

УДК 621.432

Сагін С.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

**ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ В ПРЕЦИЗІЙНИХ ПАРАХ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ**

The possibility of reducing energy losses in precision vapors of the fuel equipment of marine diesel engines through the use of special organofluorine coatings is considered. The aim of the study was to determine the method of processing the contact surfaces of high pressure fuel equipment of marine diesel engines, which ensures minimal energy losses in the tribological system of the plunger - fuel - hub of the high pressure fuel pump while maintaining the specified power of the internal combustion engine.

It is indicated that for precision pairs of high-pressure fuel equipment as a method to reduce wear on their contacting surfaces, epilation (application of organic coatings) can be used. Studies to determine the effect of organic coatings on the energy efficiency of a precision pair of plunger - hub of a high-pressure fuel pump were performed in the following sequence: development of technology for applying epilams on the surface of plungers of a high-pressure fuel pump; determining the thickness of epilam nanolayer adsorbed on a metal surface; study of the effect of nanolayer epilame on the formation of a boundary layer of fuel; determination of tribotechnical characteristics of the tribological system plunger - fuel - bushing of a high pressure fuel pump.

During the experiments, the following epilams Polisam-05, Polisam-20MSK and Akwaline were used, having a maximum operating temperature of 450°C and allowing short-term operation to a temperature of 700°C.

The application of epilams on precision surfaces was carried out by volumetric immersion. The determination of the thickness of the adsorbed epilam layer and the boundary layer of fuel formed on the metal surface was carried out on an ellipsometric unit.

As a result of research, it was established that the thickness of the epilam layer on the surface of the plungers of the high-pressure fuel pump is 12.5...18.7 nm, and the time required for its adsorption does not exceed 10 minutes. An epilamic layer deposited on a metal surface results in a

~1.5-fold increase in the thickness of the boundary layer of the fuel, which contributes to an increase in the elastic properties and proppant pressure of the fuel that separates the precision pair of hub-plunger of the high-pressure fuel pump. The application of organic coatings on the surfaces of precision pairs of a high-pressure fuel pump contributes to an increase in the energy efficiency of this tribological system, which (depending on the operating time of the internal combustion engine) results in a 24.0...44.6% reduction in the wear of the plungers.

**Ключевые слова:** судовой дизель, топливный насос высокого давления, граничный слой топлива, эпилам, энергетические потери, износ плунжера топливного насоса

**Ключові слова:** судновий дизель, паливний насос високого тиску, граничний шар палива, епілам, енергетичні втрати, знос плунжера паливного насоса

**Keywords:** marine diesel, high pressure fuel pump, boundary layer of fuel, epilam, energy losses, wear of fuel pump plunger

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Робота будь-яких механізмів, що здійснюють поступальний або обертальний рух, відбувається з неминучими втратами потужності і корисної енергії. З метою мінімізації цих втрат контактують деталі поділяються шаром рідини, що забезпечує мастильний ефект. При цьому в залежності від зазору між контактуючими деталями та умовами їх роботи забезпечується гідродинамічний або граничний режим змащення. В умовах граничного змащення (або граничного тертя) контактуючі поверхні розділені тонким шаром змазує рідини, яка завдяки свої пружно-демпфуючим властивостям забезпечує працездатність вузла тертя. Одним з трибо-вузлів, що працюють в режимі граничного тертя, є прецизійна пара плунжер-втулка паливного насоса високого тиску (ПНВТ) двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) [1].

