

Напрямок «Суднобудування та водний транспорт»

Науковий напрямок «Суднові енергетичні установки»

Ентропія

ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАР ТЕРТЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ З
УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРИ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

Одеса – 2018

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	4
1. СТРУКТУРНІ ТА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОТОРНОГО МАСТИЛА, ЩО ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ...	5
1.1 Суднове моторне мастило як дисперсна система.....	5
1.2. Реологічні властивості моторного мастила як дисперсної системи..	7
1.3. Класифікація матеріалів по їх реологічним характеристикам.....	11
2. ТРИБОЛОГІЧНІ ЯВИЩА, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В СИСТЕМІ ВАЛ – МАСТИЛЬНИЙ ШАР – ВКЛАДЕНЬ ПІДШИПНИКА СУДНОВИХ МАЛО-ОБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	16
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА СТРАТИФІКАЦІИ В'ЯЗКОСТІ МОТОРНОГО МАСТИЛА, ЩО ВИНΙΚАЄ ПРИ РОБОТІ ТРИБО- СПОЛУЧЕНЬ СУДНОВИХ МАЛО-ОБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ.....	20
3.1. Реологічні характеристики мастильного матеріалу, що знаходиться в зоні тертя підшипників кривошипно-шатунного механізму суднових дизелів	20
3.2. Моделювання процесів зміни реологічних характеристик суднових моторних мастил	23
ВИСНОВКИ.....	30
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	32

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

- ВМС – високомолекулярні сполуки
ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння
КШМ – кривошипно-шатунний механізм
ММ – моторне мастило
МОД – мало-обертовий дизель
НМС – низькомолекулярні сполуки
ТС – трибологічна система
ЦПГ – циліндропоршнева група

ВСТУП

Тенденції в розвитку світового морського флоту характеризуються підвищеною увагою до використання високорентабельних спеціалізованих суден, оснащених автоматизованими енергетичними й вантажними комплексами.

Ефективна експлуатація суднових енергетичних установок може бути досягнута при умові найкращого вибору режимів роботи двигунів, впровадження сучасної технології технічного обслуговування, раціонального використання паливо енергетичних ресурсів.

Основною тенденцією в розвитку суднових дизелів є підвищення їх циліндрової і агрегатної потужності і техніко-економічних показників, що багато в чому залежить від якості вживаних моторних мастил. Раціональне використання моторних мастил припускає в першу чергу їх обґрунтований вибір з урахуванням конструктивних особливостей дизеля і умов експлуатації, а також зниження витрати мастил на чад і заміну. Якість моторних мастил в основному визначається кількістю і ефективністю присадок, що вводяться в них. За допомогою присадок можна забезпечити підвищення великої кількості властивостей моторних мастил.

Правильно і обґрунтовано вибраний сорт моторного мастила, кваліфікаційне обслуговування систем змащення, догляд за технічним станом деталей і елементів двигуна в значній мірі сприяють підвищенню надійності, довговічності і економічності суднових дизелів.

Тому дослідження, що проводяться в цьому напрямку є актуальними, а використання їх результатів сприятиме підвищенню рівня технічної експлуатації суднових дизелів.

1 СТРУКТУРНІ ТА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОТОРНОГО МАСТИЛА, ЩО ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ

1.1 Суднове моторне мастило як дисперсна система

Нафта і похідні від неї нафтові системи (нафтові палива і нафтові мастила) є предметом вивчення багатьох природничих наук, кожна з яких вносить певний внесок у розвиток уявлень про будову і структуру цих систем [1]. З точки зору органічної хімії нафтові мастила – це суміш низько- і високомолекулярних сполук, що відносяться до різних гомологічних рядках. З позицій аналітичної хімії нафтове мастило, як елемент нафтової системи, являє собою суміші органічних сполук складного складу. У термінах фізичної хімії нафту можна визначити як багатоконпонентну суміш складного складу, здатну в широкому інтервалі значень термобаричних параметрів змінювати агрегатний стан і, відповідно, об'ємні властивості.

З позицій колоїдної хімії моторне мастило (ММ), що отримується з нафти, – це складна багатоконпонентна суміш, яка в залежності від зовнішніх умов проявляє властивості молекулярного розчину або дисперсної системи [2]. ММ складається з низькомолекулярних (НМС) і високомолекулярних сполук (ВМС). НМС є в основному парафінові, нафтенно-парафінові і ароматичні вуглеводні. Високомолекулярна частина ММ складається з високомолекулярних парафінових вуглеводнів, моно- і конденсованих нафтенно-парафінових, моно- і біциклічних ароматичних вуглеводнів ряду бензолу і нафталіну, смол і асфальтенів.

Міжмолекулярні взаємодії ВМС призводять до утворення в ММ просторових надмолекулярних структур, що складаються з безлічі макромолекул. Залежно від характеру зв'язків надмолекулярних структури підрозділяються на асоціати, в яких діють фізичні сили Ван-дер-Ваальса і комплекси з більш міцними хімічними зв'язками. Фізичні асоціати здатні за

певних умов переходити в комплекси, наприклад, при підвищенні температури.

Число молекул ВМС в фізичних асоціатів, рівноважний їх стан з НМС (дисперсійним середовищем) залежать в основному від складу і концентрації компонентів суміші, температури та інших умов. Таким чином, в залежності від умов і властивостей ВМС і НМС, ВМС в моторних мастилах можуть утворювати:

істинні розчини, в яких молекули знаходяться в неасоційованих стані;

оборотні нафтові дисперсні системи, в яких дисперсною фазою є асоціати;

незворотні дисперсні системи, в яких дисперсною фазою є комплекси.

До оборотних відносяться системи, в яких дисперсна фаза може мимовільно розчинятися в дисперсійному середовищі аж до утворення молекулярних розчинів.

Моторне мастило може містити вуглеводні:

не схильні при даних умовах до процесів асоціації (НМС, вуглеводні, що мають просторові обмеження);

здатні до міжмолекулярним взаємодій з утворенням тільки асоціатів (нормальні парафінові вуглеводні);

ВМС, схильні до утворення асоціатів і комплексів (смоли, полі-циклічні вуглеводні, асфальтени).

Надмолекулярні структури колоїдних розмірів ($10^{-4} \dots 10^{-9}$ м) відрізняються від молекул ВМС в кілька разів більшою молекулярною масою, наявністю поверхні розділу фаз між ними і дисперсійним середовищем, високою щільністю, малої летючість і надають нафтовій системі специфічні властивості. При цьому система набуває:

1) структурно-механічну міцність;

2) нестійкість, здатність до розшарування на фази.

Структурно-механічна міцність системи підвищує мастильну здатність ММ. Особливо актуальним придбання даної властивості є для режимів граничного змащування, коли в змащувальному шарі виникає додатковий розклинюючий тиск, що підвищує несучу здатність мастильного клину.

