

Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Суднові енергетичні установки



Науково-технічний
збірник

Випуск 48

Одеса
2024

Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник.
Вип. 48 - Одеса: НУОМА, 2024. - 213 с.

Збірник присвячено проблемам суднової енергетики, проектування, модернізації й експлуатації суднових енергетичних установок, методам підвищення ефективності та надійності використання суднових технічних засобів.

Для науковців і фахівців.

Редакційна колегія: д-р техн. наук, проф. Сагін С.В. (науковий редактор); д-р техн. наук, проф. Афтанюк В.В.; д-р техн. наук, проф. Будашко В.В.; д-р техн. наук, проф. Гвоздева І.М.; д-р техн. наук, проф. Голіков В.А.; д-р техн. наук, проф. Горб С.І.; к-т техн. наук, доц. Журавльов Ю.І.; к-т техн. наук, доц. Заблоцький Ю.В.; д-р техн. наук, проф. Захарченко В.М.; д-р фіз.-мат. наук, проф. Козицький С.В.; к-т техн. наук, проф. Колегаєв М.О.; д-р фіз.-мат. наук, проф. Малахов О.В.; д-р техн. наук, проф. Міюсов М.В.; д-р техн. наук, проф. Онищенко О.А.; к-т техн. наук, доц. Печенюк А.В.; д-р техн. наук, проф. Суворов П.С.; д-р техн. наук, проф. Хлієва О.Я.; Doctor of Technical Sciences, Senior Lectures Class A, Bendahmane Boukhalifa (Algeria)

Адреса редакційної колегії: 65029, Одеса, вул. Дідріхсона, 8,
Національний університет «Одеська морська академія» (НУОМА)

Контактні телефони редакції (067) 558-13-28

e-mail: ivanovich1zh@gmail.com

Затверджене вченою радою НУОМА, протокол №1 від
26.08.2024 р.

ISSN 1815-6770 (print)

©Національний університет "Одеська морська академія", 2024

Зміст

Богач В.М., Парменова Д.Г., Обертюр К.Л. Математична модель руху мастила по дзеркалу циліндра	5
Будашко В.В., Заблоцький Ю.В. Аналіз термодинамічних циклів охолодження природного газу під час його транспортування морськими суднами-газовозами.....	18
Козицький С. В. Застосування наноматеріалів для збільшення надійності та ресурсу суднових установок	31
Колегасв М.О., Бражнік І.Д. Забезпечення процесу інертизації вантажних приміщень нафтових танкерів за допомогою системи інертних димових газів.....	46
Корх М.В. Властивості та застосування вуглецевих нанотрубок для збільшення ресурсу судна та його обладнання.....	54
Латиш О.М. Перспективи застосування наноматеріалів та нанотехнологій в морський галузі	63
Матейко О.В. Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів	75
Половинка Е.М., Табулінський І.М. Швидкісна характеристика системи паливоподачі common rail двигунів RT-FLLEX	89
Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива.....	100
Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Аналіз ефективності морських перевантажувальних терміналів під час транспортування зрідженого природного газу суднами-газовозами.....	114
Солодовніков В.Г., Руснак Д.Ю. Використання ультразвукової обробки палива у паливних системах суднових середньооборотних дизелів	126
Черемісін В.І., Ігнатенко О.А. Дизельна форсунка з керованим уприскуванням палива в циліндр	137
Шестопалов К.О. Експериментальне дослідження ефективності ежектора та холодильної машини у складі суднової системи кондиціонування повітря	143

Lebediev B., Uminsky S., Korolkova M., Lebedieva L. The technology of increasing the durability of resource-determining parts of the internal combustion engine.....	159
Zhuravlov Yu.I., Dovidenko Yu.N., Latych O.M. Analysis of the thermomechanical condition of the working surface of "shaft-sliding bearing" joints' parts in ship repair.....	173
РЕФЕРАТИ.....	185
Правила оформлення і подання рукописів для збірника «Суднові енергетичні установки».....	210

10.31653/smf48.2024.5-17

Богач В.М., Парменова Д.Г., Обертюр К.Л.

Національний університет «Одеська морська академія»

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ МАСТИЛА ПО ДЗЕРКАЛУ ЦИЛІНДРА

Розширення використання на суднах довгоходових двигунів, їхнє форсування, застосування важких сортів палива з завищеним вмістом сірки й збереження при цьому надійності й довговічності роботи дизелів підвищує актуальність питань організації мащення сполучень циліндро-поршневої групи (ЦПГ) і вимагає оптимального їхнього рішення.

З появою швидкісних компютерів, інтенсивно розвивається обчислювальне експериментування, що вимагає опису досліджуваного об'єкта за допомогою рівнянь (математичних моделей).

Існуючі математичні моделі руху мастила в каналі стінки циліндра дають можливість проводити аналіз роботи системи на часткових режимах, користуючись єдиними параметрами, однаковими критеріями оцінки, що дозволяє коректно здійснювати порівняльний аналіз поведінки різних каналів, оцінювати переваги й недоліки кожного з них, проводити обґрунтований вибір найбільш доцільних варіантів.

Важливо мати можливість прогнозувати найважливіші експлуатаційні показники якості роботи систем у цілому, знати шляхи й способи їхнього поліпшення. При цьому доводиться розв'язувати питання оптимального проектування цих складних систем і оптимального керування ними. І в цьому випадку необхідний системний підхід, загальні методи оптимізації.

Як показує аналіз наявних досліджень [1,2], до тепер практично не вивчений рух мастила за межами каналів, а саме по поверхні дзеркала циліндра.

Рух мастила по дзеркалу циліндра являє собою стікання його по гладкій твердій поверхні, рис.1а, під дією сили тяжіння. Товщина плівки завжди виявляється значно менше її ширини, а отже, рух мастила в цьому випадку можна розглядати як двовимірний.

Те ж саме справедливо для випадку, коли плівка стікає вниз по поверхні, що має заглиблення (при зустрічі з розподільною канавкою), рис.1б, за умови, що радіус канавки багато більше товщини

плівки. Витрата мастила в такій плівці визначається співвідношенням його ваги, в'язкості й сил, що діють на поверхні поділу газ-рідина.

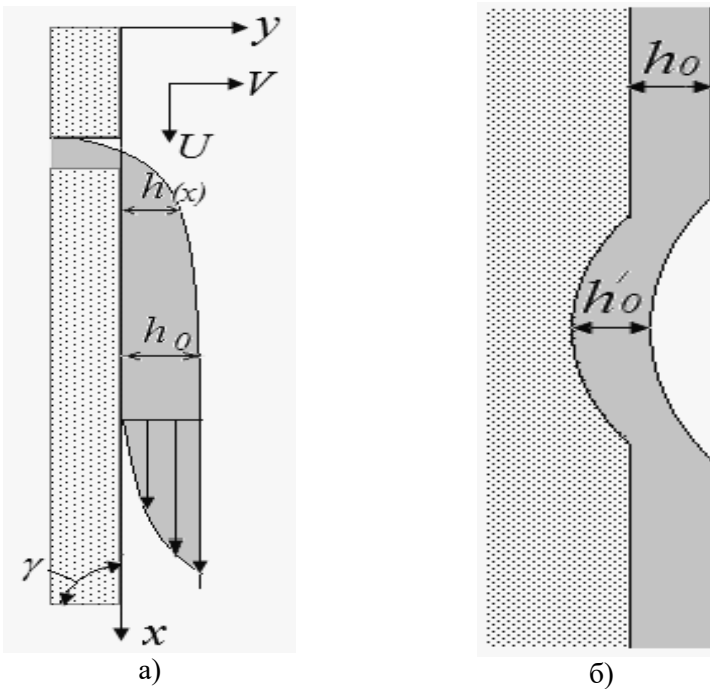


Рис.1. Характер руху мастила при вільному стіканні по дзеркалу циліндра: а) по рівній поверхні: б) по поверхні з канавкою

Кількісний опис такого руху вважається вичерпним, якщо визначені компоненти вектора швидкості, тиск у мастилi й товщина плівки. Ці характеристики можуть бути отримані за допомогою вирішення основних рівнянь механіки суцільних середовищ, що включають рівняння перенесення імпульсу, нерозривності й макроскопічного балансу.

Математичний опис плівок, що стікають по поверхні, ґрунтується на фізичній моделі [1], показаній на рис.1. Плівка стікає вниз по твердій поверхні $y=0$, і математична модель руху записується системою диференціальних рівнянь, що зв'язують компоненти вектора швидкості u і v , тиск P і товщину h . Для Ньютонівської рідини основними рівняннями, що описують рух, є рівняння Нав'є - Стокса, рівняння нерозривності й рівняння макроскопічного балансу. Для

вертикальної плівки мастила на дзеркалі циліндра кут нахилу поверхні до горизонту $\gamma=90^\circ$.

Умови однозначності рішення системи зазначених рівнянь представлені чотирнадцятьма початковими й граничними умовами. З огляду на стаціонарність руху, три початкових умови u , v і h стають непотрібними. Те ж саме можна сказати про одну із граничних умов для тиску P , оскільки розподіл його уздовж y завжди визначається з точністю до довільної постійної. Таким чином, необхідно задати десять граничних умов для функцій $u(x,y,t)$, $v(x,y,t)$ і $P(x,y,t)$ або їхніх похідних при $x=0$ і $x=l$, а також при $y=0$ і $y=h(x,t)$.

Оскільки довжина плівки значно більше, ніж її товщина, істотно важливі лише асимптотичні рішення при $x \rightarrow \infty$ і, таким чином, граничні умови по поздовжній координаті стають непотрібними. Отже, для вирішення завдання потрібно лише чотири граничних умови. Вони виражають умову "прилипання" на твердій стінці $y=0$ і умови рівноваги сил на міжфазовій поверхні газ-рідина:

$$y = 0, \quad u = v = 0,$$

$$y = h, \quad p_{nL} = p_\sigma + p_{nG}, \quad p_{\tau L} = p_{\tau G},$$

$$u_{nG} = u_{nL}, \quad u_{\tau G} = u_{\tau L},$$

де

$$p_{nL} = -p - 2\mu \frac{1-h'^2}{1+h'^2} \frac{\partial u_L}{\partial x} - 2\mu \frac{h'}{1+h'^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

$$p_\sigma = \frac{\sigma h''}{(1+h'^2)^{3/2}},$$

$$p_{\tau L} = \mu \frac{1-h'^2}{1+h'^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - 4\mu \frac{h'}{1+h'^2} \frac{\partial u}{\partial x}.$$

Верхній штрих тут і всюди далі означає диференціювання по x , нижній індекс G - приналежність до газової фази, L - до рідкого, σ - коефіцієнт поверхневого натягу рідини, P_n і P_τ - нормальна й дотична

компоненти тензора напруг на поверхні розділу газ-мастило, а P_{σ} - капілярний тиск.

Розглянемо ламінарний режим руху плівки мастила по поверхні дзеркала циліндра. Він може існувати при витратах, менших, чим деяке критичне значення, що залежить від властивостей рідини (поверхневого натягу, в'язкості), властивостей твердої поверхні (наприклад, її шершавості), наявності поверхнево-активних речовин (ПАР) і т.п.

Хвильові режими по суті також є ламінарними, і для них характерно, що хвилі поширюються уздовж плівки з фазовою швидкістю, що перевищує швидкість часток мастила на поверхні. Установлено, що при $Re > Re_{кр}$ хвилі з'являються на поверхні плівки лише на певній відстані від розподільника рідини, що називають лінією початку хвиль.

Довжина початкової без хвильової області залежить від конструкції пари тертя "кільце-дзеркало циліндра" і наявності поверхнево-активних речовин. Вона убуває зі збільшенням числа Рейнольдса. Наявність забруднень із поверхнево-активними властивостями, навпаки збільшує цю область.

Імовірно, причиною появи збурення, що приводять до розвитку системи хвиль на поверхні плівки, є крапка K (рис.2а), у якій здійснюється перехід від режиму руху між двома паралельними твердими стінками до руху з вільною поверхнею.

Ламінарний рух плівки мастила є по суті сталим, оскільки на її поверхні відсутні хвилі. Такий рух може існувати на всьому протязі довжини плівки (при досить малих числах Рейнольдса) або тільки на початковій ділянці. Експериментальні результати свідчать про те, що плівки, на поверхні яких не формуються хвилі, спостерігаються аж до $Re = 6$.

Встановлено, що перехід до турбулентного режиму відбувається в діапазоні $250 < Re_{кр} < 500$. Це може бути пояснено перехідною природою й властивостями поверхні хвиль.

Іноді для визначення критичного числа Рейнольдса використовують експериментальні дані по перенесенню маси в рідких плівках. Однак варто прийняти, що перехідний режим, безсумнівно, існує. Отже, режим руху плівки мастила варто розглядати як турбулентний при $Re > 500$.

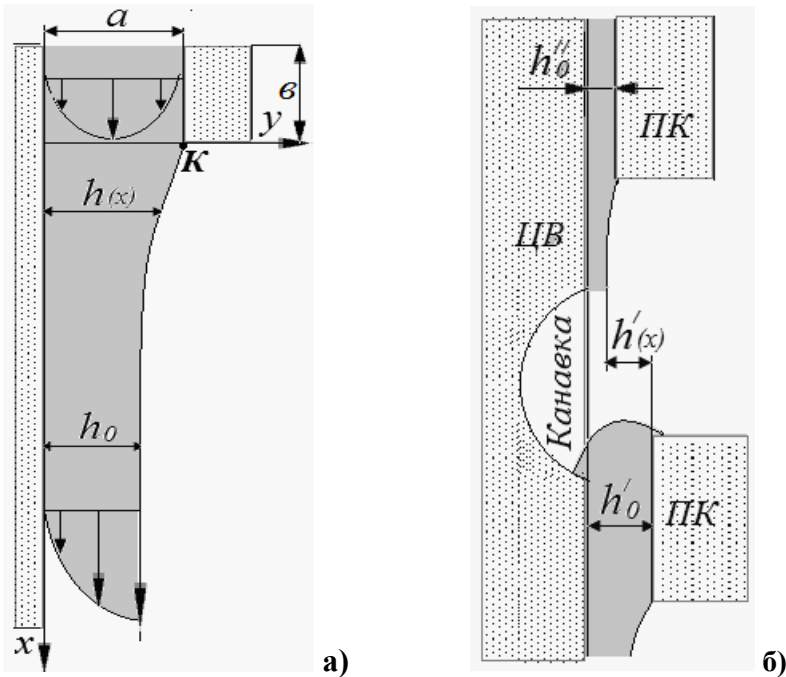


Рис. 2. Типи розподілу мастила між дзеркалом і поршневим кільцем:
а - на гладкій поверхні ЦВ; б - на поверхні ЦВ при зустрічі з канавкою

Математична модель ламінарного руху плівки мастила по дзеркалу циліндра виходить із рівнянь Нав'є-Стокса, нерозривності й макроскопічного балансу (з урахуванням граничних умов) за умови, що

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Для вирішення гідродинамічного завдання необхідно сформулювати дві граничні умови по координаті x . Перша з них (при $x=0$), як це видно з рис.2, залежить від конструкції пари тертя.

Розглянемо два граничних випадки: параболічний профіль швидкості (рис.2) або однорідний вхідний профіль (рис.1). Обидва типи умови можна записати у вигляді

$$x = 0, \quad u = u_0, \quad v = 0, \quad p = const, \quad h = h_0' - h_0'' \quad (2)$$

де

$$u_0 = const, \quad \text{або} \quad u_0 = u_0(y).$$

Друга гранична умова виставляється на кінці плівки. Вона залежить від способу видалення мастила з поверхні. Оскільки звичайно довжина плівки l значно перевершує її товщину h , цю граничну умову варто сформулювати при $x \rightarrow \infty$.

Правда, такий розгляд не може бути наслідком апріорної фізичної передумови, а дає лише асимптотичне рішення поставленого завдання при $x \rightarrow \infty$. Реально, можна використати граничну умову при $x=l$, але це не підвищить практичної цінності рішення.

Рух ламінарної плівки мастила залежить від різних факторів, зв'язаних як з об'ємними [1,5] (кут нахилу твердої поверхні, в'язкість рідини), так і з поверхневими динамічними впливами (рух прилеглого газу, поверхнева пружність, пов'язана з адсорбцією поверхнево-активних речовин і ін.).

Поверхня рідкої плівки, що стікає, практично вільна від напруг, якщо немає динамічної взаємодії (або вона досить мала) з газом і якщо поверхневий натяг сталий уздовж всієї довжини плівки.

У цьому випадку гранична умова істотно спрощується внаслідок того, що:

$$P_{nG} = 0, \quad P_{\tau G} = 0. \quad (3)$$

Рух плівки з вільною поверхнею зображене на рис.2а. Мастило проходить через щілину шириною a , і залежно від витрати Q , конструкції розподільника й довжини щілини b можуть бути реалізовані різні варіанти вхідного профілю швидкості плівки. При $b > 0,08aRe$ реалізується розвитий параболічний профіль.

При досить довгих плівках ($l \geq h$), розподіл швидкості виходить як рішення завдання із граничною умовою (2) і обліком співвідношень (1) і (3). Завдання представляється в безрозмірному виді за допомогою наступних змінних:

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{x}{l_0}, & Y &= \frac{y}{h_0' - h_0''}, & U &= \frac{u}{\bar{u}}, & V &= \frac{v}{\varepsilon_0 \bar{u}}, \\
 P &= \frac{p}{\rho \bar{u}^2}, & H &= \frac{h}{h_0' - h_0''}, & \varepsilon_0 &= \frac{h_0' - h_0''}{l_0}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Тут $h_0' - h_0''$ і $\bar{u} = Q / (h_0' - h_0'')$ позначають середню товщину плівки й середню по поперечному перерізі плівки швидкість рідини.

Підставлення співвідношень (1), (3) і (4) у вихідні рівняння приводить до наступного крайового завдання, сформульованого в безрозмірних змінних:

$$\varepsilon_0 \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) + \varepsilon_0 \frac{\partial P}{\partial X} = \frac{1}{Fr} + \frac{1}{Re} \left(\varepsilon_0^2 \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right),
 \tag{5}$$

$$\varepsilon_0^2 \left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) + \frac{\partial P}{\partial Y} = \frac{\varepsilon_0}{Re} \left(\varepsilon_0^2 \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right),
 \tag{6}$$

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0,
 \tag{7}$$

$$H' = (V/U)_{Y=H},
 \tag{8}$$

$$Y = 0, \quad U = V = 0,
 \tag{9}$$

$$Y = H, \quad P + \frac{\varepsilon_0^2 H''}{We(1 + \varepsilon_0^2 H'^2)^{3/2}} + \frac{2\varepsilon_0}{Re} \frac{1 - \varepsilon_0^2 H'^2}{1 + \varepsilon_0^2 H'^2} \frac{\partial U}{\partial X}
 \tag{10}$$

$$+ \frac{2\varepsilon_0}{Re} \frac{H'}{1 + \varepsilon_0^2 H'^2} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \varepsilon_0^2 \frac{\partial V}{\partial X} \right) = 0,$$

$$Y = H, \quad \frac{\partial U}{\partial Y} + \varepsilon_0^2 \frac{\partial V}{\partial X} - \varepsilon_0^2 \frac{4H'}{1 - \varepsilon_0^2 H'^2} \frac{\partial U}{\partial X} = 0,
 \tag{11}$$

Рішення завдання можна одержати, додаючи до зазначеної системи рівнянь граничні умови при $X=0$ і $X \rightarrow \infty$. Останнє можна уточнити, вирішуючи систему (5)...(11) у нульовому наближенні по ε_0 :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} = -\frac{Re}{Fr}, \quad \frac{\partial P}{\partial Y} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0,$$

$$Y = 0, \quad U = V = 0,$$

$$Y = H, \quad P = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial Y} = 0, \quad H'U - V = 0.$$

Це рішення виписується безпосередньо:

$$U = \frac{Re}{Fr} (Y - Y^2/2), \quad V \equiv 0, \quad P \equiv 0, \quad H \equiv 1. \quad (12)$$

Підставлення істинних значень величин дає наступний вираз для розрахунку швидкості руху плівки мастила по дзеркалу:

$$u = \bar{u} \frac{g(h_0' - h_0'')^3}{Q\nu} \left(\frac{y}{h_0' - h_0''} - \frac{y^2}{2(h_0' - h_0'')^2} \right).$$

Чисельне рішення системи (5)...(11) показало, що рівняння (12) справедливо, якщо $l_0 \geq Reh_0$. Експериментальна перевірка цих результатів звичайно здійснюється виміром поверхневої швидкості, профілю швидкості й товщини плівки.

Вікна камери лабораторного стенда й використання прозорих ділянок нагнітального тракту (рис.3) дозволяли вести візуальні спостереження за скороминучими процесами як у каналі, так і за його межами - на дзеркалі циліндра [1,3]. Для візуального спостереження за процесом подачі мастила в циліндр, у загальну схему стенда включена швидкісна кінокамера.

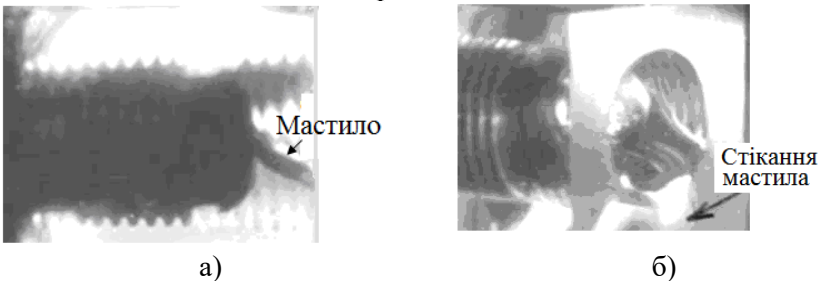


Рис.3. Кінокадри (прозора модель) руху мастила:
а) по каналу; б) по дзеркалу

Слід зазначити, що в роботах присвячених даному питанню не враховані такі фактори як вплив ПАР або рух газу, а стосовно до суднових двигунів необхідно враховувати також наявність розподільних канавок на дзеркалі циліндра. Як видно з рис.2б, при русі поршневого кільця повз канавки плівка мастила руйнується (частково або повністю), що значно погіршує умови змазування пари тертя "поршневе кільце – дзеркало циліндра".

Є дослідження, з яких досить чітко проглядається негативний вплив канавок на ефективність роботи систем мащення [4]. При вивченні впливу прориву газів на тепловий стан ЦПГ сучасних суднових двигунів виявилось, що при наявності мастильних канавок максимальна температура під верхнім поршневим кільцем на 50° вище, ніж без них. Максимальна температура циліндра, за тих самих умов, відрізнялася на 20° .

Відомо, що з ростом температури інтенсифікуються процеси окислювання вуглеводнів мастила. З деякого рівня в ньому зростає вміст смол, асфальтенів, карбенів, карбідів і окисикислот, з яких останні при подальшому нагріванні в присутності кисню конденсуються в клейку масу, що покриває поверхні ЦПГ лаковою плівкою. Бувши поганим провідником, лак порушує умови теплопередачі. У зв'язку із цим, питання про доцільність канавок заслуговує окремих досліджень.

Ламінарний рух плівки звичайно асоціюється з існуванням на поверхні плівки дотичних напружень, що викликані динамічним впливом прилеглої газової фази. При відсутності вимушеного руху газу ці напруження звичайно не беруться в розрахунок.

Змушений рух газу істотно впливає на рух плівки. Цей вплив звичайно враховується в граничній умові рівноваги сил на поверхні газ-рідина через величини p_{nG} і $p_{\tau G}$:

Цікавим представляється розгляд одночасного руху рідкої плівки мастила й газового потоку в тому випадку, коли останній є турбулентним.

Оцінка розподілу швидкості в цьому випадку є досить трудомістким завданням. Тому, тут розглянута лише перша її стадія, що складається в одержанні асимптотичного рішення для великих значень x .

Крайове завдання формулюється аналогічно розглянутим вище. Припускаючи, що вихрова в'язкість залежить тільки від поперечної координати, можна записати

$$\frac{v_G^{(t)}}{\bar{u}_G r} = L^2 \frac{\partial U_G}{\partial Y_G}.$$

Закон згасання довжини шляху перемішування передбачається наступним:

$$L = \chi(Y_G - \varepsilon_1 H)^k.$$

Звідси при $\varepsilon = \varepsilon_G = 0$ задача приймає вид

$$\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} = \mp \frac{\text{Re}}{\text{Fr}}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial P_G}{\partial X_G} = \frac{\partial}{\partial Y} \left\{ \left[1 + \text{Re}_G \chi^2 (Y_G - \varepsilon_1 H)^{2k} \frac{\partial U_G}{\partial Y_G} \right] \frac{\partial U_G}{\partial Y_G} \right\}, \quad (14)$$

$$Y = 0, \quad U = V = 0, \quad Y = H, \quad Y_G = \varepsilon_1 H, \quad U_G = \theta_2 U, \quad (15)$$

$$\frac{\partial U}{\partial Y} = \varepsilon_1 \theta_1 \frac{\partial U_G}{\partial Y_G}, \quad (16)$$

$$Y_G = 1, \quad \frac{\partial U_G}{\partial Y_G} = 0. \quad (17)$$

Величина χ являє собою емпіричну константу. Можна припустити, що вона має те ж саме чисельне значення, що й у випадку руху поблизу твердої стінки, тобто $\chi = 0,43$. Показник ступеня k можна оцінити тільки на підставі експериментальних даних. Будемо думати, що він буде приймати лише цілі значення. Тоді рішення завдання (13)...(17) можна записати в наступному виді [4]:

$$U = \left(3 - \frac{3}{2} \varepsilon_1 \theta_1 \tau \right) \left(Y - \frac{1}{2} Y^2 \right) + \varepsilon_1 \theta_1 \tau Y,$$

$$U_G = \theta_2 \left(\frac{3}{2} - \frac{\varepsilon_1 \theta_1 \tau}{4} \right) + \frac{2\tau}{1 - \varepsilon_1} \int_{\varepsilon_1}^{Y_G} \frac{(1 - \eta) d\eta}{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \operatorname{Re}_G \tau \chi (1 - \eta)(\eta - \varepsilon_1)^{2k}}{1 - \varepsilon_1}}} \quad (18)$$

Тут h, \bar{u} отримані з умов макроскопічного балансу

$$\int_{\varepsilon_1 H}^1 U_G dY_G = 1, \quad \int_0^H U dY = 0.$$

а $\tau = \partial U_G / \partial Y_G$ при $Y_G = \varepsilon_1 H$.

Для визначення τ, \bar{h}, \bar{u} виходить наступна алгебраїчна система:

$$\bar{u}^3 = \pm \bar{u}_0^3 + \tau \frac{\mu_G \bar{u}_G Q}{2\mu r} \bar{u},$$

$$\bar{h}^3 = \pm h_0^3 \left(1 - \tau \frac{\mu_G \bar{u}_G}{2\mu Q r} \bar{h}^2 \right),$$

$$\theta_2 \left(\frac{3}{2} - \frac{\varepsilon_1 \theta_1 \tau}{4} \right) (1 - \varepsilon_1) + \frac{1}{3} \tau (1 - \varepsilon_1^2) \left[1 + \frac{(2k + 1)^3}{80k^2} \frac{1 - \sqrt{A}}{1 + \sqrt{A}} \right] = 1, \quad (19)$$

$$A = 1 + \frac{4 \operatorname{Re}_G \tau \chi^2 (2k)^{2k} (\eta - \varepsilon_1)^{2k}}{(2k + 1)^{2k+1}}.$$

Рівняння (19) отримано в результаті апроксимації підінтегральної функції у вираженні (18) поліномом четвертого ступеня, п'ять невідомих числових коефіцієнтів якого визначаються, виходячи з заданих значень функції і її першої похідної при $\eta = \varepsilon_1$ і $\eta = 1$, а також з її максимального значення.

Визначити перепад тиску у двофазному газоз-рідинному потоці практично дуже складно. Є деякі експериментальні дані, представлені на рис.4 для перепаду тиску руху газоз-рідинного потоку [1,4].

Очевидно, що режим руху в одному напрямку характеризується більше слабкою залежністю перепаду тиску від числа Рейнольдса, ніж режим зустрічного руху.

З іншого боку, рух в одному напрямку, очевидно, робить стабілізаційний вплив на двофазний рух. У цьому випадку перепад тиску починає зростати при деякому досить високому значенні числа Рейнольдса. У випадку ж зустрічного руху різке зростання перепаду тиску при певному значенні Re_L приводить у результаті до явища "захлинання". Критичне значення Re_G , що відповідає режиму "захлинання", убуває з ростом Re_L , як показано на рис.4.

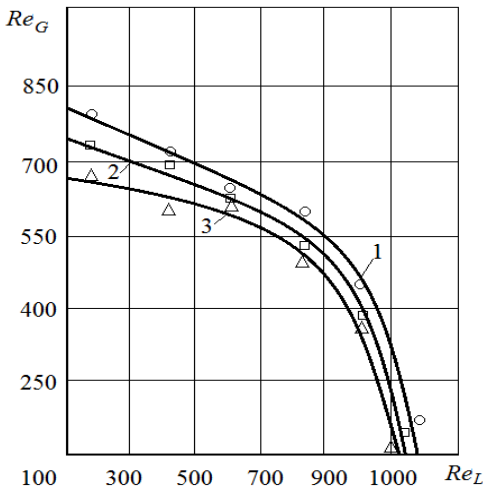


Рис.4. Характеристики режиму "захлинання" при зустрічному напрямку руху мастила і газів

Варто пам'ятати, що дані, представлені на рис.4, не зостануться такими ж для інших умов руху - іншої геометрії, ширині зазору й т.п. Хоча ясно, що при помірних числах Рейнольдса перепад тиску буде доволі малим як у випадку однакового і зустрічного напрямків руху мастила і газів.

Ця особливість робить перспективу практичного застосування двофазного газожидкісного плівкового руху досить привабливою,

особливо у випадку однакового напрямку, коли проявляється стабілізаційний ефект. Правда, надмірне збільшення числа Рейнольдса по газу приводить до таких додаткових ефектів, як розвиток хвиль великої амплітуди на поверхні плівки, зрив і віднесення крапель і т.п.

Висновки

- Встановлено, що витрата мастила в плівці, що стікає по дзеркалу циліндра під дією сили тяжіння визначається співвідношенням його ваги, в'язкості й сил, що діють на поверхні розділу газ-рідина.

- Аналітичні залежності вказують на той факт, що вимушений рух газу істотно впливає на рух плівки, при цьому однаковий напрямок руху газу й мастила (період руху поршня до н.м.т.) робить на двофазний рух стабілізаційний вплив. У випадку ж зустрічного руху газу і мастила (рух поршня в напрямку в.м.т.) різке зростання перепаду тиску приводить у результаті до явища «захлинання», при якому відносно тонкий шар мастила захоплюється газом, що рухається йому назустріч.

Перелік 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. 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.
3. 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. Вип. 44. - Одеса: НУ «ОМА», 2022. С. 53-63.
4. Богач В.М. Вплив газу на рух мастила по дзеркалу циліндра / В.М. Богач, А.М. Шебанов, Ю.М. Довіденко, І.Е.Єлінський. // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. - Одеса: НУ «ОМА», 2021. С.126-139.
5. Двигуни внутрішнього згоряння / В. Г. Дяченко; за ред. А. П. Марченка. - Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – 488 с.

10.31653/smf48.2024.18-30

Будашко В.В., Заблоцький Ю.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ЦИКЛІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ПІД ЧАС ЙОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ МОРСЬКИМИ СУДНАМИ-ГАЗОВОЗАМИ

Постановка проблеми в загальному вигляді. В останнє десятиріччя природний газ розглядається як основне джерело енергії для багатьох типів енергетичних установок. Скритий «недолік» природного газу – необхідність його транспортування від міста видобутку до споживачів. Найбільш ефективної технологією, яка дозволяє транспортувати великі об'єми природного газу – є його зрідження. Зріджений природний газ (ЗПГ) – криогенна рідка багатокомпонентна суміш легких вуглеводнів, основу якої становить метан. Транспортування ЗПГ може здійснюватися або континентальними шляхами – трубопровідним способом, або океанськими / морськими – суднами-газовозами [1-3].

Склад ЗПГ відрізняється від складу природного газу. Щоб отримати ЗПГ з природного газу, спочатку видаляють етан, пропан, бутан і більш важкі вуглеводні, потім його очищають від вуглекислого газу і сірководню, а потім осушують – видаляють вологу. Газоподібний метан, що залишився, може як домішки мати 3...4 % етану, 2...3 % пропану, до 2 % бутану і до 1,5 % азоту. Якщо цю суміш метану з іншими газами охолодити приблизно до температури -160°C за тиском трохи більше атмосферного (температура кипіння чистого метану за атмосферним тиском $-161,5^{\circ}\text{C}$), він перетворюється на рідину. Це і є ЗПГ. Зразкові склади природного газу та ЗПГ наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Зразкові склади природного газу та ЗПГ

Елемент	Природний газ, мольні %	ЗПГ, мольні %
Метан	62,6...98,8	86,98...99,72
Етан	2,89...7,06	0,06...9,35
Пропан	0,05...2,1	0,0005...2,33
Бутан	0,03...1,04	0,0005...2,33
Вуглекислий газ	0,03...2,25	—
Азот	0,43...28	до 1,5
Гелій	до 0,58	—

ЗПГ є безбарвною рідиною без запаху, густина якої вдвічі менша за густину води – ЗПГ може плавати на поверхні води, не змішуючись з нею. У рідкому стані він токсичний, не агресивний. За відсутності джерела займання ЗПГ швидко випаровується та розсіюється, не залишаючи слідів. Після розливу ЗПГ на землі або на воді немає необхідності проводити екологічне очищення. Деякі фізико-хімічні властивості ЗПГ наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Фізико-хімічні властивості ЗПГ

Властивості	Одиниця виміру	Значення
Молекулярна маса	кг/моль	16,3
Температура кипіння	К / °С	111,7 / –161,5
Температура плавлення	К / °С	90,7 / –182,5
Критична температура	К / °С	191,1 / –82,1
Критичний тиск (за 20° С)	МПа	4,3
Густина рідини	кг/м ³	424,5
Густина газу (за 20° С)	кг/м ³	0,667

Обсяг ЗПГ у 600 разів менший від обсягу природного газу, що полегшує зберігання та забезпечує можливість його транспортування на великі відстані. При цьому постійно необхідно вирішувати питання забезпечення транспортування ЗПГ з найбільшою енергетичною ефективністю та найменшими втратами ЗПГ, що пов'язані з його випаровуванням. Особливо ці питання актуальні для морського транспорту, судна-газовози якого здійснюють тривали перевезення ЗПГ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час випаровування природний газ може спалахнути, якщо відбудеться контакт з джерелом полум'я або окислювачем. Для займання необхідно мати концентрацію випарів у повітрі 5...15 % (за нормальних умов). Якщо концентрація до 5 %, то випарів недостатньо для початку займання, а якщо більше 15 %, то в повітрі стає замало кисню, необхідного для займання газової суміші [4-6].

У випадку розливу ЗПГ на поверхні землі холодні пари, що утворюються, конденсують на себе вологу з повітря і стають помітними, формуючи білі хмари на поверхні землі. У міру того, як пари ЗПГ нагріваються, хмари розчиняються і знову стають невидимими.

Відносна густина метану по відношенню до повітря за температурою довкілля близько 0,6, тому за нормальних умов газоподібний метан легко піднімається від поверхні землі. Пари ЗПГ за атмосферним тиском і температурою кипіння –162°С мають відносну густину 1,8, яка означає, що в цих умовах пари ЗПГ важчі за повітря і будуть

накопичуватися під час розливу біля поверхні землі або води. Однак, пари ЗПГ швидко нагріваються, та у випадку досягнення температури -110°C їх відносна густина стає рівною 1, пари починають швидко підніматися. Отже, холодні пари ЗПГ у разі локалізації у поверхні землі за холодної погоди становлять небезпеку для дихання, оскільки за збереження негативної плавучості повітря пари ЗПГ витісняють кисень [7-9].

Температура самозаймання ЗПГ залежить від його складу і знаходиться в межах $540\ldots 600^{\circ}\text{C}$, що значно вище, ніж у дизельного палива. Температура полум'я під час згоряння ЗПГ вища, ніж в інших видів палива. Під час згоряння ЗПГ утворюється в середньому $50,2$ МДж/кг теплоти – це вище, ніж під час згоряння дизельного палива, значення якої складає $42,4$ МДж/кг. Згоряючи, ЗПГ виробляє, в основному, вуглекислий газ і водяну пару, тому використання ЗПГ як паливо більш сприятливо для екології в порівнянні з іншими видами палива [10-12].

Для споживачів зниженого природного газу велике значення має такий показник, як найвища теплотворна здатність – кількість тепла, що утворюється під час згоряння одного кубічного метра газу за атмосферним тиском і температурою 15°C . ЗПГ продається та купується на підставі показника теплотворної здатності, значення якої залежить від складу ЗПГ [13-15]. Наявність у ЗПГ азоту знижує його теплотворну здатність, а присутність етану та інших більш важких вуглеводнів підвищує цей показник. У різних країнах прийнято різні стандарти вищої теплотворної здатності, звідси і такий розкид у вимогах до складу ЗПГ. Вимоги Японії до якості ЗПГ за показником вищої теплотворної здатності перебувають у діапазоні $39,7\ldots 43,3$ МДж/м³, Іспанії – $35,0\ldots 44,9$ МДж/м³. Специфікації теплотворної здатності ЗПГ за різними країнами представлені в табл. 3.

Таблиця 3. Вимоги до теплотворної здатності ЗПГ країн світу

Країна	Теплотворна здатність, МДж/м ³	
	Мінімум	Максимум
Японія	39,7	43,3
Корея	40,0	43,7
США	35,8	40,8
Великобританія	36,7	42,4
Франція	36,2	43,3
Іспанія	35,0	44,9

Постановка завдання. В зв'язку з вищевикладеним завданням досліджень був аналіз термодинамічних циклів охолодження природного газу під час його транспортування морськими суднами-газовозами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Метод транспортування природного газу в зрідженому стані є значно економічним, ніж трубопровідний, починаючи з відстаней до споживачів газу більше 2000...3000 км, але потребує більш високих початкових вкладень в інфраструктуру, ніж трубопровідний. Основну вартість в цьому випадку складе не транспортування, а вантажно-розвантажувальні роботи. До переваг цього методу відноситься також той факт, що зріджений газ більш безпечний під час перевезення та зберігання, ніж стислий. ЗПГ може бути доставлений з будь-якого заводу зі зрідження на будь-який регазифікаційний термінал. Крім того, це єдина технологія для трансокеанських перевезень [16-18].

Якщо перейти від глобальних логістичних схем постачання ЗПГ до менш масштабних, то ЗПГ може розв'язати проблему газифікації регіонів віддалених від магістральних газопроводів. За умовою створення ізотермічних сховищ ЗПГ та невеликих регазифікаційних установок, що є невеликими трубчастими випарниками, доставка ЗПГ може бути здійснюватися автомобільним, внутрішнім водним або залізничним транспортом, обладнаним криогенними цистернами.

У промислових процесах технології охолодження та зрідження природного газу відіграють ключову роль. За період існування світової промисловості зрідженого газу було розроблено кілька технологій промислового зрідження газу. Ряд процесів знайшли різною мірою своє застосування, деякі з них досі існують лише у проекті [19].

Для виробництва ЗПГ беруть потік природного газу за високим тиском, видаляють з нього небажані домішки, охолоджують газ до дуже низької температури, потім дроселюють його до атмосферного тиску, при цьому газ охолоджується до заданої кінцевої температури, конденсується і перетворюється на ЗПГ [20-22].

Якщо подивитися на криву охолодження природного газу в координатах тепло-температура за тиском 3,7 МПа від температури доквілля 10°C...20°C до температури конденсації метану -162°C, то можна побачити, що на початку охолодження йде по прямій лінії (рис. 1). Протягом цієї ділянки кривої охолодження конденсуються переважно важкі вуглеводні.

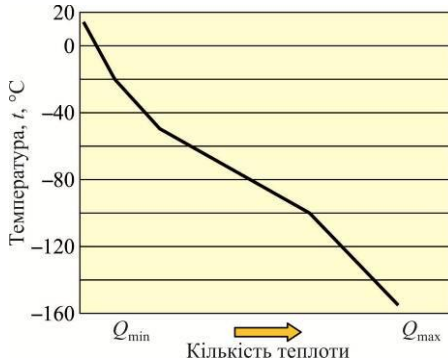


Рис. 1. Крива охолодження природного газу

Фактично, в діапазоні $-50\dots-56^\circ\text{C}$ більша частина пропану і більш важких компонентів випаде з потоку газу. Зі зниженням температури крива охолодження змінює напрямок. Ця зміна відбувається на початку конденсації етану та метану. У випадку зниження температури до -140°C практично вся газова суміш, крім парів азоту, перетворюється на рідкий стан.

Методи охолодження та конденсації газу можуть сильно відрізнятися в залежності від того, який процес охолодження використовується [23, 24].

На рис. 2 зображені принципові схеми простого одноступеневого (а) та багатоступеневого (б) циклів охолодження, які використовуються під час зрідження природного газу.

