

10.31653/smf46.2023. 5-16

Богач В.М., Обертюр К.Л., Довіденко Ю.М.  
Національний університет Одеська морська академія

## АНАЛІЗ УМОВ ПОДАЧІ МАСТИЛА В ЦИЛІНДРИ СУДНОВИХ ДВЗ

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Широке використання альтернативних палив усіх видів і низькоякісних сортів палив нафтового походження, поряд з підвищенням економічності, вимагає значного збільшення надійності суднових ДВЗ, а також зниження трудовитрат на їх обслуговування.

Виходячи з цього, одночасно з освоєнням дизелів нових поколінь, особливу значущість набуває підвищення техніко-економічних показників суднових двигунів шляхом збільшення ефективності систем, що забезпечують їх роботу. Для флоту це найбільш реальний шлях суттєвого скорочення питомих витрат палива та мастила, збільшення ресурсу та підвищення безвідмовності роботи СДВЗ.

Відомо, що ці показники та витрати на обслуговування дизелів насамперед залежать від працездатності циліндропоршневої групи (ЦПГ), тобто вузла, який у двигунах найбільш навантажений і визначає техніко-економічні показники роботи не тільки ДВЗ, а й судна в цілому.

Тому, створення нових поколінь або модернізація існуючих дизелів, збільшення їх потужності та підвищення економічності супроводжується необхідністю постійного пошуку можливостей зниження зносу деталей ЦПГ. Однак, складність та недостатня вивченість умов їх роботи, з урахуванням зазначеної вище спрямованості розвитку дизелів, не дозволяє вважати проблему забезпечення надійності ДВЗ вирішеною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тривалі спостереження [1,3] за роботою суднових дизельних двигунів показують, що характер розподілу зношування втулок має помітний зв'язок з розподілом мастила по поверхням тертя.

Підвищений, або інтенсивний знос втулок циліндрів і поршнів, втрата рухливості, знос і поломка поршневих кілець, інтенсивне відкладення нагару та задирання деталей ЦПГ не є рідкістю [1,2].

Для найбільш форсованих дизелів (особливо останніх випусків), у яких питомі витрати циліндрових масел лежать в межах 1,0...1,5 г/квт.г., розтин циліндрів проводиться всього через 2...4 тис. годин,

причому часто із заміною всього комплексу компресійних кілець через їх знос і поломку.

У всіх дизелів з лубрикаторними системами, на головках поршнів навпроти мастильних отворів, є місцеві відкладення нагарів рис.1, а на дзеркалі втулок, які проходять по вертикалях через ці отвори, незмінно існують смуги натирань і місцевого вироблення, що виявляється навіть без вимірювань. Ці загальні ознаки є безперечним свідченням впливу на стан ЦПГ не тільки якості масла, а й досконалості його подачі.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – полягає у встановленні взаємозв'язків процесу подачі мастила лубрикаторними системами з надійністю роботи та станом деталей ЦПГ.

**Викладення матеріалу дослідження.** Встановлено [1,4], що при постійному протитиску, що створюється в камері, зі штуцера звичайної конструкції відбувається нормальний вихід масла, а падіння протитиску супроводжується значним збільшенням порції з каналу. Після цього подача починається тільки через деякий проміжок часу, необхідний для заповнення штуцера.

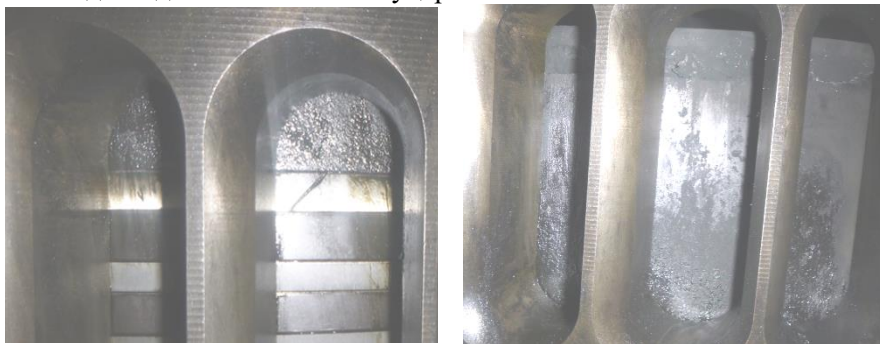


Рис. Характер місцевих відкладень на поверхнях поршня

Отже момент подачі масла і його кількість будуть визначатися не профілем кулака або шайби лубрикатора, а зміною тиску газу в циліндрі. Звідси, розташування мастильних отворів по висоті втулки може виявитися істотно важливим.