Розшарування ММ на фази, як правило, характерно при його високому напрузованні, а також при порушенні умов експлуатації. Якісні ММ, навіть включають до свого складу різні присадки, характеризуються стійкістю структури, а підбір присадок здійснюється таким чином, щоб їх компоненти вільно з'єднувалися з вуглеводневими ланцюгами базового мастила.

1.2. Реологічні властивості моторного мастила як дисперсної системи

Робота моторного мастила в суднових дизелях супроводжується зміною його фізико-хімічного стану, в тому числі деформацією. Для мастильного матеріалу, що знаходиться в зоні контакту, характерні основні ознаки деформації: наявність прикладеної ззовні механічної сили і зміна форми, яке полягає в зміщенні частинок тіла (в даному випадку молекул) відносно один одного. У разі розгляду пари поршень-втулка в якості механічної сили на молекули мастила діє нормальна, а в разі вал-вкладень – радіальна сила кривошипно-шатунного механізму (КШМ). Як в тому, так і в іншому випадку, прикладене навантаження викликає появу внутрішніх сил, які протидіють зовнішнім зусиллям, які дорівнюють, але протилежні їм за напрямком. У змащувальному шарі виникає напруга P , що дорівнює відношенню сили F до одиниці площі S :

$$P = \frac{F}{S} .$$

Силу і напруга можна розділити на нормальні (тиск) і дотичні (напруга зсуву). Реологічні характеристики мастильного матеріалу, що знаходиться в зоні трибо-сполучення вал-вкладень, найбільш характеризує напруга зсуву, яке може бути визначено як

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1.1)$$

Закон Ньютона для так званих істинно-в'язких (ньютонівських) рідин пов'язує зовнішню напругу і швидкість переміщення окремих шарів:

$$P = \frac{F}{S} = \eta \frac{du}{dx}, \quad (1.2)$$

де η – динамічна в'язкість, Па·с;

$\frac{du}{dx}$ – швидкість вздовж вісі x [3].

Коефіцієнтом пропорційності в цій формулі є η – динамічна в'язкість системи, що є матеріальною константою рідини при даній температурі.

З урахуванням (1.1) вираз (1.2) можна записати як

$$\tau = \eta \gamma', \quad (1.3)$$

де γ' – швидкість зсуву.

Напруга зсуву і швидкість зсуву можуть бути проілюстровані моделлю паралельних площин (рис. 1.1).

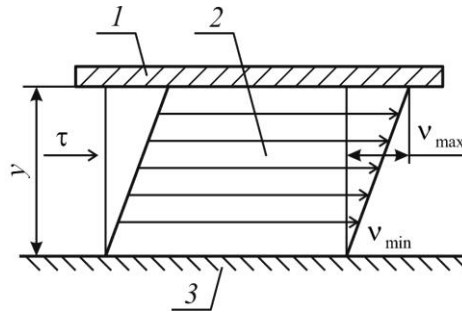


Рис. 1.1. Модель течії рідини між співвісними площинами:

1 – площина, що рухається з площею зсуву S ; 2 – рідина;

3 – нерухома площина

Напруга зсуву τ викликає характерну картину пошарового розподілу швидкостей в шарі рідини. Максимальна швидкість течії v_{\max} спостерігається біля кордону розділу рідини з рухомою площиною. У міру віддалення від рухомої площини швидкість течії знижується і на відстані y від неї, на кордоні з нерухомою площиною $v_{\min} = 0$. Швидкість зсуву γ' представляє швидкість поперек зазору і математично виражається у вигляді похідної:

$$\gamma' = \frac{dv}{dy}, \quad \frac{\text{м/с}}{\text{м}} = \text{с}^{-1}. \quad (1.4)$$

Таким чином, швидкість зсуву в парі вал-вкладень можна розрахувати, знаючи частоту обертання валу і ширину вкладення підшипника.

В'язкість дисперсної системи може бути розрахована за рівнянням Ейнштейна, виведеного їм на підставі обліку гідродинамічного опору течією, який чинять частки дисперсної фази:

$$\eta = \eta_0 (1 + \alpha\chi), \quad (1.5)$$

де η – в'язкість дисперсної системи;

η_0 – в'язкість дисперсійного середовища;

α – коефіцієнт, що враховує форму частинок дисперсної фази (для сферичної форми $\alpha=2,5$);

χ – об'ємна частка дисперсної фази.

Рівняння Ейнштейна не враховує багатьох особливостей дисперсних систем і тому справедливо лише при дотриманні цілого ряду умов.

Поряд з нормальними рідинами є аномально-в'язкі системи, що проявляють підвищену в'язкість при невеликих тисках; це пов'язано з утворенням в них своєрідних просторових структур внаслідок взаємодії частинок дисперсної фази.

Більшість дисперсних систем має аномальний характер в'язкості, тобто вони не підкоряються закону Ньютона. В'язкість таких систем є функцією напруги, зрушення. Основною причиною аномальної в'язкості може бути просторова структура, що виникає при взаємодії частинок дисперсної фази між собою. За своїм реологічними властивостями структуровані системи (гелі, пасти, структуровані суспензії і ін.) займають проміжне положення між рідинами і твердими тілами. 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 [4].

Пластичні течії дисперсних систем описуються рівнянням Бінгама:

$$P - P_d = \eta' \frac{du}{dx},$$

де η' – в'язкість, відповідна пластичному течію системи;

P_d – межа плинності, тобто то критичне напруження зсуву, яке необхідно для руйнування структури і початку перебігу.

В області напруг менше P_d система проявляє пружні властивості, при $P > P_d$ спостерігається пластична деформація. У разі $P_d = 0$, рівняння Бінгама переходить в рівняння Ньютона [5].

Співвідношення між напругою зсуву і швидкістю зсуву, що характеризує поведінку рідини при перебігу, графічно зображується у вигляді кривої, на якій по осі ординат відкладають значення напруги зсуву τ , а по осі абсцис значення швидкості зсуву $\dot{\gamma}$. Такий графік називають «кривою течії».

Найбільш простий тип кривої течії наведено на рис. 1.2, а. При цьому в'язкість в рівнянні (1.5) вважають постійною і не залежить від швидкості зсуву.

Інший широко використовується діаграмою є залежність $\eta = f(\dot{\gamma})$, така діаграма називається «кривою в'язкості» (рис. 1.2, б).