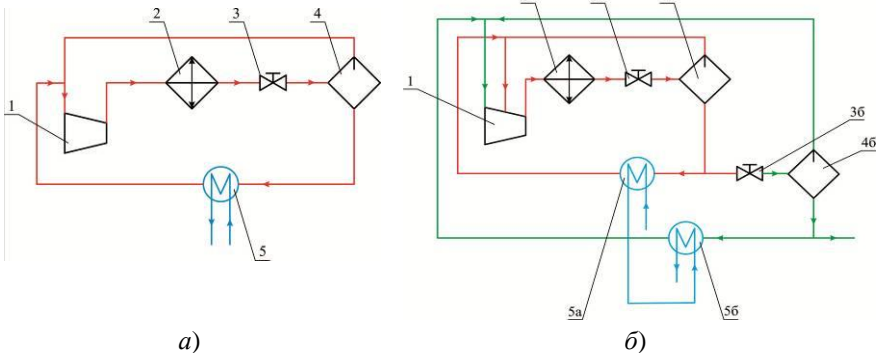


Рис. 2. Цикли охолодження ЗПГ:

а – одноступеневий цикл; б – багатоступеневий цикл;

1 – компресор; 2 – холодильник-конденсатор із зовнішнім охолодженням;
3а, 3б – дросель; 4а, 4б – сепаратор; 5а, 5б – холодильник-випарник для охолодження природного газу

Розглянемо як приклад простий пропановий цикл, що використовує пропан як холодильний агент при температурі близько -30°C (рис. 2, *a*). У компресорі 1 пропан стискається від тиску всмоктування $0,17\text{ МПа}$ до тиску на виході $1,8\text{ МПа}$. Тиск на всмоктуванні компресора завжди має бути більшим за атмосферний з метою виключення підсмоктування навколишнього повітря в лінію подачі газу. Нагрітий під час стиснення газ від температури $80\dots 85^{\circ}\text{C}$ охолоджується в холодильнику 2 зовнішнім холодоагентом (водою або навколишнім повітрям) до температури близько 50°C та конденсується. Далі під час проходження через дросель тиск газу скидається до рівня $0,17\text{ МПа}$ (тиск всмоктування компресора), при цьому пропан охолоджується до -30°C . У сепараторі 4 пропан розділяється на рідку і парову фази, парова фаза повертається в компресор, а рідка фаза подається у випарник 5, де пропан випаровується, а природний газ при цьому охолоджується. Випарений пропан повертається до компресора 1.

Якщо подивитися на рис. 2, *b* можна побачити, що до схеми простого одноступеневого циклу на лінії подачі рідини у випарник-холодильник 5а поставлений дільник потоку, і на відділений потік рідини поставлений другий дросель 3б. Цей відокремлений потік утворює другий рівень охолодження з нижчою температурою та нижчим тиском. Таким чином, у схемі присутні два рівні тиску потоків пропану, що подаються на всмоктування компресор, і два температурних рівня для охолодження природного газу.

Якщо розвивати цю схему далі, можна додати третій, четвертий чи п'ятий рівень. Збільшення кількості температурних рівнів, тобто збільшення числа ступенів в одному температурному діапазоні, наближає криву охолодження холодоагенту до кривої охолодження газу, що робить процес більш ефективним. Число рівнів охолодження – це компроміс між капітальними вкладеннями, складністю технологічної схеми та експлуатаційними витратами. На сьогодні максимально застосовувалося п'ять рівнів охолодження для однокомпонентного холодильного агента. Вочевидь, що з додаванням ступенів охолодження збільшується кількість температурних рівнів. Зрештою, можна використовувати один з цих ступенів охолодження для конденсації іншого холодильного агента, що застосовується в каскадних процесах зрідження природного газу [25, 26].

Розглянемо також графік залежності тиску насиченої пари метану, етилену та пропану від температури (рис. 3).

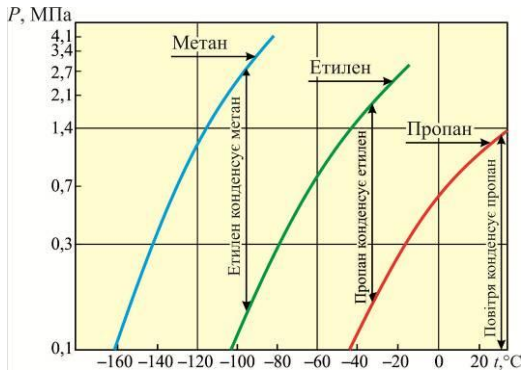


Рис. 3. Залежність тисків насичених парів метану, етилену та пропану від температури

За тих значення тиску, за якими працюють установки зрідження, кожному компоненту – метану, етилену і пропану відповідає певний діапазон температур у процесі охолодження природного газу та отримання ЗПГ. За певних термодинамічних умов пропан здатний сконденсувати етан або етилен. У свою чергу, етан або етичний здатні сконденсувати метан, і метан зможе сконденсувати потік природного газу. На такій схемі збудовано каскадні процеси зрідження природного газу.

Розглянемо простий каскадний процес отримання ЗПГ. Як чисті холодоагенти приймемо наступні гази: пропан, якій має температуру кипіння -42°C , етилен, з температурою кипіння -104°C та і метан, температура кипіння якого -162°C . Якщо на криву охолодження газу накласти рівні охолодження трьох різних холодоагентів у трьох різних, простих циклах, отримаємо рис. 4, а.

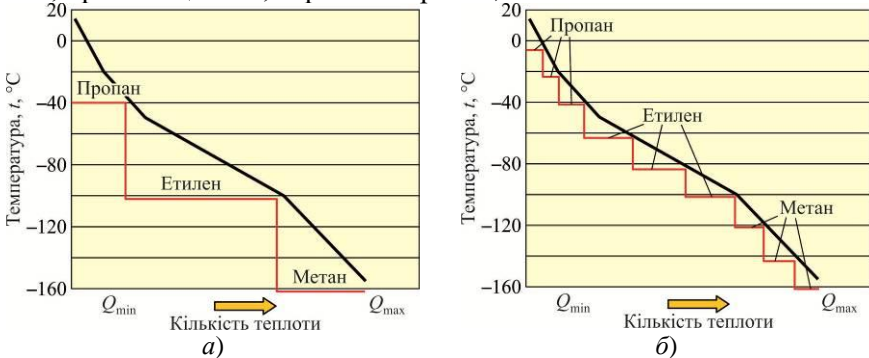


Рис. 4. Криві охолодження природного газу та чистих холодоагентів під час

використання одноступеневих (а) та триступеневих (б) циклів охолодження

Область діаграми між кривими охолодження відповідає втратам теплоти в циклах, тобто такий процес не є ефективним. Насправді, у такому вигляді три ступені охолодження на чистих холодоагентах використовувалися надзвичайно рідко. Для підвищення ефективності процесу кожен простий холодильний цикл був замінений на триступінчастий цикл з трьома різними температурними рівнями в кожному циклі (див. рис. 2, б). В результаті вийшла дев'ятиступінчаста каскадна система, яка лягла в основу деяких промислових процесів одержання ЗПГ. Зіставлення кривої охолодження природного газу та кривої охолодження холодоагентів такої дев'ятиступінчастої каскадної системи дозволяє здавати висновок про її більшу ефективність порівняно з каскадним процесом, який використовує одноступінчасті холодильні цикли. Приклад діаграми триступеневого циклу охолодження наведено на рис. 4, б.

З урахуванням того, що можна побудувати систему з трьома холодоагентами та з трьома окремими рівнями охолодження для кожного холодоагенту, то для подальшого підвищення ефективності процесу можна скомбінувати кілька компонентів в одну власну систему.

Внаслідок законів Бойля і Дальтона, під час змішуванні чистих компонентів парціальний тиск компонента газової суміші можна співвіднести з його точкою роси, тобто з температурою, за якою за заданому тиску починається його конденсація. Наприклад, суміш що складається з 33 % пропану, 33 % етану та 34 % метану знаходиться в замкнутому об'ємі під тиском 4,2 МПа. За законом Дальтона парціальний тиск кожного компонента суміші становить приблизно 1,4 МПа. За такого тиску пропан почне конденсуватися за температурою близько 41° С, етан – за –20° С, метан – за –116° С. Коли частина пропану сконденсується, мольний склад газу зміниться, іншими стануть і парціальний тиск компонентів суміші. Парціальний тиск пропану зменшиться, причому знизиться температура його конденсації, а парціальні тиски інших компонентів збільшаться, підвищивши температури їх конденсації. Це призводить до того, що крива охолодження змішаного холодоагенту стає гладкішою. Підбираючи склад суміші холодоагенту, можна максимально наблизити криву охолодження холодоагенту до кривої охолодження природного газу, тим самим роблячи процес зрідження газу ефективнішим.

До складу змішаного холодильного агента (ЗХА) можуть входити азот, пентан, бутан, пропан або пропілен, етан або етилен та метан. В зв'язку з тим, що температури кипіння у цих речовин різні: від 28°C у ізопентану до -196°C у азоту (табл. 4), під час охолодження компоненти газової суміші конденсуються по черзі.

Таблиця 4. Температури кипіння компонентів СХА за атмосферним тиском

Компонент	Температура кипіння, $^{\circ}\text{C}$	Компонент	Температура кипіння, $^{\circ}\text{C}$
Азот, N_2	$-195,8$	Пропан, C_3H_8	$-42,1$
Метан, CH_4	$-161,5$	I-бутан, C_4H_{10}	$-11,7$
Етилен, C_2H_4	$-103,7$	Н-бутан, C_4H_{10}	$-0,5$
Етан, C_2H_6	$-88,6$	I – пентан, C_5H_{12}	$-27,9$
Пропілен, C_3H_6	$-47,2$		

Принципова схема простого холодильного циклу зі змішаним холодоагентом наведено на рис. 5.

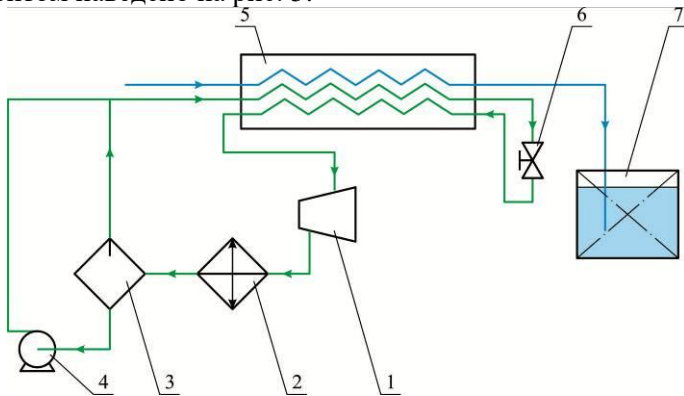


Рис. 5. Цикл охолодження зі змішаним холодоагентом:

1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – сепаратор; 4 – насос; 5 – багатопотоковий теплообмінник; 6 – дросель

До обладнання циклу на змішаному холодильному агенті (рис. 5) в порівнянні зі схемою простого пропанового циклу (рис. 2, а) входить такий самий компресор, холодильний агрегат, сепаратор, але до схеми включено трипоточковий теплообмінник зі збільшеною поверхнею теплообміну. Охолоджений і сконденсований потік змішаного холодоагента, пройшовши в прямому напрямку теплообмінник, а потім дросель, під час проходження теплообмінника у зворотному напрямку використовується для охолодження самого себе і потоку природного газу (холодильне навантаження). На противагу чистим компо-

нентам конденсація змішаного холодоагенту не відбувається за якоїсь постійної температури. Замість декількох кожухотрубчастих випарників можна використовувати один потоковий теплообмінник зі збільшеною поверхнею теплообміну. Таким вимогам відповідають спіральновиті та ребристо-пластинчасті теплообмінники. Вони здатні одночасно пропускати кілька теплообмінних потоків.

Особливістю роботи багатопоточних теплообмінників під час зрідження природного газу є те, що частина теплообмінника працює у двофазній області. Отже, поліпшення теплообміну важливе значення має правильне розподіл потоків. Зокрема, в пластинчастих теплообмінниках потік, що випаровується, спрямовується знизу вгору, а потік, що конденсується – зверху вниз.

Холодильні цикли зі змішаними холодоагентами стали основою більшості сучасних технологічних процесів зрідження природного газу, які в тому числі використовуються на суднах-газовозах.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Зріджений природний газ є найбільш перспективним паливом, що в найближчий час буде використовуватися у всіх видах енергетики, в тому числі суднової.

Відносно морського транспорту ЗПГ має ряд переваг перед іншими паливами:

- більш висока екологічність – під час згоряння ЗПГ не виділяється парниковий газ, який негативно впливає на озоновий шарі Землі;
- нижча ціна, ніж на палива нафтового походження – переведення суднових енергетичних установок на використання ЗПГ дозволить суттєво підвищити економічні показники роботи морських суден;
- тривалий термін використання обладнання для ЗПГ, ніж під час використання палива нафтового походження, які можуть сильно зношувати деталі суднових теплових двигунів;
- скорочення шкідливих викидів в атмосферу, що є особливо актуальним з урахуванням постійного чи періодичного знаходження морських суден у спеціальних екологічних районах;
- можливість транспортування великих обсягів ЗПГ судами-газовозами на великі відстані.

Під час перевезення ЗПГ суднами-газовозами найбільш ефективною технологією його зрідження з економічної, енергетичної та еко-

логічної точок зору є використання циклів охолодження зі змішаним холодоагентом.

Перелік використаних джерел

1. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

2. Matieiko O. Selection of optimal schemes for the inerting process of cargo tanks of gas carriers // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – № 4(1(78)). – Р. 43–50. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310699>.

3. Segin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

4. Budashko V., Shevchenko V. Solving a Task of Coordinated Control Over a Ship Automated Electric Power System under a Changing Load // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – № 2(2(110)). – Р. 54-70, 2021. doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

5. Segin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – Р. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.

6. Segin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022. – Vol. 69(1). – Р. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

7. Бражнік І. Д. Изменение рабочих характеристик системы инертизации танкера за счет принудительной подачи газов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. Наковий журнал. – 2019. – № 1(20). – Херсон: ХДМА. – С. 4-11.

8. Сагін С.С., Ворохобін І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морсько-го транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.07.

9. Будашко В.В., Онищенко О.А., Юшков Е.А. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса // Збі-

рник наукових праць Військової академії (м. Одеса). Технічні науки. – 2014. – № 2. – С. 88-92.

10. Сагін С.В., Матейко О.В. Особливості інертизації вантажних танків суден-газовозів під час транспортування вогненебезпечних речовин // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 36-49. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03.

11. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4(3(72)). – P. 33-42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

12. Сагін С.В., Матейко О.В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 148-156. doi: 10.31653/smf47.2023.148-156.

13. Mrzljak V., Poljak I., Kosor M., Culin J. Bisection Method for the Heavy Fuel Oil Tank Filling Problem at a Liquefied Natural Gas Carrier // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 849. <https://doi.org/10.3390/jmse11040849>.

14. Manos A., Lyridis D., Prousalidis J., Sofras E. Investigating the Operation of an LNG Carrier as a Floating Power Generating Plant (FPGP) // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 1749. <https://doi.org/10.3390/jmse11091749>.

15. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

16. Будашко В.В. Имплементарный подход при моделировании энергетических процессов динамически позиционирующего судна // Электротехника и электромеханика. – 2015. – № 6. – С. 14-19.

17. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

18. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskiy Y., Pišt'ek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>

19. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», – С. 76-87.

20. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2020. – Вип. 2(59). – С. 88-98.

21. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.

22. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 23-31. doi: 10.31653/smf47.2023.23-31.

23. 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 of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(10). – 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

24. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O. Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2023. – № 118. – P. 195-206. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>.

25. Budashko V.V., Yushkov Y.A. Mathematic modeling of allrange controllers speed of thrusters for ship power plants in combined propulsion complexes // Electronic Modeling. – 2015. – Vol. 37/ – № 2. – P. 101-114.

26. Chumak I., Zhyvytsya Y., Onishchenko O. Monitoring and energy saving control for reciprocating refrigerating compressors // Compressors-2006. – 2006. – Vol. 6. – P. 383-390.

10.31653/smf48.2024.31-45

Козицький С. В.

Національний університет “Одеська морська академія”

ЗАСТОСУВАННЯ НАНОМТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА РЕСУРСУ СУДНОВИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми в загальному вигляді. Область науки і техніки, яка стрімко розвивається у 21 столітті, та спрямована на отримання матеріалів з особливими властивостями, до складу яких входять елементи з розміром у діапазоні 1 – 100 нанометрів, має назву нанотехнологія [1]. Запровадження наноматеріалів для підвищення ефективності судна та його установок актуальна задача сьогодення.

Аналіз досліджень та публікацій. Фізичні та хімічні властивості нанорозмірних частинок суттєво відрізняються від відповідних для традиційних матеріалів [2]. Такі особливі властивості [3] пов’язані з розмірними ефектами та особливостями їх поведінки.

Зазначимо, що 1 г речовини утвореної сферичними частинками розміром 10 нм має площу поверхні $\sim 100 \text{ м}^2$, а частка поверхневих атомів складає 30% [4]. Надлишкова поверхнева енергія приводять до суттєвої нерівноважності наночастинок [5], яка посилюється методами їх отримання [6]. Для усіх наночастинок спостерігається зміна фундаментальних фізичних параметрів [7], а наноматеріали характеризуються підвищеною твердістю в 2...7 разів, межею міцності в 1,5...8 разів, межею плинності в 2...3 рази у порівнянні з традиційними матеріалами [8]. Поведінка наночастинок виходить за рамки класичного уявлення про їх рух [3] і потребує застосування рівнянь нерівноважної термодинаміки [9] та квантової механіки [10].

Постановка задачі. У морському транспорті велика кількість проблем вимагає ефективного вирішення. Серед основних зазначимо: підвищення ефективності суднових систем, збільшення ресурсу суднових механізмів та корпусу, збільшення ККД механізмів і захист довкілля від викидів. Більшість цих проблем є можливість вирішувати шляхом використання унікальних властивостей наноматеріалів. У роботі [11] описані основні властивості наночастинок і наноматеріалів, а у роботі [12] розглянуті питання застосування наночастинок для збільшення ресурсу та ефективності суднових механізмів. У даній роботі розглядаються питання перспективи використання

наноматеріалів з метою ефективного вирішення зазначених вище проблем та особливості механізму дії наноматеріалів.

Виклад основного матеріалу.

Традиційні мастильні присадки, які використовуються для захисту від зносу та для зменшення тертя, базуються на так званих діалкілдітіофосфатах цинку (ДДФЦ) та інших похідних органічних жирних кислот. ДДФЦ містять фосфор, який отруює каталізатори вихлопних газів, що є серйозною проблемою для навколишнього середовища. Інша проблема полягає в тому, що традиційні присадки призводять до водневої крихкості, мікропітінгу та білих поверхневих тріщин (БПТ), що спричиняє втому металу. Окрім того, трибоплівки, утворені ДДФЦ, є твердими і доволі крихкими. У результаті утворюються абразивні частинки, які також збільшують знос. Тому пошук альтернативних присадок, є важливою задачею, яка успішно вирішується застосуванням нанорозмірних матеріалів.

Застосування наноматеріалу ХАДО

ХАДО – це українська компанія [13] заснована у 1991 році в Харкові, яка є виробником ревіталізанту, який запатентовано у 1998 році. За зовнішнім виглядом ревіталізант ХАДО є гелем або пластичною речовиною. Складається з високомолекулярного мастильного середовища, до складу якого входить дуже активна карбоксильна група – COOH , а також суміші нанорозмірних оксидів Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 та їх гідратів, або Al_2O_3 , MgO і Fe_2O_3 чи Al_2O_3 , CaO та Fe_2O_3 і їх гідратів. наночастинки цієї речовини мають форму близьку до сферичної.

Введення ревіталізанта до мастильних матеріалів приводить до формування захисного покриття на металевих деталях механізмів, які труться, безпосередньо у процесі їхньої експлуатації [14]. Процес формування захисного покриття, який називається ревіталізація, він заснований на фізико-хімічній взаємодії поверхонь тертя у присутності ревіталізанта при граничному або змішаному режимах змащення. Механізм утворення захисної плівки при використанні ревіталізанта зображено нижче на рис. 1.

В результаті процесу ревіталізації утворюється металокерамічне градієнтне покриття. Особливість процесу – це зміцнення покриття з одночасним його «зростанням», що має високу контактну міцність і пластичність, гарну теплопровідність [14]. Утворене покриття збільшує фактичну площу контакту, знижує коефіцієнт тертя та зношування, а також захищає поверхні від схоплювання і зварювання.

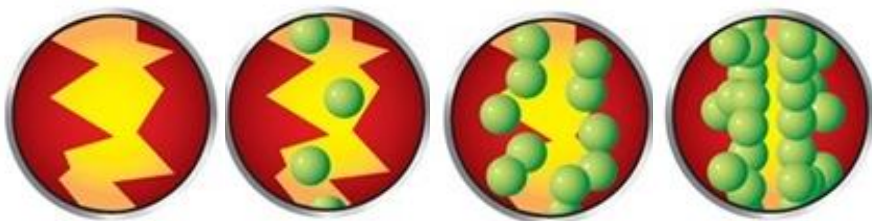


Рис. 1. Етапи ревіталізації в зоні тертя “метал – метал” і утворення захисної плівки, яка захищає пару тертя від зношування [13, 14]

Ревіталізант проявляє унікальні властивості при використанні присадок до мастильних матеріалів, що застосовуються для змащення поверхні циліндрів. На рис. 2 наведені дані про відновлення поверхні циліндра двигуна внутрішнього згорання де спостерігалися подряпини глибиною до 0,1 мм, які зникають при введенні ревіталізанта у мастильний матеріал.

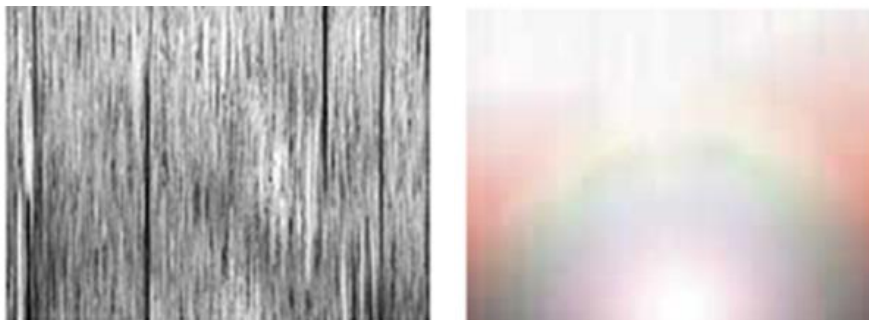
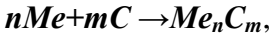


Рис. 2. Зліва – подряпини глибиною до 0,1 мм на поверхні циліндра двигуна, справа – відновлення поверхні шляхом утворюється гладкого металокерамічного покриття [15]

Явище ревіталізації дає можливість повернути процес зносу у зворотному порядку і відновити зношену поверхню шляхом утворення металокерамічного покриття. Ревіталізація починається в зоні найбільшого зносу, оскільки саме тут досить надлишкової енергії для початку нового процесу та атоми металу мають найбільшу кількість некомпенсованих зв'язків, які захоплюють і утримують саме в місцях зносу будівельний матеріал - ревіталізант. Таким чином, на старій основі формується нове покриття. Речовини, що входять до складу ревіталізанта, під дією тиску та температури, що виникають

між деталями при терті, виступають у ролі каталізатора утворення карбідів металів [15] за схемою



де Me – метал; C – вуглець.

За участі карбідів і стертих з робочих поверхонь часточок металу, що перебувають у мастильному матеріалі, у зоні надлишкової енергії формується новий захисний шар. Завдяки дифузії захисного шару в метал, утворюється супер міцне градієнтне покриття з унікальними позитивними експлуатаційними властивостями.

Демонстрація утворення покриття зображена на рис. 3: а) зовнішній вигляд доріжки кочення підшипника зі спеціально нанесеним дефектом, б) початкова поверхня деталі при збільшенні, в) дія ревіталізатору через 15 хв. - зникають дрібні подряпини та починається відновлення поверхні, г) усунений дефект поверхні після одної години ревіталізації за рахунок утворення металокерамічного покриття.

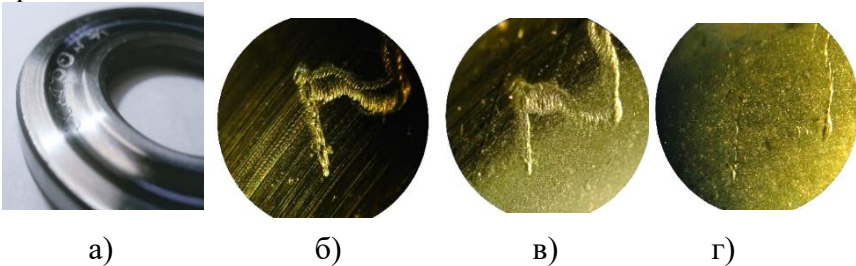


Рис. 3. Процес утворення металокерамічного покриття [15]

Утворення металокерамічного покриття відбувається при одночасній взаємній дифузії двох речовин (металу і металокераміки), яка завершує процес формування нового покриття, цементує і тим самим остаточно знищує дефект. Також чим більше проходить часу, тим більш міцним стає новоутворене покриття.

Ревіталізатор розв'язує завдання безрозбірного ремонту, збільшення ресурсу та максимально беззношувальної експлуатації машин і механізмів **лише тоді, коли компоненти є нанорозмірні**, та не спостерігається при використанні складових мікронних розмірів. Більше того, кварцовий пісок (SiO_2) та кристалічний корунд (Al_2O_3), якщо би входили до складу присадки у мікронному виді, то діяли би як абразиви зношуючи поверхні пар тертя.

Компанія «XADO» також повідомляє [13-15], що використання ревіталізатору дає наступні результати

у двигунах внутрішнього згоряння:

- усунення овальності та конусності на робочій поверхні циліндрів двигуна до 0,15 мм;
 - повне усунення подряпин і мікрозадирів на робочій поверхні циліндрів глибиною до 0,1 мм;
 - підвищення ресурсу робочої поверхні циліндрів до 2,5 разів;
 - економію палива до 18%;
 - зниження СО і НС у викидних газах від 2 до 10 разів.
- у підшипниках кочення:**
- зменшення радіальних зазорів до 0,07 мм;
 - збільшення ресурсу в 2 ~ 4 рази.

1.Застосування наноматеріалу Nano Vit Motor Renovator

Ефективним є німецький наноматеріал Nano Vit Motor Renovator (NVMR або НАНОВІТ). Він застосовується в системах змащення дизельних двигунів внутрішнього згоряння. Продукт перевірений на ефективність і сертифікований TUV THURINGEN сертифікат номер 8141.076.06.44. Продукт є сумішшю нанодисперсних порошоків (5-10 нм) SiO_2 - 80%, (10-70 нм) Al_2O_3 - 10% та терморасщепленого інтеркальованого графіту - 10% [16].

Наноматеріал NVMR сумісний з будь-яким видом масла, в силу своєї хімічної пасивності не вступає у взаємодію з пакетом стандартних присадок і не змінює властивостей товарного масла. Зауважимо, що при застосуванні NVMR [16] присадка по масі становить 0,03–0,05% за рахунок великої питомі поверхневої енергії наночастинок, яка складає 156 м^2 на один грам.

При використанні NVMR як присадки нанорозмірні матеріали взаємодіють із поверхнями тертя та утворюють захисні плівки [17] за наступним механізмом. У зоні тертя, де виникають високі напружень, відбувається розрив зв'язків алюміній-кисень у триоксиді алюмінію, що викликає впровадження атомів алюмінію у поверхні деталей. Утворена плакувальна плівка представляє собою твердий розчин зі значною пластичністю та міцністю, а частинки графіту, де сильний ковалентний зв'язок між атомами у шарі та слабкий Ван-дер-Ваальсовий між шарами, на поверхнях тертя забезпечують низький коефіцієнт тертя між деталями.

Розбирання двигунів показало (рис.3), що в результаті використання NVMR відбувається модифікація поверхонь тертя, яка викликає різке зростання адгезії молекул масла до поверхонь металу і в

зонах тертя утворюються стійкі плівки, які утримують мастильний матеріал. Діоксид кремнію SiO_2 та графіт створюють двовимірний ковзний шар, що різко знижує будь-які додаткові пошкодження фрикційних частин двигуна. Масло не стікає з її поверхонь, що додатково захищає пари тертя при холодному пуску двигуна від підвищеного зносу та відновлює дзеркало циліндра (рис.3). Як наслідок, забезпечується гідродинамічний режим змащення, механічні втрати у двигуні скорочуються до 30%, та істотно знижується знос.

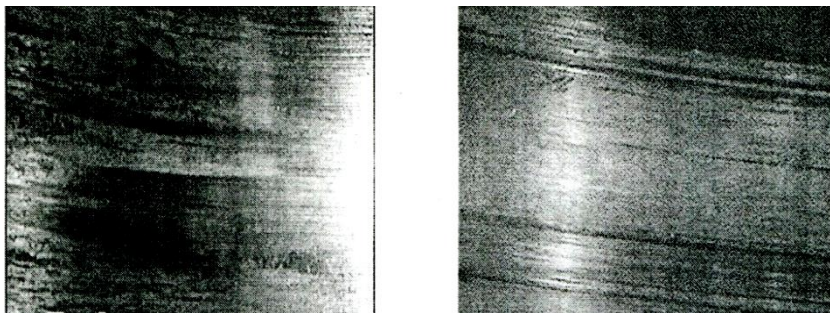


Рис. 3. Результат використання продукту NVMR –відмивання поверхні циліндра та відновлення його “дзеркала” [17]

Дослідним шляхом встановлено, що NVMR продовжує терміни експлуатації моторних масел в кілька разів. Встановлено [16,19], що після 50000 годин експлуатації суднового дизель-генератора додавання в моторне мастило продукту NVMR в процесі подальших 12000 годин роботи призвело до збільшення до 30% тиску стиснення в циліндрах, зниження коефіцієнта тертя до оптимального значення через 6000 годин роботи, підвищення в 4 рази періоду між плановими (3000 годин) замінами мастила, економії палива до 12% і очищенню поверхонь тертя від відкладень продуктів згоряння

Антифрикційні властивості NVMR багаторазово перевірялися в різних умовах змащення, при різних величинах навантаження і концентраціях продукту в маслі [18]. Були зроблені однозначні висновки про зниження коефіцієнтів тертя при певних умовах до значень 0,01-0,001, причому зі збільшенням навантаження реєструвалися більш низькі значення коефіцієнтів.

Випробування на реальному двигуні при високих навантаженнях показали, що обробка NVMR призводить до зниження швидкості зносу поршневих кілець в 3 рази, а вкладишів підшипників колінчастого вала в 5 і більше разів [19].

Зменшення внутрішніх механічних втрат у вузлах тертя двигуна при застосуванні NVMR зумовлює зниження витрати палива і зростання економічності двигуна. Випробування на стенді показали приріст максимальної потужності двигунів на 2-3% після обробки NVMR. Реальне зменшення витрат палива в режимах великих навантажень двигунів становить 5 - 8%. Крім того, оброблений двигун в півтора-два рази швидше виходить на ті ж значення крутного моменту, що необроблений [20].

Відмітимо вплив наноматеріалу NVMR на зменшення викидів, повноту згоряння палива та зниження рівня шуму. Дрезденський інститут FSD випробував дизельні двигуни внутрішнього згоряння при різних умовах експлуатації із додаванням NVMR.

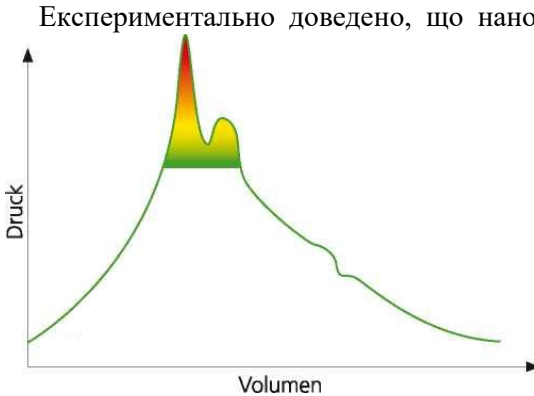


Рис.4. Залежність тиску при спалюванні палива при застосуванні NVMR [21]

Експериментально доведено, що нанокристали Al_2O_3 , які входять у склад NVMR накопичуються на поверхні камери згоряння і діють як незліченна кількість «міні-свічок запалювання». Ці «міні-свічки» викликають згладжування вибухового піку максимального тиску, що відмічено на рис.1, та контрольоване згоряння палива. При цьому в камері згоряння відбу-

вається модифікація поверхонь тертя та їх ретельне очищення. Рівномірне згоряння палива без локальних максимумів температури і тиску призводить до зменшення споживання палива та викидів забруднюючих речовин від двигунів внутрішнього, значно зменшуються вібрації.

Зменшення шуму роботи двигуна перевірялося прямими вимірами з використанням спеціальної апаратури [20]. Зниження рівня шуму на оброблених NVMR двигунах лежить в діапазоні від 1,5 до 2 разів.

Використання NVMR дає наступні результати:

- • Ретельне очищення двигуна, особливо поверхонь тертя;
- • Модифікація поверхонь тертя;

- • Зменшення внутрішніх механічних втрат двигуна;
- • Зниження витрати моторного масла;
- • Економія палива;
- • Зменшення викидів забруднюючих речовин;
- • Зниження рівня шуму;
- • Збільшення часу роботи двигуна.

3. Застосування наноматеріалу NANOL

У 2010 році в місті Гельсінкі (Фінляндія) була заснована компанія «Nanol Technologies Ltd.», яка розробляє, виготовляє та реалізує присадки і добавки до змащувальних матеріалів, мастил, моторних олів і різного виду пального, яке використовується на морському транспорті та у важкій промисловості і автомобільній сфері.

Інноваційна технологія [21] полягає у формуванні захисного наночастинки на поверхнях тертя, який не дає водню руйнувати контактні поверхні. Зважені наночастинки міді, що входять до складу наноматеріалів компанії, утворюють тонкий захисний шар лише на поверхнях тертя і у зонах контакту. Формування наноплівки у продуктах компанії NANOL відбувається [22,23] шляхом поверхневої активації, яка запускає окислювально-відновну реакцію, що зменшує кількість іонів міді в добавці з подальшим відкладенням частинок міді на поверхні металу (рис.5).

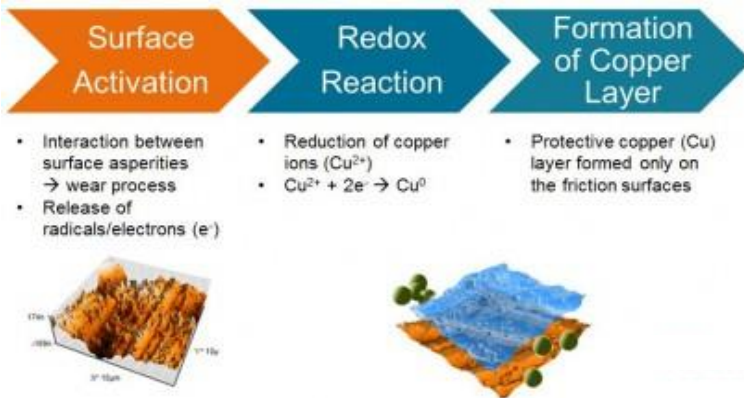
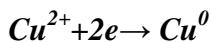


Рис. 5 . Механізм дії наноматеріалу NANOL [23]

Взаємодія між поверхневими нерівностями приводить до значних напружень, що викликає розкладання елементів, що входять до складу NANOL, в результаті чого утворюються вільні електрони. Далі відбувається відновлення іонів міді Cu^{2+} згідно реакції



та утворення захисного шару міді (рис.5), який утворюється лише у зоні контакту, тобто тільки на поверхнях тертя [23]. Мідна металева плівка захищає зони тертя від зносу, знижує робочу температуру вузлів тертя та подовжує термін служби машин і компонентів [22].

Зпатентована технологія також підвищує ефективність ДВЗ, покращує екологічні параметри та підвищує ефективність промислових застосувань із сильним тертям і високими температурами. Особливу увагу слід приділити продукту «Nanol Power+ МН/ML» [24], який був спеціально розроблений для застосування у морській сфері та на морському транспорті, зокрема для суднових ДВЗ, які працюють на важкому паливі з великим показником сірки (МН – highsulphur) та низькосірчастому пальному (ML – lowsulphur).

Центр «VTT Technical Research Center of Finland» у період з 2010 по 2017 роки провів [24] 16 натурних і 4 стендових випробування зі вмістом 0,3% NANOL у суднових моторних оливах і мастилах, та 15 лабораторних трибовипробувань з вмістом 0,3% ~ 3% NANOL в мастилі. У суднових натурних випробуваннях спостерігалось зниження витрати палива на 4% для дизельних двигунів середньої потужності (1600 ~ 10000 кВт), і – на 1~2% для великих (12600 ~ 15600 кВт) двигунів. Стендові випробування [24] в одиничних спостереженнях показали зниження тертя на 4%, зниження витрати палива до 3% і збільшення крутного моменту та потужності на 1% в дизельних двигунах різного типорозміру (60 ~ 4000 кВт) при використанні присадки «NanolPower+ МН/ML».

Центр «Schaeffler Group» випробував на машині FE8-25 [25] ролікові підшипник з метою оцінки впливу NANOL на утворення білих поверхневих тріщин (БПТ). Доведено, що поява БПТ спостерігалась, після часу випробування $t > 422$ годин, в той час, як для традиційних присадок утворення БПТ відбулося вже у проміжку від 30 до 42 годин. Отже, мастило з присадкою NANOL досягло щонайменше десятикратного збільшення терміну служби в порівнянні з іншим еталонним мастилом в умовах змішаного тертя.

Судноплавна компанія «Transfennica Ltd.» повідомляє [23], що випробування, проведені компанією «Napa Ltd.» під наглядом Регістру судноплавства «Lloyds Register» на судні M/V «Seagard» (з головним двигуном Wärtsilä 16V46B, MCR-потужність якого становила 15600 кВт), показали, що при використанні продукту NANOL споживання палива скоротилося в середньому на 2%.

Судноплавна компанія – «BoreLtd.» (експлуатує судна типу "Ро-Ро", а саме «Ro-Flex», «Ro-Ro» та «CarCarrier»), звітує [25], що у двигунах суден компанії загальна витрата палива була знижена приблизно на 4% за перші 12 місяців використання продукту NANOL.

При застосуванні отримані наступні результати:

- зменшення витрат палива до 6%;
- зменшення шкідливих викидів у атмосферу до 30%;
- зменшення показників тертя до 30%;
- зменшення зносу та задирів на поверхні циліндрів до 10%;
- збільшення терміну роботи підшипників кочення.

4. Особливості механізму дії наноматеріалів

Наведемо аргументи, які дають підстави пояснення ефективної дії наноматеріалів у порівняння з традиційними присадками мікронних розмірів.

Оцінимо надлишкову поверхневу енергію зразка масою $m = 1$ г утвореного сферичними наночастинками розміром $r = 10$ нм. Прийmemo середнє значення густини $\rho = 4 \cdot 10^3$ кг/м³, тоді об'єм даної маси $V = m/\rho = 2,5 \cdot 10^{-7}$ м³, об'єм наночастинки $V_0 = 4\pi r^3/3 = 4,2 \cdot 10^{-24}$ м³ та її поверхня $S_0 = 4\pi r^2 = 1,26 \cdot 10^{-15}$ м². Загальна кількість частинок $N = V/V_0 = 6 \cdot 10^{16}$, а їх сумарна площа поверхні $S = S_0 N = 75$ м² та сумарна поверхнева енергія $W = \sigma S = 7,5$ Дж, де взяли для питоми поверхневої енергії характерне значення $\sigma \sim 0,1$ Дж/м².

Отже 1 г наночастинок має характерне значення сумарної поверхні 10-100 м² та характерне значення надлишкової поверхневої енергії $\sim 1-10$ Дж. Отримані результати на 2-3 порядки більші, ніж для частинок мікронних розмірів, отже наночастинок знаходяться у нерівноважному стані..

Щоб описувати процеси, які протікають в нерівноважних системах вводять поняття відкритої системи, де зміна ентропії складається з двох внесків [25]

$$dS = dS_V + dS_S,$$

де $dS_V > 0$ є приріст ентропії в системі за рахунок процесів, які протікають, та dS_S – потік ентропії, обумовлений обміном енергією або речовиною з оточуючим середовищем і цей доданок не має певного знаку. В такій відкритій системі, яку називають "активним елементом", можливий такий перерозподіл енергії між її елементами, при якому система переходить в стан з меншою ентропією, тобто

$$dS = dS_V + dS_S < 0.$$

Тобто, у відкритих термодинамічних системах при по мірі збільшення відхилення від рівноважного стану, як показав Пригожин [25], термодинамічна система губить стійкість, а малі флуктуації можуть привести до процесів самоорганізації – у результаті якого відбувається перехід від хаотичного руху до впорядкованого систему зі створення нових просторових та часових структур, які не виникають поблизу рівноважного стану.

Так, при введенні наноматеріалів у мастильний матеріал у парах тертя досягаються високі напруження та градієнти температур, що створює суттєві відхилення від рівноваги у нерівноважній системі, якою є наноматеріал. У цих місцях можуть виникати перетворення зі зменшенням ентропії, які приводять до виникнення порядку в системі, як прагнення системи знизити ентропію шляхом самоорганізації наночастинки, що пояснює, чому відбувається утворення міцної та зносостійкої плакувальної плівки, які суттєво збільшують ресурс пар тертя [26].

Друга причина – це особливість поведінки поверхневих атомів при контакті з металічною поверхнею, де можливе тунелювання електронів через бар'єр між наночастинкою і поверхнею та перехід електронів на вакансії. Доля атомів, що знаходяться на поверхні сферичної частинки діаметром d до загальної кількості атомів у об'ємі частинки складає [27] $\Delta N/N \approx 6\delta/dN$, де δ – товщина поверхневого шару частинки, яка складає 3-4 моношари часток і має величину $\sim 0,5$ нм. Тоді у сферичної частинки розмірі 10 нм, частка поверхневих атомів велика та складає 30%.