Дослідження на прозорій моделі циліндра показують доцільність розташування цих отворів у нижній частині втулки, так як при верхньому їх розташуванні в канали і навіть за безповоротний клапан проникають гази. Це порушує режим витрати масла, крім того, висока температура газів викликає його розкладання.

Вплив газів на зміну якості масла і розподіл його по дзеркалу в залежності від рівня розташування отворів було помічено і рядом інших дослідників. Однак, аналіз існуючих конструкцій лубрикаторних систем показує, що конструкція їх нагнітального тракту не обумовлена будь-якими факторами, що визначають процес надходження масла в циліндр.

Масляні отвори повинні бути розташовані на дзеркалі ЦВ з урахуванням рівномірного розподілу масла по поверхні циліндра. Це особливо важливо для дизелів, що працюють на сірчистих сортах палив і лужних циліндрових мастилах.

Для ефективного захисту втулки від корозійного зносу, нейтралізуючі властивості масляної плівки повинні бути достатніми не тільки в районах виходу масла, а й між ними. Тим часом питання розподілу масла і своєчасної зміни його на дзеркалі циліндра вивчено недостатньо. Вирішення цього питання є кінцевою метою всієї організації змащування циліндра і головним завданням проектування лубрикаторної системи.

Саме в цьому рішенні криється можливість суттєвого зниження зносів, нагароутворень та витрати дефіцитних циліндрових мастил. Це питання залежить від кількості точок змазування. Природно, чим їх більше, тим рівномірніше розподілиться масло по повернях тертя і знос ЦПГ буде меншим. Але збільшення числа штуцерів, при прагненні до мінімальної подачі масла, викликає труднощі в його дозуванні.

За існуючими уявленнями, рівномірність розподілу масла частково вирішується канавками, що виходять від мастильних отворів. Канавки можна зустріти різних розмірів, нахилів і форм. Відомо, що зі зростанням температури інтенсифікуються процеси окислення вуглеводнів мастила. З деякого рівня в ньому зростає вміст смол, асфальтенів, карбенів, карбоїдів і оксикислот, з яких останні при подальшому нагріванні в присутності кисню конденсуються в клейкоподібну масу, що покриває поверхні ЦПГ лаковою плівкою.

Будучи поганим провідником, лак порушує умови теплопередачі. Наприклад, утворення на внутрішній поверхні поршня відкладень товщиною 0,5 мм (при масляному охолодженні) достатньо, щоб підвищити температуру днища на 200°C. Крім того, липка поверхня лакових відкладень на кільцях, втулці і поршні сприяє осіданню продуктів неповного згоряння палива, продуктів зносу, механічних до-

мішок та ін. утворюють щільні абразивні нагари, що погіршують умови роботи циліндра [5,6].

Таким чином, наведені факти ще раз вказують на великий вплив в організації змащування циліндрів кожного елемента системи маслоподачі. У цих умовах недоліки систем не виявляються й не усуваються, а лише компенсуються підвищенням вимог до якості циліндрових масел, створення яких, як відомо, і без того є дорогим і складним завданням у загальній проблемі вдосконалення організації змащування циліндрів двигунів.

При стійкої спрямованості форсування сучасних малооборотних дизелів, незважаючи на помітне зростання питомих витрат і застосування змащувальних матеріалів високої якості, недоліки існуючих систем маслоподачі проявляються все більш виражено.

Це говорить про те, що можливості існуючих мастил компенсувати недосконалість маслоподаючих пристроїв підходять до межі, за якою нормальна робота форсованих дизелів можлива тільки при зниженій потужності, або при використанні будь-яких нових, скажімо, синтетичних мастил, здатних виконувати свої функції в більш жорстких умовах подачі, ніж масла на мінеральній основі. Однак, ефект використання будь-яких мастил в значній мірі залежить від того, як і куди вони подаються системами.

