10.31653/smf46.2023. 67-78

Заблоцький Ю.В.
Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ МАЩЕННЯ ЦИЛІНДРОВОЇ ГРУПИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Двигуни внутрішнього згоряння морських суден (дизелі) є найпоширенішим типом теплових двигунів суднових енергетичних установок. Сьогодні дизелі використовуються на всіх типах суден, включаючи як вітрильні, так і судна з ядерною установкою. При цьому за своїм призначенням вони можуть бути головними (якщо їхня потужність передається на гребний гвинт) та допоміжними (коли їхня потужність використовується електричним генератором). Функціювання суднових дизелів забезпечується різними системами, однією з яких є система мащення. Головним компонентом даної системи вважається моторне мастило, яке виконує функції як мащення, також і охолодження деталей, які воно поділяє. Для суднових дизелів одним із відповідальних вузлів є циліндрова група, подача моторного мастила до якої здійснюється окремою системою [1, 2].

Аналіз основних досліджень і публікацій. Забезпечення процесів мащення основних вузлів суднових дизелів (пар тертя поршневе кільце – втулка циліндра та вкладиш підшипника – колінчатий вал) є одним з основних завдань, що розв'язуються під час експлуатації суднових дизелів [3, 4]. Підтримання необхідних режимів мащення в цих вузлах забезпечує надійність [5, 6], ефективність [7, 8] та економічність [9, 10] роботи дизеля та суднової енергетичної установки. Якість процесу мащення забезпечується своєчасною подачею необхідної кількості мастила на дзеркало циліндрової втулки [11, 12] та підтриманням необхідного тиску в системі циркуляційного мащення [13, 14]. При цьому через змінні динамічні та температурні навантаження виникають постійні зміни експлуатаційних показників мастила, насамперед в'язкості, густини, лужного числа та температури спалаху. Несвоєчасно встановлення цих змін, або ігнорування їх виникнення призводить до погіршення процесу мащення, збільшенню механічних контактів поверхонь, які поділяє мастило, що з часом сприяє підвищенню зносу цих елементів та виникненню аварійних ситуацій.

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення діапазону зміни в'язкості мастила (як однієї його з його експлуата-

ційних характеристик) під час зміни частоти обертання колінчатого валу дизеля та, відповідно, зміни зсувних зусиль, якім піддається мастило на поверхні циліндрової втулки з боку поршня.

Виклад основного матеріалу дослідження. Робота моторного мастила у суднових дизелях супроводжується зміною його фізико-хімічного стану, у тому числі деформацією. Для мастильного матеріалу, що знаходиться в зоні контакту циліндрової групи, характерні основні ознаки деформації: наявність доданої ззовні механічної сили та зміна форми, що полягає у зміщенні частинок тіла (у даному випадку молекул мастила) щодо один до одного. У разі розгляду пари поршневе кільце – втулка циліндра як механічна сила на молекули мастила діє нормальна сила, що притискає поршень до стінки циліндра. При цьому прикладене навантаження викликає появу внутрішніх сил, що протидіють зовнішнім зусиллям, які рівні, але протилежні їм у напрямку. У мастильному шарі виникає напруга P, що дорівнює відношенню сили F до одиниці площі S:

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

Силу та напругу можна поділити на нормальні (тиск) та дотичні (напруга зсуву). Для пари тертя поршневе кільце – циліндрова втулка деструктуючу дію на мастильний шар, що сприяє зриву молекул мастила з поверхонь, які контактують, надає саме напругу зсуву, що визначається як

$$\tau = \frac{F}{S}. \qquad (1)$$

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

$$P = \frac{F}{S} = \eta \frac{du}{dx}, \qquad (2)$$

де η – динамічна в’язкість;

$\frac{du}{dx}$ – градієнт швидкості [10, 14].

З урахуванням (1) вираз (2) можна записати як

$$\tau = \eta \cdot \gamma', \qquad (3)$$

де γ' – швидкість зсуву.