Електронні властивості атомів описуються квантово-механічним методом молекулярних орбіталей $\Psi_{(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_k)}$, які отримують [28] шляхом комбінацій атомних хвильових функцій

$$\Psi_{(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_k)} = \prod_{i=1}^k \Psi_{(\vec{r}_i)}, \text{ правити}$$

які є розв'язком стаціонарного рівняння Шрьодінгера [10]

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \psi_{(x,y,z)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_{(x,y,z)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_{(x,y,z)}}{\partial z^2} \right) + u_{(x,y,z)} \psi_{(x,y,z)} = E \psi_{(x,y,z)}$$

де E – енергія частинки, $u_{(x,y,z)}$ – потенціальна енергія в якій знаходиться частинка.

Положення поверхневих атомів відмінні від об'ємних за рахунок ненасичених електронних зв'язків у порівнянні з атомами в об'ємі наночастинки. Тому у разі контакту наночастинки з металічною по-

верхню орбіталі можуть виступати за межі об'єкта та здійснювати зв'язок з оточенням. За рахунок взаємодії з оточенням орбіталі деформуються, що змінює їх енергію і коли енергія взаємодії досягає рівня Фермі [28] електрони переходить на поверхню металу при контакті з ним. В результаті чого виникає кулонівська взаємодія між наночастиною та металом, що зумовлює дії сил притягання та утворення конфігурації з сильним ковалентним або іонними зв'язком [28].

Крім зазначеного, виникнення кулонівської взаємодії наночастинок з металічною поверхнею, можливе за рахунок тунелювання електронів з поверхневих атомів. Ймовірність електрона, енергія якого E , проникнути в область $[x_1, x_2]$, де значення потенціальної енергії $u(x) > E$, визначається з виразу [10]

$$w = D = D_0 \cdot \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(u(x) - E)} \cdot dx \right],$$

де вісь x спрямована по нормалі до поверхні.

Оскільки при $E < u$ отримуємо $w > 0$, тобто електрон має шанс пройти через бар'єр, коли його енергія менша максимальної потенціальної, тому процеси тунелювання електронів з наночастинок до пар тертя цілком ймовірні.

Велика доля поверхневих атомів, нерівноважність наночастинок та кватновий характер руху атомів дає можливість пояснити ефективну взаємодію нанорозмірних матеріалів з металевими поверхнями.

Висновки

Аналіз експериментальних досліджень підтверджує, що наноматеріали ХАДО, Nano Vit Motor Renovator та NANOL відіграють значну роль у покращенні експлуатаційних характеристик суднових механізмів. Нанорозмірні частинки, що входять до наноматеріалів, мають енергетичну нерівноважність і в результаті самоорганізації при взаємодії з поверхнями деталей відбувається утворення захисної плакувальної плівки. Утворена плівка має високу контактну міцність і пластичність, гарну теплопровідність і знижує коефіцієнт тертя та зношування і захищає поверхні від схоплювання і зварювання.

Застосування розглянутих наноматеріалів у мастилах на морському транспорті діє протягом тривалого проміжку часу та дає наступні переваги:

- утворюють захисну трибоплівку на поверхнях тертя та у зонах контакту;

- сприяють суттєвому зменшенню зменшують тертя та зносу;
- суттєво підвищують несучу здатність мастил та збільшення часу їх дії;
- сприяють розсіюванню надлишкового тепла, знижуючи робочі температури та термічне навантаження на суднові деталі;
- подовжують термін служби судових двигунів і механізмів;
- підвищують показники енергоефективності та економічності СДВЗ;
- сприяють покращенню показників економії палива і мастила та зниженню викидів шкідливих речовин у атмосферу.

Саме тому розглянуті наноматеріали, як писадки до мастил та палив, є сучасною перспективою та дієвою альтернативою до вже існуючих. А їх механізм дії можна пояснити у рамках самоорганізації та квантовомеханічної поведінки наночастинок.

Перелік використаних джерел

1. Poole Charls. Introduction to nanotechnology/ Ch. Poole, F. OutsenLondon: John Wiley & Sons, 2003. 336 p.
2. Kumar Phany. Principles of Nanotechnology /Ph. Kumar//2Nd.Edish, ScitechPublications, 2020. 115 p.
3. Kozytskyi S. V. Properties and behavior of nanoparticles / S. V. Kozytskyi, S. V. Kiriiian. // Фізика аеродисперсних систем. – 2022. – №44. – С. 17–30].
4. Козицький С. В. Особливості дії наночастинок / С. В. Козицький, С. В. Кіріян. // Матеріали наук.-техн. конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса, 2019. – С. 49–52
5. Kozytskyi S. V. Effectiveness of nanomaterial utilizationin ship’s mechanisms / S. V. Kozytskyi, S. V. Kiriiian. // Суднові енергетичні установки. – 2019. – №39. – С. 101–106
6. Козицький С.В., Мікро-, мезо- та нанорозмірні кристали сульфїду цинку отримані методом високотемпературного синтезу, що само поширюється/ Фізика аеродисперсних систем. – 2023 – № 61. – С.32-42
7. Наноматеріали і нанотехнології / Азаренков М. О., Неклюдов І. М. та інші. – ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2014. – 316 с.
8. Valiulis A. A history of materialsand technologies development / A.Valiulis. – Technika, 2014. – 444 p.

9. Сугаков В. Й. Синергетика / В.Й. Сугаков //Київ, Обегіг, 2001. – 287 с.

10.Глауберман А. Ю. Квантова механіка / А. Ю. Глауберман. 2 видання// Одеса: Астропринт, 2017. – 526 с.

11.Козицький, С. В. Властивості нанооструктурованих матеріалів / С. В. Козицький, С. В. Кіріян // Суднові енергетичні установки. – 2022. – №45. – С. 123-133.

12.Козицький, С. В. Застосування наночастинок для збільшення ефективності суднових механізмів/ С. В. Козицький,Кіріян С. В. // Суднові енергетичні установки. – 2023. – №46. – С.53-66.

13.XADO Industrial: Revitalizants, oils, greases. Коддоступу: [https://xadoindustrial.com/image/data/download/XADO Industry](https://xadoindustrial.com/image/data/download/XADO%20Industry)

14.Стадниченко В. Н., Об образовании и функционировании металлокерамического покрытия полученного с помощью ревитализантов /В. Н. Стадниченко, Н. Г. Стадниченко, Р. Н. Джус, О. Н. Трошин // Вестн. науки и техн.: ХДНТ и НТУ «ХПИ». — 2004. — Вып. 1(16). — С. 18-27

15.Трошин О. Н. Наукова парадигма досягнення аномально низького тертя в трибології / О. Н. Трошин // Вісник ХНТУСГ. Вип. 184, 2017. С. 102-110

16.Nano Vit Research GmbH [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nanovit-research.de/ueber-nanovit>.

17.Nanovit: General presentation. –Режим доступу до ресурсу: [http://efficiencytechnologies.co.uk/downloads // Tribo Presentation.pdf](http://efficiencytechnologies.co.uk/downloads//Tribo%20Presentation.pdf)

18.NanoVit Research GmbH [https://www.nanovit.de/ Neue MöglichkeitendurchEinsatz von NanoVit®–Download](https://www.nanovit.de/NeueMoglichkeitendurchEinsatzvonNanoVit-Download)

19.NanoVit Research GmbH [https://www.nanovit.de/ Der Einsatz von NanoVit® in Schmierfetten und -pasten–Download](https://www.nanovit.de/DerEinsatzvonNanoVit-inSchmierfettenund-pasten-Download)

20.NanoVitResearch GmbH [https:// www.nanovit.de/ NanoVit® in-Diesel- Verbrennungsmotoren – Download](https://www.nanovit.de/NanoVit-in-Diesel-Verbrennungsmotoren-Download)

21. Lubricant oil additives. Nanol Technology – <https://www.nanol.eu>

22. Nanol Technology. – Access mode: [https://nanol.eu/technology Fighting friction with chemistry and innovation.htm](https://nanol.eu/technologyFightingfrictionwithchemistryandinnovation.htm).

23. Nanol References [Electronic resource].–Access mode: <https://nanol.eu/references/>.

24. Nanol Power+ [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nplube.com/nanol>.

25. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. - М: Мир, 1979. – 512 с.

26. Козицький С.В. Особливості поведінки наноматеріалів/Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса, 2022. с.49-52

27. Козицький С. В., Кіріян С. В. Особливості дії наночастинок / Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річко вий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса, 2019. с.49-52

28. Поплавко Ю. М. Фізика твердого тіла. Том 1: Структура, квазі частинки, метали, магнетики:– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 415 с.

10.31653/smf48.2024.46-53

Колегаєв М.О., Бражнік І.Д.

Національний університет “Одеська морська академія”

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПРИМІЩЕНЬ НАФТОВИХ ТАНКЕРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ ІНЕРТНИХ ДИМОВИХ ГАЗІВ

Постановка проблеми. Експлуатація танкера завжди передбачає використання процесу інертизації його вантажних приміщень. Реалізація цього процесу забезпечує головні вимоги до створення та підтримання безпечної з погляду виникнення пожеж та вибухів атмосфери у вантажних танках. На танкерах, де двейт яких перевищує 8000 тонн, цей процес є попереднім перед операцією отримання нового вантажу. Використання системи інертних газів (ІГ) є обов'язковим і з 1978 р. регламентується вимогами ІМО [1]. Всі технологічні етапи виробництва, обробки та подачі ІГ до вантажних танків, є універсальними. Вони містять одностипне обладнання та магістралі. Тому технічні проблеми, що виникають під час їх експлуатації, є ідентичними. Для їхнього опису була розроблена універсальна класифікація. Вона показана на рис. 1 і складається із трьох напрямків.

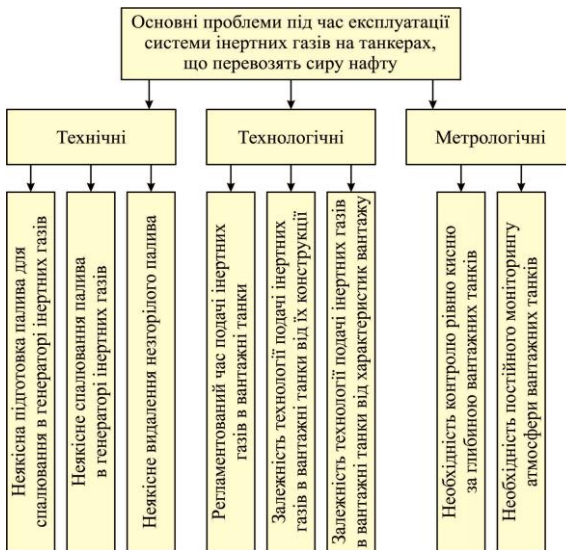


Рис. 1. Класифікація проблем, що виникають під час експлуатації системи ІГ на танкерах

Перший напрямок – технічний. Він визначається недосконалістю конструкцій технічних пристроїв, що використовуються. Другий напрямок – технологічний, який визначається недосконалим проектуванням, а також наявністю окремих недоліків у технологіях подачі ПГ, що використовуються, всередину робочого об'єму вантажного танка. Третій напрямок – метрологічний. Він визначається якістю використовуваних засобів вимірювання та контролю. До нього також входять аварії, що пов'язані з людським фактором з боку екіпажу танкера.

Під час вивчення причин аварій, що виникали у системах ПГ на танкерах, було виконано аналіз аварійних звітів. Як результат встановлено, що найбільш часто проблеми, що виникають на танкерах, пов'язані з технічними недоліками системи ПГ. До цих недоліків відносяться:

- неякісна сепарація палива та, як наслідок, слабка фільтрація важких фракцій палива, що спалюється – на завершальному етапі це виявляється в зменшенні виробленої кількості ПГ і зриву процесу горіння в робочій камері генератора ПГ;
- неякісне спалювання палива в генераторі ПГ, що виявляється у підвищеному генеруванні сажі та заниженої кількості одержуваного основного продукту горіння у вигляді вуглекислого газу CO_2 [2].

Усунення цих недоліків то, можливо за допомогою вдосконалення перелічених технологічних вузлів. Можлива також модернізація системи підготовки палива за рахунок встановлення додаткового обладнання в лінії попередньої подачі палива.

Аналіз технологічних недоліків у роботі систем ПГ на танкерах показав, що процес створення пожежо- та вибухобезпечної атмосфери всередині вантажного приміщення проводиться з економічної точки зору неефективно. Найголовнішим недоліком є підвищена тривалість процесу інертизації. Головною причиною великої тривалості процесу інертизації вантажних приміщень танкера є недосконалість використовуваних технологій [3].

Розв'язання цих проблем може бути досягнуто шляхом дослідження процесу інертизації вантажного приміщення танкера за рахунок використання удосконалених механізмів збільшення швидкості масообміну повітря та ПГ.

З урахуванням вищезазначеного можна констатувати наявність дуже актуальної проблеми. Вона полягає у розробці нових принципів функціонування системи генерування та подачі ПГ у вантажні примі-

щення нафтових танкерів. Саме ці гази забезпечують суттєве підвищення якості експлуатації танкера за рахунок зміни технології інертизації та зниження аварій, пов'язаних з якістю та тривалістю роботи таких систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основні принципи роботи системи ІГ на танкерах базуються на спалюванні дизельного палива в генераторі ІГ. Він є окремим пристроєм, який не пов'язаний із судновим контуром підготовки палива. Вироблені під час функціонування генератора ІГ продукти згоряння після проведення низки операцій з їхньої очищення та зниження температури прямують до вантажних танків нафтового танкера.

Відповідно до вимог SOLAS система повинна забезпечувати:

- концентрацію кисню в ІГ – менше за 5 %;
- концентрацію кисню в вантажному приміщенні – менше за 8 %;
- температуру ІГ під час подачі у вантажні приміщення – менш за 65 °С.

Вихідний вимушений рух повітря в вантажному танку завжди обумовлений дією сили, що виштовхує, від поданих в трюм ІГ. Ця сила також з'являється через зміну густини внаслідок взаємопов'язаних між собою процесів теплоперенесення та передачі маси через різні концентрації ІГ і повітря. Температурна стратифікація потоку ІГ у суміші з повітрям за висотою вантажного танка також є одним із факторів, що впливають на швидкість витіснення повітря з вантажного приміщення судна. Вона також є складовою, що реалізує механізм передачі енергії від ІГ до повітря [4].

У роботах [5-8] показано, що у разі вимушеної конвекції поле течії в замкнутому обсязі перестає залежати від механізмів теплопередачі та поточного поля температур. Цей висновок свідчить про доцільність використання примусової подачі ІГ до вантажного танка судна. У більшості наукових праць з теорії конвекції зазвичай розглядаються процеси тепломасоперенесення в необмеженій області без присутності жорстких обмежень [6, 9]. Тільки невелика кількість робіт описує процес змішаної конвекції або дифузії газів у замкнутих обсягах, коли стінки, що обмежують потік, істотно нестационарно впливають на механізм процесу перенесення тепла або маси [7]. Для розв'язання проблеми інертизації вантажних приміщень танкера зі складною формою поперечного перерізу ці результати підходять лише першому наближенню.

У застосуванні до інертизації вантажного танка П найближчими є результати роботи [8]. У ній розглянуто теплову конвекцію у три-вимірному прямокутному об'язі з відкритим верхом у діапазоні чисел Релея $Ra=100\dots 10^8$. Експериментальним шляхом встановлено, що:

1) за числах Релея $Ra < 10^3$ у прямокутному об'язі виникає один осередок зі слабкою стаціонарною циркуляцією. Рідина, нагріта біля стінки, піднімалася, та після опускалася біля холодної стінки. По ширині всього об'язу течія була спрямована лише вертикально (включаючи повороти поблизу верхньої та нижньої меж);

2) за числах Релея $10^3 < Ra < 10^5$ градієнт температури поблизу стін зростає, а у внутрішній ділянці течії залишався постійним. Розподіл швидкості для чисел Релея від $3 \cdot 10^4$ до $3,6 \cdot 10^6$ характеризується вертикальною симетричністю. Зростання числа Релея свідчить про просторове збільшення шириною зони ядра потоку.

У роботах [7, 10] як нижня межа виникнення вторинних течій в замкнутому прямокутному об'язі наводяться різні числа Релея. Діапазон розкиду отриманих значень становить $Ra=2,1 \cdot 10^5 \dots 3,9 \cdot 10^5$. Більш складні структури потоку виникають за числах Релея $Ra > 10^6$. В цьому випадку виникають багатоосередкові структури зі слабкими зсувними течіями на їхніх межах.

У застосуванні до процесу конвективно-дифузійного перенесення П у суднових вантажних танках важливими є результати роботи [8]. У ній показано, що під час термогравітаційної конвекції всі коефіцієнти перенесення є постійними і не залежать від температури.

Аналіз наведених робіт показав, що тривалість процесу витіснення повітря з вантажних танків судна безпосередньо визначається такими параметрами, як швидкість подачі струменів П та число Прандтля Pr . Чим вище їх значення, тим сильнішим буде конвективне перенесення, зростання архімедової сили та величина ежекції повітря вздовж осі дії струменя П.

Мета роботи полягає у підвищенні експлуатаційних характеристик танкерів шляхом удосконалення системи генерування та технології подачі інертних газів у вантажні приміщення танкера.

Виклад основного матеріалу. У ході теоретичних досліджень процесу витіснення повітря з вантажного приміщення танкера за рахунок подачі П встановлено, що під час використання примусової інертизації можливо отримати сильний висхідний перебіг повітря. Цей результат є автотельним також при зміні об'ємної витрати П,

що подаються, або розмірів суднового вантажного приміщення з урахуванням збереження його геометричної подоби залишатиметься завжди незмінним. Отримані конфігурації поля швидкості та поля тиску також залишатимуться ідентичними.

Подача ІГ моделювалася конічним струменем. Її джерело розташовувалося у центрі днища вантажного танка, що у розрахунках відповідало середині нижньої межі розрахункової області. Довжина факелу струменя за рахунок граничних умов задавалася рівною п'яти відсоткам від висоти вантажного приміщення [11].

Примусова подача ІГ в танк танкера з метою його інертизації повинна ґрунтуватися на структурі потоку повітря, що рухається з невисокими швидкостями, всередині вантажного приміщення, що обмежений його жорсткими стінками. Оскільки основна зміна в епорах швидкості, завихренності і температури спостерігається тільки в кутових зонах вантажного танка, тому під час проведення експериментів подача струменів ІГ проводилася в ядро висхідного повітряного потоку. У цьому випадку турбулізація стійкої течії в середній частині вантажного танка призводила до скорочення часу процесу інертизації [12].

Під час виконання експериментів, проведених в умовах роботи танкера, за умовою примусової подачі ІГ вимірювались значення величини концентрації кисню на виході з вантажного танка. Вимірювання проводилися одночасно у шести вантажних танках. На рис. 2 наведено графіки, які відповідають осередненню цих даних.

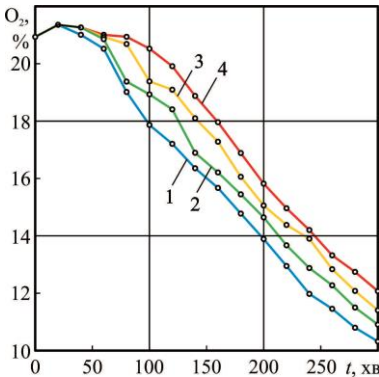


Рис. 2. Зміни концентрації кисню в трюмі за різних кутів конусності струменя ІГ: 1 – 30°; 2 – 90°; 3 – 120°; 4 – стандартна подача ІГ

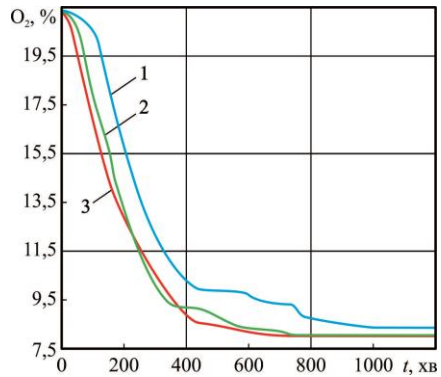


Рис. 3. Зміна концентрації кисню в трюмі танкера. Подача ІГ: 1 – стандартна; 2 – удосконалена; 3 – розрахунок

Як впливає з рис. 2, найкращі результати були отримані за кутом розпилу П рівним 30° . У цьому випадку значення концентрації кисню всередині танка були найменшими. Це пояснюється більшою дальністю дії струменя П, що потрапляють до вантажного приміщення, і відповідно збільшенням зони конвективної взаємодії П з повітрям. Також рис. 2 свідчить, що характер зміни концентрації кисню всередині танка у всіх чотирьох випадках залишався ідентичним. Цей результат дозволяє зробити висновок, що вплив кутів розкриття струменів П на характер витіснення повітря з вантажного приміщення не є основним, а процес залежить в основному від ступеня стратифікації густини П всередині робочого простору трюму.

У ході експериментів була отримана залежність, що відображає характер зменшення часу концентрації кисню в вантажному приміщенні танкера під час удосконаленою подачі П. Її порівняння зі стандартною інертизацією вантажного танка та результатами розрахунків на основі математичної моделі показано на рис. 3. Експериментальні дані на цьому графіку були отримані одночасно, коли два вантажних приміщення заповнювалися П за стандартною технологічною схемою та з використанням удосконаленої подачі П.

Аналіз результатів показує, що використання удосконаленої подачі П призводить до кількісного, але не якісного розходження в змінах концентрації кисню всередині вантажного приміщення танкера. Використання процесу удосконаленої подачі П призводило до отримання найголовнішого та основного результату – скорочення часу, що витрачається на інертизацію вантажних приміщень танкера перед отриманням нового вантажу. На графіку видно, що розбіжність між кривими починається через 80 хвилин після початку інертизації вантажного танка. Вихід на стаціонарне значення концентрації кисню менше ніж 8 % спостерігається через 740 хвилин після початку удосконаленого процесу інертизації вантажного приміщення. Аналогічна величина концентрації в ході стандартного процесу інертизації за цей період часу була більшою і становила 9,25 %. Її вихід на стаціонарне значення спостерігався приблизно через 1700 хвилин після початку процесу інертизації вантажного танка.

У відсотковому співвідношенні покращення процесу інертизації вантажних приміщень за умовою переходу від стандартного до удосконаленого процесу інертизації вантажних танків склало 13,5 %. Скорочення витраченого часу за інших рівних умов становило 56,47 %.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

1. Однотипність технологічних контурів та обладнання, що використовується для виробництва, обробки та подачі ПГ на танкерах виявляється в ідентичності технічних проблем, що виникають під час їхньої експлуатації.

2. На танкерах доцільно використовувати удосконалену подачу ПГ до вантажного приміщення танкера з кутом розпилу в сопловій насадці рівним 30° . Через збільшення зони конвективної взаємодії ПГ з повітрям значення концентрації кисню всередині вантажного танка в цьому випадку будуть найменшими.

3. Використання процесу удосконаленої подачі ПГ призводить до скорочення часу інертизації вантажних приміщень танкера на 56,47 %.

4. Основна спрямованість подальших досліджень має бути пов'язана з удосконаленням системи підготовки палива, що використовується у судовому генераторі інертних газів. Підвищення ступеня диспергування може бути досягнуто за рахунок використання процесу кавітаційної обробки палива перед спалюванням.

Перелік використаних джерел

1. Бражник І.Д. Изменение рабочих характеристик системы инертизации танкера за счет принудительной подачи газов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. Науковий журнал. – 2019. – № 1(20). – Херсон: ХДМА. – С. 4-11.

2. Бражник И.Д. Модернизация процесса вентиляции грузовых трюмов танкера с помощью системы инертных газов // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки». – 2019. – Т. 30(69) – № 5. – С.129-133.

3. Малахов О.В., Коллегаев М.О., Бражник І.Д., Ліхогляд К.А. Характеристики процесу тепло-масопереносу в застосуванні до вентиляції інертними газами вантажних трюмів танкерів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2019. – Вип. 39 – Одеса: НУ «ОМА». – С. 56-68.

4. Anand S., Suresh S., Santhosh Kumar D. Heat Transfer Studies of Supercritical Water Flows in an Upward Vertical Tube // Journal of Heat and Mass Transfer Research. – Semnan : Semnan University Press, 2019. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 155-167.

5. Reif A., Büchner A., Rehfeldt S., Klein H. Outer heat transfer coefficient for condensation of pure components on single horizontal low-

finned tubes // Heat and Mass Transfer. – Berlin : Springer, 2019 – Vol. 55. – Iss. 1. – P. 3-16.

6. Shervani-Tabar M.T., Parsa S., Ghorbani M. Numerical study on the effect of the cavitation phenomenon on the characteristics of fuel spray // Mathematical and Computer Modelling. – Amsterdam : Elsevier. – 2012. – No 56. – P. 105-117.

7. Wong S.F., Dol S.S. Turbulence Characteristics Study of the Emulsified Flow // WSEAS Journal – Transactions on Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 14. – P. 45-50.

8. Mohyud Din S.T., Zubair T., Usman M., Hamid M., Rafiq M., Mohsin S. Investigation of heat and mass transfer under the influence of variable diffusion coefficient and thermal conductivity // Indian Journal of Physics. – Calcutta : Springer. – 2018. – Vol. 92. – Iss. 9. – P. 1109-1117.

9. Belghazi M., Bontemps A., Marvillet C. Condensation heat transfer on enhanced surface tubes, experimental results and predictive theory // Journal of Heat Transfer. – New York : ASME, 2002 – Vol. 124(4). – P. 754–761.

10. DeWitt D.P., Incropera F.P., Lavine A.S., Bergman T.L. Principles of Heat and Mass Transfer / D. P. DeWitt // Chichester : John Wiley and Sons Ltd. – 2012. – 1072 p.

11. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

12. Malakhov O.V., Kolegaev M.O., Brazhnik I.D., Saveleva O.S., Malakhova D.O. New Forced Ventilation Technology for Inert Gas System on Tankers // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2020. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 2549-2555.

10.31653/smf48.2024.54-62

Корх М.В.

Національний університет “Одеська морська академія”

ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ СУДНА ТА ЙОГО ОБЛАДНАННЯ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Морська галузь завжди була в центрі інновацій та технологічних вдосконалень. Одним із ключових напрямків, які в останні роки знаходять широке застосування, є використання нанотехнологій. Нанотехнології вносять революційні зміни у різні аспекти морського господарства, включаючи суднобудування, експлуатацію механізмів та приладів, охорону довкілля та дослідження океану. Однією з ключових галузей, які виграють від нанотехнологій, є суднобудування. Використання наноматеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки, полімерні нанокompозити та нанокераміка, дозволяє створювати легкі, але дуже міцні конструкції. Це сприяє покращенню ефективності плавання, зменшенню ваги суден та збільшенню їхньої морської стійкості [1].

Впровадження нанотехнологій у приладах та механізмах машинного відділення морського судна має величезний потенціал для поліпшення його продуктивності, надійності та збільшення ресурсу машин і механізмів. Використання нанотехнологій у сучасних засобах обладнання морських судів відкриває нові можливості для підвищення ефективності операцій, забезпечення комфорту екіпажу та зменшення впливу на навколишнє середовище.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У світовому науковому середовищі зараз проводяться інтенсивні дослідження в напрямках удосконалення існуючих й створення новітніх «проривних» нанотехнологій.

Аналіз наукових публікацій зарубіжних вчених свідчить, зокрема, про те, що саме нанотехнології мають велику перспективу використання при виготовленні різноманітних високоміцних та корозійностійких корпусних і конструктивних елементів на основі вуглецевих нанотрубок, що викликає підвищений інтерес серед представників суднобудівного напрямку.

Постановка завдання. При експлуатації судових механізмів виникають деякі проблеми, які вимагають ефективного вирішення. Завданням даної статті є аналіз наукових засад та передумов що до

отримання та застосування вуглецевих нанотрубок для збільшення ресурсу судна та його обладнання.

Виклад основного матеріалу. Однією з найважливіших подій в історії розвитку нанотехнології стало відкриття у 1991 р. нової форми нановуглецю – нанотрубок. Загальновідомим є факт спостереження структури багат шарових нанотрубок Іджімої в 1991 р..

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) – це протяжні згорнуті графітові площини, мають циліндричну форму. Як правило, товщина їх досягає декількох десятків нанометрів, з довжиною в кілька сантиметрів. На кінці нанотрубок утворюється сферична головка, яка є однією з частин фулерену [1]. Існують такі типи вуглецевих нанотрубок: металеві та напівпровідникові. Головним їх відмінністю є провідність струму. Перший вид може проводити струм при температурі рівній 0°C, а другий — тільки при підвищених температурах.

Структурні властивості вуглецевих нанотрубок. *Одношарові вуглецеві нанотрубки (ОВНТ)* – це безшовні циліндри графену, що закінчуються фулереноподібною півсферою. Відмінними рисами ОВНТ є простота їх будови, менша кількість дефектів і, як наслідок, високі механічні і фізико-технічні характеристики [2]. Разом із тим необхідно зазначити, що практичне застосування цих наноструктур обмежується електронікою і приладобудуванням, де потрібна порівняно невелика кількість вуглецевих нанотрубок високої якості. Отримані нанотрубки майже завжди є кривими і переплутаними одна з одною, формуючи при цьому по-різному заплутані клубки (рис.1).

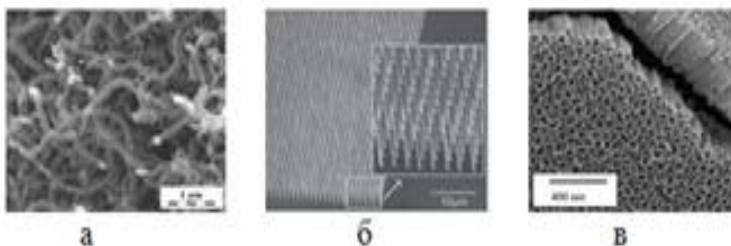


Рис.1. Електронно – мікроскопічне зображення ВНТ (а) та їх «ліс нанотрубок» (б, в) [2]

Ідеальна ВНТ являє собою згорнуту в циліндр графітову площину з півсферами по краях (рис. 2 а). Графітова сітка складається із гексагональних комірок (на бічній поверхні циліндра і його півсферах) і пентагональних комірок, що знаходяться по краям у напів

сфер. Діаметр і довжина ВНТ коливаються в межах 0,3 – 5 нм та 1-500 мкм відповідно [2].

У залежності від хіральності в них можуть проявлятися металеві або напівпровідникові властивості. Термін *хіральність* означає, що два предмети знаходяться у відповідності один до одного як ліва і права руки, тобто являють собою дзеркальне зображення, які не збігаються при спробі їх суміщення у просторі. Хіральними можуть бути кристалічні структури (двоокис кремнію – природний кварц (рис. 2 б) .

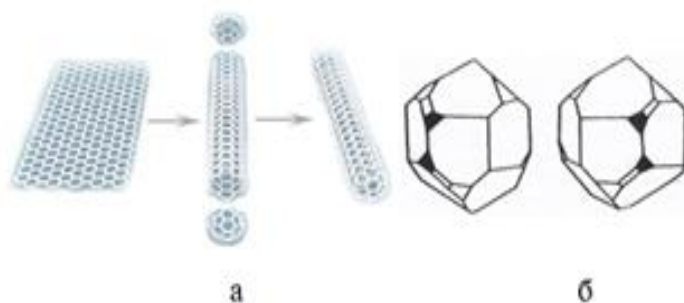


Рис. 2. Схематичне формування закритої нанотрубки (а) та зображення правого та лівого кристалу кварцу (б) [6]

Багатошарові вуглецеві нанотрубки (БВНТ) відрізняються від одношарових більш широкою різноманітністю форм і конфігурацій, які проявляються як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку. БВНТ, як правило, складаються з одношарових нанотрубок діаметром, що поступово зростає, розміщених у вигляді концентричних циліндрів, та містять у собі від декількох до десятків ОВНТ, усталених коаксіально одна в одну [6]. За своєю структурою їх поділяють на БВНТ типу «матрьошка», шестикутна призма, сукупність вкладених один в одного коаксіальних призм та типу «згорток» (рис. 3) [2].

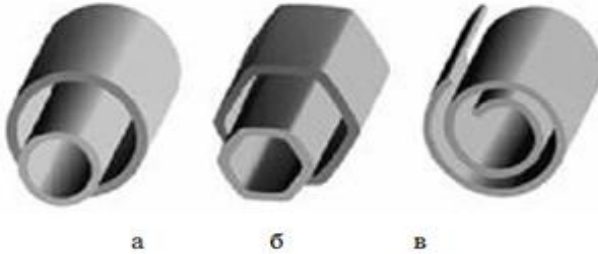


Рис. 3. Поперечний переріз БВНТ: а – матрешка, б – шестикутна призма, в – згорток [1]

Отримання вуглецевих нанотрубок. На сьогоднішній день існують наступні методи одержання вуглецевих нанотрубок: електродуговим розрядом, лазерне випаровування, метод осадження парів [1].

Електродуговий розряд. Отримання вуглецевих нанотрубок у плазмі електричного заряду, який горить із застосуванням гелію. Такий процес може виконуватися за допомогою спеціального технічного обладнання для отримання фулеренів. Але при даному способі використовуються інші режими горіння дуги. Наприклад, щільність струму знижується, а також використовують катода величезних товщин. Для створення атмосфери з гелію необхідно підвищити тиск цього хімічного елемента. Вуглецеві нанотрубки отримуються методом розпилення. Щоб їх кількість збільшилася, необхідно ввести в графітовий стрижень каталізатор. Найчастіше це суміш різних груп металу. Далі, відбувається зміна тиску і способу розпилення. Таким чином, виходить катодний осад, де і утворюються вуглецеві нанотрубки. Готові вироби ростуть перпендикулярно від катода і збираються в пучки. Вони мають довжину 40 мкм.

Лазерне випаровування. Такий спосіб був винайдений Річардом Смали. Суть його полягає в тому, щоб випаровувати різні графітові поверхні в реакторі, що працює при високих температурах. Вуглецеві нанотрубки утворюються в результаті випаровування графіту на нижній частині реактора. Беруть довгу кварцову трубку, в якій поміщають графітову мішень, а за графітовою мішенню розміщують майданчик, що охолоджується. Трубку розміщують у грубці, яку нагрівають до 1000 градусів. Графітову мету опромінюють лазерним променем діаметром близько півтора мм. При опроміненні частинки графіту відносяться з поверхні мішені на майданчик. Серед наноча-

стинок графіту, що опинилися на майданчику, виявляються фулерени та нанотрубки.

Осадження з газової фази. Метод осадження парів вуглецю був винайдений в кінці 50-х років. Але ніхто навіть і не припускав, що за допомогою нього можна отримувати вуглецеві нанотрубки. Отже, для початку необхідно підготувати поверхню з каталізатором. В якості нього можуть служити дрібні частинки різних металів, наприклад, кобальту, нікелю і багатьох інших. Нанотрубки починають з'являтися з шару каталізатора. Їх товщина безпосередньо залежить від розміру каталізу металу. Поверхня нагрівається до високих температур, а потім відбувається підведення газу, що містить вуглець. Серед них - метан, ацетилен, етанол і т. п., в якості додаткового технічного газу служить аміак. Даний спосіб отримання нанотрубок є найпоширенішим. Сам процес відбувається на різних промислових підприємствах, завдяки чому витрачається менше коштів для виготовлення великої кількості трубок. Ще однією перевагою такого методу є те, що вертикальні елементи можуть вийти з будь-яких частинок металу.

Властивості вуглецевих нанотрубок.

Завдяки особливостям своєї будови (високій міцності зв'язку, високій щільності упаковки атомів, відсутності чи малій щільності дефектів структури) нанотрубки мають унікальні фізико-хімічні, механічні властивості. Збільшення різноманітності незвичайних властивостей нанотрубок і широкі перспективи утворення на їх основі функціональних і конструкційних матеріалів відкриває модифікування вуглецевих нанотрубок. Такі незвичайні властивості передбачають широке практичне застосування нанотрубок – як самостійного матеріалу (мікроелектроніка, біологія та медицина), і як елементарного об'єкту нанотехнологій при утворенні покриттів, композиційних матеріалів граничної міцності (суднобудування, будівництво, машинобудування).

Застосування вуглецевих нанотрубок для збільшення ресурсу судна та його обладнання. Застосування композитних матеріалів є перспективним напрямом у суднобудуванні — особливо під час створення високошвидкісних, пасажирських та рибальських суден. Головні якості композитів: зносостійкість та стійкість до дії агресивних середовищ. Мала щільність дозволяє виготовляти легкі конструкції. Це підвищує безпеку та економічність судів. Заміна сталевих корпусу судна на нові види покриттів з використанням кон-

струкційних матеріалів, призведе до підвищення ресурсу корпусу судна, зменшення експлуатаційних витрат. Такі матеріали мають меншу вагу та більшу міцність, що вплине на збільшення морських якостей [3].

Ще одне цікаве практичне застосування нанотрубок – вогнезахисні покриття на морських судах. ВНТ можуть бути використані замість звичайних галогеновмісних антипиренів (в істотно менших кількостях) для підвищення термостійкості полімерів і теплових бар'єрних шарів на їхній основі.

Морські покриття корпусу, такі як фарби проти обростання, позитивно вплинули на збільшення ресурсу судна, але приводили до забруднення доквілля, оскільки до їх складу входили отруйні хімічні сполуки. Протягом останнього десятиліття нанотехнології викликали значний інтерес до застосування, у тому числі у морській галузі.

В даний час покриття на основі ВНТ активно використовуються в якості необростаючих і антикорозійних судових покриттів. На основі вуглецевої нанотрубки (ВНТ) були створені багат шарові силіконові покриття. ВНТ зазвичай завантажують у полімерну матрицю, а отриманий матеріал використовують для нанесення на захисні покриття. ВНТ мають високу міцність на розрив і модуль Юнга, в порівнянні зі сталлю. Зміцнення матриці фарби ВНТ покращує механічні властивості покриттів, значне покращення ударостійкості [4].

Норвезька компанія Advanced Marine Coatings, що спеціалізується на розробці покриттів для морських судів, представила нове покриття, у складі якого вперше використані вуглецеві нанотрубки Baytubes®. У результаті підвищився опір абразивному зношуванню, зменшився гідравлічний опір між корпусом судна й водою, що привело до істотного зниження витрати палива. Нове покриття «Green Ocean Coating Heavy Duty», основу якого становить двокомпонентна епоксидна смола, має високу водонепроникність й особливо підходить для захисту корпусу судна нижче поверхні води. Покриття можуть застосовуватися як для нових судів, так і для відновлення старих або поточного ремонту. Ще одна перевага – завдяки гладкості й твердості нового покриття можна не застосовувати спеціальні засоби, що охороняють судна від біологічного обростання. Таким чином, нанотрубки дозволили розроблювачам знайти найбільш економічне й найбільше екологічне рішення.

Протикорозійні покриття суден льодового плавання повинні протистояти абразивній дії льоду, що залежить від шорсткості корпусу, характеристик льоду, швидкості руху, тиску, температури, вологості, наявності снігу. Цим вимогам задовольняє покриття "Інерта 160". При використанні покриття витрата палива під час льоду знижується до 18 %, на чистій воді - до 6%. Міцність покриття з такої сталі зростає в 3 - 4 рази, твердість – на порядок, крім того багаторазово збільшується корозійна стійкість.

Нанотрубки також використовують при розробці нових мастил і охолоджуючих сумішей для підвищення ресурсу механічних вузлів тертя морських транспортних систем [5]. Присадки до мастильних матеріалів знайшли широке застосування при експлуатації суднового обладнання з метою збільшення їх ресурсу. Перехід від присадок мікронних розмірів до нанорозмірних широко починає впроваджуватися у техніці.

Використання нанодобавок в мастильних матеріалах розглядається як один з найбільш ефективних методів поліпшення трибологічних характеристик, що знижують тертя і знос. Таке трибологічне вдосконалення значно посилює енергозбереження, скорочення викидів, тим самим знижуючи вплив на навколишнє середовище [6]. Оксидні наночастинки, такі як Al_2O_3 , CuO або ZnO , широко використовуються як наночастинки, що поліпшують трибологічні показники мастильних матеріалів. Інші добавки включають беззольні добавки, іонні рідини, ефіри боратів, неорганічні наноматеріали, наноструктури вуглецевого походження, такі як вуглецеві нанотрубки (CNTs), графіт і графен. Специфічні добавки використовуються з метою поліпшення специфічних властивостей мастильних масел [7].

В результаті самоорганізації при взаємодії наноприсадок з поверхнями деталей відбувається утворення пакувальної плівки, що має високу контактну міцність і пластичність, гарну теплопровідність, при низьких швидкостях збільшує фактичну площу контакту, знижує коефіцієнт тертя й зношування, захищає поверхні від схоплювання. Найважливішим показником дії наноприсадок є здатність створювати на поверхні контакту деталей тонку захисну плівку, що запобігає руйнуванню робочих поверхонь [8].

Крім збільшення ресурсу пар тертя при використанні присадок, спостерігається надзвичайно важливий ефект відновлення пошкоджень. Присадка формує захисне покриття на металевих деталях тертя

механізмів безпосередньо в процесі їх експлуатації. Особливість процесу – зміцнення покриття з одночасним його зростанням.

ВНТ застосовують у виробництві різних суднових електротехнічних пристроях [9]. Завдяки властивостям нанотрубок та за рахунок своєї легкості і підвищеної провідності кабель, виготовлений з використанням вуглецевих нанотрубок, істотно перевершуватиме свого мідного попередника, що робить його промислове виробництво більш вигідним.

Впровадження наноматеріалів у будівельні матеріали суден дозволяє зменшити вагу судна та покращити його гідродинамічні властивості, що впливає на економію палива та зниження викидів.

Висновки і перспективи подальших досліджень. За результатами досліджень визначимо наступне.

1. Дослідження вуглецевих нанотрубок становлять значний фундаментальний та прикладний інтерес для морської індустрії. Фундаментальний інтерес до цього об'єкта обумовлений, насамперед, його незвичайною структурою та широким діапазоном зміни фізико-хімічних властивостей залежно від хіральності. Багато з цих властивостей ще й сьогодні є предметом інтенсивних досліджень, спрямованих на виявлення нових цікавих особливостей поведінки нанотрубок у тій чи іншій ситуації.