Для поліпшення процесу подачі масла і підвищення ефективності систем, що знаходяться в експлуатації, необхідно спростити геометрію частини нагнітального тракту, розміщену між безповоротним клапаном і дзеркалом циліндра. При цьому особливу увагу необхідно приділити останній ділянці масляного тракту, що розміщена на зрізі дзеркала ЦВ, так званій предкамері.

В умовах різкого наростання тиску зсередини циліндра, рис.2 і послідовним настільки ж різким його падінням, на ділянках предкамери можна очікувати виникнення перепаду, що обумовлює формування потоку газу над вільною поверхнею масла рис.3, деформацію цієї поверхні і, зрештою, виникнення явища "захлинання".

Складність гідродинамічних процесів, що відбуваються в передкамері і на стику "нагнітальний тракт системи - циліндр", практично повна недоступність їх для вивчення на двигуні, дуже обмежені уявлення про фактичні умови, що визначають вихід масла в циліндр вимагають експериментальних досліджень роботи системи мащення циліндрів в лабораторних умовах наближених до реальних.

Зародження та розвиток процесу подачі масла в циліндр відбувається переважно в ті періоди, коли у маслопідводних отворів переміщується пояс компресійних кілець, організуючи імпульсне падіння (на стисненні) і наростання (на розширенні) тиску газів, що діють в області зрізу каналу зсередини циліндра. Проте, канали і масляні отвори на дзеркалі втулки приховані від спостережень ще більшою мірою, ніж розпилювачі форсунок. Ця відсутність обумовлює серйозні труднощі в дослідженнях.

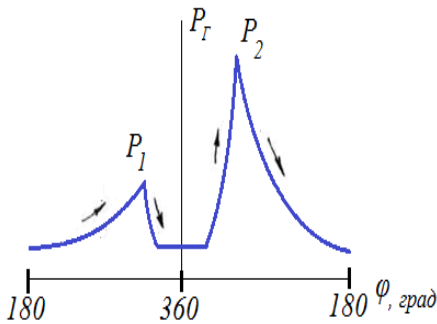


Рис.2. Характер зміни тиску на масло в предкамері

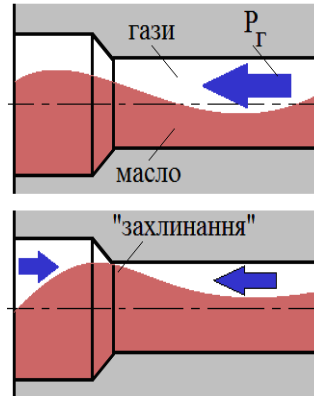


Рис. 3. Характер дії тиску газів на масло в предкамері

Але якщо перед масляними отворами задати такий самий тиск, який виникає перед ними при русі поршня, то вивчення процесу витікання масла в циліндр стає можливим на безмоторному. Дослідження роботи лубрикаторної системи можливо і в умовах реального двигуна якщо приєднати в нагнітальний тракт системи камеру з прозорими стінками і необхідну вимірювальну апаратуру з відповідними датчиками.

Безсумнівно, що в умовах ударної зміни тиску у зрізу вихідного отвору, як це відбувається в передкамері на двигуні, процес "захлинування" рис.4, що призводить по суті до замикання певної газової порожнини і подальшого її стиснення, протікає в багато разів різкіше, а , отже, під іншими перепадами. Тому, в період падіння тиску у вихідного зрізу, стиснуті в передкамері газів здатні зробити метання частини масла, яке потрапляє в порожнину циліндра над поршнем і залишає на його поверхні відповідні сліди.

Для розглянутої ділянки системи, критична швидкість газу, при якій в тонкому шарі рухливої в'язкої рідини, що обдувається газами,

виникає явище «захливання» при малих витратах, справедлива наступна залежність:

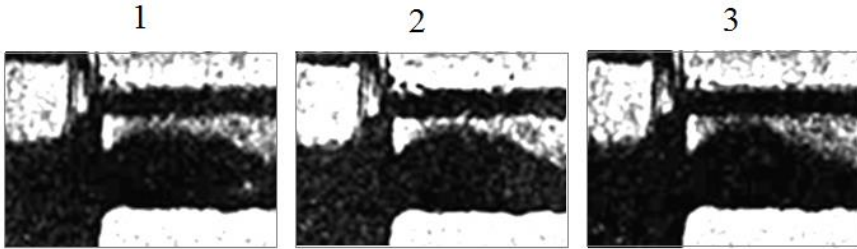


Рис.4. Кінокадри процесу формування «захливання» в каналі

$$g_{кр} = \left[ \frac{6 \cdot 10^{-3} \tau_0^8 \sigma^6 \rho^4 Q}{\mu^7 \rho_1^{11}} \right]^{0,045} + K \quad (1)$$

