповнювалася мастилом з поверхнево-активною присадкою, що містить в своєму складі солі міді. Крім того, через кожні 10 годин роботи поповнення мастильної системи даного дизеля здійснювалось мастилом з такою ж концентрацією поверхнево-активною присадки, як і в загальному обсязі системи.

Для максимальної коректності проведеного експерименту всі три дизеля перебували в експлуатації практично однакову кількість часу, при цьому відхилення в величині навантаження на дизелі не перевищувало 7%. З огляду на енергоємність дизелів, а також з урахуванням обсягу мастильної системи і тривалості експерименту, результати, що були отримані адекватно відображали процеси зміни реологічних характеристик моторного мастила.

З обсягу мастильної системи дизелів проводився відбір проб через різні проміжки часу. Головним параметром, який підлягав виміру, була в'язкість моторного мастила. При цьому, її вимір в судових

умовах проводився за допомогою штатної суднової експрес-лабораторії Viscomar фірми UNITOR. Таким чином вимірювалася «об'ємна» в'язкість. Вимірювання «пристінної» в'язкості виконувалося на експериментальній установці в науковій лабораторії.

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 1 і на рис. 4.

Таблиця 1. Зміна в'язкості моторного мастила в процесі експлуатації

Характеристика мастильної системи	Час експлуатації, години			
	0	50	100	150
В'язкість мастила в великому обсязі				
Робота в штатному режимі	107	122	125	128
Поповнення через 10 годин роботи	107	113	116	118
Поповнення через 10 годин роботи і до- бавка поверхнево-активної присадки	107	110,5	112	113
В'язкість мастила в граничному шарі				
Робота в штатному режимі	117	125	128	131
Поповнення через 10 годин роботи	117	121	122	123
Поповнення через 10 годин роботи і до- бавка поверхнево-активної присадки	126	126	127	128

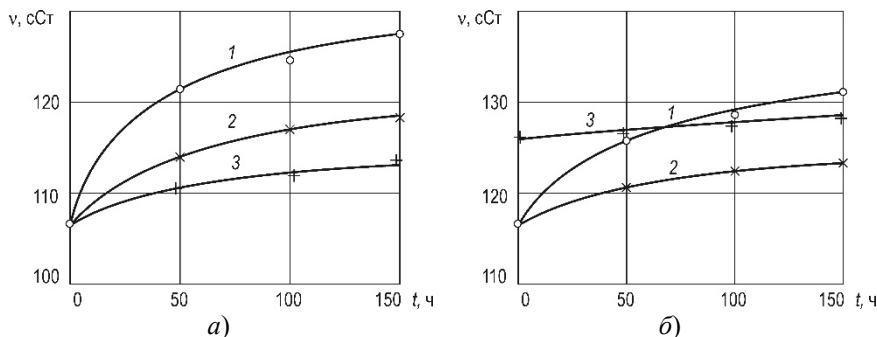


Рис. 4. Зміна в'язкості мастила в процесі експлуатації
а) «об'ємна» в'язкість; б) «пристінна» в'язкість:

1 – робота мастильної системи в штатному режимі; 2 – поповнення мастильної системи через 10 годин роботи; 3 – поповнення мастильної системи через 10 годин роботи і додання поверхнево-активної присадки

Більш наочно процес зміни в'язкості проілюстрований на рис. 5, де показані статичні характеристики в'язкості в початковий і кінцевий момент роботи для розглянутих вище умов роботи дизеля і його мастильної системи.