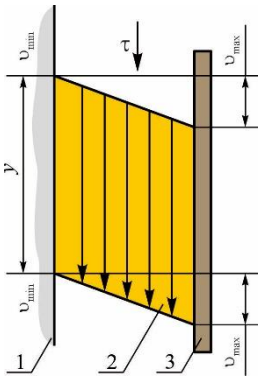


Рис. 1. Модель течії рідини між паралельними площинами:

1 – нерухома площина; 2 – рідина; 3 – площина, що рухається

Напруга зсуву та швидкість зсуву можуть бути проілюстровані моделлю паралельних площин (рис. 1), аналогічною до процесів тертя в парі поршневе кільце – циліндрова втулка.

Напруга зсуву τ викликає характерну картину пошарового розподілу швидкостей у шарі рідини [15].

Максимальна швидкість течії спостерігається біля межі розділу рідини з площиною, що рухається [16].

У міру віддалення від рухомої площини швидкість течії знижується та на відстані у від неї (на межі з нерухомою площиною) $\upsilon_{min}=0$. Швидкість зсуву γ' являє собою градієнт швидкості поперек зазору та математично виражається у вигляді диференціала

$$\gamma' = \frac{d\upsilon}{dy}, \quad \frac{\text{м/с}}{\text{м}} = \text{с}^{-1}. \tag{4}$$

Більшість технічних рідин (зокрема моторне мастило) відносяться до дисперсних систем і мають аномальний характер в'язкості, тобто вони не підпорядковуються закону Ньютона. Такі системи рідини називаються неньютонівськими. Їхня в'язкість є функцією напруги та зсуву. До подібних систем можна віднести структуровані тонкі шари мастильного матеріалу, що знаходиться у вузькому зазорі пари тертя втулка циліндра – поршневе кільце. Наявність просторової структури надає цим системам своєрідні механічні властивості, а саме пружність, міцність, пластичну в'язкість. Відмінною характеристикою мастильного матеріалу, що поділяє металеві поверхні пар тертя, є його здатність утворювати структурно впорядковані граничні мастильні шари, що мають властивості рідких кристалів. При цьому відбувається відмінність деяких індивідуальних властивостей тонких шарів рідини від їх аналогічних властивостей у великому об’ємі [17]. Рідкокристалічний стан граничного шару мастильного матеріалу

призводить до анізотропії ряду його властивостей, зокрема таких як оптична та діелектрична проникність, в'язкість, міцність [18, 19].

Основними режимами тертя та пов'язаного з ним змащування, що відбуваються в суднових дизелях, є гідродинамічний та граничний. Незважаючи на прагнення забезпечити гідродинамічний режим мащення в трибосполученні поршневе кільце – циліндрова втулка суднового дизеля, процес мащення цього вузла відбувається в умовах граничного тертя. Це обумовлюється рядом причин, основна з яких – мінімізація зазору в парі тертя поршневе кільце – циліндрова втулка для забезпечення герметичності камери згоряння з метою максимального перетворення енергії газів, що розширюються в циліндрі, на корисну роботу. Крім того, в процесі експлуатації на поверхнях названої пари тертя відбуваються утворення окислів та відкладення нагарів, що також сприяє зменшенню зазору та переходу з гідродинамічного в режим змішаного та граничного тертя. Уявлення про режими мащення циліндрової групи суднових дизелів можна проілюструвати з прикладу моделі, показаної на рис. 2.

Гідродинамічний режим мащення спостерігається в тих місцях, де мастильний матеріал поділяє поверхні поршня та втулки. У парі тертя поршневе кільце – циліндрова втулка режим тертя та мащення змінюється на граничний. Це пов'язано з тепловим розширенням кільця (завдяки наявності «кільцевого» замку), а також з виконанням кільцем компресійної дії, коли на верхню та

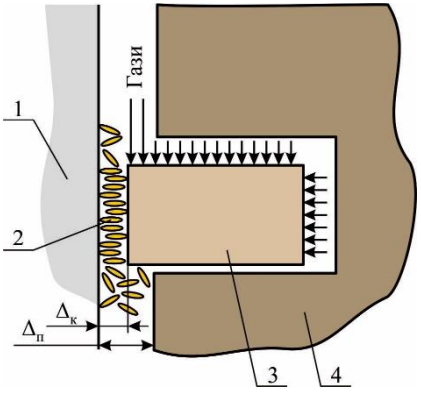


Рис. 2. Модель трибологічної системи циліндрова втулка – мастильний матеріал – поршневе кільце: 1 – втулка циліндра; 2 – мастильний матеріал; 3 – кільце; 4 – поршень