де:  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу;  $\tau_0$  - дотичне напруження на межі поділу мастила й газу;  $\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості;

$\rho$  - щільність мастила;

$Q = Vc/b$  - витрата мастила, тут:  $Vc$  - об'ємна витрата мастила;  $b$  - ширина мастила;  $a_0$  - середня товщина шару мастила;

$K = 2,4Q/a_0$  - фазова швидкість хвилі на поверхні шару мастила.

Для визначення дотичного напруження на межі шару мастила й газу можна скористатися наступним виразом:

$$\tau_0 = \frac{\Delta P}{L} a_0, \quad (2)$$

де:  $\Delta P$  – перепад тиску;  $L$  – довжина каналу.

Результати розрахунку (рис.5), показують, що критичне значення швидкості, при якому виникає «захливання» лежить у діапазоні 5...30 см/с.

Визначимо фактичну швидкість потоку газів, що виникає над шаром мастила, обумовлених нестационарними процесами, що відбуваються в циліндрі двигуна. Для дозвукових швидкостей газу розглянуту ділянку нагнітального тракту системи, можна вважати простим соплом, для якого швидкість витікання газу визначається не його формою, а тиском у камері й на зрізі сопла.

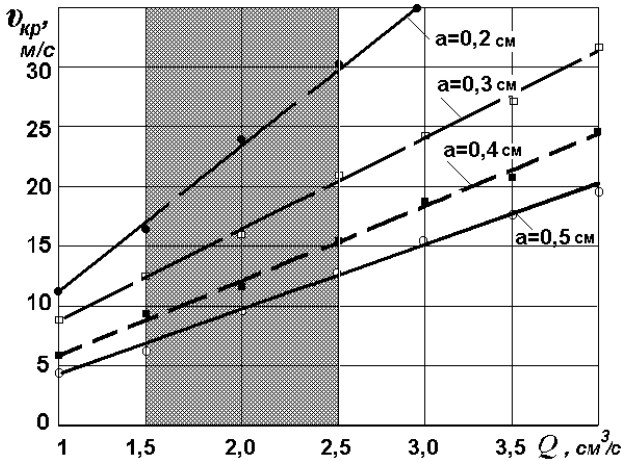


Рис.5. Характер зміни критичної швидкості

З огляду на це, для обчислення величини фактичної швидкості скористаємося формулою:

$$V_{\phi} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}} g R T \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3)$$

де:  $g$  - сила тяжіння;  $P_0$  - тиск під поршневим кільцем;  $P$  - тиск газів над поршневим кільцем.

Як показують розрахунки фактична швидкість потоку газів, що виникають над шаром мастила обумовлених нестационарними процесами, що відбуваються в циліндрах суднових двигунів перебуває в межах  $V_{\phi} = 30 \dots 40$  м/с.

Таким чином, швидкість потоку газів над вільною поверхнею ( $V_{\phi}$ ) значно більше критичної швидкості ( $v_{кр}$ ), що є підтвердженням існування умов, при яких виникає «захливання» в циліндрах суднових двигунів.

На рис.6 наведена осцилограма моментів виходу масла з предкамери в умови циліндра дизеля з синхронізованою системою, що передбачає управління моментом подачі.

З осцилограми випливає, що у цієї системи момент виходу масла з мастильного отвору, лінія  $M_B$  визначається не ходом плунжера, а рівнем протитиску газу з боку циліндра, лінія  $P_G$ .

Привід синхронізованої системи забезпечує робочий хід плунжера лубрикатора через 2...4 оберти двигуна в проміжку  $200... 260^\circ$  п.к.в., при цьому надходження масла в циліндр відбувається на кожному ході поршня. Регулярне надходження масла обумовлено приготуванням в передкамері газомасляної суміші, яка в проміжках між імпульсами тиску газів розширюється забезпечуючи надходження масла на дзеркало зменшуючимися порціями.