Тривала експлуатація суднових дизелів без суттєвих змін показників робочого процесу в більшій мірі залежить від стану паливних насосів і форсунок, надійність роботи яких визначається трибо-технічними показниками – якістю виготовлення і станом прецизійних пар. Погіршення стану прецизійної пари плунжер-втулка призводить до погіршення процесу стиснення і впорскування палива. Крім того, при цьому порушується синхронізація руху плунжера ПНВТ і ходу

поршня дизеля, що призводить до відхилень в законі подачі палива. Ще одним наслідком погіршення технічного стану прецизійних пар ПНВТ є виникнення протікання палива і зменшення його циклової подачі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В сучасних суднових ДВЗ тиск, що створюється ПНВТ, досягає 180...200 МПа, що можливо забезпечити при високій якості прецизійної пари втулка-плунжер. В таких умовах трибологічна система плунжер-паливо-втулка працює в режимі граничного тертя, а паливо, що входить до складу цієї системи, виконує функції мастильного матеріалу. У дослідженнях, виконаних в [2], зазначалося, що суднові палива, які характеризуються більш високою мастильною здатністю, забезпечують менші втрати енергії на подолання сил тертя, що для паливної апаратури високого тиску відповідає підтримці необхідного значення циклової подачі палива. В якості методу підвищення пружно-демпфуючих властивостей палива пропонувалося використання регулярного мікрорельєфу на поверхні плунжерів ПНВТ [3], проте для цього потрібно не тільки проведення додаткових розрахунків, а й спеціальна апаратура, а також стаціонарні умови виконання технологічних операцій зі зміни профілю плунжерів.

**Постановка завдання.** З огляду на викладене, метою дослідження було визначення способу обробки контактуючих поверхонь паливної апаратури високого тиску суднових дизелів, при якому забезпечуються мінімальні втрати енергії в трибологічній системі плунжер-паливо-втулка ПНВТ при одночасній підтримці заданих потужних характеристик ДВС.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** При граничному терті (або граничному змащенні) однією з головних характеристик мастильного шару (який формується завдяки орієнтаційної впорядкованості молекул) є його товщина. Підвищення товщини орієнтаційно впорядкованого граничного шару забезпечує більшу міцність мастильної плівки, знижуючи, таким чином, коефіцієнт тертя в трибо-сполученні. Для збільшення товщини граничних шарів, що утворюються вуглеводними рідинами (паливом і мастилом), використовують спеціальні поверхнево-активні речовини (ПАР) або присадки, які з різною концентрацією додають в базові палива або мастила [4]. У разі, коли граничний шар утворюється паливом на поверхні плунжера

ПНВТ, даний варіант неприйнятний, оскільки при будь-якій концентрації присадок збільшується циклова подача і, відповідно, час впорскування. Крім того, як правило, присадки, що вводяться, мають вартість, яка перевищує вартість як мастила, так і палива. При використанні ПАР в циркуляційних системах змащування їх функціональні властивості використовуються тривалий період часу і можуть відновлюватися в процесі експлуатації. ПАР, які додані в паливо, згорають в циліндрі. Тому для палив використовуються ПАР, що активують процес згорання, а застосування ПАР, що сприяють збільшенню товщини граничного шару палива, якій знаходиться в трибо-сполученні плунжер-втулка є недоцільним ще й з фінансової точки зору.

Для прецизійних пар паливної апаратури високого тиску як метод, що сприяє зниженню зносу їх контактуючих поверхонь, може бути рекомендовано використання епіламів. Як робоче середовище для процесу використання епіламів широкого поширення набули розчини перфторполіефіркіслоти загального вигляду  $Rf-COOH$  ( $Rf$  – радикал, що містить фтор) в хладачах. При використанні епіламів на поверхні твердого тіла утворюється плівка товщиною до 30 нм, яка не впливає на дислокаційну структуру і твердість металу, а її поверхнева енергія залежить від виду епілама і не залежить від епіламуемого матеріалу. Основна функція епіламуемого шару полягає в утриманні мастильного матеріалу в зоні тертя енергетичним бар'єром на кордоні «метал-епілам». Це досягається за рахунок збільшення крайових кутів змочування рідини, що знаходиться біля поверхні металу, покритого шаром епілама (рис. 1), а також за рахунок переспрямованості вектора дії сили поверхневого натягу рідини. При цьому збільшується товщина граничного мастильного шару і його несуча здатність.