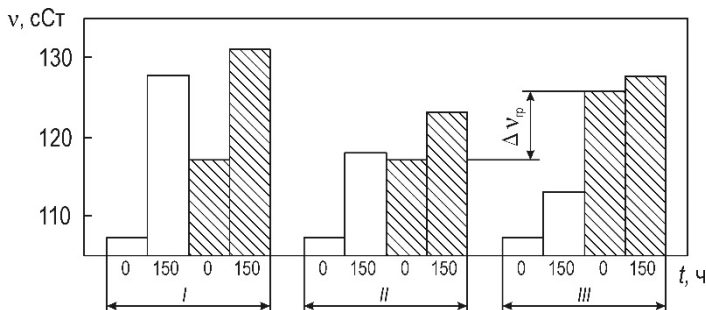


Рис.5. Зміна в'язкості мастила в процесі експлуатації (чисті – «об'ємна» в'язкість, штриховані – «пристінна» в'язкість):

I – робота мастильної системи в штатному режимі; II – поповнення мастильної системи через 10 годин роботи; III – поповнення мастильної системи через 10 годин роботи і добавка поверхнево-активної присадки

Реологічні характеристики мастила у великому обсязі і в граничному змащувальному шарі відрізняються один від одного. Так, в'язкість мастила в граничному шарі $v_{гр}$ (тобто в зазорі вал – вкладень) має більше значення, ніж в обсязі $v_{об}$. Використання поверхнево-активних речовин призводить до збільшення в'язкості в граничному змащувальному шарі. Слід мати на увазі, що в даному випадку відбувається «прирощення» в'язкості в граничному шарі $\Delta v_{гр}$, яке якісно відрізняється від збільшення об'ємної в'язкості. В даному випадку відбувається збільшення ступеня впорядкованості молекул в граничному шарі. Це призводить до підвищення гідродинамічної міцності моторного мастила, що забезпечує граничний режим тертя.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналізуючи наведені результати можна зробити наступні висновки.

1. В'язкість моторного мастила, що знаходиться у вузькому зазорі пари тертя вал – вкладень підшипника і забезпечує граничний режим тертя, залежить від швидкості зсуву, тобто проявляє «неньютонівській» характер течії.

2. Для моторного мастила необхідно розрізнити в'язкість в великому обсязі («об'ємну» в'язкість) і в'язкість в пристінному шарі («пристінну» в'язкість), яка має більше значення, що пояснюється виникненням орієнтаційної впорядкованості молекул в граничному змащувальному шарі.

3. В процесі експлуатації мастила в циркуляційній системі відбувається зростання значень як «об'ємної», так і «пристінної» в'язкості, що пояснюється окисленням мастила і попаданням в нього незгорілих вуглеводнів.

4. Збільшення періодичності поповнення масляної системи свіжим маслом, а також введення в масло поверхнево-активних компонентів уповільнює процес підвищення його в'язкості.

5. Шляхом оптимізації інтенсивності поповнення циркуляційної мастильної системи, а також за рахунок використання поверхнево-активних речовин, можливо управляти реологічними характеристиками мастила, що призводить до підвищення надійності роботи судового дизеля.

Своєчасне поновлення реологічних характеристик мастильних матеріалів судових дизелів сприяє підвищенню їх надійності. Визначення найбільш оптимальних термінів поповнення систем змащення мастилом залежить від характеристик та режимів роботи судового дизеля, його технічного стану, а також експлуатаційних властивостей як мастила, так і палива, які при цьому використовуються, та може бути зроблено за результатами динаміки зміни в'язкості моторного мастила, що забезпечує граничний, або гідродинамічний режим змащення.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sagin S. V. Motor Oil Viscosity Stratification in Friction Units of Marine Diesel Motors / S. V. Sagin, O. V. Semenov // American Journal of Applied Sciences, Published by Science Publication. – 2016. – Vol.13. – Iss. 2. – P. 200-208. DOI: 10.3844/ajassp.2016.200.208.

2. Sagin S. V. Marine Slow-Speed Diesel Engine Diagnosis with View to Cylinder Oil Specificarion / S. V. Sagin, O. V. Semenov // American Journal of Applied Sciences, Published by Science Publication. – 2016. – Vol.13. – Iss. 5. – P. 618-627. DOI: 10.3844/ajassp. 2016.618.627.

3. Поповский А. Ю. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств / А. Ю. Поповский, С. В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств : наук.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.

4. Мацкевич Д. В. Управление реологическими характеристиками моторных масел судовых дизелей / Мацкевич Д. В. // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 2. – Одеса: ОНМУ. – С. 52-60.