2. Вуглецеві нанотрубки грають важливу роль в інноваційних технологіях. Багато фахівців прогнозують зростання даної галузі в найближчі роки. Буде спостерігатися значне зростання виробничих можливостей, що забезпечить істотні зміни в морських галузях, машинобудуванні, оптоелектроніці, мікроелектроніці, а також медицині та екології. Це призведе до зниження вартості на ВНТ та буде впливати на величезний попит користування. Вуглецеві нанотрубки стануть незамінним матеріалом для багатьох пристроїв і обладнання. Важливо продовжувати дослідження та розробки в цій області для досягнення максимальних переваг цих інновацій.

Перелік використаних джерел

1. Куцова В.З. Вуглецеві наноматеріали: навч. посібник/ В.З. Куцова, Т.В. Котова // Дніпропетровськ: НМетАУ. – 2014. – 61 с.
2. Савченко І. О. Нанохімія та нанотехнології: підручник / І. О. Савченко // Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. – 2019. - 447 с.
3. Корх М.В. Застосування супергідрофобних наноматеріалів і покриттів у морській галузі / М.В. Корх // Матеріали міжнародної

науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса: НУ «ОМА». 18.03.2021 – 19.03.2021. – С. 54-58.

4. Козицький С. В., Кіріян С. В. Застосування наночастинок для збільшення ефективності суднових механізмів / С. В. Козицький, С. В., Кіріян // Суднові енергетичні установки: Науково-технічний збірник. Вип. 46. - Одеса: НУ «ОМА» . – 2022.- С. 53-66.

5. Козицький С. В. Властивості наноструктурованих матеріалів / С. В. Козицький, С. В. Кіріян // Суднові енергетичні установки: Науково-технічний збірник. Вип. 45. - Одеса: НУ «ОМА» . – 2022.- С. 75 – 86.

6. Агеєв М.С. Застосування комбінованих технологій відновлення для підвищення ресурсу деталей засобів транспорту / М.С. Агеєв, І.Грицук // Збірник наукових праць Укр. державного університету залізничного транспорту. - 2020. – С. 81 – 92.

7. Гузько І. І. Застосування нанотехнології для підвищення довговічності суднових допоміжних механізмів / І. І. Гузько, Е.О. Димитрашко // Матеріали науково-технічної конференції молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт"». – Одеса: НУ «ОМА». 16.11.2022. – С. 239-241.

8. Kozytzkyi S.V., Kiriian S.V. Properties and behavior of nanoparticles / S.V. Kozytzkyi, S.V. Kiriian // Фізика аеродисперсних систем. № 60. – 2022. – С.17-30. DOI: 10.18524/0367-1631.2022.60.265983.

9. Корх М.В. Застосування вуглецевих нанотрубок в електротехніці суднового обладнання / М.В. Корх // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса: НУ «ОМА». 19.03.2022. – С. 50-53.

10.31653/smf48.2024.63-74

Латиш О.М.

Національний університет «Одеська морська академія»

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЙ В МОРСЬКИЙ ГАЛУЗІ

Постановка проблеми в загальному вигляді. В останнє десятиліття нанотехнологіям приділено велику увагу. Визначення широких потреб морської промисловості та шляхи їх вирішення з використанням нанотехнологій, дасть змогу задовольнити частину цих потреб, а також може вивести на новий якісний рівень вирішення технічних проблем.

Аналіз досліджень та публікацій. Морська галузь зазнала кардинальних змін і в неї вкладаються величезні інвестиції. Морська промисловість включає широкий спектр допоміжних виробництв, кожне з яких може бути основою для розвитку науки і техніки.

Нанотехнології вже застосовуються в будівництві суден:

1) Створення відповідних покриттів, які захищають від впливу морського середовища.

2) Виробництво нових матеріалів для конструкції корпусів судна та його компонентів з метою підвищення міцності та зменшення шуму та вібрації.

3) Виробництво нових матеріалів для підвищення продуктивності, таких як: нове паливо та паливні елементи, електричні батареї з дуже високим запасом енергії, зменшення тертя та зносу в механізмах.

Завдяки використанню нанотехнологій можна виробляти нові матеріали, інструменти та системи, змінюючи властивості матеріалу.

Поведінка наноматеріалів залежить від кількості наночастинок, доданих до системи, від властивостей наночастинок, а також від орієнтації та розташування наночастинок .

Поява нанотехнологій – це прогрес, який являє собою фундаментальну зміну, яка призведе до розвитку матеріалів та інструментів вже зараз та у майбутньому. Можливість використовувати наноматеріали певного розміру і розташовувати їх в потрібному порядку робить революцію в матеріалознавстві. Нанотехнології дозволяють створювати структури з матеріалів, яких не існує в природі, а звичайна хімія не змогла їх створити. Деякі з переваг наноструктур включають легші, міцніші та більш адаптовані матеріали, зниження

вартості за рахунок зменшення дефектів, можливість розробляти нові інструменти.

Сьогодні наука і техніка в багатьох сферах наближаються до своїх реальних технічних меж і, можливо, більше не зможуть відповідати технічним потребам. Використання нанотехнологій вже зараз дозволить вийти на якісно новий рівень вирішення технічних проблем. Використання нанотехнологій в матеріалознавстві, оборонній промисловості, електроніці, квантових комп'ютерах, медицині, хімії, тощо виявилось плідним. Наночастинки, додані до сталі або повністю зроблені з наночастинок, призводять до отримання легкого, але дуже міцного матеріалу зі співвідношенням міцності до ваги, яке набагато перевершує звичну сталь. У медицині нанокапсули можуть ідентифікувати уражену тканину та депонувати терапевтичні засоби безпосередньо в цільові місця. [1]. У транспорті нові матеріали, виготовлені з наночастинок, значно зменшили вагу транспортних засобів, що призвело до збільшення швидкості. Додавання наночастинок в мастило значно зменшує тертя та зношування в механічних парах. У виробництві сонячних елементів наночастинки використовуються для створення водню як чистого палива, розробки стійких матеріалів і поверхонь, розробки нового покоління акумуляторних батарей.

В багатьох країнах усвідомлюють це важливе питання та потенційну роль нанотехнологій і приділяють йому особливу увагу. У XXI столітті нанотехнології вважаються одним з найважливіших напрямків досліджень у багатьох технічних областях.

Постановка задачі. Застосування нанотехнологій в морській галузі

Морська промисловість включає широкий спектр допоміжних галузей, таких як: будівництво та експлуатація надводних суден і підводних човнів, морські платформи та все, що пов'язане з морською галуззю. Деякі з можливостей застосування нанотехнологій у морській промисловості включають наступне: низькотемпературні зварювальні електроди, сучасне паливо, нанокompозити та нанокompозитні покриття, нановолокно, амортизатори вібрації, акустичні поглиначі, морські фарби, використання енергії моря та сонячного світла, нанофільтрація, наноморфологія, еволюція технологій паливних елементів, комп'ютери, ультразвук, електроніка, телекомунікації, високоенергетичні акумуляторні батареї, наночастинки для зменшення тертя в механічних парах.

Виклад основного матеріалу.

1. НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ЗВАРЮВАЛЬНІ ЕЛЕКТРОДИ

Удосконалені нанотехнологією електроди мають дуже низьку робочу температуру порівняно з існуючими зварювальними електродами. Матеріал цих електродів такий, що при помірному нагріванні вони утворюють міцний молекулярний зв'язок між двома шматочками металу, який функціонує як термічний клей. Ці електроди вже використовуються в технології зварювання, особливо успішно в зварюванні алюмінію. Можна безпечно зварювати дугою без гарячих тріщин, вводячи фазовий контроль за допомогою наночастинок під час зварювання [2]. З'єднання, зварені електродом AA7075, що містить наночастинки карбід титану (TiC), не тільки демонструють дрібні кулясті зерна та модифіковану вторинну фазу, що по суті усуває сприйнятливості матеріалів до гарячих тріщин, але також демонструє виняткову міцність на розрив як під час зварювання, так і після зварювання. Ця досить проста модифікація присадочного матеріалу зварного шва може бути застосована до широкого діапазону матеріалів, схильних до гарячих тріщин.

2. ПАЛИВО.

Кораблі та підводні човни часто перевозять тисячі тонн палива, перебуваючи в морі, змушені дозаправлятися під час свого плавання. Нанотехнологія забезпечує високоенергетичне паливо, таке як водень, і нанодобавки до палива. Таке паливо є високоенергетичними молекулярними пакетами, які виділяють багато енергії. Нанотехнологія розробляє методи для виробництва дуже великих кількостей водню без виробництва вуглекислого газу, а також технології для зберігання водню. Це питання є одним із найважливіших питань, пов'язаних із використанням водневого палива [3].

Оскільки нанометрові частинки збільшують швидкість горіння та його однорідність, їх можна використовувати в нових видах палива для збільшення енерговиділення палива. Присадки для нанопалива, крім зниження споживання палива, також зменшують забруднення. Паливні присадки додаються до палива, щоб зменшити викиди вихлопних частинок забруднюючих речовин і зменшити утворення оксидів азоту (NOx), монооксидів вуглецю (CO) та вуглеводнів (HC). Використання деяких з цих добавок зменшило кількість забруднюючих частинок на 15-20%. Дослідження показали, що коли паливо використовується в поєднанні з каталізатором DPF, викиди можна зменшити майже на 99% [4]. Деякі добавки в багатоядерних арома-

тичних вуглеводнях зменшують забруднення на 80%. Присадки можуть варіюватися від 10 ppm до 100 ppm у паливі. Добавки спричиняють значне зниження температури горіння диму. За рахунок наявності паливних присадок спостерігається зниження витрат палива на 5%-7%. Присадки, які додають до дизельного палива для зниження температури займання на виході в кіптяви. Іншим застосуванням нанотехнологій є нанопорошки металів. Металеві нанопорошки дуже хімічно активні, а також можуть проявляти особливі каталітичні властивості. Металеві нанопорошки також можуть зменшити забруднення. Наприклад, тип нанопорошку, що містить алюміній, можна додати до твердого палива ракети, щоб збільшити її енергію та швидкість. Таке використання нанопорошків призводить до меншого споживання палива та меншого забруднення [5].

Експериментальні дослідження впливу каталізатора гомогенного згоряння на основі Fe дали змогу отримати характеристики викидів чотиритактного одноциліндрового дизельного двигуна [6]. Каталізатор містив пікрат заліза як активний інгредієнт у складі суміші органічних розчинників, яку можна було однорідно розчинити в традиційному дизельному паливі при наднизьких співвідношеннях доз.

Список деяких нанодобавок, доданих до дизельного палива [7]:

CNT (вуглецеві нанотрубки), Nano CeO_2 (діоксид церію), Nano ZnO (оксид цинку), Nano CuO (окись міді), пікрат заліза.

Список нанодобавок, доданих до біодизельного палива [7]:

Nano CeO_2 (діоксид церію), Nano FeCl_3 (хлорне залізо), Nano Co_3O_4 (оксид кобальту), Nano AlN (нітрид алюмінію), CNT (вуглецеві нанотрубки), Nano Al_2O_3 (оксид алюмінію), Nano ZnO (оксид цинку).

Використання біодизельного палива в порівнянні з дизельним паливом сприяло зменшенню викидів. Таких забруднювачів, як монооксид вуглецю (CO), незгорілий вуглеводень (UHC) і сажа, що утворюються в результаті згоряння біодизельного палива, значно менше в порівнянні з дизельним паливом. Низький крутний момент і потужність, а також високий рівень азотно-кисневих сполук є недоліками використання біодизельного палива як альтернативи дизельному паливу, хоча біопаливо може надати інші переваги. Застосування нанодобавок до такого палива є одним із способів зменшення викидів та підвищення продуктивності двигуна. Паливні елементи мають широкий спектр застосування за високий ККД та мінімум викидів.

3. НАНОКОМПОЗИТИ ТА НАНОПОКРИТТЯ

Корозія є основною проблемою в морській промисловості. Корозія завдає великої економічної та екологічної шкоди. За допомогою нанотехнологій можна досягти покриттів, які захищають поверхню металів набагато краще, ніж традиційні методи.

Композит - це комбінація кількох різних матеріалів, завдяки чому його компоненти можна легко відрізнити один від одного. Наноккомпозит такий самий композит, тільки у нанометровому масштабі (10^{-9} м). Наноккомпозити формуються в дві фази. На першому етапі будується кристалічна структура нанорозміру, яка служить композитною матрицею. Цей фон може бути виготовлений з полімеру, металу або кераміки. На другій фазі до матриці додають наночастинки для підсилення міцності, опору, електропровідності, тощо. Залежно від матеріалу наноккомпозитної підкладки її поділяють на полімерну, металеву та керамічну групи. Полімерні композити використовуються в літаках протягом багатьох років завдяки своїй міцності, жорсткості, термічній і розмірній стабільності. Наноккомпозити включають полімери, армовані частинками нанометрового розміру. Композити з різним молекулярним розташуванням можуть бути застосовані до більш широкого класу інженерних задач. Однією з важливих властивостей композитів є їх висока міцність і мала вага, висока корозійна стійкість, а також властивість радіолокаційного поглинання. Ця функція використовується для створення літаків і підводних човнів, які важко виявити радаром та сонаром.

Наноккомпозитні покриття - це наноструктурні покриття, які мають кращі властивості, ніж звичайні покриття. Завдяки цим покриттям можна отримати чудову адгезію та особливі властивості поверхні. Нанопокриття прилипає на такі поверхні, як метали, скло, кераміка та пластмаси товщиною кілька мікрон. Вони стійкі до механічного зносу, хімічно стійкі, термічно стійкі, мають блиск і самоочищення. Усі ці фактори призводять до зменшення споживання сировини, необхідної для заміни елементів конструкції, зменшення споживання енергії, необхідної для виробництва, та зменшення потреби в очищенні.

Нанотехнологія створює дуже міцні, легкі нановолокна, які мають дрібнозернисту текстуру між молекулами, що набагато перевершує сучасне скловолокно.

Оскільки кораблі рухаються в воді, водорості та зважені частинки у воді прикріплюються до корпусу і змушують їх рухатися по-

вільніше. Корозія в морському середовищі, особливо в солонуватих морях, а також прикріплення моху і водоростей до корпусів є основними проблемами при обслуговуванні кораблів і морських платформ. Особливі умови морського середовища вимагають, щоб корпуси кораблів і морських платформ фарбувалися в середньому раз на три роки. Одним із поширених методів очищення корпусу є переведення судна в сухий док. Цей метод має високі витрати, тривалі простой та інші додаткові витрати. Вирішення цього питання за рахунок зменшення опору тертя води об корпус судна призводить до збільшення швидкості корабля. Також буде зменшено кількість витраченого палива.

Нанотехнології створюють нові фарби, які мають високу стійкість до корозії та інших шкідливих впливів навколишнього середовища. Крім того, використання нанотехнологій в лакофарбовій промисловості запобігають прилипанню водоростей до корпусу і подовжують термін служби кораблів. Матеріал проти обростання запобігає небажаному скупченню моху на зволоженій поверхні корпусів суден. Покриття також екологічно чисте, не виділяє жодних хімікатів у море та зменшує використання біоцидів. Крім корпусів кораблів, нанопокриття можна було наносити на берегові споруди та пірси, а також на військові підводні човни. Протиобростаючий шар діє щонайменше п'ять років. Як зазначалося раніше, проблема прилипання моху до корпусу судна збільшує опір та витрату палива та зменшує швидкість судна. Нанотехнології відіграватимуть вирішальну роль у майбутньому у боротьбі з корозією та біологічним обростанням суден.

4. ВІБРАЦІЙНІ ТА АКУСТИЧНІ АМОРТИЗАТОРИ

Сучасні вібраційні амортизатори є громіздкими і важкими механізмами. Нанотехнології вносять глибоку трансформацію в цій галузі, представивши нові поверхні, що поглинають вібрацію. Ці наноматеріали поглинають дуже велику кількість коливальної енергії в межах своєї молекулярної решітки. Таким чином вібрація добре контролюється. Ці матеріали широко використовуються на круїзних суднах, військових судах і підводних човнах і їх часто встановлюються під двигуни та механізмами, які мають вібрацію.

Акустичні амортизатори, як і амортизатори вібрації, поглинають звукову енергію. Сучасні матеріали мають різну ефективність з точки зору частоти та напрямку ударного звуку, і вони, як правило, важкі та громіздкі. Нанотехнології пропонують різноманітні аку-

стичні матеріали, молекулярна структура яких підходить до певного діапазону звукових частот. Вони можуть поглинати набагато більше звукової енергії, ніж раніше доступні матеріали, незважаючи на їх легкість і тонкість. Ці матеріали можна застосовувати на круїзних судах, військових кораблях на підводних човнах, внутрішня або зовнішня частина корпусу може бути покрита цими матеріалами.

5. НАНОФІЛЬТРАЦІЯ

Однією з особливостей цієї технології є адсорбція дуже дрібних частинок із навколишньому середовищі, таких як адсорбції чадного газу та вуглекислого газу.

Методом нанофільтрації вже користуються протягом останніх років. Застосування нанофільтрації - це видалення шкідливих хімічних речовин у воді, видалення важких металів, видалення органічних компонентів, знищення шкідливих організмів, очищення стічних вод, знебарвлення та видалення забруднень, а також видалення нітратів. Нанофільтрація може очистити практично будь-яке джерело води та видалити бактерії у воді. Крім того, це дозволяє легко використовувати методи очищення та виконує очищення без хімічної дії. Ці нанофільтри можна використовувати для отримання прісної води з солоної морської води. Через нанофільтри під тиском пропускають морську воду. Нанофільтри краще функціонують, ніж ультрафільтри. З отворами від 1 до 10 нм і тиском від 5 до 15 бар ці фільтри здатні очищати морську солону воду на 90% з меншим споживанням енергії, ніж метод зворотного осмосу. Крім того, він здатний ефективно знищувати бактерії, віруси, пестициди, органічні забруднювачі та солі кальцію і магнію.

6. НАНОМАТЕРІАЛИ ДЛЯ АКУМУЛЯТОРІВ

Електроди

Було досліджено кілька типів наноматеріалів, які забезпечують більш високу щільність зберігання літію, ніж стандартні металеві або графітові електроди, це: кремнієві нанодропи з вуглецевим покриттям; вуглецеві нанотрубки; шаруватий, наноструктурований оксид ванадію та оксид марганцю; наночастинки LiMn_2O_4 (літій-марганець) або LiCo_2O_4 (літій-кобальт); сплав Li (літій)/графенова фольга; фосфорен-графеновий гібридний матеріал. (Сульфід молібдену) MoS використовується як ефективний захисний шар для Li -металевих анодів у високопродуктивних (літійових) Li батареях [8] [9].

Електроліти

Наночастинки (оксид алюмінію) Al_2O_3 , (діоксид кремнію) SiO_2 або (діоксид цирконію) ZrO_2 , додані до полімерного гелю, можуть значно підвищити провідність і здатність до зберігання електроліту.

Сучасні літєві батареї зазвичай використовують рідкий електроліт для утримання іонів між двома електродами, проте розглядають інші варіанти. Одним з недоліків електролітів, які використовуються в літєвих батареях є те, що вони містять небезпечні рідини, які несуть загрозу пожежі, якщо в системі трапиться коротке замикання. Тверді електроліти можна виготовляти з негорючих матеріалів, що робить їх набагато менш сприйнятливими до утворення дендритів.

Такі електроліти дають можливість для створення батарей, які працюють з анодом, виготовленим з чистого літію. Це дозволить електромобілям і літакам подорожувати набагато далі без підзарядки, звичайно, відповідні переваги будуть реалізовані і в морській галузі.

Багато електролітів, розроблених дотепер, були виготовлені з кераміки, яка надзвичайно ефективна для проведення іонів, а також її стійкість до високих температур підходить для застосувань при високих навантаженнях, таких як великі транспортні засоби або відновлювальні електростанції. Однак кераміка крихка за своєю природою, що обмежує можливості її використання. На заміну кераміці використовували целюлозні полімерні трубки, в які додають мідь, для створення стабільного іонного провідника з провідністю, подібною до кераміки, і в 10-100 разів вищою, ніж у полімерних іонних провідників.

Експерименти з включенням міді з одновимірними нанofібрилами целюлози показали, що целюлоза, яка ізолює іони, забезпечує більш швидке переміщення іонів літію всередині полімерних ланцюгів [10]. Виявили, що цей іонний провідник досяг рекордно високої іонної провідності серед усіх твердих полімерних електролітів. В результаті тканина виходить тонка, як папір, та універсальна, вона більш підходить до напруг, що виникають під час руху транспортних засобів, так як нема крихкості, як у кераміці. Крім того, він має електрохімічну стабільність для розміщення літєво-металевого анода та катодів із надмірною напругою.

Використання нанотехнологій для підвищення продуктивності за рахунок збільшення щільності накопичення енергії також дозволило виготовляти акумуляторні батареї набагато меншого розміру, легкі і гнучкі. Деякі тонкоплівкові батареї вже доступні, але вони мають

обмежену продуктивність і все ще відносно дорогі. Застосування нанотехнологій покращило електроємність та їх потужність, можливості збільшення циклів зарядки та безпеки сучасних накопичувачів електроенергії.

7. ВИКОРИСТАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ТЕРТЯ В МЕХАНІЧНИХ ПАРАХ

Сила тертя — сила, що чинить опір відносному переміщенню одного тіла по поверхні іншого під дією зовнішньої сили, яка спрямована тангенціально до спільної границі між цими тілами.

Тертя викликає видалення матеріалу з однієї або обох контактних поверхонь; це явище називають «зносом або зношуванням». Тертя та зношування значно знижують продуктивність та термін експлуатації механічного обладнання і таким чином спричиняють величезні економічні втрати в промисловій діяльності. Фактично, тертя та зношення можуть бути зведені до мінімуму шляхом ретельної модифікації властивостей поверхонь, що контактують, або використання мастильних плівок між контактуючими поверхнями.

Класичні закони тертя продовжують відігравати важливу роль у сучасному машинобудуванні та виробництві. Однак дослідження тертя на макроскопічному розмірі не можуть безпосередньо враховувати вплив мікроскопічних структур та властивостей, тому виникають великі обмеження, коли класичні закони тертя застосовуються безпосередньо до тертя мікро або нанорівня. Розвиток нанонауки та нанотехнологій дав можливість досліджувати тертя на нанометровій шкалі. Тертя та знос сильно залежать від поверхонь твердих тіл, які контактують. Тертя також може змінювати мікроструктуру поверхонь, що контактують, зокрема, під високим навантаженням або після тривалої роботи.

Матеріали, що беруть участь в терті, особливо в змащуванні, використовуються для мінімізації тертя між контактуючими поверхнями. Звичайні мастильні матеріали включають масло, воду, жири, а також шаруваті матеріали, такі як графіт, дисульфід молібдену, гексагональний нітрид бору (h-BN) та дихалкогеніди перехідного металу. З розвитком нанотехнологій було виявлено, що різноманітні нові наночастинки мають надзвичайні мастильні властивості.

Кулькові підшипники є важливим способом зменшити тертя кочення, але коли кулі мають нанорозмір, їх роль значно змінюється. Нульові наночастинки (0D) - це частинки діаметром від 1 до 100 нанометрів [11]. Завдяки винятково великій площі поверхні та мало-

му розміру, наночастинки виявляють зовсім інші фізичні та механічні властивості порівняно з об'ємними та мікромасштабними аналогами. Ці властивості роблять їх ідеальними для поліпшення трибологічних властивостей мастильних матеріалів та експлуатації композиційних покриттів. Рух кочення та ковзання наночастинок при змазуванні може забезпечити низьке тертя та малий знос. Три основні механізми тертя наночастинок, - це кочення, ковзання та відшаровування, а низьке тертя та мале зношення можуть бути досягнуті фулереноподібними наночастинками шляхом поліпшення їх сферичності, дисперсності та гладкості поверхонь, що взаємодіють[12].

Властивості тертя та зношування поверхнево-модифікованих наночастинок (оксид титана) TiO_2 , наночастинок алюмінію, наповнених політетрафторетиленом (ПТФЕ), порожнистими неорганічними фулереноподібними наночастинками (дисульфід молібдена) MoS_2 та тонких плівок наночастинок (дисульфиду молібдена) MoS_2 застосовують у нановиробництві та змащуванні.

Властивості тертя двовимірних (2D) шаруватих матеріалів викликають великий науковий інтерес, оскільки наднизьке тертя їхніх основних аналогів (тобто шаруватих матеріалів, таких як: графіт, дисульфід молібдену та нітрид бору) робить їх ідеальними мастильними матеріалами в механічних системах, таких як аерокосмічні системи, системи високого вакууму та системи, що працюють у широкому температурному спектрі. Це наднизьке тертя пояснюється слабким міжшаровим з'єднанням (сили Ван-дер-Ваальса) порівняно з сильним хімічним з'єднанням внутрішнього шару нашарованих матеріалів, що дозволяє їм легко рухатись. Більш того, оскільки міжшарова взаємодія сил Ван-дер-Ваальса зменшується зі збільшенням температури, тертя шаруватих матеріалів може бути додатково зменшено при підвищеній температурі. Тверді мастильні матеріали добре працюють при високих температурах і тисках, а також в радіоактивних ситуаціях.

Наноматеріали та нанотехнології дають нам можливість краще зрозуміти явища тертя та значно зменшити тертя та зношування, ніж традиційні матеріали та технології. Нульові наночастинки (0D) можна застосовувати в мастилах для зменшення тертя та зносу. Особливо важливими є двовимірні наноматеріали, такі як графен, нітрид бору з гексагональною решіткою (h-BN) та дихалкогеніди перехідного металу та топологічні ізолятори. На відміну від відповідних сипучих

матеріалів, які служать традиційними сухими мастильними матеріалами, ці високоякісні одношарові матеріали, вирощені у великих розмірах, можуть служити покриттями з товщиною, яка дорівнює одному атому, для зменшення тертя та зношення.

ВИСНОВКИ

Поява нанотехнологій – це прогрес, що являє собою фундаментальну зміну, яка призведе до розвитку матеріалів та інструментів у майбутньому. Можливість використання нанобудівельних блоків за розміром і складом робить революцію в матеріалознавстві. В даний час проводяться численні дослідження нанотехнологій, як їх застосувати, які вони мають переваги та майбутні перспективи. У морській промисловості, яка включає в себе широкий спектр галузей, таких як: суднобудування, підводні човни та морські платформи, нанотехнології знаходять багато застосувань. Нанотехнології вже мають застосування в різних секторах морської промисловості, де вони на більш високому рівні допомагають вирішувати технічні проблеми.

Дослідження показали, що наночастинки, додані в паливо, можуть знизити витрату палива в дизельних двигунах і можуть зменшити забруднення. Додавання цих наночастинок до палива призводить до розкладання спалених вуглеводнів і сажі, що підвищує ефективність. Відповідно зменшується кількість сажі, НС і СО. Результати фізичних випробувань підтвердили роль наночастинок для підвищення ефективності та зменшення забруднення. Наприклад, матриці наночастинок в електродах акумулятора можуть різко збільшити їх здатність зберігати іони літію, збільшуючи щільність зберігання батареї. Графен можна використовувати як самозмащувальну тверду речовину або як добавку до мастильних масел. Застосування нанотехнологій для виготовлення пористої кераміки може покращити її термостабільність та механічну міцність. Загалом, нанотехнології мають величезний потенціал у таких різноманітних сферах, як розробка ліків, очищення води, інформаційна та комунікаційна інфраструктура та виробництво міцніших, легших і досконаліших наноматеріалів. Застосування нанотехнологій для морської галузі вже дає результат та має блискучі перспективи для зростання і розвитку.

Перелік використаних джерел

1. Роко М. Нанотехнології: конвергенція з сучасною біологією та медициною. *Curr Opin Біотехнологія*. 2003 черв.;14(3):337-46.

2. Sokoluk M, Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075/ Sokoluk M, Cao C, Pan S, et al. // *Nat Commun.* 2019;10:98

3. Williamson K. Integration of chemical engineering, environmental engineering, and bioengineering to facilitate research and education in nanotechnology, biotechnology, and sustainability./ Williamson K, Semprini L, Rorrer G, McGuire J.// *Water Environ Res.* 2006 Jun;78(6):555-6. PMID: 16894980.

4. Доступно: <https://katalizator.net.ua/stati/128-sazhevyj-filtr-s-nim-ili-bez-nego/>

5. Sayler GS. Emerging foundations: nano-engineering and bio-microelectronics for environmental biotechnology./ . Sayler GS, Simpson ML, Cox CD. // *Curr Opin Microbiol.* 2004 Jun;7(3):267-73.

6. Ma Y. The effect of a homogeneous combustion catalyst on exhaust emissions from a single cylinder diesel engine, *Applied Energy/* Ma Y, Zhu M, Zhang D//. 2013;102(2013):556–562.

7. Mirzajanzadeh M. Investigating the Additive Nano-Catalysts to Diesel and Biodiesel Fuels/ Mirzajanzadeh M, Arjoman M, Joudaki E.// *Frayanono Journal.* 2017; 56: 79-92 .

8. Доступно: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3042>

9. Доступно: <https://www.designnews.com/materials-assembly/nanotechnology-eyed-longer>

10. Yang C. Copper-coordinated cellulose ion conductors for solid-state batteries. / Yang C, Wu Q, Xie W, et al.// *Nature.* 2021; 598: 590–596.

11. Латиш О.М. Отримання нанопорошків механічними методами/ Матеріали науково-технічної конференції " Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт ", 24.03.2015 – 25.03.2015. Частина 1. – Одеса: ОНМА, 2015. – с. 177-179.

12. Tevet O. Friction mechanism of individual multilayered nanoparticles. / Tevet O, Von-Huth P, Popovitz-Biro R, Rosentsveig R, Wagner H D, Tenne R. // *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108**: 19901–19906 (2011).

10.31653/smf48.2024.75-88

Матейко О.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІНЕРТИЗАЦІ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Морський та внутрішній водний транспорт забезпечує перевезення вантажу між країнами та континентами, що поєднані річками або роз'єднані морями та океанами. При цьому судна морського транспорту є єдиним засобом транспорту, який забезпечує трансокеанське перевезення вантажів [1–3]. Морські судна перевозять практично всі види вантажів:

- насипні (у тому числі зернові та добрива) – за допомогою використання суден класу Bulk Carrier;
- генеральні (у тому числі техніку та обладнання) – на судах класу General Cargo;
- накатні (у тому числі автомобілі) – на судах типу Ro-Ro;
- великотоннажні – за допомогою суден класу Heavy Lift;
- контейнерні – за допомогою використання суден класу Container Ship;
- наливні – на судах Oil Product/Crude Oil/Chemical Tanker.

Також існують судна класів Liquefied Petroleum Gas Ship (LPG-ship) та Liquefied Natural Gas Ship (LNG-ship), які забезпечують перевезення відповідних типів газу [4, 5]. Необхідність у судах-газовозах насамперед пов'язана з тим, що природні родовища газу (континентальні або шельфові) розташовані на великій відстані від великих споживачів газу. У зв'язку з цим, доставка газу звичайними газотрубопроводами стає або нерентабельною, або взагалі неможливою. У таких умовах газові продукти спочатку піддаються скрапленню, після чого транспортуються судами-газовозами [6-8]. При цьому розв'язується проблема транспортування великих обсягів газу на великі (у деяких випадках трансатлантичні) відстані [9-12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Транспортування вантажів суднами-газовозами завершується обов'язковою інертизацією вантажних танків, мета якою – зниження в них концентрації кисню до рівню, за яким неможливо виникнення самозаймання або вибуху залишків вантажу [13-16].

Одним з найбільш поширених способів інертизації є використання азоту, отримання якого забезпечують спеціальні генератори, які через вуглецеву адсорбцію виділяють азот з повітря [17-20].

Інертизація вантажних танків суден-газовозів виконується за каскадною, напівкаскадною та паралельною схемами [12, 21-23]. Подача інертного газу до вантажних танків, його проходження скрізь вантажні танки (саме під час якого забезпечується витиснення та видалення залишків вантажу) та вихід з вантажних танків зрозумілий з рис. 1 та не вимагає додаткових пояснень.

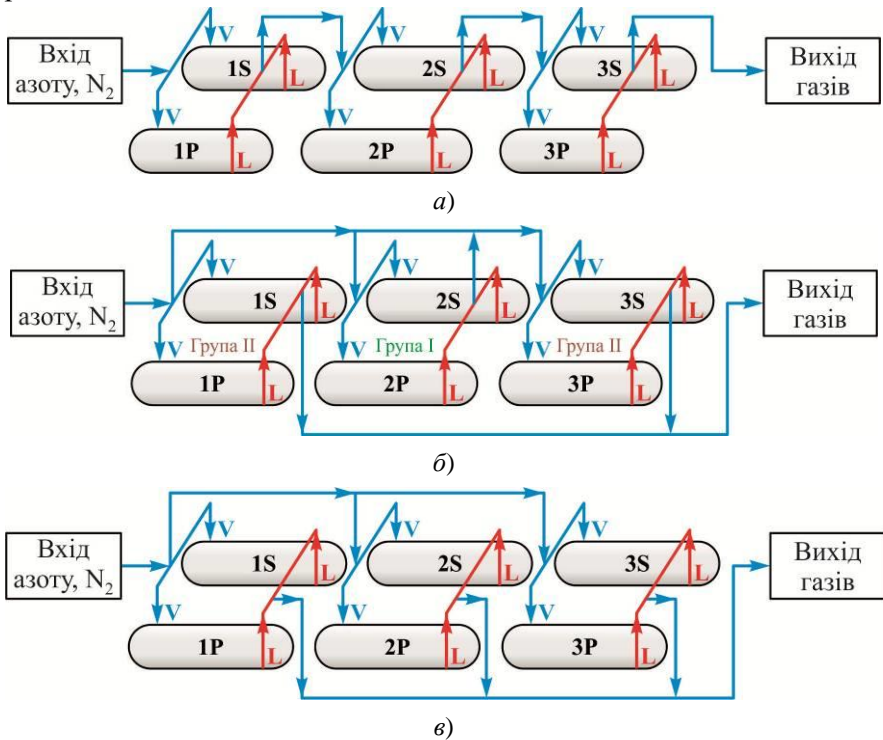


Рис. 1. Принципова схема інертизації вантажних танків суден-газовозів:
а – каскадна; б – напівкаскадна; в – паралельна;

1S, 2S, 3S – танки правого борту (Starboard); 1P, 2P, 3P – танки лівого борту (Port Side); V – рух пари (Vapor line); L – рух рідини (Liquid line)

На сучасних судах-газовозах можливо використання кожної з наведених схем, що забезпечується через відповідне підключення та налаштування відповідної арматури [24-26].

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення оптимальної схеми інертизації вантажних танків суден-газовозів з різною вантажомісткістю.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження щодо визначення найбільш оптимальної схеми інертизації вантажних танків виконувались на основі статистичних даних щодо забезпечення даної операції на судах-газовозах різної вантажомісткості. Обробка та аналіз інформації з інертизації вантажних танків виконувався для суден-газовозів, обсяги вантажних танків яких становили 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³, 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³, 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³. Під час проведення досліджень дані судна були скомпоновані в три групи: менше ніж 50000 м³, 50000...100000 м³, більше за 100000 м³. Усі судна виконували перевезення одного й того ж вантажу між портами Близького Сходу та Китаю. На всіх судах було можливе виконання каскадної, напівкаскадної та паралельної схем інертизації. Після кожного транспортування та вивантаження зрідженого газу в порту виконувався процес інертизації вантажних танків. Інертизація вантажних танків виконувалася з допомогою азоту. Для виробництва азоту використовувалася судова система генерації. Для кожного судна після першого транспортування процес інертизації виконувався за каскадною схемою. Друге транспортування завершувалося інертизацією за напівкаскадною схемою, третє – за паралельною. За період проведення досліджень кожне із суден здійснило понад десять перевезень зрідженого газу. Це забезпечувало необхідний масив експериментальних даних, а також дозволяло зробити висновки щодо коректності проведення експериментів [27-30].

Порівняння каскадної, напівкаскадної та паралельної схем інертизації вантажних танків під час використання азоту доцільно виконувати за двома показниками:

- 1) витрата азоту, необхідного для забезпечення цього процесу;
- 2) тривалість проведення процесу інертизації.

Ці показники залежать від вантажомісткості суден-газовозів. Для оцінки ефективності систем інертизації вантажних танків було введено такі позначення:

G_c , G_s , G_p – витрата азоту, яка необхідна для забезпечення інертизації за каскадною, напівкаскадною та паралельною схемами, відповідно;

t_c , t_s , t_p – тривалість проведення процесу інертизації за каскадною, напівкаскадною та паралельною схемами, відповідно.

Результати досліджень на судах з вантажомісткістю менш ніж 50000 м³. До цієї групи були віднесені судна-газовози з вантажомісткістю 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³.

Витрата азоту, яка була необхідна для забезпечення процесу інертизації вантажних танків, визначалась за допомогою витратоміру, що був встановлено після генератору інертних газів (щодо рис. 1 – після елемента «Вхід азоту, N₂»). Технологія проведення процесу інертизації виключала витоки азоту через ущільнення, трубопроводи або арматуру в системі. Тому було прийнято, що процес інертизації виконується без втрат азоту.

Завершення процесу інертизації визначалось за значенням концентрації азоту в газовому середовищі на виході з останньої групи вантажних танків (щодо рис. 1 – перед елементом «Вихід газів»). Аналіз газового середовища виконувався за допомогою газового аналізатору.

Якщо прийняти витрату азоту G_c та тривалість t_c процесу інертизації за каскадною схемою за базові значення, то відносні значення даних величин для всіх схем інертизації визначаються за виразами:

- для каскадної схеми $\overline{G_c} = G_c / G_c = 1$, $\overline{t_c} = t_c / t_c = 1$;
- для паралельної схеми $\overline{G_p} = G_p / G_c$, $\overline{t_p} = t_p / t_c$;
- для напівкаскадної схеми $\overline{G_s} = G_s / G_c$, $\overline{t_s} = t_s / t_c$.

Відносну ефективність процесу інертизації можливо оцінити за наступним критерієм

$$K_E = \overline{G} / \overline{t};$$

де \overline{G} , \overline{t} – відносні значення витрати азоту та тривалості інертизації, відповідно.

З урахуванням цих виразів, отримуємо значення, що наведені в табл. 1-3.

Таблиця 1. Відносна витрата азоту, що необхідний для забезпечення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
38646	1	2,53	1,98
42427	1	2,58	2,06
42563	1	2,73	2,04

Таблиця 2. Відносна тривалість проведення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
38646	1	0,55	0,75
42427	1	0,52	0,69
42563	1	0,48	0,71

Таблиця 3. Відносна ефективність процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
38646	1	1,392	1,485
42427	1	1,342	1,421
42563	1	1,310	1,448

З метою кращої візуалізації, за результатами табл. 1-3 побудовані діаграми, що подані на рис. 2.

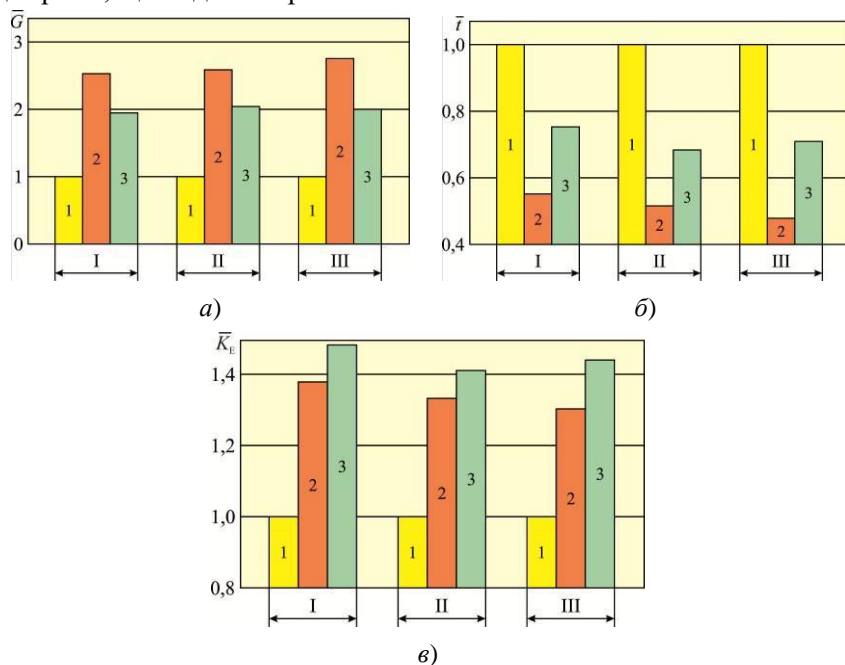


Рис. 2. Показники, що характеризують процес інертизації:
 а – відносна витрата азоту; б – відносна тривалість; в – відносна ефективність; 1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми;
 вантажомісткість: I – 38646 м³, II – 42427 м³, III – 42563 м³

Результати досліджень на суднах з вантажомісткістю 50000...100000 м³. З метою збільшення масиву експериментальних даних та поширення висновків на судна іншої вантажомісткості, дослідження проводились також на інших суднах. До цієї групи були віднесені судна-газовози з вантажомісткістю 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³.

Результати з визначення відносних значень витрати азоту для каскадної \overline{G}_c , паралельної \overline{G}_p та напівкаскадної схем \overline{G}_s , відносної тривалості процесу інертизації за цими схемами \overline{t}_c , \overline{t}_p та \overline{t}_s , а також відносна ефективність процесу інертизації \overline{K}_E наведені в табл. 4-6.