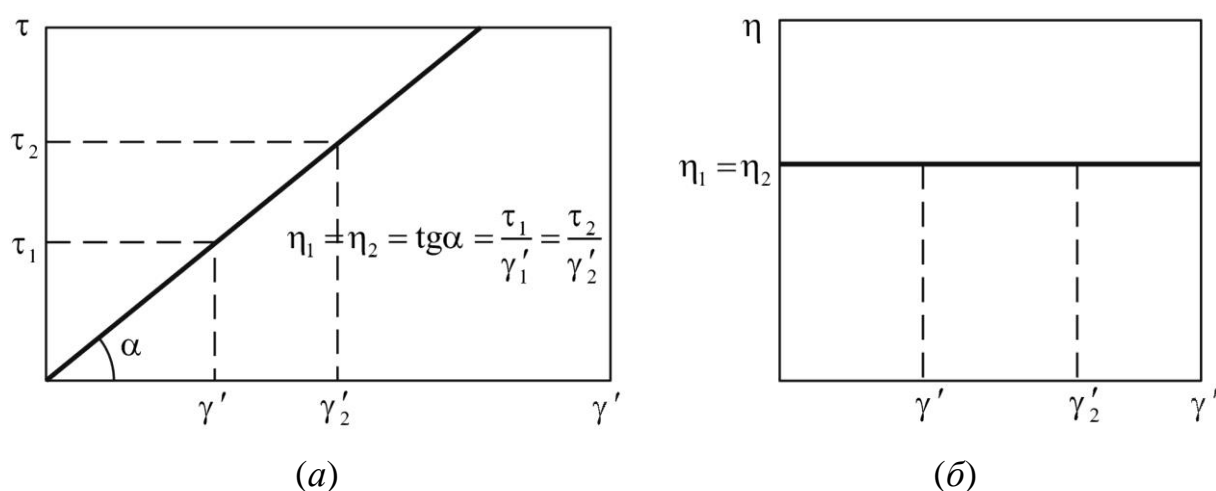


Рис. 1.2. Криві течії (а) і в'язкості (б) ньютонівської рідини

1.3. Класифікація матеріалів по їх реологічним характеристикам

Основний розподіл матеріалів по їх реологічним характеристикам відбувається на ньютонівські і неньютонівські. Ньютонівські рідини – рідини, що володіють «ньютонівським характером течії» при певних величинах напруги або швидкості зсуву. У випадку ідеальної рідини графічним еквівалентом рівняння Ньютона (1.5) буде пряма лінія з нахилом α , яка виходить із початку координат (рис. 1.2, а). Будь-яка точка на цій прямій визначається двома величинами: τ і $\dot{\gamma}$. Ділення першої величини на другу дає значення η . Значення η може бути також визначено як тангенс кута α .

Так як крива течії ідеальної рідини насправді являє собою пряму лінію, відношення всіх пар величин τ і $\dot{\gamma}$, що лежать на цій лінії, постійно. Це означає, що зміна швидкості зсуву не впливає на η . Всі рідини, які задовольняють цій умові, називаються «ньютонівськими рідинами». Різні типи течії рідин показані на рис. 1.3, при цьому ньютонівським відповідають лінії 1.

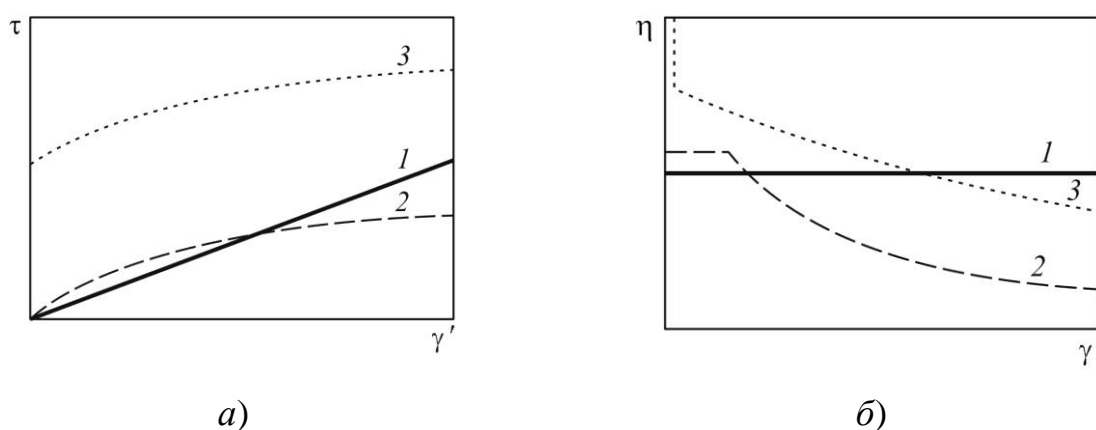


Рис. 1.3. Різні типи течії рідин:

а) криві течії; б) криві в'язкості

Всі інші рідини, які не виявляють такого «ідеального» характеру течії, називають «неньютонівськими рідинами». Неньютонівських рідин значно більше, ніж ідеальних рідин. До них відносяться: псевдо-пластичні рідини, ділатантні рідини, псевдо-пластичні рідини з межею плинності (пластичні рідини).

Псевдо-пластичні рідини – так називають рідини, що проявляють псевдо-пластичний характер перебігу при певних величинах напруги і швидкості зсуву: в'язкість цих рідин знижується при зростанні швидкості зсуву (обидві криві 2 на рис. 1.3).

Для більшості рідких матеріалів ефект зниження в'язкості під впливом зсуву є оборотним (часто він відбувається з деяким запізненням), тобто рідина відновлює початкову високу в'язкість при зниженні швидкості зсуву або в стані спокою: ланцюгові молекули повертаються до свого початкового неорієнтованого станом, деформовані краплі знову набувають кулясту форму, а агрегати відновлюються завдяки броунівському русі.

Необхідно відзначити, що ступінь зниження в'язкості при зростанні швидкості зсуву псевдо-пластичних рідин не є постійною у всьому інтервалі швидкостей зсуву – від дуже низьких до дуже високих (рис. 1.4).

При низькій швидкості зсуву вплив зсувної орієнтації малий, і всі молекули або частинки в рідині здійснюють хаотичний броунівський рух. При дуже низьких швидкостях зсуву псевдо-пластичні рідини поведуться подібно ньютонівським рідинам з певною в'язкістю η_0 , що не залежить від швидкості зсуву, яку часто називають «в'язкістю при нульовій швидкості зсуву».

Коли швидкість зсуву зростає до такого ступеня, що викликана нею орієнтація молекул або частинок істотно перевершує дезорієнтуючий вплив броунівського руху, в'язкість рідини різко падає. При надзвичайно високих швидкостях зсуву в'язкість буде асимптотично наближатися до кінцевої постійної величини η_∞ . Перехід до ще більш високих швидкостей зсуву вже

не може привести до подальшого зниження в'язкості, так як оптимальні умови досконалої орієнтації частинок вже досягнуті.