Таким чином, при існуючих конструкціях нагнітального тракту систем змащування, вихід масла в циліндр відбувається тільки при падінні імпульсів протитиску газів, що діють в області мастильних отворів.

Зіставляючи осцилограми процесів подачі масла, отримані на стенді, з осцилограмами дії газів, отриманими безпосередньо на двигунах, з достатнім ступенем точності можна оцінити справжній момент виходу масла в циліндр. В результаті такого зіставлення встановлено, що у дизелів з верхнім розташуванням мастильних отворів подача на висхідному ході поршня (перша фаза) починається в діапазоні  $310...320^\circ$  п.к.в., а на низхідному (друга фаза) - в діапазоні  $50...60^\circ$  п.к.в..



Рис.6. Осцилограма подачі мастила в циліндри ДВЗ синхронізованою системою

На рис.7 стосовно дизелів з верхнім розташуванням мастильних отворів наведені графічні залежності, які встановлюють кількісний зв'язок процесу подачі масла в циліндр з конструктивними характеристиками предкамери і рядом інших показників, що змінюються від умов експлуатації двигуна.



При почерговій оцінці впливу одного з перерахованих факторів на процес подачі масла, всі інші в експерименті залишалися постійними, що дозволило виявити головні з них і визначити напрямок вдосконалення існуючих предкамер, а також розробки нових конструкцій мастильних пристроїв, що являють собою заключну частина нагнітального тракту систем змащування циліндрів ДВЗ.

На осі ординат графіка відкладено кількість мастила  $G$ , що надходить у циліндр з відривом від зрізу мастильного отвору (а отже, і від дзеркала).

З графіків випливає, що збільшення обсягу предкамери, заповненого газами, призводить до значного зростання кількості масла, що надходить з відривом (так званим «викидом») від дзеркала.

Збільшення діаметра каналу  $d$  (лінія 1) призводить до значного зменшення "викиду". Розглядаючи природу явища "викиду" мастила вказувалося, що основними умовами організації цього процесу є вільні поверхні мастила в предкамері, деформація їх під дією ударних імпульсів тиску газу зсередини циліндра з подальшим утворенням гребеня, який замикає канал, замикаючи газові порожнини (див. рис.4) з одночасним їх стисненням, що відбувається до кінця підвищення тиску імпульсу.

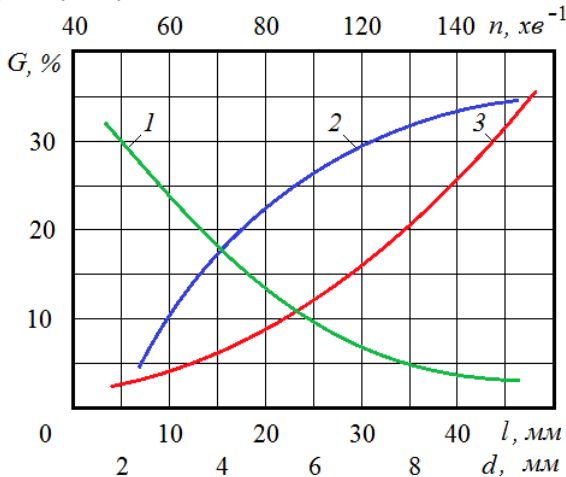


Рис.7. Характер зміни величини "викиду" мастила в порожнину циліндра від геометричних та експлуатаційних факторів.

Наведені фрагменти кінозйомки дають можливість пояснити характер зміни кількості масла, що надходить у циліндр з "викидом"

залежно від діаметра  $d$  і довжини каналу  $l$  (лінія 2), а також інших умов, що розглядаються нижче.

Збільшення діаметра каналу призводить до зменшення "викиду" мастила тому, що замикання його відбувається рідше. Крім того, зв'язок вершини гребеня з верхньою стінкою каналу стає, у міру збільшення діаметра, більш слабким і легше руйнується як при русі гребеня в глиб каналу, так і в період розширення в ньому газів.

Це приведе до більш швидкого зрівнювання тиску перед гребенем і після нього, до інтенсивного згасання інерції маси гребеня і, природно, до зниження кількості масла, що надходить в циліндр з "викидом". Формування гребеня, здатного перекрити канал, вимагає певної його довжини. У короткому каналі, за час наростання імпульсу тиску, гребінь не встигає розвинутися до розмірів, що забезпечують перекриття перерізу і замикання газової порожнини, тому в такому разі "викид" неможливий.