Таблиця 4. Відносна витрата азоту, що необхідний для забезпечення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
72312	1	2,03	1,68
88248	1	2,08	1,78
88274	1	2,11	1,82
88302	1	2,19	1,76

Таблиця 5. Відносна тривалість проведення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
72312	1	0,61	0,82
88248	1	0,58	0,79
88274	1	0,6	0,76
88302	1	0,55	0,8

Таблиця 6. Відносна ефективність процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
72312	1	1,238	1,378
88248	1	1,206	1,406
88274	1	1,266	1,383
88302	1	1,205	1,408

З метою кращої візуалізації, за результатами табл. 4-6 побудовані діаграми, що подані на рис. 3.

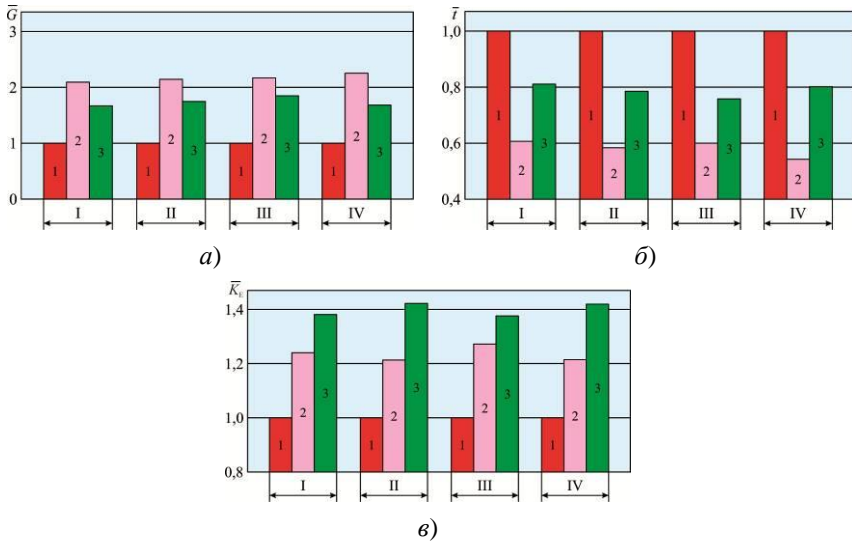


Рис. 3. Показники, що характеризують процес інертизації:
 а – відносна витрата азоту; б – відносна тривалість; в – відносна ефективність; 1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми; вантажомісткість: I – 72312 м³; II – 88248 м³; III – 88274 м³; IV – 88302 м³

Результати досліджень на суднах з вантажомісткістю більш за 100000 м³. Подібні випробування також були виконані на суднах-газовозах з вантажомісткістю 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³. Їхні результати наведені в табл. 7-9.

Таблиця 7. Відносна витрата азоту, що необхідний для забезпечення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
145673	1	1,44	1,38
146817	1	1,46	1,37
162233	1	1,51	1,41

Таблиця 8. Відносна тривалість проведення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
145673	1	0,59	0,82
146817	1	0,61	0,86
162233	1	0,57	0,79

Таблиця 9. Відносна ефективність процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
145673	1	0,850	1,132
146817	1	0,891	1,178
162233	1	0,861	1,114

З метою кращої візуалізації, за результатами табл. 7-9 побудовані діаграми, що подані на рис. 4.

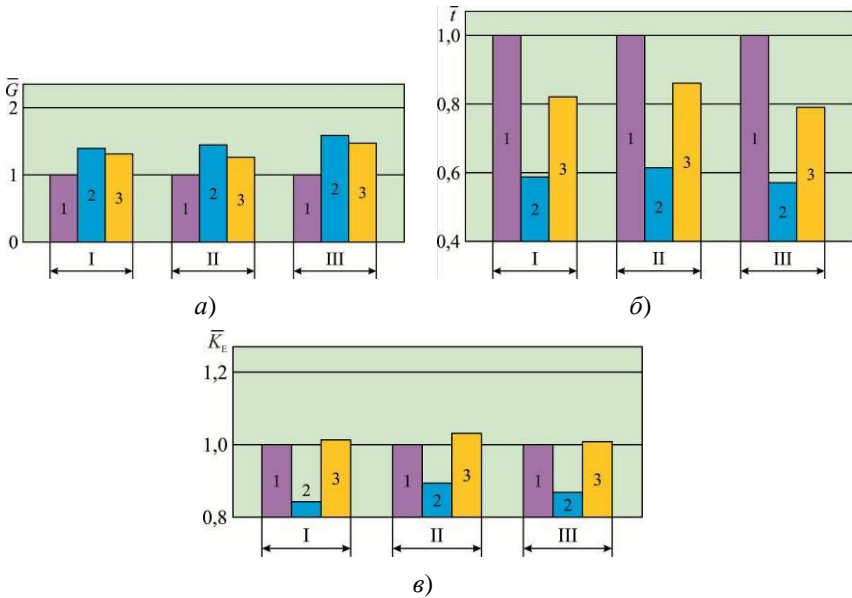


Рис. 4. Показники, що характеризують процес інертизації:
 а – відносна витрата азоту; б – відносна тривалість; в – відносна ефективність; 1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми;
 вантажомісткість: I – 145673 м³; II – 146817 м³; III – 162233 м³

Аналіз результатів з визначення витрати азоту та тривалості процесу інертизації. Узагальнені значення відносної витрати азоту та відносної тривалості інертизації для різних груп суден-газовозів наведено в табл. 10.

Таблиця 10. Порівняння схем інертизації вантажних танків суден-газовозів

Вантажомісткість, м ³	Відносна витрата азоту		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
I – менш за 50000	1,0	2,53...2,73	1,98...2,06
II – 50000...100000	1,0	2,03...2,19	1,68...1,82
III – більш за 100000	1,0	1,44...1,51	1,37...1,41
	Відносна тривалість проведення інертизації		
I – менш за 50000	1,0	0,48...0,55	0,69...0,75
II – 50000...100000	1,0	0,55...0,61	0,76...0,82
III – більш за 100000	1,0	0,57...0,61	0,79...0,86
	Відносна ефективність процесу інертизації		
I – менш за 50000	1,0	1,310...1,392	1,421...1,485
II – 50000...100000	1,0	1,205...1,238	1,378...1,408
III – більш за 100000	1,0	0,850...0,891	1,114...1,132

За даними табл. 10 побудовані діаграми, що подані на рис. 5.

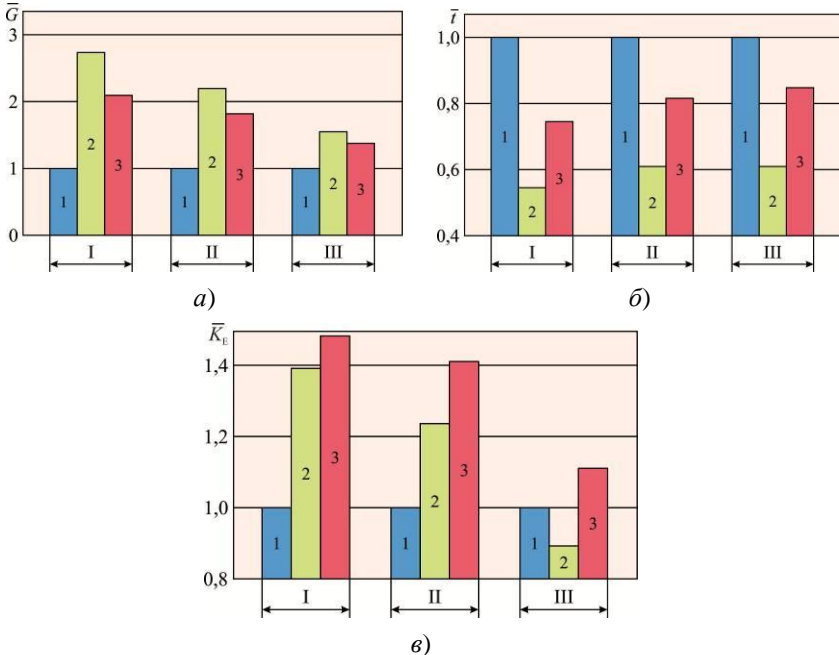


Рис. 5. Показники, що характеризують процес інертизації:
 а – відносна витрата азоту; б – відносна тривалість; в – відносна ефективність; 1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми;
 вантажомісткість: I – менш за 50000 м³; II – 50000...100000 м³;
 III – більш за 100000 м³

Всі дослідження виконувались з виконанням вимог таких міжнародних морських документів: International Maritime Dangerous Goods Code, Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, International Safety Management Code. Усі дослідження з інертизації вантажних танків виконували або під час баластних переходів судна, або в порту розвантаження. При цьому контролювалися та підтримувалися у необхідному діапазоні всі основні параметри роботи головного та допоміжних двигунів, параметри в системах, які забезпечують їхнє функціонування, а також усі основні параметри в системі генерації інертних газів. Крім того, постійно контролювався крен і диферент судна, а також його стійкість. Проведення досліджень було погоджено з технічним департаментом судноплавної компанії, якій належали судна, а також із фрахтувальником [24, 31, 32].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Потреба в газовому паливі та неможливість деяких країн отримання подібного палива континентальними газопроводами сприяють транспортуванню зріджених газів морськими та океанськими шляхами суднами-газовозами. Навігаційні переходи цих суден (як із вантажем, а також у баласті) неможливі без інертизації вантажних танків. Основним завданням процесу інертизації є зменшення концентрації кисню в атмосфері танка до рівня, на якому неможливе займання парів газів, що знаходяться в них.

Інертизація вантажних танків може бути забезпечена шляхом їх заповнення інертним газом. При цьому одним із найбезпечніших способів є використання азоту. Виробництво азоту можливе у спеціальних генераторах, що встановлюються на суднах, крім того, азот може бути отриманий з берегових станцій постачання.

Інертизація вантажних танків азотом виконується за такими схемами: каскадною, напівкаскадною, паралельною. Порівняння схем інертизації при використанні азоту доцільно виконувати за коефіцієнтом відносної ефективності, який враховує витрату азоту, необхідного для забезпечення інертизації, та тривалість проведення процесу інертизації. Значення цього коефіцієнту (також, відповідно, схем інертизації вантажних танків) різне для різної вантажомісткості суден-газовозів. Експериментально встановлено, що:

для суден вантажомісткістю до 100000 м³ найбільш оптимальною схемою інертизації є каскадна, далі слідує паралельна та напівкаскадна;

для суден вантажомісткістю більш за 100000 м³ найбільш оптимальною схемою інертизації є паралельна, далі слідують каскадна та напівкаскадна.

Вибір схеми інертизації залежить від рейсового завдання, вимог берегової адміністрації та можливостей порту-вивантаження щодо забезпечення судна азотом, а також характеристик суднової системи генерації інертних газів.

У всіх випадках процес інертизації повинен виконуватись відповідно до вимог міжнародних класифікаційних товариств із захисту довкілля, а також міжнародних та національних правил щодо перевезення небезпечних вантажів.

Перелік використаних джерел

1. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4(3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

2. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // *Transactions on Maritime Science*. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01>.

3. Сагін С.С., Ворохобін І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морського транспорту // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.07.

4. Manos A., Lyridis D., Prousalidis J., Sofras E. Investigating the Operation of an LNG Carrier as a Floating Power Generating Plant (FPGP) // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – 1749. <https://doi.org/10.3390/jmse11091749>.

5. 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 of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

6. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8. – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

7. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.- техн. сб. – 2014. – Вып. 20. – НУ "ОМА". – С. 74-83.

8. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskiy Y., Pišt'ek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>

9. Wu S., Zhou X., Lu J., Liang D., Li D. Experimental Study on CH₄ Hydrate Dissociation by the Injection of Hot Water, Brine, and Ionic Liquids // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – 713. <https://doi.org/10.3390/jmse11040713>.

10. Lyridis D.V. Spot Charter Rate Forecast for Liquefied Natural Gas Carriers // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – 1270. <https://doi.org/10.3390/jmse10091270>.

11. Сагін С.В., Матейко О.В. Особливості інертизації вантажних танків суден-газовозів під час транспортування вогнебезпечних речовин // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 36-49. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03

12. Сагін С.В., Матейко О.В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 148-156. [doi: 10.31653/smf47.2023.148-156](https://doi.org/10.31653/smf47.2023.148-156).

13. Бражник И.Д. Модернизация процесса вентиляции грузовых трюмов танкера с помощью системы инертных газов // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. – 2019. – Т.30(69). – Ч. 2. – № 5. – С. 129-133. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-2/23>.

14. Даки О.А., Якусевич Ю.Г., Ліганенко В.В., Тришин В.В. Модель системи кондиціонування та охолодження повітря на сучасних нафтоналивних суднах і газовозах. // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 121-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.15.

15. Бражник И. Д. Изменение рабочих характеристик системы инертизации танкера за счет принудительной подачи газов // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії. Науковий журнал*. – 2019. – № 1(20). – Херсон: ХДМА. – С. 4-11.

16. Mrzljak V., Poljak I., Kosor M., Culin J. Bisection Method for the Heavy Fuel Oil Tank Filling Problem at a Liquefied Natural Gas Carrier //

Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 849. <https://doi.org/10.3390/jmse11040849>.

17. Mangan S., Lohrer A.M., Thrush S.F., Ellis J.I., Pilditch C.A. The Effects of Long-Term Nitrogen Enrichment on Estuarine Benthic-Pelagic Coupling // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1955. <https://doi.org/10.3390/jmse10121955>.

18. Li H.-C., Yu K.-W., Lien C.-H., Lin C., Yu C.-R., Vaidyanathan S. Improving Aquaculture Water Quality Using Dual-Input Fuzzy Logic Control for Ammonia Nitrogen Management // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 1109. <https://doi.org/10.3390/jmse11061109>.

19. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.

20. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

21. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

22. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2018. – Вип. 24. – Одесса : НУ "ОМА". – С. 72 - 80.

23. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskiy Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022. – Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

24. Matieiko O. Selection of optimal schemes for the inerting process of cargo tanks of gas carriers // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – № 4(1(78)). – P. 43–50. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310699>

25. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження //

Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

26. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

27. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

28. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів / С. В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб., 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132-142.

29. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

30. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

31. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

32. Тимошук О.М., Даки О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.

10.31653/smf48.2024.89-99

Половинка Е.М., Табулінський І.М.

Національний університет «Одеська морська академія»

**ШВИДКІСНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМИ
ПАЛИВОПОДАЧІ COMMON RAIL ДВИГУНІВ RT-FLLEX**

Загальноприйнятими для галузі паливної апаратури суднових дизелів є представлення робочих процесів у формі навантажувальної та швидкісної характеристик.

У цій роботі представлені результати дослідження параметрів паливоподачі акумуляторної системи Common Rail при зміні частоти обертання та незмінним керуванням тривалості впорскування по куту повороту колінчастого валу, що відповідає швидкісній характеристиці.

Особливе значення при дослідженні процесів паливоподачі має властивість системи - акумуляторна технологія Common Rail з використанням додаткового пристрою ICU (Injection Control Unit).

Імітаційне моделювання в середовищі GT-Power забезпечило детальне уявлення про гідродинамічні процеси в пристроях системи та переміщення її механічних елементів.

Ключові слова: система паливоподачі Common Rail, гідродинаміка, швидкісна характеристика.

Умовні позначення:

$x_{п}$ – координата ДП;

$h_{п}$ – перебіг ДП;

$\varphi_{п.маx}$ - кут максимального переміщення ДП;

$\varphi_{п}$ – кут подачі ДП;

$v_{п}$ – швидкість ДП;

$\varphi_{кл}$ - кут відкриття керуючого клапана;

φ -кут повороту колінчастого валу; пр.-

°ПКВ – градуси повороту колінчастого валу;

$z_{г}$ – хід голки форсунки;

$p_{р. п}$ - тиск у робочій порожнині БУВ;

$p_{б.п}$ - тиск у буферній порожнині БУВ;

$g_{ф}$ - інтенсивність упорскування;

$q_{ц}$ – циклова подача;

CR (CRS) – акумуляторна система впорскування палива Common Rail System;

ВГ - відпрацьовані гази;

БУВ - блок управління впорскуванням (Injection Control Unit-ICU);

ДП - дозуючий поршень БУВ (QP-Quantity Piston);

РП БУВ - робоча порожнина БУВ;

БП БУВ - буферна порожнина БУВ;

ТА - паливний акумулятор (Fuel Rail);

1. Вступ

Удосконалення експлуатаційних характеристик суднових дизелів забезпечується насамперед розвитком процесів паливоподачі – технологій та засобів їх реалізації. Визначальними факторами є високі вимоги до економічності і екологічні нормативи, що постійно посилюються. Зазначені чинники є суперечливими, що потребує реалізації оптимальних компромісних рішень.

У сучасних умовах засобами вдосконалення процесів паливоподачі стали комп'ютерне управління та перехід до гідромеханічних схем упорскування палива.

Характерним прикладом такого роду рішень стала розробка паливної апаратури для двигунів типу RT-flex.

Об'єднане керування системами двигуна забезпечене апаратно-програмним комплексом WECS, підсистемою якого є модулі регулювання системи впорскування палива Common rail.

Нова технологія та конструкція елементів паливної апаратури для ефективної експлуатації потребує детального уявлення про гідродинамічні процеси в елементах системи. Вирішенню цього завдання присвячена дана робота.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є система паливоподачі двигунів RT-flex, які набули широкого поширення на судах морського флоту. Обладнання двигунів комп'ютерним управлінням забезпечило якісно нові можливості підвищення експлуатаційних характеристик дизелів. У цьому їх реалізація зажадала розвитку гідромеханічних елементів систем паливоподачі. При розробці двигунів створено акумуляторну систему Common Rail на принципово новій технології та конструктивній реалізації. Для ефективної експлуатації зазначених двигунів необхідно глибоке розуміння процесів у системі паливоподачі. Вирішенню даної задачі присвячено проведене дослідження.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розвиток теорії гідродинамічних процесів у різних технологічних схемах паливоподачі в дизелях. У той самий

час результати становлять практичний інтерес у сфері організації експлуатації дизелів класу.

4. Дослідження існуючих розв'язань проблеми

Скорочення викидів оксидів азоту (NOx) та сажі судових дизелів може бути досягнуто за рахунок використання стратегій багаторазового упорскування. У розрахунковому дослідженні [1] розглядається можливість поліпшення роботи малообертового двотактного судового дизеля при повному навантаженні шляхом реалізації попереднього впорскування. Використано програму обчислювальної гідродинаміки на основі пакету KIVA-3.

Ці дослідження включають багаторазове впорскування палива, що забезпечується системою впорскування Common Rail, для покращення змішування палива та повітря та досягнення згоряння в умовах, що знижують кількість шкідливих викидів [2-5]. Основна мета багатоступеневого впорскування - інтенсифікація розпилювання та випаровування палива для створення більш однорідної паливно-повітряної суміші зі зменшенням областей, багатих паливом, де утворюється сажа. Крім того, підтримання горіння при температурах нижче приблизно 2300 К важливо для зниження швидкості утворення NOx.

Yoon et al. [6], використовуючи засоби обчислювальної гідродинаміки (CFD) та експеримент, досліджували вплив декількох параметрів двигуна, у тому числі швидкості впорскування палива при згорянні. При цьому отримано зниження викидів NOx на 20% при тій же витраті палива.

Наслідуючи інший підхід, Struckmeier et al. [7] провели експерименти з використанням палива з нижчим цетановим числом, щоб забезпечити раннє упорскування і збільшити затримку займання та час змішування палива з повітрям, тим самим досягнувши згоряння частково гомогенного займання від стиснення. Такий підхід призвів до 10-відсоткового зниження викидів NOx із помітною (близько 1,5%) економією палива.

5. Методи дослідження

Проведено детальний аналіз комплектації системи паливоподачі Common Rail, що застосовується на двигунах RT-flex. Основною конструктивною особливістю системи є використання акумулятора великої ємності, що забезпечує вільне керування тиском упорскування на всіх режимах роботи двигуна. Ця особливість суттєво розширює можливості дослідження процесу паливоподачі.

Інше нетрадиційне рішення в методології паливоподачі представлене використанням пристрою для дозування з гідравлічним приводом і вільним гідродинамічним управлінням. Цей модуль -блок управління впорскуванням палива -БУВ (Injection Control Unit)-представляє особливий інтерес для дослідження оригінальністю конструкції та принципом роботи.

З урахуванням зазначених особливостей складені та реалізовані в середовищі GT-Power математична модель та програма розрахунку процесу впорскування палива, що забезпечили виконання представленого дослідження.

6.Виклад основного матеріалу

Переходячи до організації дослідження для побудови швидкісної характеристики, зупинимося на розрахунковій схемі. При її розробці ставилося завдання створення моделі, що досить повно описує функції окремих елементів системи з урахуванням їх реальних параметрів. Схема розрахункової моделі представлена на рис. 1.

Основними робочими елементами розрахункової моделі акумуляторної системи CR подачі палива (рис. 1) є пристрої, безпосередньо що здійснюють упорскування палива. Це БУВ 2 і форсунки 4. Керує процесом клапан 3, що з'єднує, згідно з алгоритмом реального процесу, в заданий момент по куту повороту колінчастого валу робочу порожнину БУВ з форсунками.

Стрілки з полицями на схемі відносяться до позицій специфікації. Номери у кружках вказують точки виведення параметрів окремих елементів. Їх загальна кількість становила 13.

Імітаційне моделювання процесів паливоподачі проведено при незмінній тривалості відкриття клапана управління в 12° ПКВ на ести режимах за частотою обертання двигуна в діапазоні $n=68-149$ об/хв. об/хв. Результати проведеного дослідження представлені у таблиці.

Імітаційне моделювання процесів паливоподачі проведено при незмінній тривалості відкриття клапана управління в 12° ПКВ на шести режимах за частотою обертання двигуна в діапазоні $n=68-149$ об/хв. Результати проведеного дослідження представлені у таблиці.

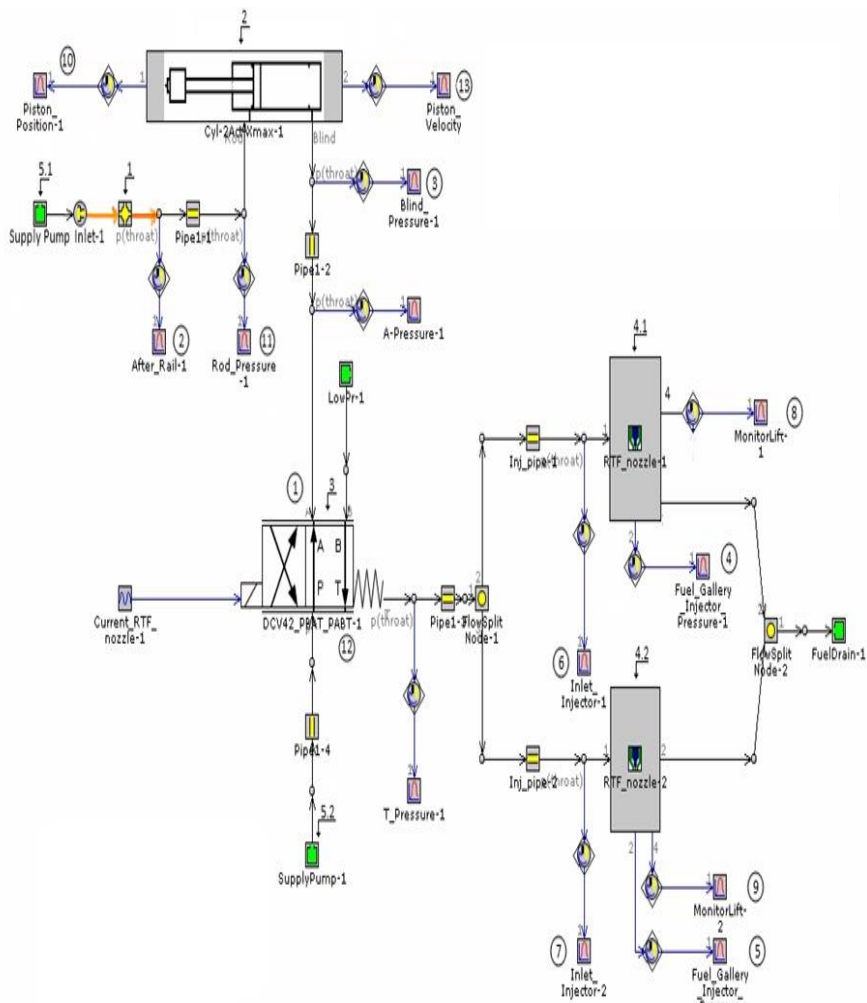


Рис. 1. Розрахункова модель акумуляторної системи CR
 1-акумулятор; 2- блок управління впорскуванням (БУВ); 3- клапан БУВ;
 4.1,4.2-форсунки; 5.1, 5.2 – ТНВД; (1) - (13) - реєстрація параметрів

Таблиця 1. Швидкісна характеристика акумуляторної системи паливонадачі Common Rail

n , об/хв	$\varphi_{п max}$, °ПКВ	$x_{п}$, мм	$h_{п}$, мм	$\varphi_{п}$, °ПКВ	$v_{п max}$, м/с	$g_{ф}$, кг/с	$P_{р.п}$, бар	$P_{б.п}$, бар	$q_{ц}$, Г
68	134.77	287	13.5	30	0.49	0.507	633	763	30.9
87	135.5	289.9	10.6	29.9	0.49	0.507	633	769	23.86
105	135.5	291.7	8.85	29.9	0.49	0.507	633	767	19.54
124	136.2	292.9	7.56	30.6	0.49	0.507	633	767	16.36
136	136.9	293.6	6.92	32.1	0.49	0.507	633	767	14.8
149	136.9	294.2	6.36	33.5	0.49	0.507	633	764	13.39

Узагальнене подання табличних даних, що представляє швидкісну характеристику системи подачі, оформлено на рис. 2.

Тривалість відкриття керуючого клапана зберігається незмінною усім режимах і становить, як зазначено вище, 12о ПКВ в діапазоні 120-132о ПКВ. Слід очікувати, що фазові (кутові) характеристики різних режимах виявляться близькими. При цьому, тимчасові характеристики мають відрізнятись суттєво.

Для аналізу узагальнених залежностей розглянемо розвиток процесів у окремому пристрої системи.

На рис. 3 дано запис гідродинамічних явищ в БУВ, що визначає перебіг впорскування. Як параметри, що формують функцію блоку - переміщення дозуючого поршня - представлені тиску палива в двох порожнинах: робочій та буферної - рр.п, рб.п.

Стан кінцевої фази заповнення робочій порожнини паливом, що характеризується рівністю тисків у РП та БП, становить 800 бар. Це відповідає поверненню ДП у вихідний стан при з'єднанні обох порожнин з паливним акумулятором.

Фаза впорскування починається при з'єднанні РП із форсунками через клапани 3 (рис.1). На ділянці $\varphi = 120 - 127$ оПКВ ДП розганяється до максимальної швидкості $v_{п max} = 0,49$ м/с. Решта подачі палива здійснюється при незначній зміні швидкості ДП.

Зниження швидкості починається при $\varphi = 136$ о ПКВ, а зворотний рух поршня - з $\varphi = 136,9$ о ПКВ, відразу після зупинки. Кінематика зворотного ходу ДП симетрична робочій фазі з тією же швидкістю.

Наведені характеристики визначаються конструктивними параметрами системи, що задають зміну тиску в порожнинах БУВ. Тиск у робочій порожнині при підключенні форсунок падає з 800 до 633 бар, зберігаючись у діапазоні 633 - 640 бар протягом основного періоду упорскування палива.

Заключна фаза паливopодачі супроводжується підвищенням до 700 бар тиском. На ділянці зворотного ходу ДП і заповнення РП $p_{p,л}$ змінюється незначно, залишаючись на рівні 680 бар.

За короткий проміжок в $2,5^\circ$ ПКВ швидкість ДП знижується до нуля, а $p_{p,л}$, навпаки, підвищується до 750 бар.

На ділянці зворотного ходу ДП і заповнення РП $p_{p,л}$ змінюється незначно, залишаючись на рівні 680 бар.

Заклучний період розвитку гідродинамічних процесів у РП послужу зупинки ДП являє собою загасаючі коливання тиску з початковим діапазоном 750-850 бар. Тривалість коливань: $150-185^\circ$ ПКВ.

Іншим істотним параметром для БУВ є тиск у буферній порожнині. Вихідне значення $p_{б,л} = 800$ бар. Подальша зміна $p_{б,л}$ є результатом взаємодії елементів складної гідродинамічної системи: форсунок – РП – ДП – БП – ТА з керуючими пристроями та сполучними ділянками каналів та трубопроводів.

Розгін ДП супроводжується падінням тиску в буферній порожнині БУВ з 800 до 764 бар. Протягом основного

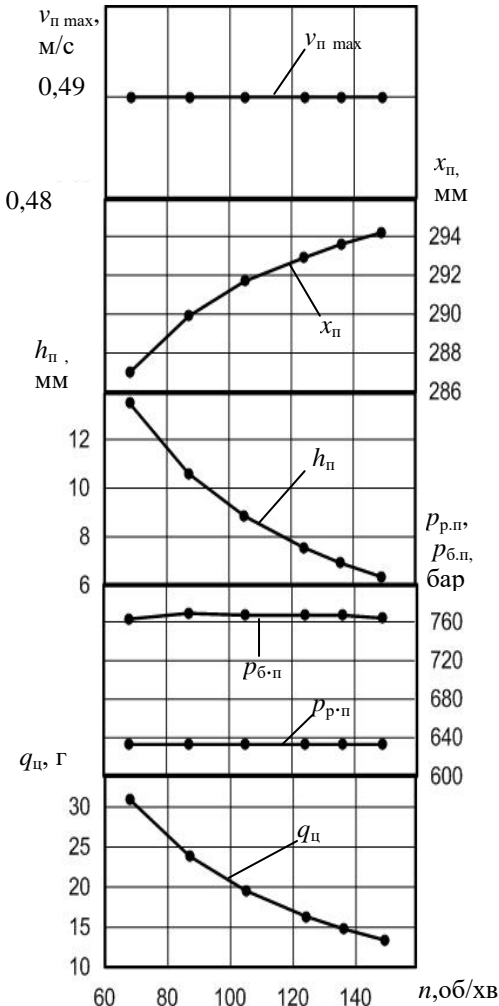


Рис.2. Швидкісна характеристика акумуляторної системи впорскування палива Common Rail

упорскування $p_{б.п}$ повторює форму $p_{р.п}$, залишаючись у діапазоні 764-775 бар. При реверсі ДП спостерігається підйом $p_{б.п}$ до 848 бар. Зворотний хід ДП іде з $p_{б.п}$ рівному 848-830 бар. При зупинці ДП генеруються загасаючі коливання $p_{б.п}$ з первісним розмахом 735 -855 бар, тривалістю 150-170 °ПКВ із сімома коливаннями. Цікаво, що період коливань $p_{р.п}$ учетверо більше - усього півтора коливання за те ж час.

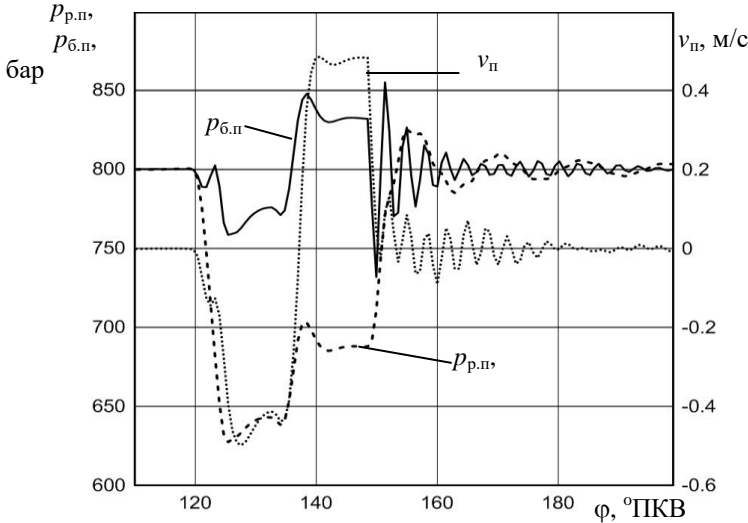


Рис. 3. Осцилограми процесів у БУВ при $n=149$ об/хв:
 $p_{р.п}$ – тиск у робочій порожнині, $p_{б.п}$ – тиск у буферній порожнині, $v_{п}$ – швидкість поршня

Не можна не відзначити ще одна обставина- поведіння ДП після його зупинки, точніше, зниження швидкості до нуля.

Коливання тиску палива в суміжних порожнинах приводять до загасаючих коливань швидкості ДП із кількості дев'яти періодів у діапазоні 0,1 - (-) 0,08 м/с. Ці коливання синхронні зі зміною $p_{б.п}$. На кривій переміщення ДП у масштабі графіка рис. 4 ці коливання помітні в районі переходу кривих на горизонтальну ділянку.

Криві рис. 4 отримані, як зазначено вище, при незмінному куті відкриття клапана керування упорскуванням. У результаті часовий відрізок для упорскування змінюється назад пропорційно частоті обертання. На графіках це представлено скороченням ходу ДП із ростом швидкості обертання. Як треба з дані таблиці, $h_{п} = 13,5 - 6,36$ мм при $n = 68 - 149$ об/хв.

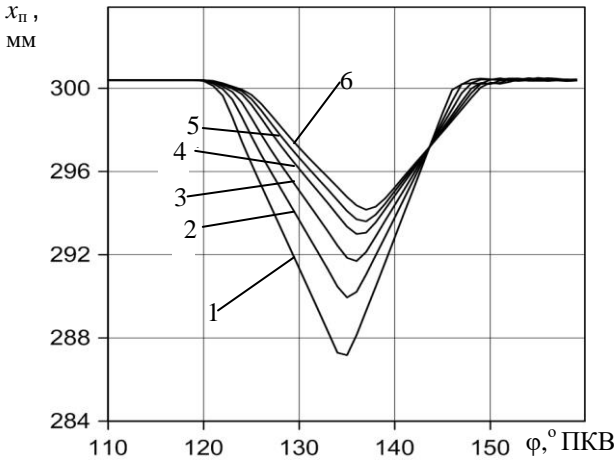


Рис.4 . Положення ДП залежно від кута повороту колінвала за різної частоти обертання: 1 - $n = 68$ об/хв; 2 - 87; 3 - 105; 4 - 124; 5 - 136; 6 - 149

Змінюються й інші параметри руху ДП. По-перше, змінюється момент його приходу в крайнє положення у бік обертання з ростом числа оборотів. Чисельно це виглядає як зміна $\varphi_{П\max}$ у межах 134,77-136,9 °ПКВ.

По-друге, через прискорене протікання процесу упорскування відбувається загальний зсув ходу ДП, що видно з порівняння траєкторій 1, 6 на рис.4. При цьому кут подачі $\varphi_{П}$ розтягується, зростаючи з 30 до 33,5 °ПКВ.

Висновки

1. В результаті аналітичного огляду досліджень у галузі засобів та процесів паливоподачі дизелів показана актуальність даної тематики. Перспективним є розвиток акумуляторних систем з електронним керуванням.

2. Детально розглянуто функціональні та конструктивні дані, складено модель для розрахункового дослідження паливоподачі акумуляторною системою Common Rail суднового малооборотового двигуна типу RT-Flex.

3. Розроблено систему показників, що забезпечують досить повне уявлення про процеси впорскування системою Common Rail.

4. Проведено імітаційне моделювання паливоподачі на 6 режимах швидкісної характеристики в діапазоні частоти обертання $n = 68-149$ об/хв, достатніх для побудови відповідних залежностей.

5. Швидкісна характеристика представлена у формі узагальнених залежностей та детального опису процесів в елементах системи.

6. Процеси в БУВ, що надає визначальний вплив на характеристики паливоподачі, описані зміною тиску палива в робочій та буферній порожнинах, а також динамікою переміщення поршня, що дозує.

7. Тиск у робочій порожнині при підключенні форсунок падає з 800 до 633 бар, зберігаючись у діапазоні 633 - 640 бар протягом основного періоду упорскування палива.

8. Заключний період розвитку гідродинамічних процесів у РП послужив зупинки ДП являє собою загасаючі коливання тиску з початковим діапазоном 750-850 бар.

Перелік використаних джерел

1. Andreadis P. Effects of the Fuel Injection Parameters on the Performance and Emissions / P. Andreadis, A. Zompanakis, C. Chryssakis, L. Kaiktsis // International Journal of Engine Research: February, 2011.- p.14-29.- DOI: 10.1243/14680874JER511 .- <http://jer.sagepub.com/content/12/1/14>

2. Benajes J. Influence of pre- and post-injection on the performance and pollutant emissions in a HD diesel engine/ J. Benajes, S. A. Molina, J. M. Garcia// SAE technical paper.- 2001-01-0526, 2001

3. Ishikawa N. DI diesel emission control by optimized fuel injection/ N. Ishikawa, T. Uekusa, T. Nakada, R. Hariyoshi // SAE technical paper.- 2004-01-0117, 2004.

4. Payri F. Influence of the post-injection pattern on performance, soot and NOx emissions in a HD diesel engine/ F. Payri, J. Benajes, J. V. Pastor, S. Molina // SAE technical paper.- 2002-01-0502, 2002.

5. Chryssakis C. In-cylinder reduction of PM and NOx emissions from diesel combustion with advanced injection strategies/ C. A. Chryssakis, J. R. Hagen, A. Knafel, V. Hamosfakidis// Int. J. Veh. Des., 2006.- 41.- 83–102.

6. Yoon W. Optimization of piston bowl shape, fuel injection nozzle and fuel injection rate for the reduction of NOx emissions in a medium-speed diesel engine/ W. H. Yoon, B. S. Kim, K. D. Kim, Y. S. Lee// Proceedings of the Seventh International Symposium on The Diagnostics and

Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines , Sapporo, Japan, 28–31 July 2008.- paper DE3-3

7. Struckmeier D. Visualization of the PCCI combustion of light cycle ϵ oil (LCO) in diesel engines/ D. Struckmeier, D. Tsuru, S. Kawauchi, C. Shinnosuke // Proceedings of the Seventh International Symposium on The Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines, Sapporo, Japan, 28–31 July 2008.- paper HC4-1

10.31653/smf48.2024.100-113

Сагін С.В., Куропятник О.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

Постановка проблеми в загальному вигляді. Судна морського транспорту забезпечують перевезення вантажів між країнами та континентами, які розділені морями та океанами. Практично на всіх судах, незалежно від їх характеристик та призначення, як головний двигун використовуються двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Крім того, ДВЗ на судах морського та внутрішнього водного транспорту виконують функцію допоміжних двигунів – забезпечуючи необхідною потужністю судову електростанцію [1-3].

Функціонування суднових ДВЗ неможливе без використання палива, основним видом якого є рідке паливо нафтового походження. Газові дизелі, а також двохпаливні ДВЗ в даний час встановлюються тільки на деяких типах спеціалізованих суден, тому за своєю кількістю та загальною потужністю не можуть конкурувати з ДВЗ, які працюють на рідкому паливі [4-6].

Одночасно з цим всі провідні дизелебудівні фірми займаються питаннями використання в дизелях альтернативних видів палива, до одного з яких відноситься паливо біологічного походження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними складовими, що використовуються під час виробництві палива біологічного походження, є рослинні та тваринні жири, хімічний склад яких незначно відрізняється один від одного. Рослинні олії як моторні палива можна використовувати як у чистому вигляді, так і в суміші з дизельним та іншими нафтовими паливами, а також із газовими конденсатами, спиртами, ефірами та іншими альтернативними паливами. Джерелом рослинних олій служать олійні культури, в насінні або плодах яких містяться рослинні жири. До олійних відноситься більше 150 видів рослин, з яких виробляють рослинні олії. Залежно від кліматичних умов та доступності вирощування, сировиною для виробництва біодизелю можуть бути різні рослинні олії – від оливкової олії до тваринного жиру [7-9].

Близько 87,4 % світового виробництва рослинних олій припадає на пальмову, соєву, рапсову та соняшникову олії, решту 12,6 % – на

арахісову, бавовняну, оливкову, кокосову та пальмоядрову. Безумовно, більша частина цього обсягу використовується у харчовій промисловості. Однак, частина олії використовується як сировина для виробництва біопалива. Ріпакова олія займає третє місце за обсягом виробництва у світі після пальмової та соєвої. При цьому, для виробництва біодизельного палива, найактивніше використовується саме ріпакова олія. У різних рослинних оліях міститься різна кількість жирних кислот, що призводить до певної відмінності в їх характеристиках. Усі рослинні палива мають схожі один з одним основні характеристики – густину, температуру спалаху, нижчу теплотворну здатність. При згорянні вони виділяють приблизно на 10...12 % менше тепла, ніж дизельне паливо на нафтовій основі. Стандартів для теплоти згоряння палива з олії не існує, проте більш висока теплотворна здатність палива є важливою властивістю, що використовується під час визначенні їх якості [10-12].

American society of testing and materials (ASTM) як основну характеристику якості палива на основі рослинних олій визначає цетанове число. Специфікація ASTM D6751 вказує на мінімальне цетанове число 47 для рослинного палива. Усі палива на основі рослинних олій, приготовані з сировини, що найчастіше використовується, перевищують це значення.

Відмінною особливістю палив з олії є мінімальний рівень вмісту сірки. Це дозволяє використовувати їх у спеціальних екологічних районах – SECAs).

Екологічна ефективність використання біопалива також характеризується меншою кількістю вуглекислого газу, що утворюється за його згоряння. При спалюванні традиційне паливо виробляє велику кількість вуглекислого газу, який вважається парниковим газом та причиною утримання сонячного тепла на планеті. Спалювання вугілля та нафти підвищує температуру та викликає глобальне потепління. Використання біопалива зменшує вплив парникових газів на довкілля [13-15].