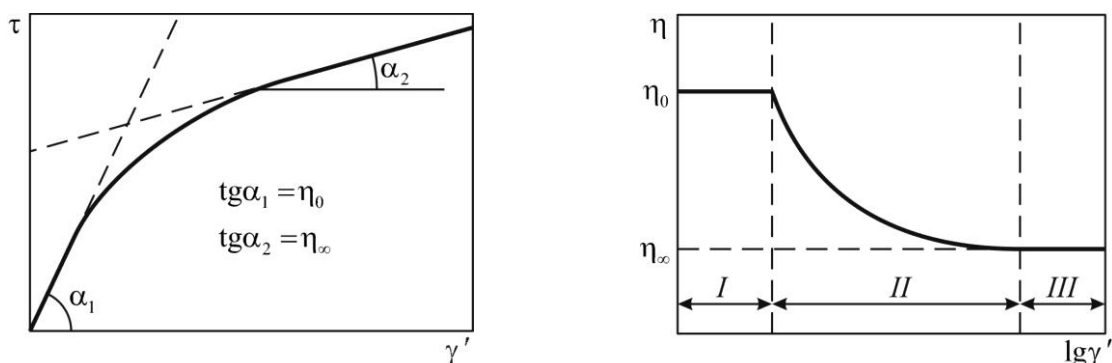


Рис. 1.4. Залежності напруги зсуву і в'язкості від швидкості зсуву псевдо-пластичних рідин:

- I – перша ньютонівська область: в'язкість η_0 ще не залежить від швидкості зсуву;
- II – область падіння в'язкості в результаті орієнтації молекул або частинок;
- III – друга ньютонівська область: в'язкість η_∞ залишається постійною, та не залежить від подальшого зростання швидкості зсуву

В областях низьких і високих швидкостей зсуву, що зветься першої і другої ньютонівськими областями, навіть в'язкість псевдо-пластичних рідин не залежить від швидкості зсуву.

Ще одним типом неньютонівських рідин є ділатантні рідини, або рідини, що демонструють ділатантний характер течії. Це такі рідини, які при певних інтервалах напруг або швидкостей зсуву проявляють ділатантний характер течії, а саме – зростання в'язкості зі збільшенням швидкості зсуву.

Неньютонівськими властивостями володіють також «в'язко-пластичні» рідини (див. рис. 1.3, криві 3), які характеризуються ще однією особливістю – межею плинності. З достатньою підставою пластичні рідини можуть бути віднесені як до рідин, так і до твердих тіл. В основному це дисперсії, у яких в стані спокою молекули або частинки, завдяки силам Ван-дер-Ваальса,

полярним взаємодій і іншому можуть утворювати просторову сітку. Сили, що формують її, обмежують переміщення елементів обсягу і надають цьому матеріалу характер твердого тіла з нескінченно високою в'язкістю. Якщо зовнішні сили менше, ніж сили, що формують сітку, твердий матеріал буде деформуватися пружно. Тільки тоді, коли зовнішні сили досягнуть величини, достатньої для подолання сил, що формують сітку, тобто перевищать поріг напруги зсуву, званий «межею плинності», сітка зруйнується, елементи обсягу зможуть необоротно зайняти нове положення, і тверде тіло перетвориться в рідину.

Для псевдо-пластичних рідин зниження в'язкості залежить в основному від орієнтації частинок, молекул та їх упорядкування в напрямку течії за умови, що в результаті зростання швидкості зсуву долається вплив хаотичного броунівського руху молекул. Ця орієнтація так само швидко втрачається, як і виникає.

Будуючи криву течії неньютонівської рідини, що не володіє межею плинності, отриману в режимі рівномірного зростання швидкості зсуву, так звану «верхню криву», ми виявимо, що «нижня крива», побудована так само, але в режимі зниження швидкості зсуву, може збігатися з «верхньої кривою» або розташовуватися нижче її.

Характерною рисою багатьох дисперсій є не тільки тенденція до орієнтації частинок і їх взаємодії один з одним або з молекулами дисперсійного середовища, а й те, що цей процес протікає в часі. Взаємодія між частинками призводить до виникнення зв'язків між ними і утворення в системі тривимірної сітчастої структури. У порівнянні з силами, що діють усередині частинок або молекул, ці зв'язки (часто водневі або іонні) відносно слабкі, вони досить легко розриваються, коли дисперсія піддається зрушенню протягом тривалого часу.

2 ТРИБОЛОГІЧНІ ЯВИЩА, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В СИСТЕМІ ВАЛ – МАСТИЛЬНИЙ ШАР – ВКЛАДЕНЬ ПІДШИПНИКА СУДНОВИХ МАЛО-ОБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

Незважаючи на прагнення забезпечити гідродинамічний режим змащення при роботі підшипників ковзання суднових дизелів, процес змащування 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 оксидів і відкладення нагару, що також сприяє зменшенню зазору і переходу з гідродинамічного в режим змішаного і граничного тертя.

Система вал - мастильний шар - вкладень підшипника судового мало-обертового дизеля (МОД) відноситься до стандартної трибологічної системи (ТС), що складається з двох металевих деталей, розділених між собою шаром мастильного матеріалу. Таку систему характеризують:

- склад (деталі і властивості деталей системи);
- внутрішні зв'язки (зв'язки між деталями системи);
- зовнішні зв'язки (вхід, вихід);
- функціональні системи (співвідношення вхід-вихід).

Основним компонентом системи вал - мастильний шар - вкладень підшипника на який можливо накладати керуючий вплив, є мастильний матеріал. Його властивості та характеристики визначаються не тільки його власною структурою, а й залежать від впливу металевих поверхонь, які він поділяє [6]. Мастильний матеріал, що знаходиться в трибо-сполученні вал-вкладень, володіє індивідуальними властивостями, які не змінюються в «базовому» варіанті в незалежності від системи, в якій він знаходиться, і агрегатними властивостями.

Індивідуальні властивості можна розділити на групи:

реологічні властивості (в'язкість, індекс в'язкості, пьезо-коефіцієнт в'язкості, час релаксації);

теплові властивості (питома теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт теплового розширення, теплота випаровування і т. д.);

електричні властивості (питомий опір, діелектрична проникність, коефіцієнт діелектричних втрат);

оптичні властивості (коефіцієнти заломлення світла, рефракції, абсорбції, дисперсії світла і т.д.);

інші – властивості, для яких важко знайти якусь загальну назву (густина, стисливість, температура застигання, температура займання, температура кипіння і т.д.).

Відмінною характеристикою мастильного матеріалу, що входить в дану ТС, є його здатність утворювати структурно впорядковані граничні мастильні шари, що володіють властивостями рідких кристалів. При цьому відбувається відміну деяких індивідуальних властивостей тонких шарів рідини від аналогічних властивостей у великому обсязі [7-9].

До агрегатних властивостей мастильного матеріалу відносяться його здатність до адсорбції і хемосорбції, схильність до піно-утворення та, емульгування, поверхневий натяг, здатність до дифузії і т.д.

Компоненти системи вал - мастильний шар - вкладень виконують взаємний вплив. Ця взаємодія буде різним у залежності від того, чи знаходиться ТС в статичному або динамічному стані. У динамічному стані зовнішні впливи викликають додаткові процеси, які в статичному стані відсутні, і підвищують інтенсивність процесів, що відбуваються в статичному стані.