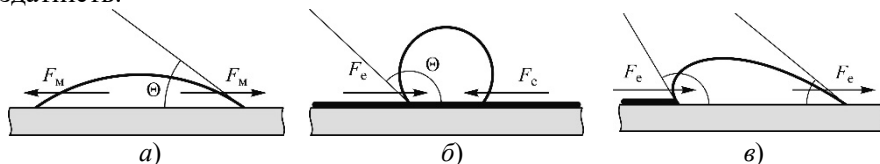


Рис. 1. Крайовий кут змочування і напрямок вектора сили поверхневого натягу рідини: а) паливо на поверхні металу; б) паливо на поверхні епілама; в) паливо на кордоні метал-епілам;  $\theta$  – крайовий кут змочування;  $F_M$ ,  $F_e$  – сили поверхневого натягу на металі і епіламі, відповідно

Застосування методу використання епіламів для прецизійної пари плунжер-втулка ПНВТ, не отримало широкого поширення в елементах судових технічних засобів. Це, в тому числі, пов'язано з консервативністю судової енергетики як науки і прагненням судового екіпажу уникнути додаткових ризиків, що виникають при впровадженні інноваційних ідей. Особливо це стосується таких відповідальних вузлів, як паливна апаратура високого тиску. Однак, при якісних попередніх дослідженнях, а також при дотриманні технології нанесення епіламів на поверхні елементів паливної апаратури високого тиску, можливо створити умови, що сприяють підвищенню їх експлуатаційних характеристик і економічності роботи дизелів [5].

Дослідження, по визначенню впливу органічних покриттів на енергетичну ефективність прецизійної пари плунжер-втулка ПНВТ, виконувалися в наступній послідовності:

- розробка технології нанесення епіламів на поверхні плунжерів ПНВТ;
- визначення товщини наночарів епіламу, адсорбованого на металевій поверхні;
- вивчення впливу наночарів епіламу на утворення граничного шару палива;
- визначення трибо-технічних характеристик трибологічної системи плунжер-паливо-втулка ПНВТ.

При проведенні експериментів були використані наступні епілами Polisam-05, Polisam-20МСК і Akwaline, що мають максимальну температуру експлуатації 450°C і допускають короткочасну експлуатацію до температури 700°C. Технологія нанесення епіламів на поверхню плунжера ПНВТ полягала в наступному. Спочатку поверхні очищалися від сторонніх домішок. Далі проводилося їх знежирення в озонобезпечному хладоне-116 ( $C_2F_6$ ) шляхом об'ємного занурення з подальшим висушуванням. Після цього при температурі навколишнього середовища проводилося безпосередньо нанесення епіламів шляхом занурення плунжерів.

Для визначення товщини шару епіламу, що адсорбується на поверхні плунжера ПНВТ, і товщини граничного мастильного шару палива, що утворюється на поверхні металу, який покритий епіламом, проводилися попередні лабораторні дослідження. Як аналог поверхні плунжера використовувалася відполірована металева поверхня

(сталь ШХ15), яка шляхом об'ємного занурення покривалася шаром епіламу. Час перебування сталевий поверхні в обсязі епіламу варіювалося в діапазоні 2...10 хв, після чого поверхні висушувалися при температурі 20°C. Товщини таким чином адсорбованого на металевій поверхні шару епілама визначалася на еліпсометричній установці, принципова схема якої показана на рис. 2.

Еліпсометрія є одним з найбільш поширених методів визначення товщини плівок (прозорих для оптичного випромінювання) за допомогою аналізу кутів відбиття світла від чистої поверхні і від поверхні з нанесеним покриттям. Результати, отримані при вимірюванні, наведені в табл. 1.