внутрішню частину кільця діють гази, а зовнішня поверхня кільця притискається до поверхні циліндрової втулки. При цьому зазори в парах тертя поршень – втулка $\Delta_п$ та кільце – втулка $\Delta_к$ мають різне значення та відповідають різним режимам змащування.

Характеристики мастильного матеріалу, що входить до трибологічної системи поршневе кільце – мастильний шар – втулка циліндра, як правило, описуються з точки зору гідродинамічної теорії мащення. При цьому враховуються лише «об'ємні» властивості мастильного матеріалу та не розглядаються аномалія цих властивостей, що відбувається в тонких граничних шарах та яка обумовлена їхній рідкокристалічною структурою.

Під час експлуатації моторного мастила відбувається зміна його фізичних і хімічних властивостей. З іншого боку, змінюються також реологічні характеристики мастила та у першу чергу в'язкість.

Неодноразово зазначалося, що характеристики тонких шарів мастила, що утворюються в умовах граничного тертя, залежать не тільки від структурного стану мастила, але також від дії твердої підкладки, поблизу якої вони знаходяться [20, 21]. Утворення поблизу твердої поверхні (особливо металевої) структурованих рідкокристалічних шарів з анізометрічною формою молекул призводить до помітної відмінності фізичних властивостей тонких прошарків рідини від їх властивостей в об'ємній фазі. Одним із параметрів, величина якого має різне значення для випадків об'ємної рідини та граничного шару, є в'язкість.

З метою підтвердження цього висловлювання виконувалося моделювання процесів тертя, що відбуваються під час мащення циліндрової групи суднового дизеля 12K98ME-C7 MAN-B&W, що має номінальну потужність 54120 кВт при номінальної частоті обертання 97 об/хв.

Мастило, що знаходиться в зазорі пари тертя, поршневе кільце – втулка циліндра, піддається напрузі зсуву. Швидкість зсуву γ', згідно з (4) може бути розрахована як

$$\gamma' = \frac{\upsilon_п}{h_к}, \qquad (5)$$

де $\upsilon_п$ – середня швидкість поршня, м/с, яка, своєю чергою, визначається як

$$\upsilon_п = \frac{Sn}{30}, \qquad (6)$$

де S – хід поршня, м;

n – частота обертання коленчатого валу, об/хв;

$h_к$ – висота поршневого кільця, м.

Діапазон експлуатаційних режимів дизеля визначається частотами обертання від мінімально стійкої n_{min} до максимально допустимої (яка на 3 % більша за номінальну $n_{ном}$) $n_{max}=1{,}03n_{ном}$ і знаходиться в інтервалі 53...100 об/хв. Тоді, з урахуванням геометричних розмірів поршневого кільця дизеля $h_к=0{,}025$ м, а також згідно з (5) і (6), швидкість зсуву в зазорі пари тертя поршневе кільце – втулка циліндра становитиме $\gamma'=188…355$ с$^{-1}$. Моделювання подібних процесів тертя у лабораторних умовах виконувалось за допомогою експериментальної установки, основу якої складав ротаційний віскозиметр [22, 23]. При цьому для різної швидкості зсуву можна було визначити в'язкість мастильного матеріалу в граничному мастильному шарі $\nu_{гр}$. Її величина визначалась при товщині мастильного шару 15 мкм, величина якого відповідала експлуатаційному зазору в парі тертя поршневе кільце – циліндрова втулка.

Значення об'ємної в'язкості $\nu_{об}$ визначалося за допомогою капілярного віскозиметра фірми Unitor.