У різних наукових дослідженнях містяться суперечливі дані щодо кількості викидів оксидів азоту NO_x при використанні біодизельного палива. Ця невідповідність пов'язана з варіативністю експерименту, типом нафтового палива, а також умовами проведення експерименту (концентрацією біопалива в паливній суміші з паливом нафтового походження, режимами роботи дизеля, особливостями та характеристиками його систем охолодження та випуску газів).

Біодизельне паливо (або FAME – Fatty Acid Methyl Ester, метилові ефіри жирних кислот) на відміну від дизельного палива на нафтовій основі, виробляється з відновлюваних органічних джерел. Основні експлуатаційні характеристики FAME (густина, в'язкість, температура спалаху, теплотворна здатність) збігаються з аналогічними показниками дизельного палива – це дозволяє використовувати його у більшості сучасних ДВЗ. Як правило, у чистому вигляді біодизельне паливо FAME не використовується. Найбільш доцільний варіант його використання – паливні суміші із паливом нафтового походження. У таких сумішах нафтове паливо є основним компонентом та його кількість становить 70...95 % за масою. Біодизельне паливо використовується як добавка, його кількість становить 5...30 % за масою. Такі палива класифікуються як B5, B10...B25, B30 [16-18].

Палива біологічного походження характеризується меншою теплотворною здатністю порівняно з паливами нафтового походження. При цьому зменшується кількість енергії, що виділяється під час його згоряння в циліндрі дизеля. Це є причиною зниження крутного моменту та потужності дизеля під його роботі тільки на біопаливі. Саме тому в чистому вигляді (тільки паливо FAME) біодизельне паливо не застосовується, крім того, склад біодизельного палива в його суміші з паливом нафтового походження не перевищує 30 % (що відповідає біодизельному паливу B30). При цьому забезпечення необхідного крутного моменту (і відповідно потужності дизеля) забезпечується шляхом підтримки необхідної частоти обертання колінчастого валу дизеля. Це змушує збільшувати циклову подачу палива у разі використання біодизельного палива.

Використання біопалива змінює перебіг робочого циклу в циліндрі дизеля, насамперед процес згоряння [19, 20]. Це призводить до зміни експлуатаційних показників дизелів, при цьому виникає завдання визначення фаз паливоподачі (насамперед кута випередження подачі палива), за якими зміна цих показників підвищує ефективність роботи дизеля та покращує його екологічні показники [21, 22]. Вирішення цієї задачі можливе шляхом проведення експериментів на основних експлуатаційних режимах роботи дизеля.

Постановка завдання. В зв'язку з вищевикладеним завданням досліджень було визначення оптимальних режимів експлуатації суднових ДВЗ під час використання біодизельного палива.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувались на судновому дизелі 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group

та трьох судових дизелях 6DL-16 Daihatsu Diesel, які виконували функції головного та допоміжного двигунів в складі судової енергетичної установки балкера водотоннажністю 68340 тонн.

Експлуатація дизелів здійснювалася з використанням палив нафтового походження DMA та RMG380, а також біодизельного палива B10. Паливо B10 включає 90 % дизельного палива, а також 10 % палива біологічного походження FAME [23, 24].

Дослідження виконувались для рекомендованого фірмами виробниками діапазону кутів випередження подачі палива θ , які вимірювалися у градусах повороту колінчастого валу – grad ARC та склали:

для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W – $-1 \dots -7$ grad ARC;

для дизелів 6DL-16 Daihatsu Diesel – $-20 \dots -8$ grad ARC.

При цьому як найбільш раціональний для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W рекомендований кут -4° grad ARC, для дизелів 6DL-16 Daihatsu Diesel -14 grad ARC. Саме з такими кутами випередження упорскування експлуатувалися дизелі під час використання дизельного палива. Саме ці кути були обрані як «базові» при випробуваннях з використанням біопалива B10.

Як контрольні параметри, за якими оцінювалися експлуатаційні показники судових дизелів, вибиралися максимальний тиск згоряння p_z , температура випускних газів t_g , питома ефективна витрата палива b_e та концентрація оксидів азоту у випускних газах NO_x . Їхнє визначення виконувалося за допомогою судової системи моніторингу та діагностики ProPower. Вибір цих показників було обґрунтовано з урахуванням наступного. Максимальний тиск згоряння характеризує енергетичну ефективність робочого циклу дизеля, з його збільшенням підвищуються всі основні показники роботи дизеля, насамперед середній індикаторний тиск та індикаторна / ефективна потужність. Температура випускних газів характеризує ефективність згоряння палива. Збільшення температури випускних газів свідчить про зміщення процесу згоряння на лінію розширення та догорання палива у випускному ресивері. Максимальний тиск згоряння та температура випускних газів є обов'язковими показниками, що контролюються під час експлуатації дизеля. При цьому їх значення визначають для кожного окремого циліндра, середнє для всіх циліндрів дизеля, а також розраховується відхилення значень для окремих циліндрів від середнього. Питома ефективна витрата палива характеризує паливну економічність роботи дизеля та характеризує економічну

доцільність вибору тих чи інших параметрів паливоподачі. Також питома витрата палива прямо пропорційно пов'язана із загальною витратою палива (годинною або добовою) та впливає на суднові запаси палива – показник, який є актуальним саме для суден морського транспорту, які здійснюють тривалі морські чи океанські переходи без можливості бункерування. Концентрація оксидів азоту у випускних газах є основним показником, що характеризує екологічні показники роботи суднових дизелів. Її значення регламентується відповідно до вимог Annex VI MARPOL і залежить від швидкісного режиму роботи дизеля та року будівництва судна [25-27].

Результати експериментів наведені у табл. 1, 2.

Таблиця 1. Результати експериментів (дизель 5S60ME-C8 MAN-B&W)

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC							DF
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
p_z , МПа	14,6	15,3	15,3	15,1	14,9	14,5	14,2	15,3
t_g , °C	291	284	284	288	291	293	298	284
b_e , г/(кВт·год)	183	176	177	179	184	188	193	176
NO_x , г/(кВт·год)	11,88	13,42	10,55	10,75	11,05	11,35	12,42	13,42

DF – експлуатація на дизельному паливі

Таблиця 2. Результати експериментів (дизель дизель 6DL-16 Daihatsu Diesel)

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC							DF
	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8	
p_z , МПа	15,8	16,45	16,7	16,45	16,25	15,95	15,7	16,7
t_g , °C	334	326	324	328	330	332	339	324
b_e , г/(кВт·год)	198	195	195	194	199	203	207	191
NO_x , г/(кВт·год)	6,68	6,21	6,08	6,16	6,37	6,72	7,04	7,84

DF – експлуатація на дизельному паливі

Для кращої візуалізації результати досліджень, що наведені в табл. 1, 2, подані як діаграми (рис. 1, 2).

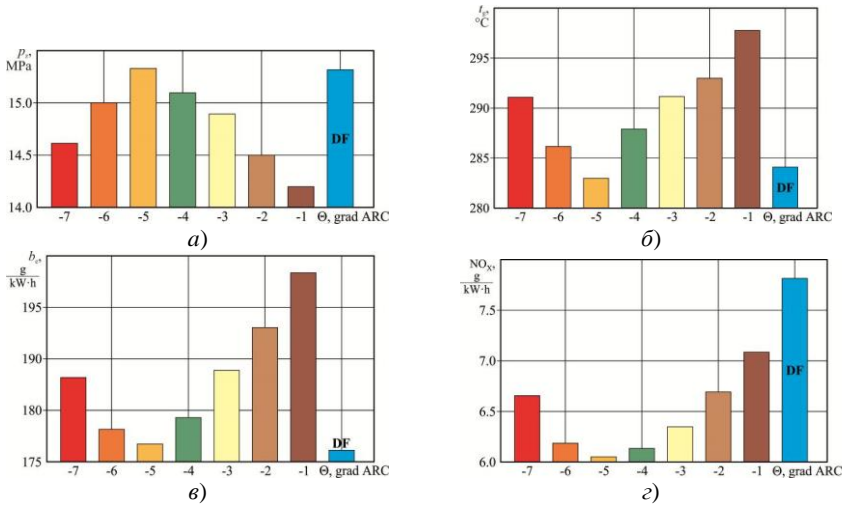


Рис. 1. Зміна експлуатаційних показників роботи дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W за різних кутів випередження подачі біодизельного палива B10: *a* – максимальний тиск згоряння; *б* – температура випускних газів; *в* – питома ефективна витрата палива; *г* – концентрація оксидів азоту у випускних газах; DF – дизельне паливо

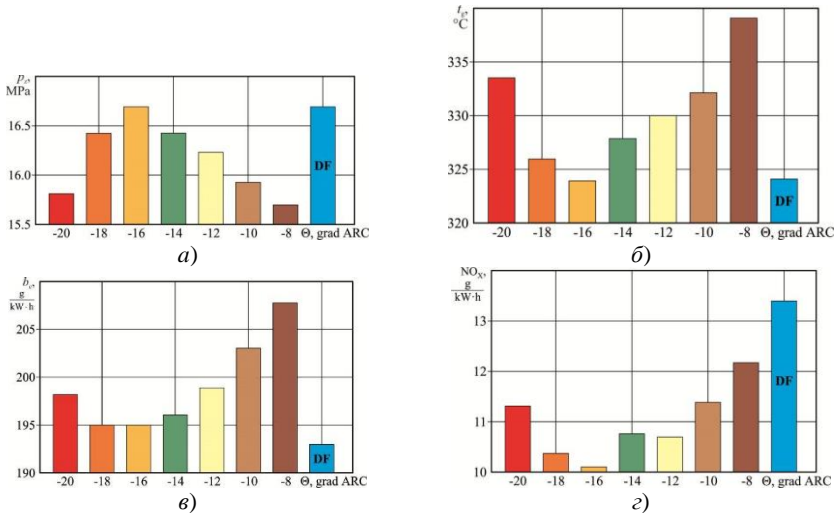


Рис. 2. Зміна експлуатаційних показників роботи дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel за різних кутів випередження подачі біодизельного палива B10: *a* – максимальний тиск згоряння; *б* – температура випускних газів; *в* – питома ефективна витрата палива; *г* – концентрація оксидів азоту у випускних газах; DF – дизельне паливо

Відносна зміна експлуатаційних параметрів дизелів за різних кутів випередження подачі біодизельного палива B10 виконувалась за формулами:

відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах

$$\Delta \text{NO}_X = \frac{\text{NO}_X^{\text{DF}} - \text{NO}_X^{\text{B10(i)}}}{\text{NO}_X^{\text{DF}}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

відносне збільшення питомої ефективної витрати палива

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{\text{B10(i)}} - b_e^{\text{DF}}}{b_e^{\text{DF}}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

відносне зниження максимального тиску згоряння

$$\Delta p_z = \frac{p_z^{\text{DF}} - p_z^{\text{B10(i)}}}{p_z^{\text{DF}}} \cdot 100\%; \quad (3)$$

відносне збільшення температури випускних газів:

$$\Delta t_g = \frac{t_g^{\text{B10(i)}} - t_g^{\text{DF}}}{t_g^{\text{DF}}} \cdot 100\%; \quad (4)$$

де NO_X^{DF} , b_e^{DF} , p_z^{DF} , t_g^{DF} – концентрація оксидів азоту у випускних газах, питома ефективна витрата палива, максимальний тиск згоряння, температура випускних газів при використанні дизельного палива;

$\text{NO}_X^{\text{B10(i)}}$, $b_e^{\text{B10(i)}}$, $p_z^{\text{B10(i)}}$, $t_g^{\text{B10(i)}}$ – концентрація оксидів азоту у випускних газах, питома ефективна витрата палива, максимальний тиск згоряння, температура випускних газів при різних кутах випередження подачі біодизельного палива B10.

Значення, що отримані за формулами (1)-(4), представлені у табл. 3, 4.

Таблиця 3. Відносна зміна експлуатаційних параметрів дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W за різних кутів випередження подачі біодизельного палива B10

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC						
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
p_z , МПа	4,58	1,96	0	1,31	2,61	5,23	7,19
t_g , °C	2,46	0,70	0	1,41	2,46	3,17	4,93
b_e , г/(кВт·год)	3,98	1,14	0,57	1,70	1,55	6,82	9,66
NO_X , г/(кВт·год)	11,48	16,39	21,39	19,90	17,66	15,43	7,45

Таблиця 4. Відносна зміна експлуатаційних параметрів дизеля 6DL-16 Daihatsu за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC						
	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8
p_{zz} , МПа	5,39	1,50	0	1,50	2,70	4,49	5,99
t_g , °С	3,09	0,62	0	1,23	1,85	2,47	4,63
b_e , г/(кВт·год)	3,66	2,09	2,09	1,57	4,19	6,29	8,38
NO_x , г/(кВт·год)	14,80	20,79	22,45	21,43	18,75	14,29	10,20

Для комплексної оцінки відносної зміни експлуатаційних показників роботи дизелів за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10 побудовано діаграми, які показані на рис. 3.

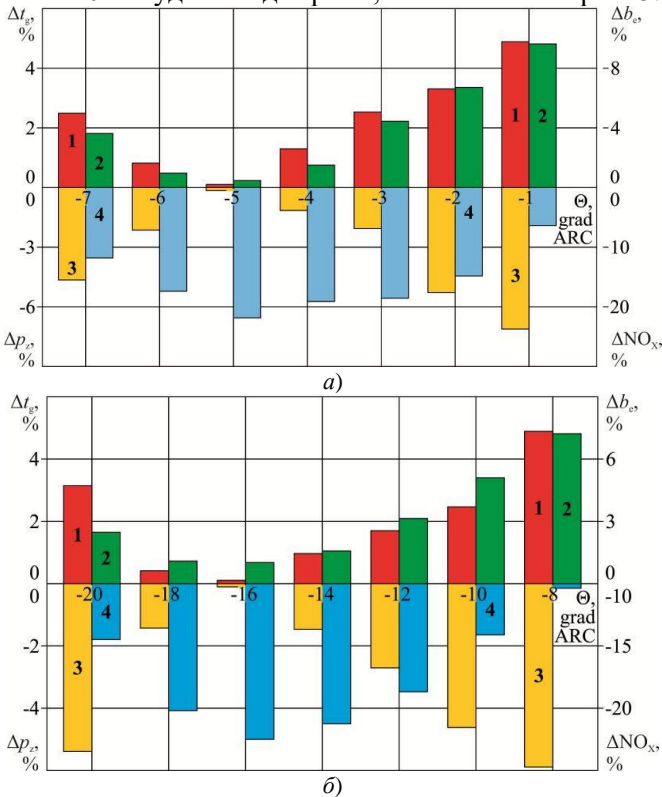


Рис. 3. Відносна зміна експлуатаційних показників роботи суднових дизелів 5S60ME-C8 MAN-B&W (а) та 6DL-16 Daihatsu Diesel (б) за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10: 1 – температура випускних газів; 2 – питома ефективна витрата палива; 3 – максимальний тиск згоряння; 4 – концентрація оксидів азоту у випускних газах

Екологічна ефективність використання біопалива В10 оцінювалася за значенням екологічної стійкості суднових дизелів за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10. Значення екологічної стійкості ΔNO_x^+ визначалося за формулою

$$\Delta\text{NO}_x^+ = \frac{\text{NO}_x^{\max} - \text{NO}_x^{\text{B10(i)}}}{\text{NO}_x^{\max}} \cdot 100\%; \quad (5)$$

де NO_x^{\max} – максимально можлива концентрація оксидів азоту у випускних газах відповідно до вимог Annex VI MARPOL.

Для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W $\text{NO}_x^{\max} = 14,4$ г/(кВт·год), для дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel визначається за формулою

$$\text{NO}_x^{\max} = 44n^{-0,23}; \quad (6)$$

де n – частота обертання, хв^{-1} .

С урахуванням характеристик дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel

$$\text{NO}_x^{\max} = 44 \cdot 1200^{-0,23} = 8,61 \text{ г/(кВт·год)}.$$

Значення екологічної стійкості ΔNO_x^+ суднових дизелів 5S60ME-C8 MAN-B&W та 6DL-16 Daihatsu Diesel за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10 наведені у табл. 5, 6.

Таблиця 5. Екологічна стійкість дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC						
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
p_z , МПа	17,5	22,08	26,74	25,35	23,26	21,18	13,75

Таблиця 6. Екологічна стійкість дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel за різних кутів випередження подачі біодизельного палива В10

Показник	Кут випередження подачі палива, θ , grad ARC						
	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8
p_z , МПа	22,46	27,91	29,42	28,49	26,06	21,99	18,28

Чим більше значення екологічної стійкості ΔNO_x^+ – тим далі від регламентованого Annex VI MARPOL NO_x^{\max} значення концентрації оксидів азоту у випускних газах.

Для кращої візуалізації за значеннями, наведеними в табл. 3, 4, побудовані діаграми (рис. 4).

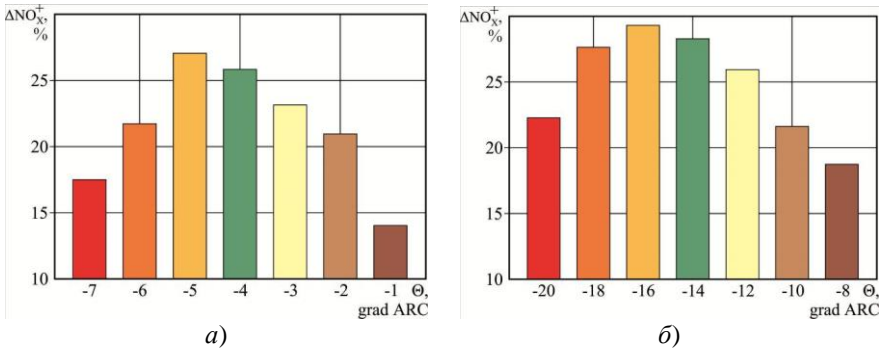


Рис. 4. Екологічна стійкість судових дизелів 5S60ME-C8 MAN-B&W (а) та 6DL-16 Daihatsu Diesel (б) за різних кутах випередження подачі біодизельного палива B10

Під час проведення досліджень контролювались та підтримувалися у необхідному діапазоні всі основні параметри роботи головного та допоміжних дизелів, а також параметри у системах, що забезпечують їхнє функціонування. До них були віднесені:

тиск у циліндрі в кінці стиснення, температура випускних газів, середній індикаторний тиск, а також відхилення цих показників від середнього значення по всіх циліндрах;

частота обертання валу дизеля;

фази газорозподілу (кути відкриття та закриття продувних та випускних клапанів);

тиск і температура охолоджувальної води та циркуляційного мастила на вході та виході з дизелів;

температура та в'язкість палива, а також технічний стан паливної апаратури високого тиску.

У зв'язку з односпрямованим перебігом процесів та пропорційними значеннями результатів, у табл. 1-6 і на рис. 1-4 наведено лише дані, які відповідають максимальному навантаженню на дизелі, а саме 0,95 $N_{ном}$ для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W і 0,8 $N_{ном}$ для дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Підвищення ефективності використання біопалива полягає не тільки у виборі його оптимального складу, але також у визначенні оптимальних кутів випередження подачі біопалива в циліндр дизеля. Зміна кутів випередження подачі біопалива (порівняно з варіантом роботи дизе-

ля на дизельному паливі) необхідна у зв'язку зі зміною складу паливної суміші, що згоряє в циліндрі дизеля.

Залежності основних експлуатаційних показників роботи як двотактних, так і чотиритактних дизелів від кута випередження подачі палива мають синусоїдальний вигляд та характеризуються наявністю оптимуму – мінімальних значень температури випускних газів, концентрації оксидів азоту у випускних газах, питомої ефективної витрати палива, а також максимального значення тиску згорання.

З метою підвищення ефективності використання біопалива необхідно зсувати процес подачі на лінію стиснення – збільшувати кут випередження подачі палива, при цьому діапазон цієї зміни має відповідати рекомендаціям заводів виробників щодо можливих кутів подачі палива.

Оптимальний кут випередження подачі біопалива визначається експериментальним шляхом та залежить від характеристик дизеля.

Використання біопалива (порівняно з експлуатацією дизеля на дизельному паливі) збільшує екологічну стійкість дизеля. Причому це відбувається у всьому діапазоні експлуатаційних режимів дизеля. Це збільшує запас екологічної стійкості – під яким можна розуміти відносну різницю між максимально допустимою та поточною концентрацією оксидів азоту у випускних газах.

Саме підвищення екологічної стійкості судових дизелів у разі використання біопалива є найбільш позитивним критерієм та сприяє інтенсивності використання біопалива в енергетичних установках морських суден.

Перелік використаних джерел

1. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pířtěk V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.

2. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V., Dovidenko Y. Basic aspects ensuring shipping safety // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2022. – № 117. – P. 139-149. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.117.10>.

3. Тимошук О.М., Даки О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх по-

будови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.

4. Petrychenko O., Levynskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96-106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.

5. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. [10.34660/INF.2020.4.52991](https://doi.org/10.34660/INF.2020.4.52991).

6. Sagin S., Куropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: [10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).

7. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskiy Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI [10.17818/NM/2022/1.7](https://doi.org/10.17818/NM/2022/1.7).

8. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

9. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskiy Y., Pīst'ek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.

10. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 23-31. doi: [10.31653/smf47.2023.23-31](https://doi.org/10.31653/smf47.2023.23-31).

11. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023.

– № 5 (1(73)). – Р. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

12. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.

13. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.

14. Куропятник А. А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник, 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.

15. Побережний Р.В., Сагин С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

16. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

17. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – Р. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

18. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.

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

20. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-101.

21. Сагин С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.

22. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // *Universum: Технические науки*. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.

23. Руснак Д.Ю., Сагин С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40.* – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

23. Сагин С.В., Сагин С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.

24. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», – С. 76-87.

25. Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малооборотного двигуна в умовах сучасної тенденції щодо зниження експлуатаційної швидкості суден. // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2022. – Вип. 2(36). – С. 1-13. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.06.

26. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунов В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.

27. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту*, 2020. – Вип. 2(59). – С. 88-98.

10.31653/smf48.2024.114-125

Сагін А.С., Заблоцький Ю.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МОРСЬКИХ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНИХ ТЕРМІНАЛІВ ПІД ЧАС ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗРІДЖЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ СУДНАМИ-ГАЗОВОЗАМИ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Останніми роками попит на перевезення зрідженого природного газу (ЗПГ) значно зріс, що зумовлено глобальними змінами в енергетичній галузі. Країни по всьому світу прагнуть зменшити залежність від вуглеводнів і перейти на більш екологічно чисті види палива. ЗПГ став одним із ключових компонентів цього переходу, оскільки під час його згоряння утворюється менше викидів вуглекислого газу порівняно з вугіллям і нафтовим паливом [1-3].

Зростання споживання ЗПГ особливо помітне в Європі та Азії, де держави активно диверсифікують свої джерела енергії. Будівництво нових терміналів для регазифікації та збільшення попиту на танкери, що транспортують ЗПГ (або liquefied natural gas – LNG) призвели до розширення флоту суден, призначених для його перевезення. Сучасні LNG-танкери (судна-газовози) оснащені передовими технологіями для забезпечення безпеки та ефективності перевезень, що також сприяє зростанню довіри до цього виду морського транспорту [4-6].

В умовах енергетичної кризи та змін на світовому ринку енергії перевезення зрідженого газу океанськими шляхами суднами-газовозами стає все більш затребуваним, а тенденції в цьому секторі вказують на подальше зростання та розвиток [7-9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Через кризу в Червоному морі та загрози для судноплавства багато компаній, що займаються транспортуванням ЗПГ в країни Азії, приділяють увагу до альтернативних маршрутів навколо Африканського континенту. Щоб мінімізувати витрати та підвищити ефективність у більш тривалих перевезеннях, зростає інтерес до використання перевалочних баз. Такі бази дозволяють тимчасово зберігати або перевантажувати ЗПГ на інші судна-газовози, що дає змогу оптимізувати логістичні процеси та скоротити час перебування суден у морі.

Перевалочні бази, розташовані у стратегічних точках, таких як узбережжя Західної та Південної Африки, сприяють розвантаженню суден-газовозів, що прямують на великі відстані. Вони також забезпечують більш гнучке управління ланцюжком постачань і знижують ризик затримок через переповненість морських портів або нестабільність регіонів. Крім того, використання таких баз допомагає уникати підвищених витрат на паливо та забезпечує стабільність транспортування ЗПГ у фокусі зростаючих вимог до безпеки та надійності постачань [10, 11].

Обхід Африканського континенту, хоча й збільшує час транспортування та витрати на паливо, став більш пріоритетним варіантом для забезпечення безпеки вантажів і екіпажів морських суден. Це також впливає на глобальні логістичні ланцюжки та підвищує вартість транспортування ЗПГ, що в підсумку відображається на цінах для споживачів. Проте компанії продовжують адаптуватися до змін умов, приділяючи особливу увагу безпеці та надійності постачань. В даний час розглядається можливість будівництва перевалочних баз на шляху від міст здобичі в північних морях поблизу берегів Норвегії та на шляху до Європейських країн та країн Азії. Характеристики деяких перевантажувальних терміналів, що розташовані на шляху транспортування ЗПГ з Північної Європи до Азії наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики перевантажувальних терміналів

Параметри	Регіон розташування терміналу	
	Норвегія	Південно-Африканська Республіка (ПАР)
Місцезнаходження	Узбережжя е Норвегії в місцях здобичі	Узбережжя ПАР поблизу Кейптауну
Пропускна спроможність	20 млн. тонн / рік	25 млн. тонн / рік
Об'єм сховища	2 плавучі сховища ЗПГ об'ємом 360 тис. м ³	2 плавучі сховища ЗПГ об'ємом 415 тис. м ³

Значне скорочення відстані та часу транспортування забезпечує зменшення обсягів утворення парів ЗПГ (Boil-off gas – BOG). Пари ЗПГ утворюються через різницю температур між ЗПГ та довкіллям внаслідок надходження тепла з довкілля через ізоляцію стінок судна-газовоза. Як правило, надлишкові пари ЗПГ збираються за допомогою системи рекуперації пари, повторно зріджуються та повертаються в рідкому стані до вантажних танків. За умовою відсутності на судна-газовозі системи повторного зрідження природного газу, надлишкові пари ЗПГ спалюють на факельній установці [12, 13].

Постановка завдання. Завданням дослідження був аналіз можливості використання морських перевантажувальних терміналів під час транспортування ЗПГ суднами-газовозами, а також визначення основних енергетичних потоків, що необхідні для забезпечення процесів завантаження /розвантаження ЗПГ на цих терміналах

Виклад основного матеріалу дослідження. Залежно від енергетичної установки судна-газовоза, надлишкові пари ЗПГ можуть використовуватися як паливо для теплових двигунів. Оскільки пари ЗПГ є цінним побічним продуктом, у світовій практиці дедалі частіше застосовують двопаливні дизельні установки, здатні працювати на газі, при цьому важке мазутне або суднове дизельне паливо використовується як резервне паливо. Швидкість пароутворення для суден-газовозів становить 0,125 ...0,13 % на добу від обсягу ЗПГ у вантажному танку. Наприклад, для судна-газовозу з місткістю вантажних танків 170000 м³ утворюється близько 170...255 м³ парів ЗПГ щоденно. Газ, що випаровується, становить приблизно 80...90 % енергії, необхідної судну-газовозу на повній потужності в завантаженому рейсі, і близько 40...50 % в баластному рейсі. Для продовження роботи судну-газовозу потрібно додаткове паливо або пара ЗПГ. У такому випадку можуть використовуватися форсовані випарники, які дозволяють випаровувати додаткову кількість ЗПГ. Слід зазначити, що під час морських перевезень через постійне випаровування ЗПГ зростає і теплота згоряння його парів. З часом цей факт може зменшити потребу в примусовому випаровуванні додаткової кількості ЗПГ [14, 15].

Оскільки поставки та відвантаження продукту можуть бути нерівномірними, з метою зменшення часу простою суден-газовозів в очікуванні розвантаження або завантаження ЗПГ передбачається можливість перевантаження ЗПГ з судна на судно за схемою «борт у борт» без проміжного зберігання на плавучих сховищах газу.

Під час вантажно-розвантажувальних операцій інтенсивність пароутворення може короткочасно збільшуватися в 1,5...2 рази. Основні причини пароутворення в процесі завантаження / розвантаження судна-газовозу представлені в таблиці 2. Надлишкові пари ЗПГ відводяться в спеціальний рукав на терміналі та далі в берегову систему повторного зрідження природного газу або можуть спалюватися на факельній установці. В останньому випадку (у зв'язку з тим, що спалювання парів ЗПГ пов'язано з використанням палива нафтового походження) необхідно підтримувати вимоги екологічних стандартів

щодо викидів в довкілля токсичних компонентів та забруднюючих речовин [16-18].

Таблиця 2. Основні причини пароутворення в процесі завантаження / розвантаження судна-газовоза

Причина пароутворення	Опис
Температурна різниця між ЗПГ та танком	Під час контакту ЗПГ з танком судна-газовоза виникає різниця температур, що сприяє випаровуванню ЗПГ
Подача теплоти через ізоляцію	Невелике, але постійне проникнення тепла через ізоляційні матеріали танка призводить до випаровування
Турбулентність під час бункерування	Під час бункеровки ЗПГ у танк створюється турбулентність, яка збільшує контакт парів ЗПГ та рідини, що підвищує теплообмін
Зовнішні температурні умови	Вплив навколишнього середовища, особливо за умовою високих температур, підвищує швидкість випаровування
Час контакту з відкритими поверхнями	Чим довше рідина перебуває на відкритих поверхнях, тим більша кількість ЗПГ випаровується
Теплота тертя під час перекачки	Під час перекачування ЗПГ відбувається тертя, яке призводить до утворення додаткової кількості парів

Регазифікаційні термінали призначені для прийому ЗПГ з суден-газовозів і підготовки природного газу до використання. На регазифікаційних терміналах ЗПГ зберігається в ізотермічних резервуарах і за потреби переводиться в газоподібний стан. Переведення ЗПГ в газоподібний стан відбувається в системі випаровування за допомогою нагрівання. Як прямий теплоносій зазвичай використовується морська вода, як проміжний теплоносій – пропан. Оскільки природний газ не має запаху, перед його подачею споживачам необхідна одоризація регазифікованого природного газу. Для одоризації застосовують етилмеркаптан або тетрагідротіофен [19-21].

В теперішній час як регазифікаційні термінали використовуються плавучі установки, здатні самостійно пересуватися на відстань до 2 морських миль від берегової лінії. Порівняно з наземними терміналами ЗПГ плавучі установки мають низку переваг: нижчу вартість; менший термін будівництва (близько 1..1,5 років – в порівнянні з наземним терміналом 3...5 років); менша площа та морське розташування мінімізує вплив на довкілля [22, 23].

Принципова схема регазифікаційного терміналу надана на рис. 1.

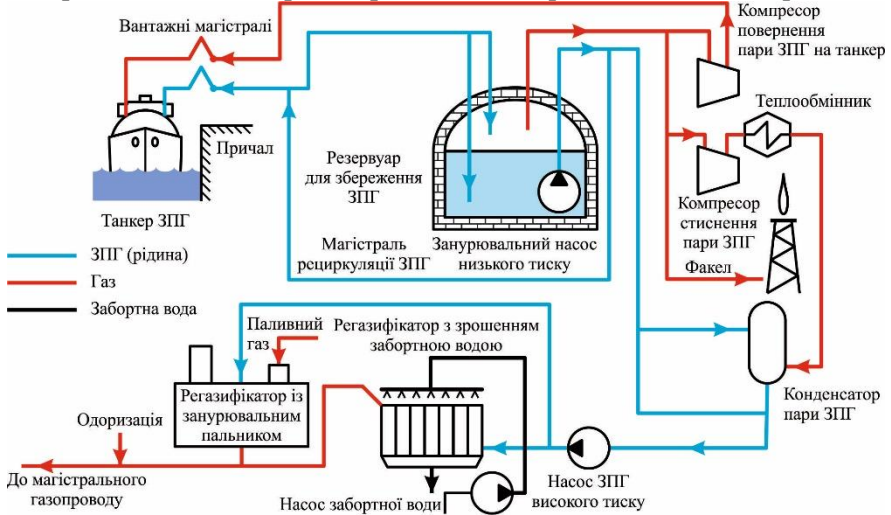


Рис. 1. Принципова схема регазифікаційного терміналу

Традиційно інтенсивність пароутворення B_S виражається у відсотках від загального обсягу зберігання ЗПГ у резервуарі. Швидкість випаровування розраховується як:

$$f = B_S \frac{V_L \rho_L}{24};$$

де B_S – базова швидкість випаровування, що приймається в межах 0,05...0,1 % на добу;

V_L – обсяг ЗПГ у резервуарі, m^3 ;

ρ_L – густина ЗПГ.

В останні роки набуло поширення скориговане емпіричне рівняння

$$f = \frac{C_R B_S V_L \rho_L}{K_1 K_2 K_3};$$

де C_R – параметр, що враховує ефект «ролловер», викликаний витратою СПГ, що циркулює (зазвичай приймається рівним 1,2);

K_1, K_2, K_3 поправочні коефіцієнти, що враховують зміну тиску ЗПГ в резервуарі залежно від тиску парів ЗПГ, температури ЗПГ і температури довкілля відповідно [24, 25].

Загальний обсяг утворення парів ЗПГ з урахуванням змін швидкості пароутворення під час вантажних / розвантажувальних операцій можна виразити:

$$f = \beta_1(P - P_v) + \beta_2 T_L + \beta_3 T_0 + \beta_3;$$

де $(P - P_v)$ – різниця між тиском газової фази в резервуарі, МПа;

T_L, T_0 – температури ЗПГ та довкілля відповідно, К;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – поправочні коефіцієнти;

β_4 – швидкість пароутворення за певних умов [26, 27].

Надмірна кількість парів ЗПГ видаляється з резервуара за допомогою компресорів і спрямовується до системи утилізації. Так підтримується постійний тиск ЗПГ у резервуарі. Для видалення надмірної кількості парів використовують компресори кількох типів: поршневі, роторні, осьові та відцентрові [28, 29].

Щоб підтримувати витрати парів ЗПГ у необхідному діапазоні, на регазифікаційних терміналах зазвичай використовується кілька багатоступінчастих компресорів паралельно. Загальне споживання енергії компресорами для стиснення парів ЗПГ можна розрахувати за виразами:

$$W^{BOG} = \sum_{i=1}^n W_i^{BOG},$$

$$W_i^{BOG} = \sum_{z=0}^l N^z t_i^z;$$

де W_i^{BOG} – потужність, яку споживає компресор i ;

N^z – потужність, яку споживає компресор на рівні завантаження z ;

z – кількість компресорів на рівні завантаження;

t_i^z – час роботи компресора i на рівні завантаження z .

Витрати енергії на роботу компресорів для стиснення парів ЗПГ слід враховувати, оскільки величина цих енерговитрат впливає на собівартість утилізації парів зрідженого природного газу.

Для підтримки криогенної температури у вантажних магістралях використовується лінія рециркуляції ЗПГ (рециркуляційні трубопроводи). Підведення теплоти до рециркуляційного трубопроводу означає вираз:

$$Q = f_{cycle} c_p \Delta T;$$

де f_{cycle} – масова витрата ЗПГ, що повертається на рециркуляцію;

c_p – питома теплоємність ЗПГ;

ΔT – різниця температур на вході та на виході рециркуляційного

трубопроводу.

Підведення теплоти Q до рециркуляційного трубопроводу також можна розрахувати за виразами:

$$Q = KA\Delta T_m,$$

$$\Delta T_m = \frac{T_{aut} - T_{in}}{\ln \frac{T_{aut} - T_0}{T_{in} - T_0}};$$

де K – загальний коефіцієнт теплопередачі;

A – площа теплообміну;

T_{aut} – температура ЗПГ на виході;

T_{in} – температура СПГ на вході;

ΔT_m – середньологарифмічна різниця температур.

На регазифікаційному терміналі для перекачування ЗПГ із резервуару в конденсатор парів ЗПГ та для подачі охолодженого ЗПГ у трубопровід рециркуляції використовуються насоси низького тиску. Потужність насосів низького тиску залежить від витрати ЗПГ в режимах нагнітання і рециркуляції. Коефіцієнт корисної дії рідинних відцентрових насосів зазвичай становить від 70...75 %, відповідно 25...30 % енергії, витраченої в електродвигунах насосів, виділяється як теплота безпосередньо в резервуар для зберігання ЗПГ. Загальне споживання енергії насосами можна розрахувати за виразом:

$$W^{LP} = \sum_{j=1}^m W_j^{LP}, \quad j = 1, \dots, m;$$

де j – індекс насосу;

W_j^{LP} – потужність, яку споживає насос низького тиску [24, 27].

Потужність, яку споживають насоси низького тиску, може бути знижена за рахунок зменшення масової витрати ЗПГ, який використовується для рециркуляції, що, однак, призведе до збільшення енергоспоживання компресорами для стиснення парів СПГ [30, 31].

Технологічні аспекти реалізації подібних проектів вивчені слабо, у зв'язку з цим виникає науково-технічна проблема раціональної організації процесів завантаження / розвантаження та зберігання ЗПГ на таких терміналах.

Специфіка роботи перевалочного ЗПГ терміналу зводиться до того, що він не пов'язаний із магістральним трубопроводом. На перевалочних терміналах типова система завантаження / розвантаження ЗПГ складається з завантажувально-розвантажувальних магістралей,

циркуляційних трубопроводів, що перекачують ЗПГ із суден у резервуари для зберігання та навпаки, занурювальних насосів низького тиску, компресорів та конденсаторів парів ЗПГ. Принципова схема перевалочного терміналу ЗПГ наведена на рис. 2.

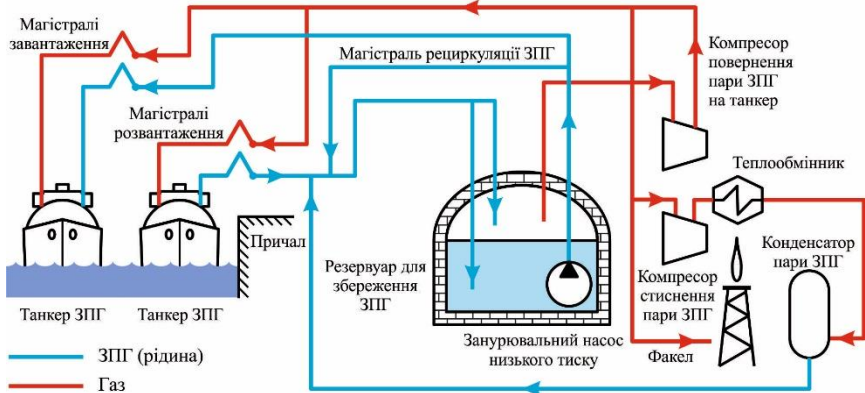


Рис.2. Принципова схема перевалочного терміналу ЗПГ

На перевалочному терміналі немає регазифікаційного вузла, тому надлишкові пари природного газу, що утворюються в резервуарі для зберігання, переконденсують і повертають назад до сховища або спалюють факельною установкою. Контроль тиску парів у вантажних танках під час завантаження/розвантаження судна-газовозу здійснюється за рахунок повернення частини парів із резервуарів для зберігання незаповненого простору танків. Таким чином, викид надлишкових парів ЗПГ в атмосферу не здійснюється. На відміну від регазифікаційних терміналів, на перевалочних комплексах ЗПГ зберігається у резервуарах короткими циклами. Цей факт може впливати на швидкість пароутворення у резервуарі. На початкових етапах випаровування швидкість пароутворення є постійною величиною. У міру випаровування ЗПГ, рідина, що залишилася, збагачується більш важкими вуглеводнями, і це має два термодинамічних наслідка. Температура кипіння та зміна величини прихованої теплоти пароутворення зростають. З часом у резервуарі спостерігається зниження інтенсивності пароутворення. Для аналізу технологічних процесів, що перебігають на перевалочному терміналі ЗПГ, можуть бути використані рівняння з представленого вище математичного апарату.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Транспортування ЗПГ з родовищ вимагає наявності сучасного флоту, що відповідає всім вимогам транспортної та екологічної безпеки. Будівництво

та введення в експлуатацію суден-газовозів, а також створення перевантажувальних терміналів забезпечать безперервне перевезення вантажів не дивлячись на зміну умов небезпечного транспортування вантажів деякими районами Світового океану.

Перевантажувальні термінали можуть також використовуватися як розподільні газові хаби або для бункерування суден ЗПГ. Перевалочні термінали є важливою ланкою технологічного ланцюжка транспортування ЗПГ, при цьому є унікальними технічними спорудами, тому що завдання бункерування ЗПГ з танкерів великої вантажомісткості на звичайні судна-газовози знаходиться на стадії вивчення.

Специфіка роботи перевалочного терміналу ЗПГ полягає в тому, що він не пов'язаний з магістральним трубопроводом, а зберігання ЗПГ у резервуарах здійснюється короткими циклами. Попередня оцінка випаровування ЗПГ на таких терміналах дозволяє обґрунтувати технологічні рішення щодо їх пропускної спроможності, а також кількості ЗПГ, якій може на них зберігатися з метою подальшого перевантаження на інші судна-газовози.

Перелік використаних джерел

1. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskiy Y., Pířtřek V., Kuřcera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.

2. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskiy Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology*. – 2022. – Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

3. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4(3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

4. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

5. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-

16.

6. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V., Dovidenko Y. Basic aspects ensuring shipping safety // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. – 2022. – № 117. – P. 139-149. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.117.10>.

7. Petrychenko O. Levynskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96-106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.

8. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

9. Тимошук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.

10. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8. – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

11. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8. – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

12. Сагін С.В., Матейко О.В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 148-156. doi: 10.31653/smf47.2023.148-156.

13. Matieiko O. Selection of optimal schemes for the inerting process of cargo tanks of gas carriers // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2024. – № 4(1(78)). – P. 43–50. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310699>

14. Mrzljak V., Poljak I., Kosor M., Culin J. Bisection Method for the Heavy Fuel Oil Tank Filling Problem at a Liquefied Natural Gas Carrier // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – 849. <https://doi.org/10.3390/jmse11040849>.