У ТС «вхід» рівнозначний впливу навколишнього середовища на систему. Під зовнішнім впливом на таку систему зазвичай розуміється сукупність полів механічних і електрохімічних сил, хімічних реакцій і

теплових полів, При цьому для системи вал - мастильний шар - вкладень підшипника необхідно враховувати наступні дії:

- а) кінетичну (швидкість ковзання, гідродинамічна швидкість);
- б) динамічну (механічна сила, нормальний тиск);
- в) теплову (температура, тепловий потік, градієнт температур).

Беручи до уваги, що внаслідок кінетичного і динамічного впливу в систему вводиться механічна енергія, а в результаті теплового впливу – теплота, можна зробити висновок, що зовнішні впливи мають енергетичний характер. Кінетичні, динамічні та теплові впливи відіграють основну роль в трибологічних процесах.

Механічні дії діють головним чином на деталі пари тертя і тільки через них на мастильний матеріал і мікросередовище системи. Теплові впливи можуть викликати зміни деталей і термохімічні зміни мастильного матеріалу. Так як частина роботи тертя перетворюється в теплоту, температура в ТС і температура «виходу» вище температури навколишнього середовища. Зовнішні впливи змінюють не тільки трибологічні процеси, але і структуру системи.

За «вихід» в будь-якій ТС, в тому числі і системі вал - мастильний шар - вкладень підшипника, приймається вплив системи на навколишнє середовище. Його можна визначити також як реакцію системи на зовнішній вплив або як наслідок трибологічних процесів в системі.

При передачі енергії через ТС неминуче відбуваються її втрати, які можна розділити на три фази. При введенні енергії (роботи) в зону трибологічного контакту утворюється фактична поверхня контакту. Потім відбувається дисипація (розсіювання) енергії: накопичення енергії, емісія, перетворення накопиченої енергії в теплоту і ентропію.

Характеристики мастильного матеріалу, що входить в систему вал - мастильний шар - метал, як правило, описуються з точки зору гідродинамічної теорії мащення. При цьому враховуються тільки «об'ємні»

властивості мастильного матеріалу, і не розглядаються аномалія цих властивостей, що відбувається в тонких граничних шарах і обумовлює їх рідкокристалічної структурою.

Внутрішнє тертя, особливо в твердих тілах, є їх властивість, заснованим на здатності незворотного перетворення в теплоту механічної енергії, переданої тілу в процесах деформації. Процесу деформації супроводжує порушення термодинамічної рівноваги тіла. Внутрішнє тертя включає в себе два явища: непружність – відступ від законів теорії пружності крім відсутності пластичних деформацій і здатність до грузлої протидії течії, яка аналогічна в'язкості рідини або в'язко-пружних тел.

У першому випадку внутрішнє тертя пов'язане з непружними, або релаксаційним, властивостями, які не вдається описати за допомогою рівнянь теорії пружності. При деформації з кінцевою швидкістю в трибологічних процесах, зазвичай дуже великий, в твердому тілі або в зоні його молекулярної дії відбувається відхилення від термодинамічної рівноваги, що викликає відповідний релаксаційний процес (повернення в стан рівноваги). Цей процес супроводжується розсіюванням енергії пружності, тобто незворотним перетворенням її в теплоту. Внутрішнє тертя в другому випадку, тобто явище, аналогічне в'язкості рідини і тому зване квазі-в'язкістю, виникає при впливі на тіло сил, що призводять до перевищення межі пружності і пластичного течією матеріалу в результаті переміщень уздовж площин ковзання. Теплота, що виділяється в зоні контакту деталей ТС, температура і градієнт температур призводять до структурних і фазових перетворень в поверхневих шарах цих деталей.

Таким чином, рідкокристалічні властивості мастильного матеріалу, що знаходиться в системі вал - мастильний шар - вкладень підшипника суднових МОД, безпосередньо впливають на процеси передачі теплової енергії палива в механічну роботу і процеси передачі потужності дизеля споживачеві енергії.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА СТРАТИФИКАЦІИ В'ЯЗКОСТІ МОТОРНОГО МАСТИЛА, ЩО ВИНИКАЄ ПРИ РОБОТІ ТРИБО-СПОЛУЧЕНЬ СУДНОВИХ МАЛО-ОБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

3.1. Реологічні характеристики мастильного матеріалу, що знаходиться в зоні тертя підшипників кривошипно-шатунного механізму судових дизелів

Реологічна модель мастильного матеріалу, що знаходиться в зазорі вал - вкладень підшипника, може бути представлена «подвійної» течією на різних фазах розділу: вал - граничний шар, граничний шар - об'ємна рідина - граничний шар, граничний шар - вкладень підшипника. По лінії граничний мастильний шар - об'ємна рідина відбувається розрив в структурі мастильного матеріалу і перехід течії з ньютонівської рідини в неньютонівську (рис. 3.1).

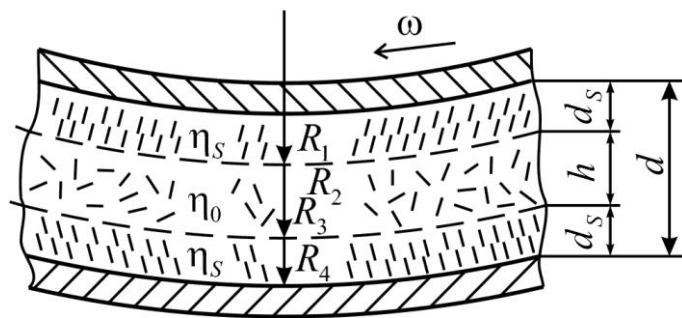


Рис. 3.1. Реологічна модель мастильного матеріалу, що знаходиться в зазорі вал - вкладень підшипника

З рішення крайової задачі з урахуванням зчеплення поточної рідини зі стінками і умов сполучення швидкостей в'язких напружень на кордонах областей

$$\left. \begin{aligned} V_1(R_1) &= 0; \\ V_1(R_2) &= V_2(R_2); \\ V_3(R_3) &= V_2(R_3); \\ V_3(R_4) &= \omega R_4; \\ \sigma_1(R_2) &= \sigma_2(R_2); \\ \sigma_2(R_3) &= \sigma_3(R_4) \end{aligned} \right\}$$

визначаються напруги сили в'язкого тертя, яке пов'язане зі швидкістю

$$\sigma_{R\varphi} = \eta \left(\frac{\partial V_R}{\partial R} - \frac{V_\varphi}{R} \right);$$

на межі $R=R_1$ рівне:

$$\sigma_{R\varphi} = \frac{2\eta_s \omega}{\frac{R_1^2}{R_4^2} - 1 - \left(\frac{\eta_s}{\eta_{об}} - 1 \right) \left(\frac{R_1^2}{R_2^2} - \frac{R_1^2}{R_3^2} \right)},$$

і момент сили тертя, що діє на вкладень підшипника з шириною B :

$$M_1(R_1) = \frac{4\pi\eta_s B \omega}{\frac{1}{R_4^2} - \frac{1}{R_1^2} - \left(\frac{\eta_s}{\eta_{об}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_2^2} - \frac{1}{R_3^2} \right)}.$$

У наближенні $d/R \ll 1$ для моменту сил в'язкого тертя з урахуванням товщини ізотропної рідкої фази $h=(d-2d_s)$ виходить більш простий вираз

$$M_1(R_1) = \frac{2\pi BR^2 \eta_{об} \gamma}{1 - \frac{2d_s}{d} \left(1 - \frac{\eta_{об}}{\eta_s}\right)}.$$

Значення для моменту сили тертя можливо визначити експериментально [10], використовуючи вираз

$$M_2 = 2\pi BR^2 \eta_{роз} \gamma,$$

$\eta_{роз}$ – розподілене значення в'язкості олійною прошарку товщиною d .