Експерименти, як щодо визначення об'ємної в'язкості $\nu_{об}$, також в'язкості в граничному мастильному шарі $\nu_{гр}$, проводилися при температурі мастильного матеріалу 40°С. Лабораторні дослідження проводилися для моторних масел Energol CLO50M (BP) та Texaco Special HT70 (Chevron). Дані моторні мастила мають рівноважні значення основних характеристик (табл. 1), тому можуть бути зіставлені під час проведення експерименту.

Таблиця 1. Основні характеристики моторних масел, що використовувались під час проведення експерименту

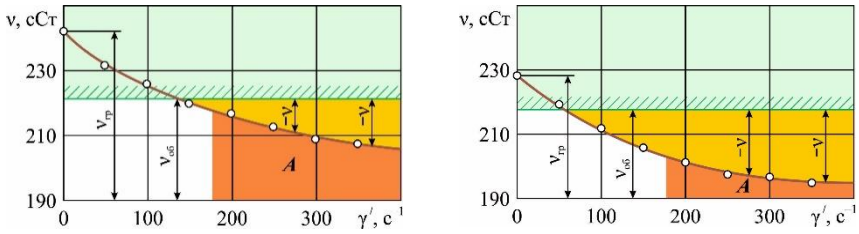
Характеристика	Energol CLO50M	Texaco Special HT70
Індекс SAE	50	50
Кінематична в’язкість при 40°С, сСт; при 100°С, сСт	217 19,5	221 20
Остаточне лужне число (Total Base Number – TBN), мгKOH/г	50	50
Густина при 15°С, кг/м^3	940	940
Температура спалаху, °С	215	

Результати вимірювань наведено у табл. 2. При цьому в ній для швидкості зсуву γ', відповідної експлуатаційним режимам дизеля 12K98ME-C7, наведено значення об'ємної в'язкості $\nu_{об}$ та в'язкості граничного мастильного шару $\nu_{гр}$, отриманих в лабораторних умовах.

Таблиця 2. Результати реологічних випробувань суднових мастил

Мастила та його характеристика		Швидкість зсуву, γ', $с^{-1}$				
		0	50	100	150	200
Texaco Special HT70	Об'ємна в'язкість, $\nu_{об}$, сСт	222	222	222	222	222
	В'язкість в граничному шарі, $\nu_{гр}$, сСт	242	233	225	221	207
Energol CLO50M	Об'ємна в'язкість, $\nu_{об}$, сСт	217	217	217	217	217
	В'язкість в граничному шарі, $\nu_{гр}$, сСт	228	218	213	206	203

За результатами табл. 2 побудовано залежності в'язкості від швидкості зсуву $\nu=f(\gamma')$, що показані на рис. 3. Зазначимо, що залежності мають ідентичний характер і відрізняються лише інтенсивністю зниження в'язкості зі збільшенням швидкості зсуву.



а) *б*)

Рис. 3. Залежності в'язкості моторного мастила (у граничному шарі ,$\nu_{гр}$ та у великому обсязі $\nu_{об}$) від швидкості зсуву γ' при товщині масляного шару 15 мкм:
а) моторне мастило Texaco Special HT70; *б*) моторне мастило CLO50M; ***A*** – область експлуатаційних режимів роботи дизеля

Встановлена в результаті проведених досліджень залежність в'язкості ν від швидкості зсуву γ' (рис. 3), підтвердила «неньютонівський» характер течії мастильного матеріалу в вузькому зазорі пари тертя поршневе кільце – втулка циліндра.

Збільшення в'язкості в граничному шарі за відсутності зсувних навантажень пояснюється наявністю у ньому орієнтаційно впорядко-

ваних молекул. Зниження в'язкості пов'язане з появою зсувних зусиль, що впливають на мастильний шар.

Стратифікація в'язкості підтверджує рідкокристалічну структуру граничного шару в вузькому зазорі між поршневим кільцем та втулкою циліндра. В діапазоні швидкостей зсуву γ'=0…400 $с^{-1}$ (що відповідають основним експлуатаційним режимам роботи суднових малообертових дизелів), стратифікація в'язкості розглянутих моторних масел становить (0,89…1,09) від значення об'ємної в'язкості $\nu_{об}$. Для моторних мастил, досліджуваних у роботі, діапазон значень стратифікації в'язкості моторного мастила показано на рис. 4.