15. Бражнік І. Д. Изменение рабочих характеристик системы инертизации танкера за счет принудительной подачи газов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. Наковий журнал. – 2019. – № 1(20). – Херсон: ХДМА. – С. 4-11.

16. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.

17. Сагін С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 79-89.

18. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2012 . – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.

19. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

20. Сагін С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.

21. Сагін С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С.102-104.

22. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

23. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

24. Li H.-C., Yu K.-W., Lien C.-H., Lin C., Yu C.-R., Vaidyanathan S. Improving Aquaculture Water Quality Using Dual-Input Fuzzy

Logic Control for Ammonia Nitrogen Management // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 1109. <https://doi.org/10.3390/jmse11061109>.

25. Lyridis D.V. Spot Charter Rate Forecast for Liquefied Natural Gas Carriers // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1270. <https://doi.org/10.3390/jmse10091270>.

26. Manos A., Lyridis D., Prousalidis J., Sofras E. Investigating the Operation of an LNG Carrier as a Floating Power Generating Plant (FPGP) // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 1749. <https://doi.org/10.3390/jmse11091749>.

27. Wu S., Zhou X., Lu J., Liang D., Li D. Experimental Study on CH₄ Hydrate Dissociation by the Injection of Hot Water, Brine, and Ionic Liquids // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 713. <https://doi.org/10.3390/jmse11040713>.

28. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Ліганенко В.В., Тришин В.В. Модель системи кондиціонування та охолодження повітря на сучасних нафтоналивних суднах і газовозах. // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 121-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.15.

29. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

30. Бражник И.Д. Модернизация процесса вентиляции грузовых трюмов танкера с помощью системы инертных газов // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2019. – Т.30(69). – Ч. 2. – № 5. – С. 129-133. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-2/23>.

31. Сагін С.В., Матейко О.В. Особливості інертизації вантажних танків суден-газовозів під час транспортування вогнебезпечних речовин // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 36-49. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03.

10.31653/smf48.2024.126-136

Солодовніков В.Г.¹, Руснак Д.Ю.²¹Одеський національний морський університет²Національний університет «Одеська морська академія»

ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА У ПАЛИВНИХ СИСТЕМАХ СУДНОВИХ СЕРЕДНЬООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Суднові середньообертові дизелі (СОД) використовуються на всіх без винятку судах морського та внутрішнього водного транспорту, забезпечуючи необхідною потужністю як пропульсивний комплекс (у разі їх роботи на гвинт), також і судову електростанцію (у разі, коли вони використовуються як приводи генераторів електричного струму) [1-3].

Під час експлуатації судових двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) не рідко виникають різні дилеми, до однієї з яких відноситься використання в судових СОД високов'язких палив з високим вмістом сірки. Дані палива мають знижену вартість, тому їх використання в судовій енергетиці, що почалося з парових котлів та у подальшому було поширене на крейцкопфні моделі дизелів, в даний час все ширше відбувається і для СОД. Більше того, сучасні моделі СОД та їхня паливна апаратура проектується безпосередньо для використання палив з в'язкістю до 380 сСт та вмістом сірчистих домішок до 0,5 %. При цьому на судах морського та внутрішнього водного транспорту експлуатується достатня кількість дизелів ранніх модифікацій, спроектованих для роботи виключно на паливі, вмісту сірки в якому не перевищує 0,03 %. Конвертація цих ДВЗ для роботи на високов'язкому сірчистому паливі зводиться до переобладнання їхньої паливної апаратури. Це призводить до покращення розпилювання та подальшого згоряння палива, але ніяк не запобігає такому явищу, як сірчиста корозія деталей циліндропоршневої групи (ЦПГ) [4-6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв'язання завдання зниження сірчистого зношування деталей ДВЗ в даний час повністю виконане для малообертових дизелів, що мають окрему систему мащення циліндрів [7-9]. При цьому завдання залишається лише знайти оптимальне співвідношення між вмістом сірки в паливі і вмістом лужних присадок в мастилі. Наприклад, для палив з вмістом сірки до 0,1 % рекомендується використання циліндрових мастил, що вклю-

чають до свого складу 20...30 мгКОН/г мастила (де КОН – вміст лугу в мастилі); для палив, що містять до 0,5 % сірки, мастила з кількістю лугу 30...40 мгКОН/г, для високов'язких палив значення КОН може становити 50 мгКОН/г [10-12].

Суднові СОД мають загальну циркуляційну систему мащення, яка забезпечує подачу мастила в циліндр дизеля та до підшипників колінчатого валу. Використання мастил з підвищеним вмістом лугу в даному випадку недоцільно як з економічних причин (у зв'язку з їхньою більш високою вартістю в порівнянні з мастилами з меншим значенням КОН), також і зважаючи на їх гірші експлуатаційні параметри (зокрема меншу здатність чинити опір нормальним навантаженням). Тому для СОД єдиним способом боротьби з наслідком використання сірчистого палива є його додаткова обробка перед подачею в циліндр, що згодом сприяє зниженню сірчистого зносу. При цьому необхідно враховувати, що розв'язання проблеми видалення сірчистих домішок з палива має бути комплексним, тому що будь-яка фізична дія на паливо призводить до зміни практично всіх його компонентів [13-15].

Виходячи з того, що в паливі знаходяться різноманітні сірчисті сполуки (елементарна сірка, сірководень, меркаптани, сульфіді, дисульфіді, тіофени, теофани, сульфокислоти та інші), що взаємодіють з деталями ЦПГ, кришкою циліндра, випускними та продувними клапанами, можна визначити такі основні шляхи захисту цих вузлів:

- виготовлення деталей дизеля з матеріалів, стійких до дії сірчистої корозії;
- зміни у конструкції дизелів, призначених для роботи на сірчистих паливах;
- застосування антисірчистих присадок;
- виключення режимів роботи дизеля, що викликають найбільш інтенсивну електрохімічну корозію та підвищений зношування (тобто режимів з низькою температурою води, яка охолоджує стінки циліндра та циліндрову кришку);
- створення систем паливопідготовки, що знижують кількість сірчистих сполук, що надходять до циліндра дизеля;
- вибір режиму роботи системи паливопідготовки, що забезпечує найбільш якісну обробку палива [16-18].

Зниженню сірчистого зносу деталей ЦПГ та випускного тракту дизеля також сприяє раціональна експлуатація систем мащення та охолодження. Наприклад, під час експлуатації ДВЗ необхідно підт-

римувати температуру охолоджувальної води та мастила на верхніх межах, рекомендованих інструкціями (щоб уникнути конденсації продуктів згоряння сірки та утворення міцних мінеральних сірковмісних кислот, насамперед сірчистої H_2SO_3 , та сірчаної H_2SO_4). Під час експлуатації дизелів на режимі часткових навантажень рекомендується підвищувати температуру повітря на вході в циліндр шляхом вимкнення охолоджувача повітря [19, 20].

Під час згоряння палива в циліндрі дизеля всі сірчисті сполуки, що містяться в ньому, утворюють двоокис SO_2 і триокис SO_3 сірки. Одночасно в циліндрі утворюється велика кількість водяної пари і, таким чином, у продуктах згоряння з'являється система з двох компонентів, що конденсуються $H_2O - H_2SO_4$, що зумовлює можливість інтенсивної сірчистої корозії.

Умовою випадання конденсату на стінках циліндра є перевищення точки роси зазначеної двофазної суміші над температурою стінок. Слід зазначити, що точка роси суміші навіть за дуже малому вмісті H_2SO_4 значно перевищує точку роси водяної пари. У міру подальшого зниження температури поверхонь деталей до точки роси водяної пари з продуктів згоряння починає випадати розчин сірчаної кислоти та вода, тим самим значно знижується концентрація конденсату на стінках. Остання обставина призводить до різкого зростання агресивності конденсату, оскільки відомо, що сірчана кислота найбільше реагує з металами за концентрацією 3...20 %. Таким чином, за температурами стінок циліндра, що перевищують точку роси продуктів згоряння, сірчана корозія протікає слабо. У разі, коли температура стінок виявляється нижче точки роси водяної пари, інтенсивність корозії різко зростає [21].

Точка роси водяної пари може бути підрахована за формулою, запропонованою Б.Б. Генбомом

$$t_s = 100 \left\{ \left[0,0016daL_o + \frac{H}{2} \left(\frac{\gamma_r}{\mu_o} + \chi_i \right) \right] \frac{P_\phi}{\mu_\phi (1 + \gamma_r) M_L} \right\}^{0,25} ; \quad (1)$$

де d – масове вміст вологи вміст, г/кг;

α – коефіцієнт надлишку повітря;

L_o – теоретично необхідна кількість повітря для згоряння 1 кг палива, кмоль/кг;

H – вміст водню в паливі;

γ_r – коефіцієнт залишкових газів;

μ_0 – коефіцієнт молекулярної зміни;

χ_i – частка теплоти, що виділяється у процесі згоряння;

P_φ – поточне значення тиску в циліндрі, кгс/см²;

m_φ – коефіцієнт молекулярної зміни, що відповідає куту повороту колінчатого валу;

M_L – кількість молей свіжого заряду, кмоль [22, 23].

Для визначення впливу вмісту сірчистих домішок у паливі на точку роси доцільно використовувати емпіричну залежність, одержану В.С. Семеновим

$$t_p = t_s + 170 \left(\frac{\chi_i S_r}{\alpha} \right)^{1,29}; \quad (2)$$

де t_s – значення точки роси водяної пари, °С;

S_r – вміст сірки у паливі, % [24].

Точка роси парів сірчаної кислоти зростає зі збільшенням її концентрації та тиску газів у циліндрі. У дизелях точка роси при положенні поршня у верхній мертвій точці досягає величин 150...180 °С і знижується приблизно до 60 °С до кінця ходу розширення [25].

Очевидно, що поряд із сірчистою корозією не можна заперечувати наявність абразивного зношування деталей під час роботи на сірчистому паливі. Однак, підтримка температури охолоджуючої води та мастила в рекомендованих межах дозволяє зменшити шкідливе злиття сірки на дизель [26].

Для успішного застосування в'язких, високосірчистих палив у суднових СОД необхідно вирішення комплексу організаційно-технічних завдань від прийому палива на борт судна до спалювання в циліндрі дизеля. Система паливopідготовки повинна забезпечувати захист дизеля при роботі сірчистих палив на всьому діапазоні експлуатаційних режимів.

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення додаткового способу паливopідготовки, що забезпечує необхідну якість палива та одночасно сприяє зменшенню сірчистої корозії деталей дизеля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним із методів паливopідготовки, що сприяє зменшенню шкідливого впливу сірки на деталі ДВЗ, є обробка палива ультразвуком. Цей спосіб насамперед сприяє поліпшенню дисперсних якостей палива, а явище кавітації, що супроводжує цей процес, призводить до додаткової активації його вуглеводневих складових та розщепленню C-S зв'язків. Одним

із варіантів застосування ультразвукової обробки палива є дообладнання штатних систем паливопідготовки додатковими модулями, які здійснюють цей процес [3].

Таким модулем була доукомплектована система паливопідготовки дизелів 6NSD-M Nigita Power Systems, які мають номінальну потужність 480 кВт за частотою обертання валу 1450 об/хв, та входили у кількості трьох штук до складу суднової допоміжної енергетичної установки. Дизелі мали кожен свою автономну систему паливоподачі, що давало можливість проводити дослідження для окремого дизеля з паливом, що пройшов різні етапи підготовки. Паливна система одного з двигунів не піддавалася перекомлектації та експлуатувалася у «штатному» стані, при цьому даний дизель приймався за «контрольний». Паливо до двох інших дизелів подавалося після додаткової обробки за допомогою ультразвукових хвиль. Фрагмент ділянки дообладнання паливної системи дизелів показаний на рис. 1.

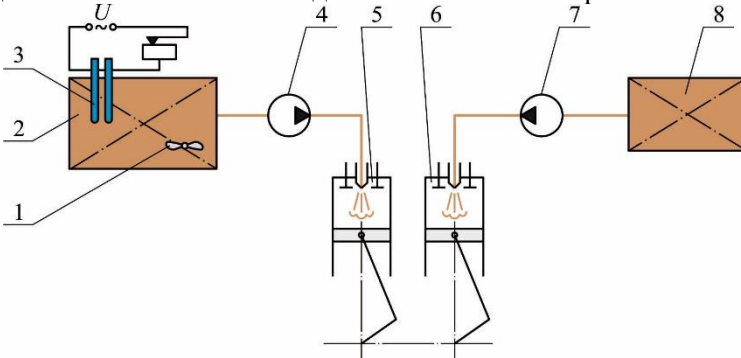


Рис. 1. Схема дообладнання системи подачі палива до двигуна (фрагмент):
1 – змішувач лопаткового типу; 2, 8 – паливні цистерни;
3 – ультразвукова установка; 4, 7 – паливні насоси; 5, 6 – двигуни

Двигун 6 був «контрольним» і експлуатувався в «штатному» режимі, при цьому паливо, пройшовши стандартну процедуру підготовки, подавалося до нього насосом 7 з цистерни 8. Двигуни 5 були «експериментальним». Паливо до них подавалося насосом 4 з цистерни 2, в якій паливо піддавали вплив ультразвукових хвиль за допомогою генератора УЗГ-5-М з фазовою корекцією та магнітострикційним випромінювачем. Генератор складається з кількох силових осередків та загальної системи управління. Система дозволяє регулювати різницю фаз вихідної напруги осередків, домагаючись необхідного розподілу картини ультразвукового поля. Під час синфазної

роботи генератор дозволяє набрати модульно будь-яку потужність у діапазоні $N_{уЗГ}=20...5000$ Вт, а також забезпечити вихідну частоту ультразвукового сигналу в діапазоні $\nu_{уЗГ}=7...35$ кГц з точністю задання частоти до 1 Гц.

При цьому експлуатація одного з дизелів проводилася на мінімально можливій температурі охолоджувальної води та мастила з точки зору забезпечення умов експлуатації та запобігання досягненню температури точки роси. Значення температури охолоджуючих середовищ, а також температури точки роси розраховувалися за виразами (1) та (2).

Ультразвукова установка 3 експлуатувалася в режимі $N_{уЗГ}=3200$ Вт з застосуванням магнітострикційного випромінювача $\nu_{уЗГ}=22$ кГц. Дані величини були визначені у попередніх лабораторних дослідженнях та забезпечували найкращі дисперсні показники палива [3]. У паливній цистерні 2, в якій відбувалася ультразвукова обробка палива, додатково встановлювався лопатковий змішувач 1, що забезпечувало однорідність палива у всьому обсязі.

Для забезпечення ідентичності експерименту всім дизелів проводилася їх попередня підготовка до випробувань. Умови експлуатації дозволяли послідовно протягом 40 годин виконати повну моточистку вказаних дизелів. При цьому на всіх дизелях замінювалася поршнева група (поршни та поршневі кільця) та основні елементи паливної системи високого тиску (прецизійні пари паливного насоса високого тиску плунжер – втулка та голка – розпилювач форсунки). Крім того, перед початком експериментів для обох двигунів здійснювався контроль та регулювання паливної апаратури. При цьому паливні насоси високого тиску регулювалися на однаковий кут випередження подачі палива, а форсунки двигунів налаштовувалися на однаковий тиск підйому голки.

Протягом усього часу проведення експерименту здійснювався контроль часу роботи та експлуатаційного навантаження на дизелі. Для досягнення рівномірного розподілу часу роботи дизелів двигуни послідовно переводилися в режим stand-by. Різниця в часі роботи двигунів, а також в експлуатаційних навантаженнях на двигуни не перевищувала 4 %, що, враховуючи енергоємність об'єктів, дозволяло вважати умови роботи дизелів ідентичними. Експлуатація двигунів проводилася на тому самому сорті палива. При цьому засоби автоматичного контролю підтримували в'язкість палива незмінною протягом усього експерименту. Також ідентичними підтримувався

сорт циркуляційного мастила, що забезпечує режими мащення, та його експлуатаційні характеристики. Ці заходи дозволили вважати, що виконання експерименту відбувається в однакових умовах. Умови мащення та охолодження відрізнялися лише в одного «експериментального» дизеля, який доцільно переводився на режим експлуатації, що сприяє підвищеному корозійному зношуванню деталей ЦПГ.

Завданням дослідження було визначення зносу циліндрових втулок і верхнього поршневого кільця для «стандартного» палива, і палива, що піддалось додатковій обробці за допомогою ультразвукових хвиль.

Вимірювання зносу проводилося для двох крайніх циліндрів, які, як відомо, більш ніж інші (центральні циліндри) схильні до цього явища. Отримані в такий спосіб значення усереднювалися. Крім того, вимірювання лише на двох циліндрах суттєво скорочувало час монтажних робіт, що обмежувалося умовами експлуатації. З цих причин дослідження виконували після 170, 360, 580, 780 і 990 годин роботи двигунів – за якими було можливе тимчасове виведення дизелів з експлуатації. Результати вимірювання зносу циліндрових втулок та поршневих кілець наведено на рис. 2 та 3.

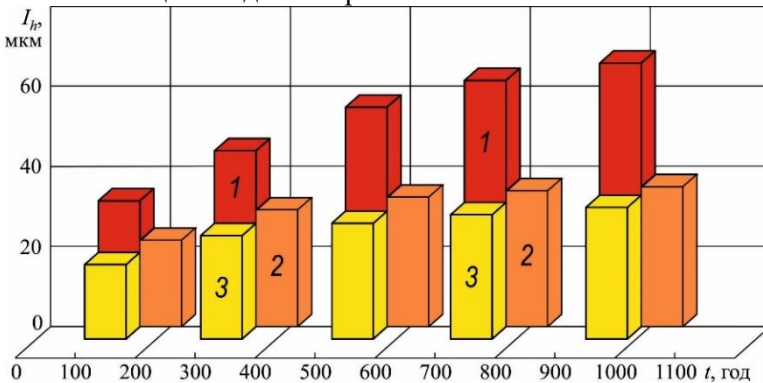


Рис. 2. Корозійний знос циліндрових втулок суднового дизеля 6NSD-M Nigita Power Systems за різних умов експлуатації:

1 – паливо без додаткової обробки (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 2 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 3 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля на мінімально допустимих температурних режимах)

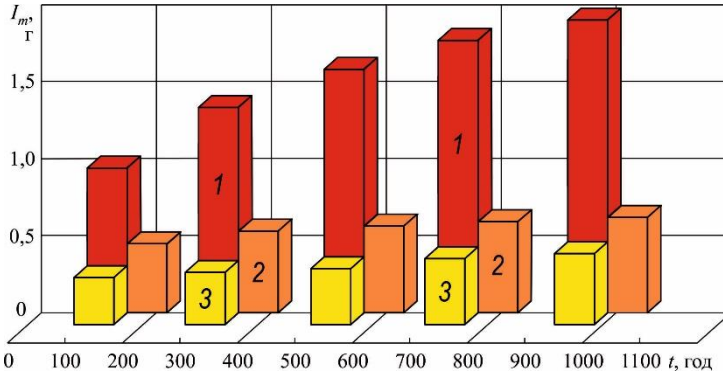


Рис. 3. Корозійний знос поршневих кілець суднового дизеля 6NSD-M Nigita Power Systems за різних умов експлуатації:

1 – паливо без додаткової обробки (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 2 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля у «штатному» режимі); 3 – паливо, що пройшло додаткову ультразвукову обробку (при експлуатації системи охолодження та змащування дизеля на мінімально допустимих температурних режимах)

Висновки і перспективи подальших досліджень. Аналіз наведених результатів свідчить про те, що ультразвукова обробка палива призводить до зниження сірчистого зносу деталей ЦПГ, при цьому найбільше зниження цього параметра спостерігається для поршневих кілець, що особливо актуально, враховуючи важливість даного вузла у забезпеченні як якісних процесів стиснення, згоряння та розширення, і надійності роботи сполучення поршень – втулка циліндра. Також необхідно зазначити, що навіть в умовах, що сприяють підвищеному корозійному зносу (робота системи охолодження та змащування дизеля на мінімально допустимих температурних режимах), значення лінійного зносу циліндрових втулок, так і масового зносу поршневих кілець на 63...65 % менше аналогічних величин, отриманих для дизеля, що працює на пальному без додаткової підготовки.

Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність застосування ультразвукової обробки сірчистих палив як додаткового методу паливопідготовки, що сприяє зниженню сірчистого зношення деталей ЦПГ суднового СОД.

Перелік використаних джерел

1. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.
2. Petrychenko O., Levynskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96-106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
3. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskiy Y., Pířtěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>
4. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.
5. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. [10.34660/INF.2019.15.36258](https://doi.org/10.34660/INF.2019.15.36258).
6. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.
7. Сагін С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
8. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
9. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості судових дизелів за рахунок використання присадок до палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 76-87.
10. Sagin S., Karianskiy S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Per-

formance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

11. Сагин С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С.102-104.

12.Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4(3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

13. Тимошук О.М., Даки О.А., Бойко О.А., Карадобрий Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.

14. Сагин С.С., Ворохобін І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морського транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 206-215. doi: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.07>.

15. Побережний Р.В., Сагин С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

16. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

17. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

18. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More :

International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022. – Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

19. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2018. – Вып. 24. – Одесса : НУ "ОМА". – С. 72-80.

20. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 79-89.

21. Руснак Д.Ю., Сагин С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

22. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виборн. журнал. – 2012 . – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.

23. Сагин С.В., Солодовников В.Г. Ультразвуковая обработка топлива для судовых среднеоборотных дизелей // Austria-science. – 2017. – № 2.– С. 88-93.

24. Солодовников В.Г. Використання ультразвукової обробки в модульних схемах побудови суднових систем паливопідготовки // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 158-168.

25. Солодовников В.Г. Забезпечення технічного стану суднових дизелів шляхом кавітаційної обробки палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 65-69. DOI : 10.31653/smf340.2020.88-94.

26. Solodovnikov V.G. Ultrasonic fuel processing as a method of improving the technical condition and economic characteristics of ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 59-62.

10.31653/smf48.2024.137-142

Черемісін В.І., Ігнатенко О.А.

Інститут Військово-Морських Сил
Національний Університет «Одеська Морська Академія»

ДИЗЕЛЬНА ФОРСУНКА З КЕРОВАНИМ УПРИСКУВАННЯМ ПАЛИВА В ЦИЛІНДР

Актуальність теми. Головним проблемним завданням сучасного дизелебудування і експлуатації дизелів є підвищення їх паливної економічності на часткових навантаженнях, що також сприяє підвищенню надійності і моторесурсу дизелів.

Відомі багаточисельні спроби створення спеціальної паливної апаратури для отримання різних законів подання палива в циліндр двигуна внутрішнього згорання [1, 2]. Незважаючи на значну кількість пропозицій, винаходів і патентів, більшість з них зважаючи на свою складність або недостатню надійність в роботі не знайшли практичного застосування. Більш доцільна зміна характеристики уприскування безпосередньо перед розпилюючими отворами, оскільки в цьому випадку усувається можливість спотворення імпульсу тиску в нагнітальному трубопроводі і об'ємах у насоса (об'ємі камери нагнітання V_n і об'ємі штуцера V_n').

Метою цієї роботи є отримання різних законів подання палива на дослідній гідрокерованій форсунці з регульованим законом подання палива.

Виклад основного матеріалу. Один з дослідних варіантів форсунки зображений на рис.1. Дослідна форсунка має гідрокеруючу порожнину, що складається з об'єму над верхнім торцем голки розпилювача і каналу 3 для підведення керуючої рідини, забезпечена зворотним 9 і перепускним 5 клапанами. Для зменшення об'єму гідрокеруючої порожнини, в корпус штатної форсунки вставляються втулки 4.

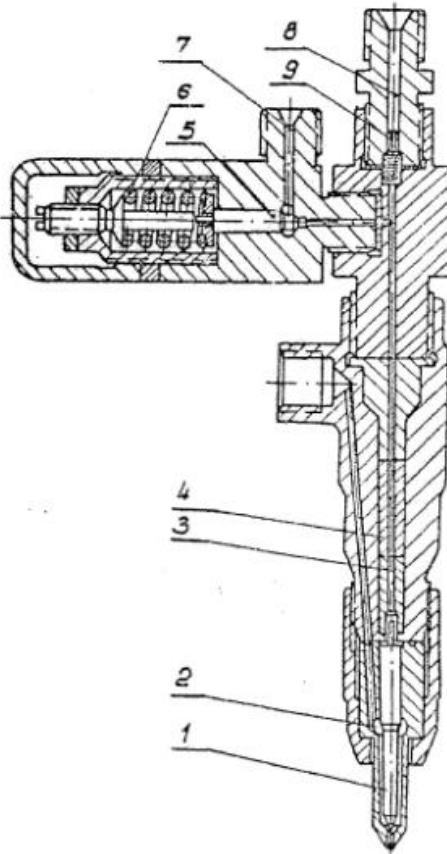


Рис. 1. Гідрокерована форсунка з регульованим законом подачі палива: 1 - голка форсунки; 2 - підголчаста порожнина; 3 - канал підведення керуючої рідини до голки; 4 - втулки; 5 - перепускний клапан; 6 - пружина; 7 - канал перепускання керуючої рідини у бачок; 8 - канал підведення керуючої рідини до форсунки; 9 - зворотній клапан

Канал 3 під час процесу уприскування, при підйомі голки 1 під дією високого тиску палива в об'ємі 2, відокремлюється з іншим об'ємом 8 за допомогою зворотного клапана 9, навантаженого пружиною малої жорсткості. Цей клапан перекриває канал 8, як тільки тиск в об'ємі гідрокеруючої порожнини, внаслідок підйому голки 1, перевищить початковий тиск керуючої рідини. Але підвищення тиску буде до тих пір, поки тиск, що відповідає початковому затягуванню пружини 6 перепускного клапана 5 не стане менше тиску керую-

чої рідини, внаслідок цього голка 5 почне підніматися, перепускаючи частину рідини назад у бачок. Зміна закону подання палива відбувається таким чином: доки клапан 5 закритий, голка розпилювача піднімається повільно і на порівняно невелику висоту, внаслідок цього прохідна площа під конусом голки також буде мала. Отже, буде незначним і кількість палива, що упорскується в циліндр двигуна.

Змінюючи початковий тиск керуючої рідини, можна змінювати початкову висоту підйому голки і, тим самим величину початкової порції палива. Після підйому голки клапана 5 тиск в гідрокеруючій порожнині, різко зменшиться, що викличе швидкий підйом голки і таке ж швидке збільшення прохідної площі під її конусом, а отже, і кількість палива, що упорскується в циліндр двигуна. Такий спосіб зміни закону подання палива дає можливість організувати ступінчасту характеристику уприскування палива, параметри якої можна змінювати в широких межах.

Характеристики уприскування палива іншого типу можуть бути отримані, якщо перекрити перепускний клапан 5. В цьому випадку, змінюючи початковий тиск керуючої рідини і її об'єм, можна отримати різні закони підйому голки і тим самим різні характеристики уприскування.

Для визначення тиску розпочатку відкриття перепускного клапана можна написати наступне рівняння:

$$p_{\text{откр}} = \frac{f_n \cdot y}{\alpha \cdot (V_{\text{зап}} - f_n \cdot y)} + p_{\text{зап}}$$

де $p_{\text{зап}}$ - початковий тиск керуючої рідини;

$V_{\text{зап}}$ - об'єм гідрокеруючої порожнини;

f_n - площа поперечного перерізу голки форсунки;

y - підйом голки форсунки;

α - коефіцієнт стискування керуючої рідини, в об'ємі гідрокеруючої порожнини.

Об'єм гідрокеруючої порожнини $V_{\text{зап}}$ підбирається як можна меншим (в даному випадку $V_{\text{зап}} = 0,4 \text{ см}^3$).

Експериментальне дослідження дослідної форсунки проводилося на безмоторному стенді з приводом паливного насоса високого тиску

дизеля ЧН25/34 від електродвигуна постійного струму. Принципова схема системи гідравлічного управління приведена на рис. 2.

Рідина (в даному випадку дизельне паливо) від паливного насоса високого тиску 1 подається через гідроакумулятор 3 до форсунки 5. Для підтримки постійного тиску керуючої рідини і для спостереження за його зміною, до гідроакумулятора приєднуються перепускний клапан 4 і манометр 2. Гідроакумулятор розташовується ближче до форсунки. Характеристики уприскування визначалися шляхом осциллографіювання тиску перед розпилюючими отворами розпилювача.

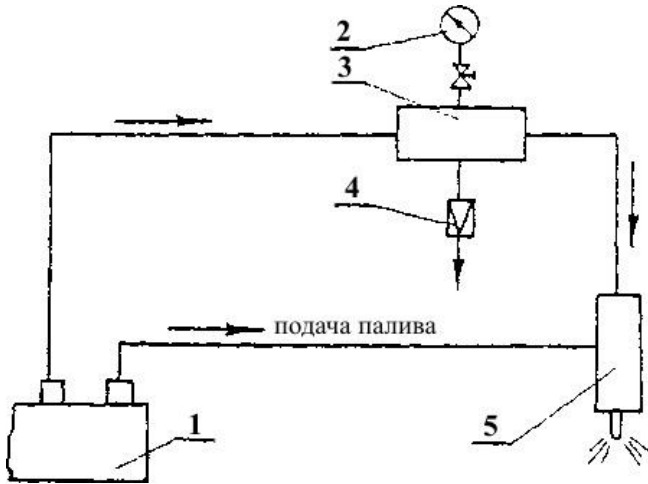


Рис. 2. Принципова схема системи гідравлічного управління роботою форсунки : 1 - паливний насос високого тиску 2 - манометр; 3 - гідроакумулятор; 4 - перепускний клапан; 5 - форсунка

На рис. 3 наведені диференціальні і інтегральні характеристики подання палива через форсунку, зняті шляхом осциллографіювання тиску перед розпилюючими отворами розпилювача на кути повороту колінчастого валу фвп, в град. повороту колінчастого валу (о ПКВ).

Проведена робота дає можливість зробити наступні висновки.

1. Спосіб роботи дослідної форсунки дозволяє уповільнити хід голки розпилювача в початковій фазі уприскування палива з подальшим її швидким підйомом, що забезпечує подання в циліндр меншої кількості палива за період затримки самозаймання, а це повинно сприяти зниженню жорсткості роботи дизеля. Такий рух голки досягається внаслідок малої величини об'єму гідрокеруючої порожнини над верхнім торцем голки розпилювача і наявністю перепуск-

ного клапана, який забезпечує перепускання рідини в заданий момент уприскування палива.

2. Зі збільшенням частоти обертання кулачкового валу формування сходинок відбувається при більшому ході голки розпилювача (тобто положення сходинок вище, ніж при меншій частоті обертання валу) із-за запізнювання закриття зворотного клапана.

3. Простота способу отримання різних законів подання палива через форсунку дозволяє використовувати його у будь-яких умовах з використанням деталей штатної форсунки.

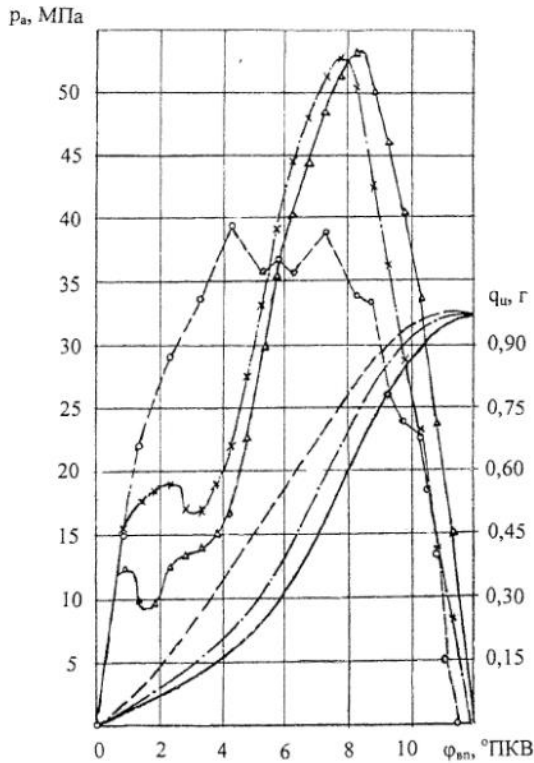


Рис. 3. Характеристики уприскування палива і їх інтегральні криві, отримані на штатній і дослідній форсунках ($n = 225 \text{ хв}^{-1}$; $q_H = 1,0 \text{ г}$)

○ — форсунка дизельного двигуна, $p_{\phi 0} = 25 \text{ МПа}$;

△ — дослідна форсунка, $p_{зан} = 18,5 \text{ МПа}$; $p_{відкр} = 28 \text{ МПа}$;

× — дослідна форсунка, $p_{зан} = 24,5 \text{ МПа}$; $p_{відкр} = 36,5 \text{ МПа}$

Перелік використаних джерел

1. Черемісін В.І. Визначення протічок палива через прецизійну пару розпилювача дизельної форсунки. / В. І. Черемісін, М. С. Бабінчук // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021. – № 42. – Одеса: НУ «ОМА». – С.59-69.

2. Половинка Э.М. Развитие систем топливоподачи современных дизелей / Э.М. Половинка, Ю.А. Карпилов // Судовые энергетические установки: науково-технічний збірник. Вип. 31. – Одеса: ОНМА – 2013. – С. 133-144.

3. Rehbichler G. The Bosch Electronic Diesel Control System for Medium and High Speed Engines. [Електронний ресурс]. / G. Rehbichler, C. Kendlbacher, M. Bernhaupt. – Режим доступу: https://jxpt.whut.edu.cn/meol/common/script/preview/download_preview.jsp?fileid=518936&resid=64210&lid=5030&preview=preview

4. Волкова Л.Ю. Диагностирование процесса подачи топлива в дизелях / Л.Ю. Волкова, Ю.П. Макушев // Наука и техника Казахстана. – 2018. – № 2. – С. 19–28.

5. Mahp B. Future and Potential of Diesel Injection Systems [Електронний ресурс]. / В. Маhp. – Режим доступу: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-10502-3_1

10.31653/smf48.2024.143-158

Шестопапов К. О.

Національний університет “Одеська морська академія”

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЖЕКТОРА ТА ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ У СКЛАДІ СУДНОВОЇ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

1 Вступ

Використання вторинних енергетичних ресурсів у вигляді теплоти стає дедалі більш актуальним у зв'язку з посиленням екологічних вимог та виснаженням корисних копалин. На судах близько 50% теплоти, що отримується в двигуні, втрачається в навколишнє середовище (близько 25% з димовими газами, по 7-9% на нагрівання масла та охолоджувальної води в сорочці двигуна тощо) [1]. З іншого боку на всіх судах є холодильні машини у складі системи кондиціонування повітря, що працюють від електрики, що виробляється на судні за рахунок спалювання палива та, частково, за рахунок рекуперації теплоти димових газів.

Вимоги ІМО до рівня енергоефективності суден доволі жорсткі: судна, що побудовані в період між 2020 і 2024 роками, повинні мати енергоефективність на 20% вище, а ті, що побудовані в 2025 році або пізніше - на 30% вище, ніж судна, що побудовані в 2013 році [2].

На сьогодні основні зусилля спрямовані на зниження викидів парникових газів (ПГ) від експлуатації суднових дизельних двигунів. Крім головного двигуна, велику кількість викидів ПГ забезпечують дизель-генераторі, тому що кількість електроенергії, що споживається на борту, є досить значною, особливо для круїзних суден, рефрижераторних та рибальських суден [3]. Холодильні системи є інтегральною частиною енергетичного комплексу водних засобів транспорту та споживають велику частку виробленої на борту електроенергії. Підвищення їх енергетичної ефективності та зниження впливу на навколишнє середовище є одним з способів підвищення енергетичної ефективності усього суднового енергетичного комплексу [4, 5].

Одним із перспективних шляхів підвищення ефективності парокompресійних суднових холодильних машин є їх поєднання або заміна на холодильні машини, які споживають вторинне тепло. Втрачає теплоту на борту засобів водного транспорту в основному відбувається з вихлопними газами (250...500) °С, при охолодженні стисне-

ного надувного повітря (130...150) °С та з водою з рубашки охолодження двигунів (70...120) °С.

Слід відзначити, що питання утилізації вторинної теплоти для вироблення холоду на судах розглядається давно [6]. Існують роботи, які опубліковані 40...50 років тому, де розглядають перспективи впровадження саме судових ежекторних холодильних машин (ЕХМ) [7]. Але, як відомо, типових рішень судових ЕХМ досі не існує, питання можливостей застосування ЕХМ на борту водних видів транспорту продовжує активно вивчатися й сьогодні [8, 9]. Це пов'язано з наявністю ще невирішених питань оптимальної конструкції та режимів роботи судових ЕХМ, а також з впровадженням нових робочих тіл холодильних машин.

У цій роботі розглянуто можливість використання відкидної теплоти в температурному діапазоні 90...120 °С для тепловикористовуючих судових ЕХМ. Використання відкидної теплоти на судах для виробництва холоду дозволить насамперед знизити споживання палива та, як результат, покращити екологічні показники суден в умовах експлуатації.

2 Ежекторні холодильні машини: устрій, термодинамічні основи ефективної роботи

Основні елементи ЕХМ включають ежектор, генератор, випарник, конденсатор, дросельний клапан (терморегулювальний клапан) і живильний насос. На рис. 1 показано розташування цих елементів ЕХМ. Процеси, що реалізуються у ЕХМ безперервної дії характеризуються точками 1–9 на рис. 2, який є термодинамічним холодильним циклом ЕХМ на p - h діаграмі. Холодоагент нагрівається та випаровується в генераторі за допомогою теплової енергії Q_g при відносно високому тиску генерації p_g . Ця пара має назву робочого потоку (первинна), вона з масовою витратою \dot{m}_p проходить через надзвукове сопло ежектору, втягуючи (підсмоктуючи) в ежектор потік, що ежекується, (вторинну пару) низького тиску з випарника з масовою витратою \dot{m}_s . Два потоки змішуються в змішувальній камері ежектора і після встановлення певного тиску в дифузорі ежектора залишають його. Об'єднаний змішаний потік надходить до конденсатора, де конденсується при проміжному тиску p_c . Теплота конденсації Q_c відводиться в навколишнє середовище.

З конденсатора частина рідини повертається в генератор через

живильний насос з електричним приводом, споживаючи механічну роботу, а решта подається у випарник через терморегулювальний (дросельний) вентиль, де рідина випаровується при низькій температурі t_e і тиску p_e с отриманням необхідного холодильного ефекту (холодопродуктивності Q_e). Пара з випарника всмоктується ежектором та цикл завершується.

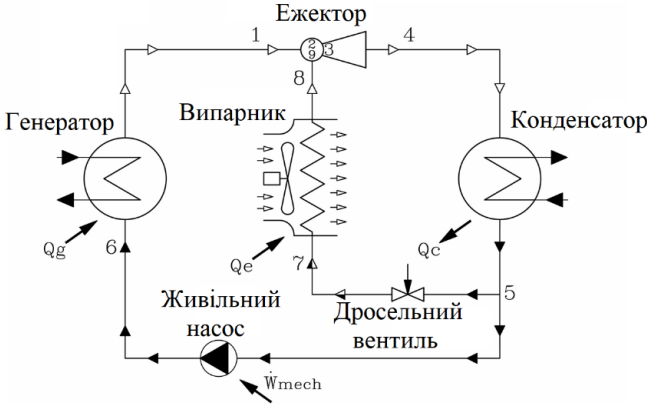


Рис. 1. Схематичне зображення контуру ежекторної холодильної машини, за якою працює судновий кондиціонер повітря

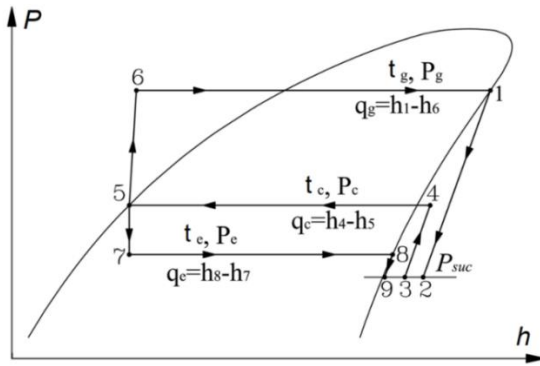


Рис. 2. Схематичне зображення термодинамічного циклу, за яким працює ежекторна холодильна машина в p - h діаграмі робочого тіла

З вищесказаного випливає, що надзвуковий ежектор є ключовим компонентом у холодильному циклі ЕХМ і забезпечує всмоктування, стиснення та нагнітання вторинної пари (пари з випарника) за допомогою первинної пари (пари високого тиску з генератора).

На рисунку 3 зображена конструкція надзвукового ежектора з конічно-циліндричною камерою змішування. В спрощеному дизайні

ежектора конічна секція камери змішування може бути відсутня, тобто замінена циліндричною камерою.

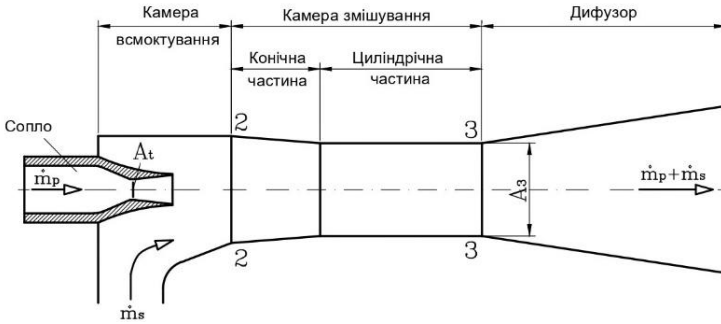


Рис. 3. Конструкція надзвукових ежекторів з конічно-циліндричною камерою змішування: A_t - площа критичного перерізу сопла, A_3 - площа перерізу циліндричної частини камери змішування, A_1 - площа вихідного перерізу сопла, \dot{m}_p та \dot{m}_s - витрата робочого (первинного) та ежекуємого (вторинного) потоків

Основними геометричними параметрами ежектора є розмір критичного перерізу сопла A_t , а також площини інших поперечних перерізів, де найважливішою є величина A_3 – рис. 3.