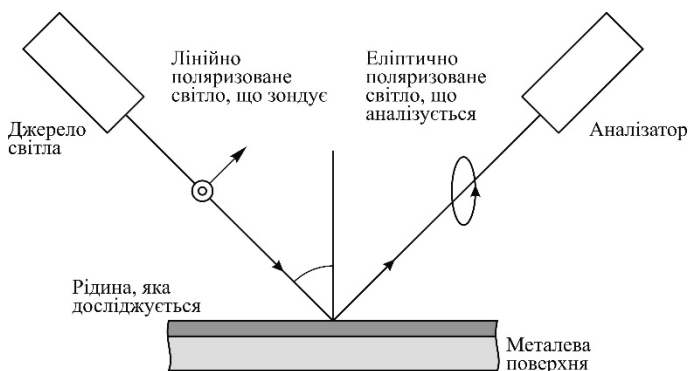


Рис. 2. Принципова схема еліпсометричної установки

Таблиця 1. Результати по визначенню адсорбованої товщини шару епіламу

Час знаходження металевий поверхні в розчині епіламу, $t$ , хв	Товщина адсорбованого шару епілама, $h$ , мм		
	Polisam-20MCK	Akwaline	Polisam-05
2	6,3	9,1	10,7
4	10,4	13,3	14,3
6	12,3	16,2	14,5
8	12,4	17,6	14,6
10	12,5	18,7	14,6

Номограма, що характеризує товщину адсорбованої плівки різних епіламов в залежності від часу їх нанесення показана на рис. 3.

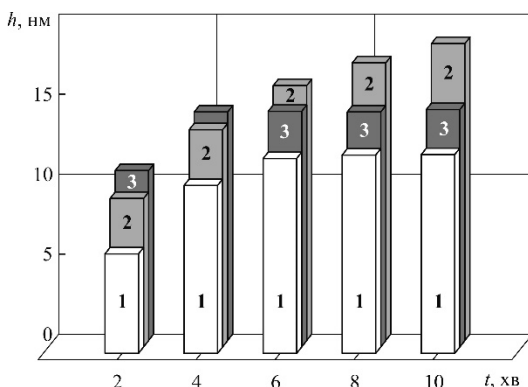


Рис. 3. Залежність товщини органічної плівки від часу знаходження металеві поверхні в різних епіламах:

1 – Polisam-05; 2 – Polisam-20MCK; 3 – Akwaline

Як видно з наведених даних (табл. 1. і рис. 3), після 6...10 хв знаходження металеві поверхні в розчині епіламу товщина адсорбційної органічної плівки на металевій поверхні стабілізується і для різних зразків коливається в діапазоні  $h=12,5...18,7$  нм. Використання епіламів сприяє утворенню граничних мастильних шарів підвищеної (у порівнянні з поверхнею, на яку не наносились епілами) товщини. Схема утворення граничних шарів при нанесенні на металеву поверхню фторорганічних сполук показана на рис. 4, а визначення їх товщини може бути виконано способом еліпсометрії (див. рис. 2).

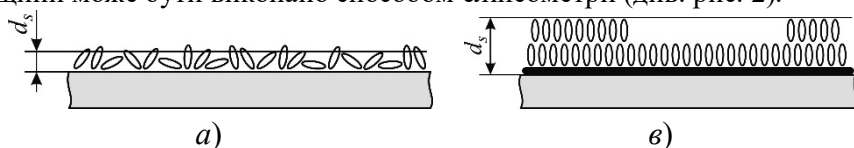


Рис. 4. Утворення граничного мастильного шару на різних поверхнях:  
а) без використання епіламу; в) при використанні епіламу

Результати даних експериментів наведені на рис. 5, де під позначенням ВП мається на увазі безпосередня товщина граничного шару «чистого» важкого палива, що утворюється на металевій поверхні, а під цифрами 1, 2, 3 – товщина граничного шару важкого палива, що утворюється на тій же поверхні при її покритті шаром епіламу. Як випливає з наведених результатів, використання епіламів забезпечує 1,47...1,52 кратне збільшення товщини граничного шару палива.