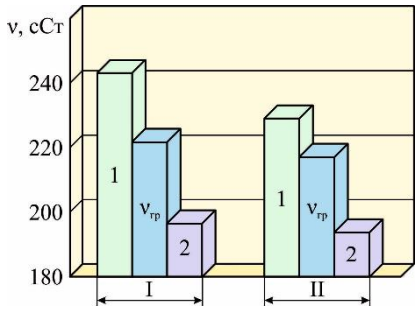


Рис. 4. Діаграма стратифікації в'язкості суднових моторних мастил залежно від швидкості зсуву (відповідно частоти обертання валу дизеля):
I – мастило Texaco Special HT70; II – мастило Energol CLO50M;
1 – в'язкість граничного шару, $\nu_{гр}$, за відсутності зсувних зусиль (γ'=0, $с^{-1}$); 2 – в'язкість граничного шару, $\nu_{гр}$, при швидкості зсуву (γ'=350, $с^{-1}$); $\nu_{об}$ – об’ємна в’язкість

Висновки та перспективи подальших досліджень. Як результат виконаних досліджень визначимо наступне.

Під час збільшення частоти обертання валу дизеля (а, отже і швидкості поршня) в мастильному шарі виникають зсувні зусилля, які сприяють зменшенню його в'язкості. Цей факт необхідно враховувати під час вибору сорту мастила для мащення циліндрової групи, а також під час визначенні бракувальних показників мастила, тому що в тому та в іншому випадку визначається значення в'язкості для великого обсягу рідини, а експлуатація циліндрової групи дизелів відбувається за значеннях в'язкості, характерних для граничного шару.

Під час відсутності зсувних навантажень, а також під час початкового руху поверхонь, що контактують, в'язкість граничного мастильного шару на 8…9 % перевищує об'ємну в'язкість мастила. Цей ефект особливо важливий для пускових режимів роботи суднових дизелів, коли швидкість переміщення поршня ще не дозволяє рівномірно розподілити мастильну плівку по поверхні циліндрової втулки та забезпечити необхідний режим мащення.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sagin S., Madey V., Sagin A. Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.

2. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.

3. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

4. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

5. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 69 - 80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

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

7. Заблоцкий Ю.В. Использование регулярного микрорельефа для оптимизации работы топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 36. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 65 - 73.

8. Заблоцкий Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 83 - 92.

9. Звєрьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

10. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. Зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 -100.

11. Богач В. М. Эксплуатационная проверка эффективности модернизированной системы смазывания цилиндров двигателей RTA / В. М. Богач, А. Н. Шебанов // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 36. – Одесса : ОНМА. – С. 41-49.

12. Богач В.М., Довіденко Ю.М., Дуранов О.П. Особливості роботи лубрикаторних систем суднових довгоходових двигунів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 53 - 63. 10.31653/smf44.2022. 53-63.

13. Столярик Т.О. Прогнозування механічних втрат в суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 142-156. doi: 10.31653/smf44.2022.142-156.

14. Сагін С.В., Кривий М.О. Розрахунок контактного тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 84-92. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-84-92.

15. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса : ОНМУ. – С. 78-88.

16. Кириян С.В., Алтоиз Б.А. Эпитропные жидкокристаллические слои синтетических масел и их влияние на сдвиговое течение // Физика аэродисперсных систем. – 2008. – № 45. – С. 72-77.

17. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки :

сборник научных статей. – Одесса : ОНМА, 2010. – Вып. 26. – С. 116-125.

18. Мацкевич Д.В., Сагин С.В. Диагностирование структурного состояния углеводородных жидкостей по их электрической прочности // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. – Одесса : ОНМУ. .– 2012. – № 2. – С. 38-46.

19. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : науково-виробничий журнал. – Одесса : ОНМУ. – 2011. – № 3. – С. 78–88.

20. Popovskii A.Yu, Altoiz B.A., Butenko V.F. Structural Properties and Model Rheological Parameters of an ELC Layer of Hexadecane // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – № 92(3). – P. 703 - 709.

21. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

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

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