Прирівнявши аналітичне M_1 і експериментально отримане M_2 значення для моментів, можливо отримати співвідношення, що зв'язує коефіцієнт «розподіленої» в'язкості $\eta_{роз}$ прошарку товщиною d з коефіцієнтом в'язкості «об'ємної» рідини $\eta_{об}$, в'язкістю граничних шарів η_s і з їх подвоєною товщиною $2d_s$ в прошарку:

$$\eta_{роз} = \frac{\eta_{об}}{1 - \frac{2d_s}{d} \left(1 - \frac{\eta_{об}}{\eta_s}\right)},$$

звідки товщина граничного шару дорівнює

$$d_s = \frac{\frac{d}{2} \left(1 - \frac{\eta_{об}}{\eta_{роз}}\right)}{\left(1 - \frac{\eta_{об}}{\eta_s}\right)}.$$

Величину коефіцієнта в'язкості $\eta_{об}$ можливо визначити експериментально для великих розмірів мастильного шару (або в звичайному

обсязі досліджуваної рідини), коли наявність граничного шару не позначається на в'язкості прошарку (так, наприклад, коли $d \gg d_s$, $\eta_{\text{роз}} = \eta_{\text{об}}$).

Умова $d \gg d_s$ виконується як в капілярних, так і в ротаційних віскозиметрах (що не виключає визначення в'язкості в обох приладах).

3.2. Моделювання процесів зміни реологічних характеристик суднових моторних мастил

Як зазначалося раніше, основними режимами тертя і пов'язаного з ним змазування є гідродинамічний і граничний. Незважаючи на прагнення забезпечити гідродинамічний режим змащення при роботі підшипників ковзання суднових дизелів, процес змащування 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 оксидів і відкладення нагару, що також сприяє зменшенню зазору і переходу з гідродинамічного в режим змішаного і граничного тертя [11].

При експлуатації ММ в дизелі відбувається зміна його фізичних і хімічних властивостей. Крім того, при цьому змінюються і його реологічні характеристики, і в першу чергу в'язкість.

Більшість дисперсних систем 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 реологічним властивостями 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.

Утворення поблизу твердої поверхні (особливо металевої) структурованих рідкокристалічних шарів з анізотричної формою молекул призводить до помітної відмінності фізичних властивостей тонких прошарків рідини від їх властивостей в «об'ємній» фазі. Помітна структурна неоднорідність граничних мастильних шарів, визначаючи неньютонівський характер в'язкої течії, значним чином впливає на дисипативні властивості мастильного матеріалу, особливо в трібоузлах, що працюють в режимі граничного і змішаного тертя.

З метою підтвердження цього вислову виконувалося моделювання процесів тертя, що відбуваються при змащенні циліндропоршневої групи (ЦПГ) та підшипників КШМ суднового дизеля 12K98ME-C7 фірми DOOSAN-MAN-B&W, який встановлено як головний двигун на судні дедвейтом 131360 тонн. Основні характеристики дизеля:

тип дизеля – двотактний, крейцкопфний;

номінальна потужність – $N_{\text{ном}}=54120$ кВт;

номінальна частота обертання - $n_{\text{ном}}=97$ об⁻¹;

кількість циліндрів – 12;

діаметр циліндра – $D=0,98$ м;

хід поршня – $S=2,66$ м;

система змащування ЦПГ – лубрикаторная (циліндрова);

система змащування підшипників колінчастого вала – циркуляційна.

Завданням дослідження було визначення явища стратифікації в'язкості мастила, що виникає в граничному змащувальному шарі при зміні зсувних навантажень, які (в свою чергу) залежать від частоти обертання колінчастого вала дизеля.

Діапазон експлуатаційних режимів розглянутого дизеля визначається частотами обертання від мінімально стійкої n_{\min} до максимально допустимої номінальної $n_{\max}=1,03n_{\text{ном}}$ і лежить в інтервалі 53...100 об⁻¹. Тоді, з урахуванням геометричних розмірів вкладення підшипника, швидкість зсуву в зазорі пари тертя вал - вкладень складе $\dot{\gamma}=20...110 \text{ с}^{-1}$.

Визначення в'язкості масла в граничному змащувальному шарі при різних швидкостях зсуву виконувалося за допомогою ротаційного віскозиметра, розробленого Б. А. Алтоїзом і С. В. Кіріяном [12] (рис. 3.1).

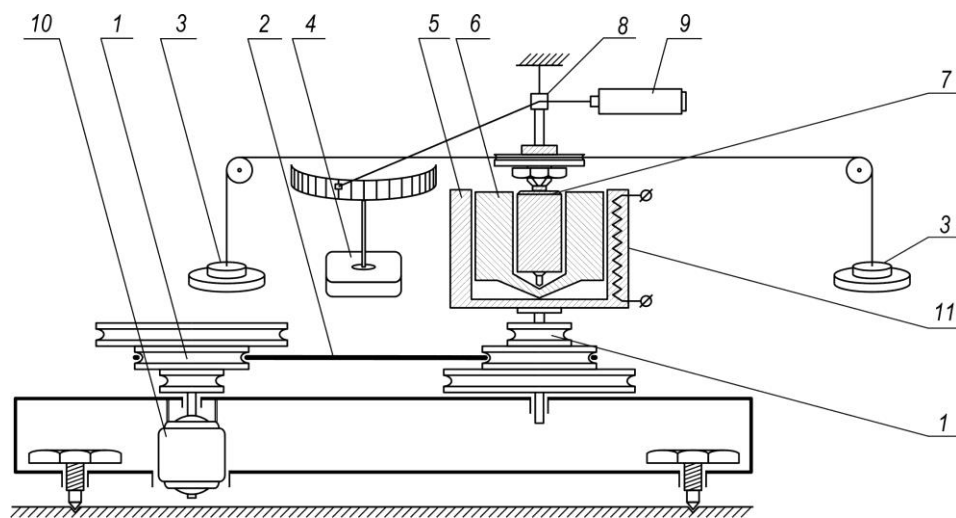


Рис. 3.1. Схема ротаційного віскозиметра:

- 1 – шківи; 2–ремінь; 3 – вантажі (противаги); 4 – лімб; 5 – стакан (місце посадки зовнішнього циліндра); 6 – зовнішній циліндр ротаційної пари;
7 – внутрішній циліндр ротаційної пари; 8 – дзеркало; 9 – лазер;
10 – електродвигун; 11 – електричний термометр опору

Робота віскозиметра (рис. 3.1) заснована на визначенні моменту сил в'язкого тертя, що виникає в прошарку рідини між коаксіальними циліндрами 6, 7 при обертанні зовнішнього циліндра в склянці 5. Привід здійснюється від електродвигуна 10 через ремінну передачу 2 системи шківів 1. Вимірником крутного моменту сил в'язкого тертя служить система противаг 3. Можливість варіювання масою цих противаг забезпечує значний діапазон вимірювань величини в'язкості досліджуваних масел (10...200 сСт) і

швидкостей їх зсувних деформації ($\dot{\gamma}=10...10^4 \text{ c}^{-1}$). За кутом відхилення ϕ променя, що визначається по лімбі 4, відбитого від дзеркала 8 при його освітленні лазером 9, розраховувався повертальний момент, якій компенсує момент сил в'язкого тертя. Ширина зазору між циліндрами 6 і 7 (товщина прошарку рідини) задається варіюванням діаметрів набору внутрішніх змінних циліндрів. Температурний режим в зоні контакту можливо змінювати і контролювати за допомогою електричного термометра опору 11. При цьому для різної швидкості зсуву можливо було визначити в'язкість мастильного матеріалу в граничному змащувальному шарі v_{bl} . Її величина визначалися при товщині мастильного шару 15 мкм, величина якого відповідала експлуатаційного зазору в парі тертя поршневе кільце - циліндрова втулка. Значення об'ємної в'язкості v_{vol} визначалося за допомогою капілярного віскозиметра фірми Unitor. Експерименти, як по визначенню об'ємної в'язкості v_{vol} , так і в'язкості в граничному змащувальному шарі v_{bl} , проводилися при температурі мастильного матеріалу 40°C.

Наведена установка по визначенню реологічних характеристик мастильних матеріалів, дозволяє виконувати моделювання зміни їх характеристик, що відбувається в процесі експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Визначальним фактором при моделюванні є напруга зсуву, яке відчуває ММ в зазорі пари тертя вал-вкладень, і товщина мастильного шару в цьому зазорі. При цьому основним вимірюваним параметром є в'язкість ММ. Реологічні характеристики ММ визначалися при товщині мастильного шару 20 мкм, величина якого відповідала експлуатаційного зазору в парі тертя вал - вкладень підшипника [13].

Дослідження проводилися для моторних мастил Mobilgard570 (фірми Mobil), Energol CLO50M (фірми BP), Cyltech70 (фірми Castrol), Texaco Special HT70 (фірми Chevron), основні характеристики яких наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Основні характеристики моторних мастил, що використовуються при проведенні експерименту

Параметр, розмірність	Марки моторного мастила	
	Mobilgard570	Energol CLO50M
Густина, кг/м ³	897	915
Кінематична в'язкість при 40° С, сСт	107	112
Кінематична в'язкість при 100° С, сСт	11,5	14,8
Загальне лужне число, мгКОН/г	12	15
Клас SAE	30	40

Результати вимірювань об'ємної в'язкості, а також в'язкості граничного мастильного шару при різній швидкості зсуву наведені в таблиці 3.2 і проілюстровані на рис. 3.2.

Таблиця 3.2

Результати реологічних випробувань суднових мастил

Тип мастильного матеріалу і його характеристика		Швидкість зсуву, γ , с ⁻¹					
		0	25	50	75	100	125
Мастило Mobilgard570	Об'ємна в'язкість, $\nu_{об}$, сСт	107					
	В'язкість граничного мастильного шару, $\nu_{гр}$, сСт	118	103	101	98	94	93
Мастило Energol CLO50M	Об'ємна в'язкість, $\nu_{об}$, сСт	112					
	В'язкість граничного мастильного шару, $\nu_{гр}$, сСт	124	114	109	107	106	105

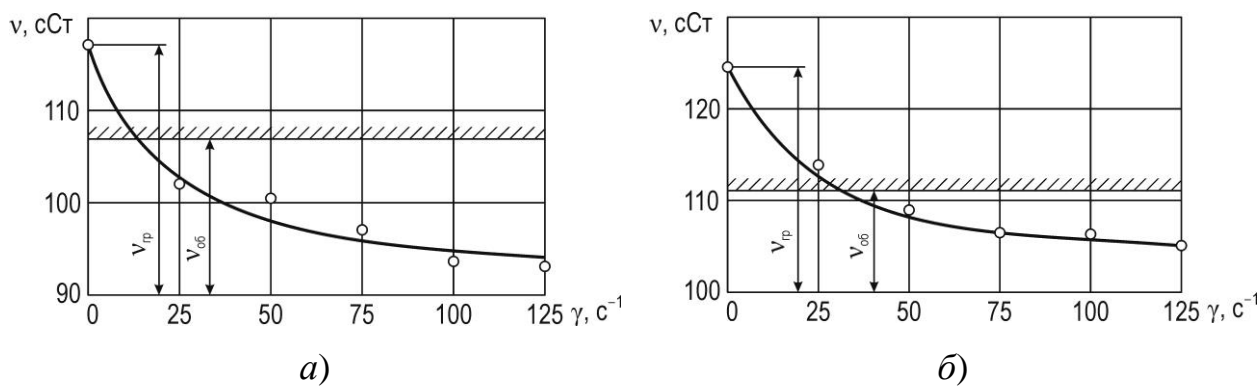


Рис. 3.2. Залежність в'язкості моторного мастила від швидкості зсуву при товщині мастильного шару 20 мкм:

а) мастило Mobilgard570 (фірми Mobil);

б) мастило Energol CLO50M (фірми BP)

Аналогічні результати були отримані для суднових ММ Cyltech70 (фірми Castrol), Texaco Special HT70 (фірми Chevron) [14].

Слід зазначити, що при відсутності зсувних навантажень, а також при початковому русі контактуємих поверхонь, в'язкість граничного мастильного шару на 10...12% перевищує об'ємну в'язкість мастила. Цей ефект особливо важливий для пускових режимів роботи суднових ДВЗ, коли в початковий період роботи дизеля ще не створюється необхідний тиск мастила в трибо-сполученні вал - вкладень.

Встановлена в результаті проведених досліджень залежність в'язкості v від швидкості зсуву γ (рис. 3.2), підтвердила «неньютонівський» характер перебігу мастильного матеріалу у вузькому зазорі пари тертя вал-вкладень підшипника. Крім того, отримані результати підтвердили твердження про те, що граничні мастильні шари, що утворюються на металевій поверхні тріади тертя вал - мастило - вкладень підшипника, більш в'язкі і володіють орієнтаційною впорядкованістю молекул [15].