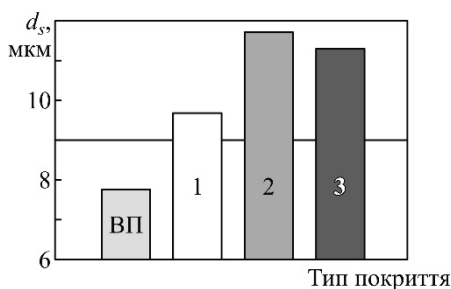


Рис. 5. Зміна товщини граничного шару палива при нанесенні епіламів на металеву поверхню: ВП – відсутність покриття (безпосередня товщина граничного шару важкого палива); 1 – Polisam-05; 2 – Polisam-20MCK; 3 – Akwaline

Енергетична ефективність будь-якої трибологічної системи оцінюється величиною втрат, до яких відносяться: втрати енергії на тертя (визначені коефіцієнтом тертя) і втрати матеріалу в результаті руйнування поверхонь тертя (визначені інтенсивністю зношування). Тому, подальші дослідження розглянутого способу зниження енергетичних втрат при терті за рахунок керування структурою мастильного шару палива полягали у визначенні зносу поверхонь плунжерів які були покриті шаром епіламу, а також тих, що знаходяться в звичайному стані. Дослідження виконувалися на судновому дизелі 6L18 MAN-Diesel. На плунжера ПНВТ, що забезпечують подачу палива в циліндри №№ 1 і 4, не наносилися шари епіламу. Як покриття поверхонь плунжерів використовувалася фторорганічні рідини Polisam-20MCK (яка наносилась на плунжера ПНВТ №№ 2 і 5) і Akwaline (яка наносилась на плунжера ПНВТ №№ 3 і 6). Згідно з попередніми дослідженнями, використання цих епіламів сприяє утворенню орієнтаційно впорядкованих граничних шарів найбільшої товщини (див. рис. 4).

Через проміжки часу, що відповідали 380, 820, 1210, 1640 і 2180 годинам роботи дизеля (тривалість яких обумовлювалася умовами експлуатації, що дозволяють виконати зупинку дизеля і ревізію його ПНВТ) виконувалося визначення площі зносу поверхні плунжерів (як зі шаром епіламу, так і таких, що працюють без нанесення цього покриття). Після чого отримані значення для кожної групи плунжерів усереднювалися, а дизелі знову вводилися в експлуатаційний режим



роботи. Результати досліджень наведені в табл. 2 і узагальнені у вигляді номограми на рис. 6.

Таблиця 2. Результати вимірювання зносу плунжерів ПНВТ

Час роботи плунжера, години	Площа зносу поверхні плунжера, мм <sup>2</sup>		
	без нанесення епіламу	з нанесенням шарів епіламу	
		Polisam-20MCK	Akwaline
380	129	98	94
820	153	103	99
1210	181	113	116
1640	209	121	126
2180	224	124	128

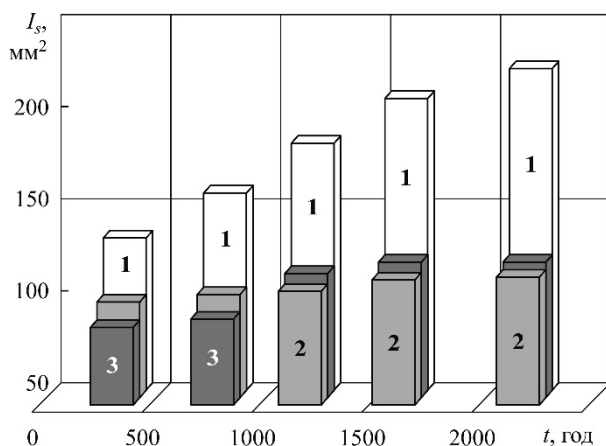


Рис. 6. Залежність зносу  $I_s$  плунжерів ПНВТ від часу роботи  $t$  суднового дизеля 6L18 MAN-Diesel:

- 1** – для плунжера без використання епіламу;
- 2** – для плунжера з нанесеним шаром епіламу Polisam-20MCK
- 3** – для плунжера з нанесеним шаром епіламу Akwaline

При проведенні експериментів через кожні 100 годин роботи проводилося періодичне індиціювання дизеля. При цьому циліндри з однотипним станом плунжерів ПНВТ (без використання епіламу, з нанесеним шаром епіламу Polisam-20MCK, з нанесеним шаром епіламу Akwaline) по черзі відключалися і по зміні частоти обертання виконувалася оцінка розподілу навантаження по циліндрах дизеля. В результаті було встановлено, що при зміні стану поверхонь плунжерів

за рахунок використання епіламів навантаження на різні циліндри дизеля не змінюється.

Результати вимірювань наведені на рис. 6, з якого випливає, що реалізація в граничних шарах палива орієнтованої структури молекул і управління його товщиною за рахунок додаткового нанесення епіламів на прецизійні поверхні дозволяє в значній мірі знизити зношування плунжерних пар ПНВТ, підвищивши, таким чином, надійність і довговічність роботи даного вузла дизеля. Зменшення зносу прецизійної пари тертя плунжер – втулка ПНВТ також свідчить про зниження енергетичних витрат на забезпечення роботи цих елементів і підтверджує ефективність застосування методу використання епіламів.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Проведені дослідження і отримані результати дозволяють зробити наступні висновки.

Експлуатація трибологічної систем плунжер-втулка ПНВТ відбувається в режимі граничного тертя, а шар палива, що розділяє їх поверхні, виконує функції мастильного матеріалу.

Для прецизійної пари паливної апаратури високого тиску плунжер-втулка як метод, що сприяє зниженню контактних навантажень, які виникають на їх поверхнях, може бути використано нанесення епіламів.

Товщина шару епіламу на поверхні плунжерів ПНВТ складає 12,5...18,7 нм, а час, необхідний для його адсорбції не перевищує 10 хв.

Наношар епіламів, нанесений на металеву поверхню, призводить до ~1,5-кратного збільшення товщини граничного шару палива, що сприяє підвищенню пружних властивостей і розклинюючого тиску палива, що розділяє прецизійну пару втулка-плунжер ПНВТ.

Нанесення органічних покриттів на поверхні прецизійних пар ПНВТ сприяє підвищенню енергетичної ефективності даної трибологічної системи, що (в залежності від часу експлуатації ДВЗ) визначається в 24,0...44,6%-му зниженні зносу плунжерів.

Нанесення епіламів відноситься до категорії сучасних нанотехнологічних методів, вимагає попередніх досліджень щодо визначення оптимальних видів органічних покриттів і часу їх нанесення на прецизійні поверхні, але при цьому не викликає додаткових трудовитрат

при його використанні на річкових і морських судах, підвищує енергетичну ефективність трибологічних систем ДВЗ і може враховуватися при розробці методики визначення параметрів СЕУ [6].

### СПИСОК 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. – 2016. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 200-208.

2. Заблоцкий Ю. В. Обеспечение смазочных свойств дизельных топлив / Ю. В. Заблоцкий // Единый всероссийский научный вестник, 2016. – № 7. – С. 69-75.

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

4. Алтоиз Б. А. Влияние жидкокристаллической присадки на структурные характеристики приповерхностных ориентационно-упорядоченных слоев вазелинового масла / Б. А. Алтоиз, С. В. Кирьян, Е. А. Шатагина // Инженерно-физический журнал, 2013. – Т. 86. – № 2. – С. 371-374.

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

6. Golikov V. A. A simple technique for identifying vessel model parameters / V. A. Golikov, V. V. Golikov, Ya. Volyanskaya, O. Mazur, O. Onishchenko // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. 4th International Scientific Conference SEA-CONF 2018, Published by IOP Publishing Ltd, 2018. – Vol. 172. – № 012010. – P. 1-8. – doi :10.1088/1755-1315/172/ 1/012010