Разом з геометрією заклапаної порожнини, характеристика "викиду" визначається і низкою інших умов, наприклад, рівнем розташування мастильних отворів по висоті циліндра. Цей фактор зумовлює число імпульсів тиску, що діють у заклапаній порожнині за один оборот, їх величину, швидкість наростання та падіння тиску, проміжок часу між імпульсами та температуру масла в передкамері.

Якщо при русі гребеня вглиб предкамери на його шляху не буде різкого розширення, то у зв'язку з верхньою стінкою каналу виявиться велика маса масла, і тоді (при достатній довжині каналу) зі збільшенням значень імпульсів "викид" прогресуватиме.

Зростання числа обертів двигуна  $n$  (лінія 3), за інших незмінних умов, супроводжується збільшенням частоти імпульсів і явища "викиду". Це відбувається за рахунок підвищення рівня масла та наближення його вільної поверхні до верхньої стінки каналу, що сприяють більш ранньому замиканню газової порожнини гребенем. Підвищення рівня масла в каналі пояснюється скороченням часу між імпульсами та зменшенням можливостей витікання його з отворів у цей період.

Циклові подачі масла при експлуатації двигуна, особливо в періоди обкатоку, змінюються в широкому діапазоні, тому отримана графічна залежність, що вказує на зміну характеристик надходження масла в циліндр за згаданих умов, має практичне значення, оскільки вона дає кількісну інформацію про ту частину масла, яка обумовлює інтенсифікацію нагаровідкладень.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Аналіз умов подачі масла за безповоротний клапан і наслідків процесу надходження його в циліндр дозволяє зробити наступні висновки:

- формування процесу надходження масла в циліндр відбувається не в нагнітальному маслопроводі, а на ділянці між неповоротним клапаном і дзеркалом, в так званій предкамері;

- предкамера заповнена маслом лише частково, в ній присутні газові порожнини та ділянки з вільною поверхнею масла;

- витікання масла в циліндр здійснюється не під дією нагнітального ходу плунжера лубрикатора, а в результаті взаємодії з газами, що надходять в предкамеру з циліндра;

- характеристики подачі масла в циліндр не визначаються конструкцією системи до безповоротного клапана та параметрами в маслопроводі, а залежать переважно від геометричних показників предкамери;

- до стику "кільце-дзеркало циліндра" мастило надходить двома шляхами: по поршню (включаючи неробочі "гарячі" його поверхні) і безпосередньо по дзеркалу;

- вихід масла за межі каналу супроводжується некерованим закиданням його частини в порожнину циліндра над поршнем, яка переважно згоряє і в змазуванні поверхонь тертя не бере участі.

### *СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ*

1. Богач В.М. Підвищення ефективності суднових дизелів шляхом удосконалення лубрикаторних систем: Монографія / В.М. Богач – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – 294 с.
2. Богач В.М. Дослідження роботи системи «Puls» без акумулювання тиску масла / В.М. Богач, А.М. Шебанов, І.М. Слободянюк // Суднові енергетичні установки: наук-техн. зб. Вип. 39. - Одеса: НУ «ОМА», 2019. – С. 22-29.
3. Богач В.М. Особливості лубрикаторних систем дизельних двигунів MAN-B&W / В.М. Богач, Ю.М. Довиденко, І.М. Слободянюк // Суднові енергетичні установки: наук-техн. зб. Вип. 40. - Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С. 22-29.
4. Богач В.М. Аналіз умов подачі масла в циліндри дизелів морських суден / В.М. Богач, І.М. Слободянюк, А.М. Шебанов // Суднові енергетичні установки: наук-техн. зб. Вип. 41. - Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С. 20-28.

5. Богач В.М. Вплив газу на рух мастила по дзеркалу циліндра / В.М. Богач, А.М. Шебанов, Ю.М. Довіденко, І.Е.Слінський. // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вып. 43. - Одеса: НУ «ОМА», 2021. С.126-139.
6. Богач В.М. Особливості роботи лубрикаторних систем суднових довгоходових двигунів / Богач В.М., Довіденко Ю.М., Дуранов О.П. // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вып. 44. - Одеса: НУ «ОМА», 2022. С. 53-63.