Стратифікація в'язкості по ширині мастильного шару підтверджує рідкокристалічну структуру граничного шару моторного мастила в вузькому зазорі між поршневим кільцем і втулкою циліндра. У діапазоні швидкостей

зсуву $\gamma' = 0 \dots 400 \text{ c}^{-1}$ (що відповідають основним експлуатаційним режимам роботи суднових мало-обертових дизелів), стратифікація в'язкості різних моторних мастил становить (0,9...1,12) значення об'ємної в'язкості v_{vol} . Для моторних мастил, досліджуваних в роботі, стратифікація в'язкості моторного мастила показана на рис. 3.3, де верхня частина діаграми відповідає відсутності зсувних зусиль ($N_e = 0 \text{ kWt}$), а нижня – зсувними зусиллям при максимальному навантаженні ($N_e = N_e^{\text{max}}$).

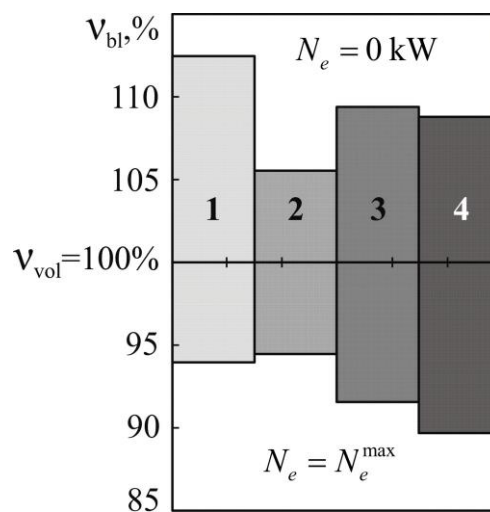


Рис. 3.3. Діаграма стратифікації в'язкості суднових моторних мастил в залежності від навантаження дизеля:

- 1 – моторне мастило Mobilgard570; 2 – моторне мастило Energol CLO50M;
3 – моторне мастило Cyltech70; 4 – моторне мастило Texaco Special HT70

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. Зростання швидкості зсуву призводить до зменшення в'язкості граничного мастильного шару.

3. Для моторного мастила необхідно розрізнити в'язкість в великому обсязі $\nu_{об}$ («об'ємну» в'язкість) і в'язкість в граничному змащувальному шарі $\nu_{гр}$ («граничну» в'язкість), яка має більше значення, що пояснюється виникненням орієнтаційної впорядкованості молекул в граничному змащувальному шарі.

4. Реологічні властивості мастильного матеріалу, що знаходиться в зазорі вал - вкладень підшипника, необхідно розглядати як подвійну течію на різних фазах розділу: вал - граничний шар, граничний шар - об'ємна рідина - граничний шар, граничний шар - вкладень підшипника. По лінії граничний мастильний шар - об'ємна рідина відбувається розрив в структурі мастильного матеріалу і перехід течії з ньютонівської рідини в неньютонівську.

5. Механічні навантаження, які діють на впорядковані молекулярні шари граничного мастильного шару, призводять до їх деструкції, що викликає зниження його в'язкості і зменшення демпфуючих властивостей мастила.

6. При збільшенні частоти обертання валу дизеля (а, отже і швидкості поршня) в мастильному шарі виникають зсувні зусилля, що сприяють зменшенню його в'язкості. Цей факт необхідно враховувати при виборі сорту мастила для змащування пари тертя вал - вкладень, а також при визначенні бракувальних показників мастила, тому що і в тому і в іншому випадку

визначається значення в'язкості для великого об'єму рідини, а експлуатація пари тертя вал - вкладень відбувається при значеннях в'язкості, характерних для граничного шару.

7. Слід зазначити, що при відсутності зсувних навантажень, а також при початковому русі поверхонь, що контактують, в'язкості граничного мастильного шару на 10...12% перевищує об'ємну в'язкості мастила. Цей ефект особливо важливий для пускових режимів роботи суднових дизелів, коли швидкість переміщення валу ще не дозволяє рівномірно розподілити мастильну плівку по поверхні підшипника і створити необхідний режим змащування.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Трофимов С. А. Нефтяные топлива, используемые в судовых энергетических установках / С. А. Трофимов. – Николаев : НКИ, 2012. – 336 с.
2. Лашхи В. Л. Представление об эксплуатационных свойствах топлив и смазочных материалов как коллоидных систем / В. Л. Лашхи // Химия и технология топлив и масел. – 1996. – № 3. – С. 32-33.
3. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм ; пер. с англ. И. А. Лавыгина ; под. ред. В. Г. Куличихина. – М. : Колос, 2003. – 312 с.
4. Кириян С. В. Эпитропные жидкокристаллические слои синтетических масел и их влияние на сдвиговое течение / С. В. Кириян, Б. А. Алтоиз // Физика аэродисперсных систем. – 2008. – № 45. – С. 72-77.
5. Курс загальної фізики : підручник у 6 т. / за загал. ред. В. А. Сминтини. – Одеса : Астропринт, 2011. – Т. 1 : С. В. Козицький, Д. Д. Полищук. Механіка. – Одеса : Астропринт, 2011. – 472 с.
6. Гаркунов Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов, Э. Л. Мельников, В. С. Гаврилюк. – М. : КНОРУС. 2017. – 408 с.
7. Алтоиз Б. А. Физика приповерхностных слоев жидкости / Б. А. Алтоиз, Ю. М. Поповский. – Одесса : Астропринт, 1996. – 152 с.
8. Сагин С. В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей / С.В. Сагин, Д. В. Мацкевич // Судовые энергетические установки: Одесса, 2010. – Вып. 26. – С. 116-125.
9. Поповский Ю. М. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения / Ю. М. Поповский, С. В. Сагин, С. А. Ханмамедов, М. Н. Гребенюк // Вестник машиностроения. – 1996. – № 6. – С. 7–11.

10. Кириян С. В. Реология моторных масел с квазижидко-кристаллическими слоями в триаде трения / С. В. Кириян, Б. А. Алтоиз // Трение и износ. – 2010. – Т. 31 ; № 3. – С. 312–318.

11. Мацкевич Д. В. Управление реологическими характеристиками моторных масел судовых дизелей / Мацкевич Д. В. // Проблемы техники. – 2013. – № 2. – С. 52-60.

12. Алтоиз Б. А. Ротационный вискозиметр для исследования микронных прослоек / Б. А. Алтоиз, С. К. Асланов, А. Ф. Бутенко // Физика аэродисперсных систем. – 2005. – № 42. – С. 53–65.

13. Кривой М. А. Обеспечение режимов смазывания подшипниковых узлов судовых малооборотных дизелей при режимах пуска и реверса / М. А. Кривой // Суднова енергетика : стан та проблеми : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 74-78.

14. 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

15. Sagin S. V. Marine Slow-Speed Diesel Engine Diagnosis with View to Cylinder Oil Specifigarion / 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