Умови роботи ежектора визначаються (рис. 2) робочими тисками кипіння p_e , конденсації p_c і генерації p_g , ступенем зниження тиску $E = p_g/p_e$ і ступенем підвищення тиску $C = p_c/p_e$.

Ефективність ежектора оцінюється його коефіцієнтом ежекції ω

$$\omega = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p}, \quad (1)$$

Конструкція профілю потоку ежектора визначається відношенням площин α

$$\alpha = \frac{A_3}{A_t}. \quad (2)$$

Найважливішим геометричним параметром ежектора є співвідношення площин A_3/A_t . Коли значення A_3/A_t є низьким, ежектор забезпечує високу ступень стиснення C , але коефіцієнт ежекції ω низький. Коли значення A_3/A_t збільшується, ступінь підвищення тиску C зменшується, але коефіцієнт ежекції ω збільшується.

Конструкція, геометричні параметри та стан поверхні елементів надзвукового ежектора повинні сприяти формуванню профілю потоку, що забезпечує найбільш ефективне використання енергії первин-

ного потоку для всмоктування, стиснення та нагнітання потоку пари [10].

Для підтримки оптимальної ефективності роботи ЕХМ у широкому інтервалі робочих параметрів (p_e , p_c і p_g), які для суднових холодильних машин можуть змінюватися, необхідно мати можливість змінювати геометрію профілю потоку ежектора. Ця зміна геометричних параметрів має спочатку відбутися в зоні A_t критичного перерізу сопла та в зоні A_3 змішувальної камери.

Для реалізації холодильного циклу ЕХМ потрібні два види енергії: теплова енергія Q_g , що надходить до генератора, і механічна (електрична) енергія для живлення живильного насоса P_{mech} . Оскільки ця енергія одержується з двох різнорідних джерел та має різну питому енергетичну цінність та грошову вартість, ефективність ЕХМ доцільно оцінювати з використанням двох різних COP , а саме: COP_{therm} і COP_{mech} [11]. Значення COP_{therm} це відношення Q_e до Q_g . Величина COP_{mech} це співвідношення між Q_e та механічною потужністю живильного насоса P_{mech} . Вони можуть бути виражені у вигляді рівнянь (3) і (4)

$$COP_{therm} = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{\dot{m}_s q_e}{\dot{m}_p q_g} = \omega \frac{q_e}{q_g}, \quad (3)$$

$$COP_{mech} = \frac{\dot{Q}_e}{P_{mech}}, \quad (4)$$

Відповідно до рівняння (4), щоб збільшити COP_{therm} , необхідно підвищити коефіцієнт ежекції ω та питому холодопродуктивність q_e , а також зменшити питому теплоту, що підводиться до генератора q_g . При заданій температурі кипіння холодоагенту t_e це вимагає збільшення температури генерації t_g і зниження температури конденсації t_c . Для збільшення COP_{mech} необхідно, перш за все, зменшити різницю тиску на насосі ($p_g - p_c$).

Крім ефективності ежектора (яка характеризується ω) та ефективності ЕХМ, яка характеризується COP_{therm} та COP_{mech} , для ежектора спостерігається певний інтервал його роботи по температурі конденсації. Коли розглядається ефективність роботи ежектора, виділяють *критичний* та *докритичний* режими роботи ежектора [9], які наглядно демонструє рис. 4.

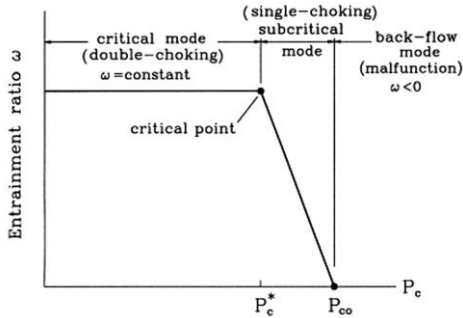


Рис. 4. Залежність коефіцієнту ежекції від протитиску (тиску у конденсаторі ЕХМ) p_c [12]: entrainment ratio ω – коефіцієнт ежекції; critical mode (double-choking) – критичний режим, critical point - критична точка, subcritical (single-choking) – докритичний режим, back-flow mode (malfunction) – режим зворотного потоку (неробочий режим)

Відомо [13], що для заданої температури коефіцієнт ежекції залишається майже постійним зі збільшенням температури конденсації до досягнення певного значення температури конденсації, відомого як «критична температура конденсації». Після досягнення критичної температури коефіцієнт ежекції ω швидко падає. Робочі умови, при яких ежектор працює з максимальною ефективністю (максимальним ω), називаються критичними – рис. 4. Для цього режиму при заданих параметрах роботи ЕХМ (температура кипіння та генерації) наявні певні критичні значення температури та тиску конденсації t_c^* та p_c^* , які приймаються як розрахункові для даного ежектору. Тобто, для кожного ежектору заданої геометрії існує своя критична температура конденсації, при перевищенні якої ефективність ежектора та ЕХМ різко падає (неробочий режим). Наявність такої t_c^* обмежує широке використання ЕХМ в режимах експлуатації зі змінною температурою конденсації. Але є технічні можливості вирішення цієї проблеми.

3 Конструкція експериментального ежектору

Метою даного дослідження було експериментальний аналіз впливу наступних параметрів геометрії ежектора на параметри його ефективності та параметри ефективності ЕХМ при її роботі у критичному (розрахунковому) режимі:

1. форми змішувальної камери ежектора: циліндрична (ЦКЗ) та конічно-циліндрична (КЦКЗ),

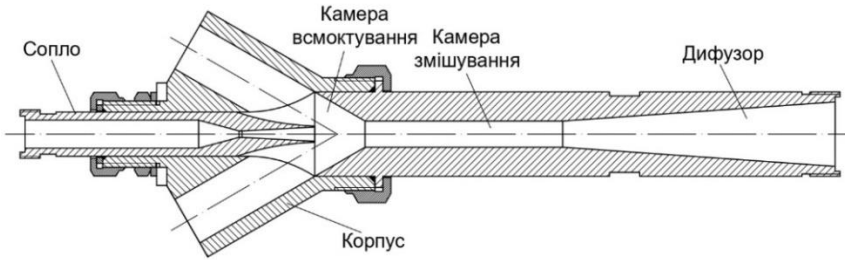
2. співвідношення площин перерізу циліндричної частини камери змішування до критичного перерізу сопла A_3/A_1 .

Було виготовлено та випробувано ежектор зі змінними соплами (три розміри) та камерами змішування (три розміри для ЦКЗ та три розміри для КЦКЗ).

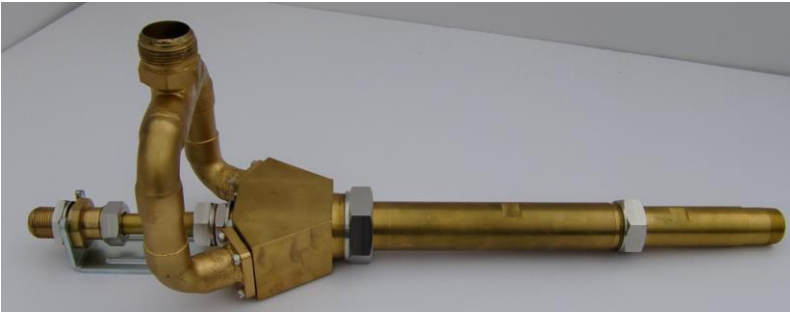
Відомо, що застосування у ежекторі КЦКЗ замість звичайної ЦКЗ дозволяє суттєво, до 20...25% збільшити як коефіцієнт ежекції ω , так й COP_{therm} при однакових режимах роботи ЕХМ [11, 14]. Але ступінь цього впливу вивчений недостатньо та залежить як від температурних режимів експлуатації ежектора, так й від властивостей робочого тіла. Так, у роботі [11] було теоретично показано, що для різних холодоагентів низького тиску це покращення ефективності знаходиться в діапазоні від 0,7% до 23,6%, а для холодоагенту R245fa теоретичне збільшення коефіцієнту ежекції ω для ежекторів КЦКЗ становить 19,6% у порівнянні з ежектором з ЦКЗ для розрахункових умов $t_g = 95\text{ }^\circ\text{C}$, $t_c = 32\text{ }^\circ\text{C}$ і $t_e = 12\text{ }^\circ\text{C}$.

На рис. 5А схематично показана конструкція вдосконаленого надзвукового ежектора з двома симетричними всмоктуючими приймальними каналами, нахиленими до вісі ежектора під кутом 30° . Таке рішення для підводу робочої пари забезпечує рівномірний розподіл пари, що ежектується, в приймальній камері. Крім того, така конструкція ежектора і такий шлях підведення пари, що ежектується, сприяє зменшенню втрат на удар в ежекторі, скорочує довжину кільцевої приймальної камери, а також поверхню сопла, що омивається холодною парою. Для додаткового зменшення втрат при взаємодії активного та пасивного потоків, сопло із зовнішнього боку було виконано обтічної форми з гострою кромкою у вихідного перерізу. Місце розташування сопла було відрегульовано у рамках проведення попередніх експериментів.

Фотографія експериментального ежектора з двома симетричними всмоктувальними каналами, розташованими під кутом до вісі ежектора, та всмоктувальним колектором наведена на рис. 5Б. Вузол ежектора складається з наступних основних компонентів: корпусу, надзвукового сопла, яке має можливість переміщуватися вздовж вісі, камери змішування, виготовленій спільно з дифузором, рами, і механізму переміщення сопла в оптимальне положення щодо входу в камеру змішування. Ежектор має довжину 510 мм, висоту 60 мм і ширину 130 мм.



а



б

Рис. 5. Складальне креслення вдосконаленого надзвукового експериментального ежектора (А) та його фотографія (Б)

Для проведення експериментальних досліджень у широкому діапазоні робочих режимів $t_g = 80 \dots 105 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_c = 24 \dots 42 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_e = 4 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$ було сконструйовано та виготовлено три надзвукові сопла, які пронумеровано для позначення у представленні результатів як 1, 2 й 3, три ЦКЗ, які позначені як А, В, С та три КЦКЗ, які позначені як 1, 3, 4. Усі камери змішування виготовлені спільно з дифузорами. КЦКЗ були виготовлені з циліндричних змішувальних камер шляхом розточування передньої частини секції постійної площі перерізу. Всі розміри нових КЦКЗ 1, 2 і 3 були такими ж, як і у ЦКЗ. Основні розміри ежекторів були розраховані за допомогою 1-D моделі [13] для роботи у складі ЕХМ (холодопродуктивністю 11,4 кВт, $t_g = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_c = 30,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_e = 16 \text{ }^\circ\text{C}$) на холодоагенті R245fa.

Фотографії одної з комбінацій сопло-камера змішування наведено на рис. 6. Технічні характеристики досліджуваних надзвукових сопел та ЦКЗ і КЦКЗ наведені в таблицях 1 і 2, відповідно.



Рис. 6. Фотографія експериментального сопла і камери змішування

Таким чином, за рахунок комбінації 3 сопел та трьох ЦКЗ або трьох КЦКЗ було отримано 18 типорозмірів ежекторі, які й використовувалися для подальшого експериментального дослідження параметрів ефективності як ежектора, так й ЕХМ.

4 Порівняльний експериментальний аналіз ежекторів з ЦКЗ та КЦКЗ

Схема експериментальної установки та її детальний опис наведено у [15]. Експериментальна установка представляла собою ЕХМ, в який навантаження на генератор та випарник створювалися електронагрівачами, а конденсатор охолоджувався водою. Установка передбачала автоматичне вимірювання наступних параметрів: температури, тиски, витрати холодоагенту, потужності електронагрівачів, потужності електромотору живильного насосу, рівня холодоагенту у ресивері. Вона була створена у рамках проекту «Solar Building Technologies», No.KUK-C1-014-12, де автор цієї роботи був основним виконавцем підплану А-1 «Ejector cooling technologies».

На кожному режимі для встановленого ежектору (t_e та t_g відповідно наведених у табл. 1) експериментальне дослідження параметрів ефективності проводилося при змінній температурі конденсації. Таким чином були визначені критичні температура конденсації t_c^* , коефіцієнт ежекції ω^* , тепловий коефіцієнт (аналог холодильного коефіцієнту) COP^*_{therm} та холодопродуктивність Q_e^* . Ці визначені параметри вважаються оптимальними для досліджуваного ежектору при заданих t_e та t_g .

Таблиця 1. Геометричні характеристика досліджуваних сопел

Номер сопла	1	2	3
Робочі режими	$t_e = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_g = 90 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_e = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_g = 95 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_e = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_g = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
Діаметр критичного перерізу сопла d_t , мм	4,515	4,212	3,902
Діаметр вихідного перерізу сопла d_1 , мм	7,8	7,11	6,412
Відношення площин A_1/A_t	2,985	2,85	2,70
Кут розходження сопла ψ_1 , °	6,0		
Кут сходження виходу з сопла ψ_2 , °	30		
Довжина конічної частини сопла, що розходиться l_{div} , мм	31,48	28,33	24,71

Таблиця 2. Геометричні характеристика досліджуваних циліндричних та конічно-циліндричних камер змішування

Номер циліндричної камери змішування	A	B	C
Діаметр перерізу циліндричної секції d_3 , мм	12,155	13,020	14,010
Довжина циліндричної секції d_{mch} , мм	90,62	98,64	106,65
Довжина дифузора d_d , мм	142,9	135,75	128,65
Кут розходження дифузора, °	8,0		
Діаметр вихідного перерізу дифузора d_4 , мм	32,0		
Додаткові геометричні характеристика для ежектора з КЦКЗ			
Номер конічно-циліндричної камери змішування	1	2	3
Вхідний діаметр конічної секції d_2 , мм	13,848	14,835	15,954
Співвідношення площин A_2/A_3	1,3		
Кут сходження конічної секції ψ_3 , °	2		
Довжина конічної секції l_{cs} , мм	48,85	52,14	55,86

Отримані для кожного ежектора з ЦКЗ та КЦКЗ критичні температури конденсації t_c^* при відповідних значеннях A_2/A_t та наведено на рис. 7.

Загальний висновок, який можна отримати з рис. 7 – один й той самий ежектор з більш простою у виготовленні циліндричною камерою змішування забезпечує більше значення t_c^* , ніж ежектор з КЦКЗ, що є його перевагою, особливо при роботі у складі суднових ЕХМ. Хоча ця різниця t_c^* не велика, порядку $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

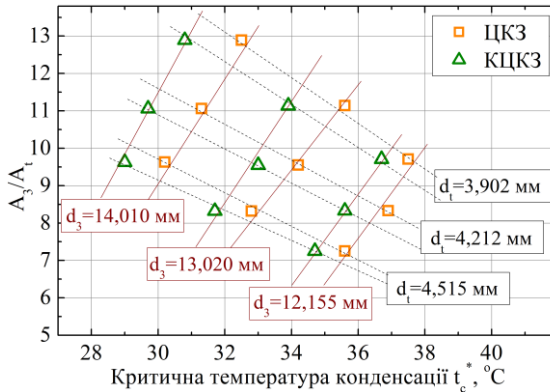


Рис. 7. Залежність A_3/A_1 від критичної температури конденсації t_c^* для дев'яти пар ежекторів з ЦКЗ та КЦКЗ

Аналогічно проведено порівняння ефективності ежекторів з ЦКЗ та КЦКЗ та параметрів ефективності ЕХМ з цими ежекторами. Результати цього порівняння показані на рис. 8.

Порівняння експериментальних показників ефективності ω^* , COP_{therm}^* і Q_e^* для дев'яти пар ежекторів, які характеризуються різною величиною A_3/A_1 , та мають ЦКЗ або КЦКЗ, при проектних режимах роботи для кожного з ежекторів (рис. 8) показує, що застосування КЦКЗ у всьому розглянутому діапазоні критичних температур конденсації $t_c^* = 29,0 \dots 37,5$ °C дозволяє підвищити параметри ефективності як ежектора, так й ЕХМ на величину від 17 до 32 %. Однак, критична температура конденсації t_c^* для ежекторів з КЦКЗ менше ніж для ежекторів з ЦКЗ при однакових A_3/A_1 на $0,8 \dots 1,7$ °C.

Ежектори з КЦКЗ характеризуються вищим коефіцієнтом ежекції ω у порівнянні з ежекторами з ЦКЗ: на 32,1 % для ежектора 1-1 проти 1-А ($A_3/A_1=7,25$) та на 16,6 % для ежектора 3-3 проти 3-С ($A_3/A_1=12,89$). Аналогічно збільшується COP_{therm}^* ЕХМ з ежекторами з КЦКЗ у порівнянні з ежекторами з ЦКЗ: на 31,1 % для ежектора 1-1 проти 1-А ($A_3/A_1=7,25$) та на 17,2 % для ежектора 3-3 проти 3-С ($A_3/A_1=12,89$). Але недоліком ежекторів з КЦКЗ є те, що критична температура конденсації t_c^* знижується, оскільки для порівнювальних ежекторів основна геометрична характеристика A_3/A_1 однакова при збільшенні ефективності ежектору з КЦКЗ проти ежектору з ЦКЗ. Однак, при приблизно однакових коефіцієнтах ежекції ω , також як й COP_{therm}^* і Q_e^* , критична температура конденсації для ежекторів з КЦКЗ більше, ніж для ежекторів з ЦКЗ – рис. 8. Таким чином, за-

стосування КЦКЗ є більш доцільним при високих температурах конденсації холодоагенту у ЕХМ та сприяє підвищенню ефективності ЕХМ.

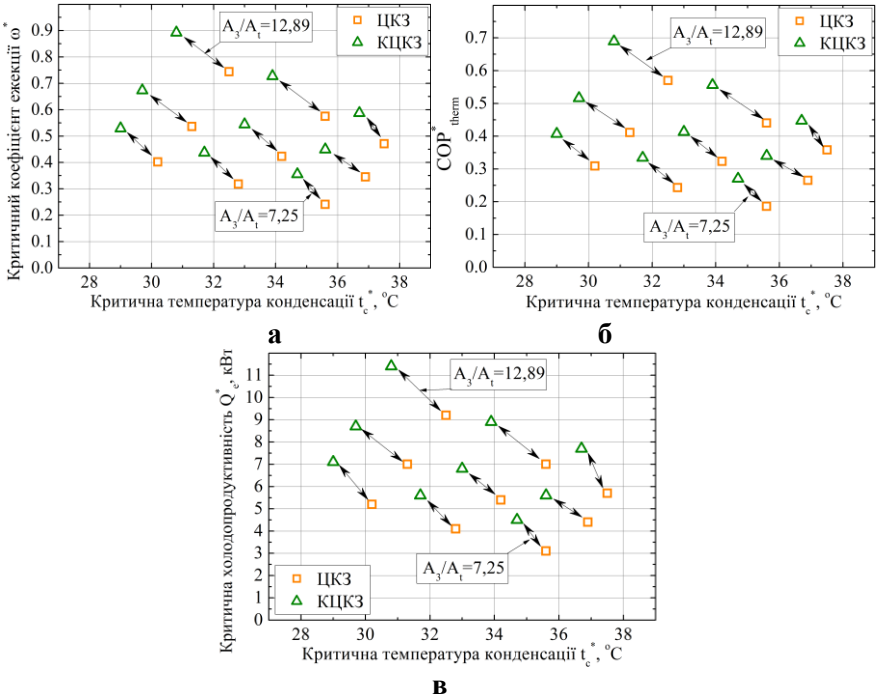


Рис. 8. Порівняння критичних показників ефективності ω^* (а), COP^*_{therm} (б) і Q_e^* (в) при роботі ЕХМ в проектному режимі при відповідних t_c^* ежекторів з ЦКЗ та КЦКЗ (стрілками поєднані показники для ежекторів з однаковим A_3/A_1 та різними камерами змішування)

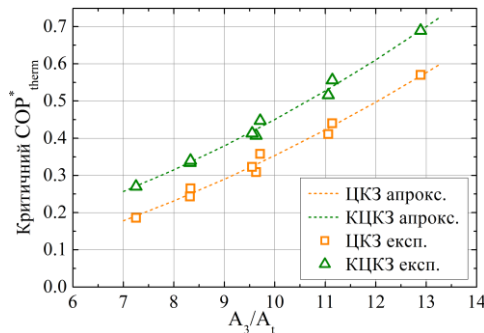


Рис. 9. Залежність критичного значення COP^*_{therm} від A_3/A_1 для ежекторів з ЦКЗ та КЦКЗ при роботі ЕХМ в проектному робочому режимі

Пояснити кращі результати з ефективності ежектора з КЦКЗ у порівнянні з ежектором з ЦКЗ при рівних A_3/A_t можна наступним. Ежектор з КЦКЗ має на вході конічну частину камери змішування. Наявність конічної частини сприяє збільшенню площі поперечного перерізу потоку парів холодоагенту, що ежектується (тобто, збільшенню коефіцієнта ежекції). Але діаметр циліндричної частини змішувальної камери був однаковим для порівнювальних ежекторів з КЦКЗ та ЦКЗ при рівних A_3/A_t . Таким чином, енергії первинного робочого потоку пари у ежекторі з КЦКЗ не вистачало для стиснення більшої кількості вторинної пари (порівняно з кількістю вторинної пари у ежекторі з ЦКЗ) до тиску, що відповідає критичному тиску конденсації, отриманому в ежекторі з ЦКЗ. Тому критична температура конденсації для ежекторів з КЦКЗ була нижчою. Для отримання більш високої t_c^* для ежекторів з КЦКЗ необхідно зробити меншим діаметр циліндричної частини змішувальної камери. Але це не було задачею представленого дослідження, хоча вплив на t_c^* зміни A_3/A_t (де A_3 - площа поперечного перерізу циліндричної частини камери змішування) можна оцінити з рис. 8, де видно, що зменшення діаметра циліндричної частини камери змішування d_3 тягне за собою підвищення t_c^* при інших рівних геометричних параметрах (A_3/A_t) та формі камери змішування.

На основі виконаних експериментальних досліджень зроблено загальний висновок, що при виборі ежектора для ЕХМ завжди потрібно шукати компроміс між збільшенням енергоефективності ЕХМ та зниженням можливості її роботи при високих температурах навколишнього середовища (критичних температурах конденсації), але з точки зору підвищення параметрів ефективності ЕХМ доцільно застосовувати ежектори з КЦКЗ замість ежекторів з ЦКЗ, спроектованих під певний режим роботи ЕХМ.

Висновки

1. Експериментальні результати роботи ЕХМ з 18 ежекторами різної геометрії (9 ежекторів з ЦКЗ та 9 ежекторів з КЦКЗ зі змінним A_3/A_t від 7,25 до 12,89) при $t_g = 80 \dots 105$ °С, $t_c = 24 \dots 42$ °С, $t_e = 4 \dots 20$ °С демонструють, що вторинна низькопотенційна теплота судових енергетичних установок з температурою 85...120 °С може використовуватися для ефективної та стабільної роботи ЕХМ на озонобезпечному та негорючому холодоагенті R245fa для кондиціонування повітря та отримання холоду при $t > 8$ °С.

2. За результатами експериментального вимірювання параметрів

ефективності ЕХМ з ежекторами з ЦКЗ та КЦКЗ з $A_3/A_1=7,25\dots 12,89$ на холодоагенті R245fa показано, що t_c^* суттєво збільшується при збільшенні як t_g , так й t_e . Тобто при фіксованій t_e можливості роботи ЕХМ при високих температурах навколишнього середовища (високі t_c^*) розширюються з ростом температури джерела теплоти (збільшення t_g). Але при цьому енергоефективність, а саме коефіцієнт ежекції ω та COP_{therm} знижуються зі збільшенням t_g . Так, при $t_e=12\text{ }^\circ\text{C}$ підвищення t_g з 110 до 120 $^\circ\text{C}$ призвело до підвищення t_c^* більш ніж на 5 $^\circ\text{C}$ і до зниження ω та COP_{therm} на 25 та 18%, відповідно, для ЕХМ з ежектором з ЦКЗ. Збільшення t_e від 4 до 18 $^\circ\text{C}$ при $t_g=95\text{ }^\circ\text{C}$ призвело до зростання ω від 0,23 до 0,53, COP_{therm} від 0,17 до 0,42, Q_e від 2,9 до 6,8 кВт і t_c^* від 32,3 до 37,7 $^\circ\text{C}$, але t_e зазвичай є фіксованим параметром роботи суднового холодильного обладнання. Тобто при фіксованій t_e потрібно шукати компроміс між можливістю роботи ЕХМ при певних параметрах навколишнього середовища (t_c^*) та енергоефективністю ЕХМ (COP_{therm}), а також її масогабаритними параметрами, що важливо саме для суднового холодильного обладнання.

3. Порівняння експериментально визначених оптимальних (критичних) показників ефективності ω^* , COP_{therm}^* і Q_e^* для ЕХМ з 18 ежекторами (9 ежекторів з ЦКЗ та 9 ежекторів з КЦКЗ зі змінним A_3/A_1 від 7,25 до 12,89), при проектних режимах роботи (t_e , t_g) показує, що застосування КЦКЗ у всьому визначеному діапазоні $t_c^*=29,0\dots 37,5\text{ }^\circ\text{C}$ дозволяє підвищити ω^* , COP_{therm}^* і Q_e^* на величину від 17 до 32 % порівняно з застосуванням ЦКЗ. Але при цьому t_c^* для ежекторів з КЦКЗ на 0,8...1,7 $^\circ\text{C}$ менше ніж для ежекторів з ЦКЗ при однакових A_3/A_1 . Однак, t_c^* для ежекторів з КЦКЗ більше ніж для ежекторів з ЦКЗ, при однакових ω^* , COP_{therm}^* і Q_e^* . Таким чином, експериментально доказано, що застосування КЦКЗ є більш доцільним при високих температурах конденсації.

Перелік використаних джерел

1. Singh D.V., Pedersen E. A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. *Energy Convers. Manage.* 2016. Vol. 111. P.315-328.

2. Improving the energy efficiency of ships. *International Maritime Organization*. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx> (дата звернення: 10.02.2024 р.)

3. Fourth IMO GHG Study 2020. *International Maritime Organization*. 2020.

4. Огурцов Д.В., Козьмініх М.А., Хлієва О.Я. Аналіз ефективності застосування регенеративного теплообмінника у судновій холодильній машині провізійних камер при її переведенні з холодоагенту R404A на R407F *Судові енергетичні установки*. Вип. 47. 2023. С. 206-216.

5. Korniiyevych S., Borisov V., Shestopalov K., Khliyeva O., Zhelezny V. Eco-energy analysis of the expediency of nanoadditive C60 fullerene to the compressor oils for small refrigerating appliance *Ship power plants (Судові енергетичні установки)*. Vol. 45. 2022. P. 70-81.

6. Селиверстов В.М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках. Л.: Судостроение. 1973. 256 с.

7. Захаров Ю.В., Андреев Л.М., Лехмус А.А., Рашевский И.А. Результаты испытаний экспериментальной фреоновой эжекторной холодильной машины в режиме кондиционирования воздуха. *Холодильная техника*. 1971. №3.

8. Yang Z., Radchenko R., Radchenko M., Radchenko A., Kornienko V., Cooling potential of ship engine intake air cooling and its realization on the route line. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(22). 15058.

9. Шестопалов К. О., Хлієв Н. О., Хлієва О. Я. Аналіз доцільності застосування компресорно-ежекторної холодильної машини у судновій системі кондиціонування повітря. *Судові енергетичні установки*. №. 44. 2022. С. 157-165.

10. Eames I.W., Ablwaifa A.E., Petrenko V.O. Results of an experimental study of an advanced jet-pump refrigerator operating with R245fa. *Appl. Therm. Eng.* 2007. Vol. 27. P. 2833-2840.

11. Shestopalov K.O., Huang B.J., Petrenko V.O., Volovyk O.S. Investigation of an experimental ejector refrigeration machine operating with refrigerant R245fa at design and off-design working conditions. Part 1. Theoretical analysis. *Int. J. Refrig.* 2015. Vol. 55. P. 201-211.

12. Huang B.J., Jiang C.B., Hu F.L. Ejector performance characteristics and design analysis of jet refrigeration system. *J. Eng. Gas Turb. Power*. 1985. Vol. 107. P. 792-802.

13. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.

14. Ge J., Chen H., Li J., Jin Y. Experimental comparison of critical performance for variable geometry ejectors with different mixer structures. *Chem. Eng. J.* 2023. Vol. 478. 147487.

15. Shestopalov K.O., Huang B.J., Petrenko V.O., Volovyk O.S. Investigation of an experimental ejector refrigeration machine operating with refrigerant R245fa at design and off-design working conditions. Part 2. Theoretical and experimental results. *Int. J. Refrig.* 2015. Vol. 55. P. 212-223.

10.31653/smf48.2024.159-172

Lebediev B^{1.}, Uminsky S.^{2.}, Korolkova M.^{2.}, Lebedieva L.^{3.}

¹National University "Odessa Maritime Academy"

²Odesa military academy

³National University "Odessa Polytechnic"

THE TECHNOLOGY OF INCREASING THE DURABILITY OF RESOURCE-DETERMINING PARTS OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Formulation of the problem. It is possible to optimize the process of operation by substantiating the dependence of the change in the technical condition of the engines since the start of operation and the criterion of the boundary state of the engine units, which will allow determining the optimal service life of the engine before theist overhaul. The main reasons for changes in the technical condition of the engine units are wear, fatigue, thermal and corrosion damage, which depend on the intensity of changes in dimensions, the geometric shape of parts and their relative location [1-4]. Wear occurs under the influence of three groups of factors: constructive - depend on the design of the engine, technological and operational - the quality of fuels and oils used, and operating conditions. Realizing the share of wear caused by various conditions of engine operation in the general wear, it is possible to determine the factors that have the main influence on the wear of units. This makes it possible to identify the most effective ways to increase the durability of engines with a small expenditure of time and money, as well as to predict the resource of engines before overhaul [2-5].

Analysis of current research.

Research on increasing wear resistance can give the maximum technical and economic effect if the design developments are primarily aimed at eliminating the factors that cause maximum wear. Various operational factors that affect the wear of engine units and its efficiency during operation are usually divided into three groups [4-8]:

1. Load and speed modes of engine operation, which mainly determine the amount of molecular mechanical (adhesive) wear.
2. The thermal mode of engine operation, including start-up and warm-up periods, which determine the amount of corrosion-mechanical and molecular-mechanical wear.

3. Air dust and protection of the engine and its separate parts from mechanical pollution particles, which determine the amount of abrasive-mechanical wear.

The aim of the work is to increase the durability of resource-determining parts by applying external friction, it is necessary to take into consideration that the shear strength of the surface layer is less than the strength of the main material.

Research material and methods.

With an increase of engine speed mode, the friction path is shortened, and at a constant temperature regime, the intensity of wear should decrease. The intensity of wear of engine parts is also greater at unstable speed modes. Moreover, with increasing acceleration, the growth rate of wear intensity decreases [5-9]. The water, that has penetrated into the oil and condensed there at low heat mode, causes intensive coagulation of impurities and hydrolysis of additives with the formation of precipitates - sludge. This leads to the destruction of oil filters, contamination of the grid of oil receivers of pumps and oil channels, which can sharply reduce smooth operation of the engine and cause increased wear of parts to the point of emergency. At high thermal modes of engine operation, oil oxidation processes intensify, leading to deterioration of its properties, activation of additives, especially alkaline ones. Basically, engine reliability indicators are determined by the technical condition of such resource-generating elements as crankshaft bearings, cylinder-piston group (CPG), engine block, which account for 37% of failures and 62% of repair costs [7-11]. The resource of these parts, even if new or restored parts were installed during the repair, to the original size of the parts, will always be less than of a new engine (unit), due to an increase in the rate of their wear, due to distortion of dimensional and kinematic relationships of previously used units and aggregates with worn or distorted parts (within permissible limits). This refers to such resource-generating parts of the power unit as: - the engine cylinder block - the bed of the block, the surfaces under the liners of the root necks of the crankshaft, which during repair of the unit must be checked for the alignment of the beds of the block; - connecting rod - the connecting surface of the lower connecting rod head with the liner, as well as the connection of the upper connecting rod head with the liner, the parallelism of the lower and upper connecting rod holes, deformation of the connecting rod body; - crankshaft - dimensions and shape of necks, presence of cracks on them, shaft deflection; In addition, the inter-repair resource is also determined by the quality of the

completed repair. The secondary resource is about 58% of the primary resource, and this is due to fatigue stress in engine elements, the formation of cracks and their development, a change in the alignment of the support surfaces of the cylinder block, which leads to crankshaft breakage, the formation of cracks in the block, etc. [8-13]

To increase the durability of engines, it is necessary to monitor changes in the technical condition of their resource-generating elements during repair work, to improve the technology and quality of repair. The analysis of operational defects of engine elements that have failed indicates a fundamental possibility of improving the operational characteristics of power units due to the use of modern restoration and strengthening technologies.

When the crankshaft deflection is more than 0.9 mm, it is impractical to restore it due to the formation of fatigue cracks in it, while up to 90% of shafts with such a deflection are subject to rejection. Analysis of these data shows that the deflection of the removed crankshafts is 8.6 times greater than that of the crankshafts to be restored. The work of frictional forces causes wear of the cylinder liner and the working surface of the ring. The work of friction forces is influenced by the ratio of physical and mechanical properties of the materials of the ring and the cylinder liner condition of the lubricant and the presence of abrasive in it; the temperature of the parts to be joined. The work of the frictional forces of the second and the third rings is lower than the first one, which is explained by better lubrication conditions, and on the other hand by lower gas pressure in the labyrinth seal. During the compression and working stroke, intensive wear of the cylinder liner occurs, aggravated by the effect of high gas temperature, which leads to burning of the lubricant on the surface of the cylinder. As the piston moves down the work of the frictional forces of the rings in the joint decreases. The conditions in the engine combustion chamber determine: a) the strength of the walls under the action of gas pressure forces on them; b) wear resistance of the cylinder mirror during long-term operation of the engine; c) small frictional losses when moving the piston with rings in the cylinder liner; d) anti-corrosion resistance of the inner and outer surfaces of the liner; e) reliability of sealing in places of gas joints and water cooling joints; f) free expansion in the axial direction for wet cylinder liners. Cylinder liners are exposed to corrosive substances, abrasive particles, high temperatures and pressure [9-13].

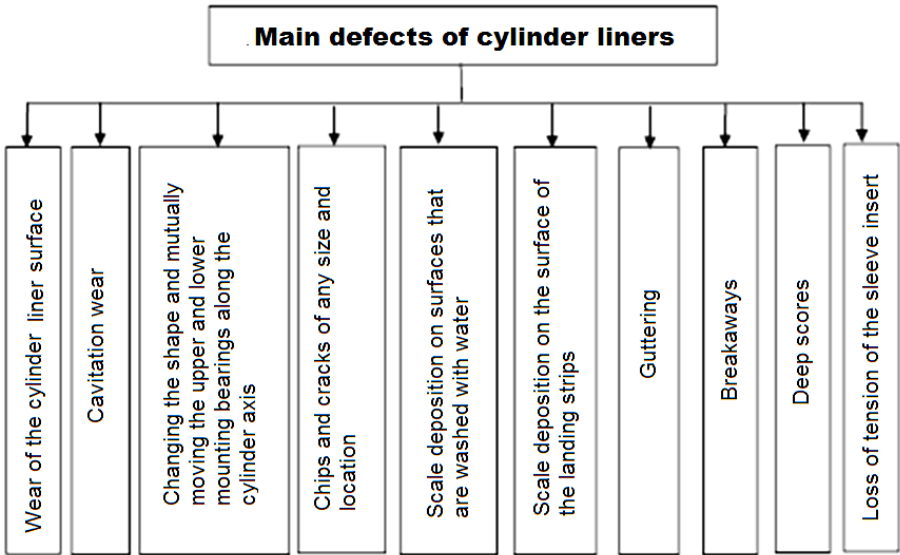


Fig. 1. Main defects of cylinder liners

The surface layer formed on the friction surface localizes adhesive, abrasive damage, embitterment and loosening processes in minimal surface volumes. This layer should have pliable volumes of metal with minimal shear resistance and deconcentrate stresses on the friction contact.

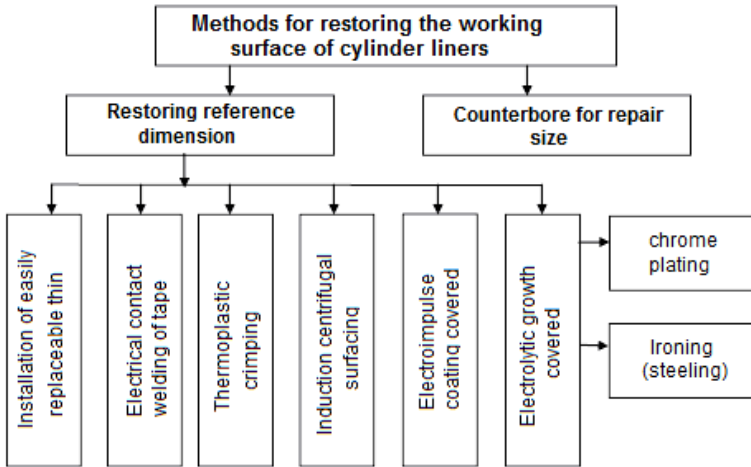


Fig. 2. Methods of restoring the working surface of cylinder liners.

The lower bearing layer must have a high resistance to plastic deformation, seizure, fatigue processes and abrasive damage. Active layers during the operation of engines must retain the ability to be regenerated and be constantly renewed [12]. High pressure and temperature lead to burning and thinning of the oil film with the fuel-air mixture and increases the friction conditions.

Presenting main material.

Let's consider the most widely used ways of increasing wear resistance (Fig. 3).

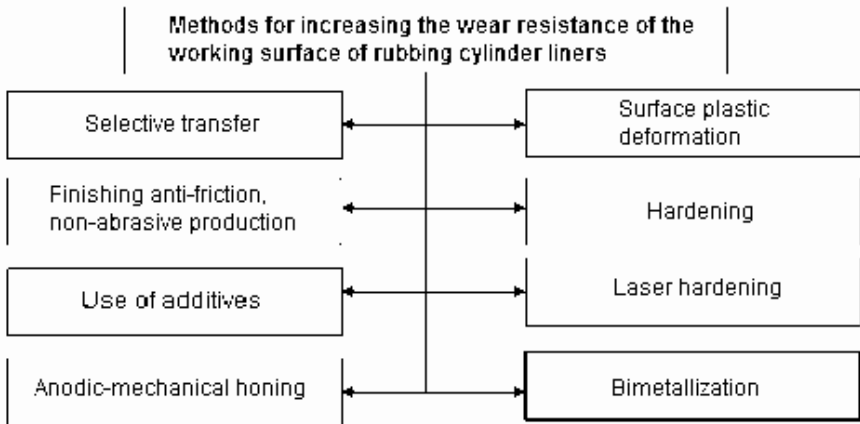


Fig. 3. Ways to increase the wear resistance of the friction working surface of cylinder liners

Such methods include finishing anti-friction non-abrasive treatment (FANAT). The essence of FANAT consists in coating a layer of brass, bronze or copper using the phenomenon of metal transfer during friction. The advantage of FANAT over other finishing operations lies in the simplicity of the equipment. FANAT gives the steel or cast iron surface high antifriction properties. The experience of using FANAT for cylinders allows you to reduce the time of additional work and increase the wear resistance of cylinder liners by 1.6 ... 1.75 times, and the piston rings working with them - by 1.35 ... 1.4 times. Special additives, which are used both at the engine break-in stage and during its operation, have become widespread. Additives form a strong adhesive film that reduces friction and prevents increased wear when working with heavy loads. The disadvantage of the composition is the difficulty of preparation in a factory environment. The additive is characterized by a general toxic effect [12-17]. It is possible to increase the wear resistance of cylinder liners by

the method of anodic mechanical honing (AMH) with the use of metal honing bars made of copper, brass, steel or cast iron, which will allow the use of not only electrochemical, but also electroerosive components of the process, as well as the application of an anti-friction layer. With AMH, metal consumption occurs due to electroerosion and electrochemical phenomena. In any mode, appropriate electrochemical processes take place in the interelectrode gap, since the working fluid is an electrolyte. Electric discharges that occur between electrodes and cause electroerosion can be considered as separate heat sources of rapid movement on the surface of the electrode work piece. At the same time, heat spreads deep into the metal according to the laws of heat conduction. The depth of penetration is determined by the power of the electric discharge, the speed of movement of the electrodes, the properties of the environment, etc.

Temperature zones of spherical shape are quickly formed around the objects. In the zone where the heating reaches the melting temperature and higher, the metal melts, partially evaporates and, moving away with the flow of the working fluid and the electrode tool, forms holes. In the following lower zones, a change in structure occurs. A so-called "white" layer appears in the zone where the temperature reaches the tempering temperature and higher one. Using these properties of the "white" layer, you can increase the resource of the cylinder liners. However, the "white" layer has an uneven thickness and continuity, and is also full of pores and cracks. Therefore, obtaining a "white" layer by the anodic-mechanical method turned out to be an impractical one. Processing of cylinder liners should be carried out in modes that allow the appearance of a "white" layer of small thickness. Laboratory and operational studies have shown that the wear resistance of processed AMH is 20 ... 22% higher than the wear resistance of the surface after diamond honing. The surface finishing time also decreased [13-17]. Rolling with balls or rollers is usually used, both in the form of an independent operation and combined with operations of boring, honing, and proofing [8]. During the laser strengthening of the cylinder liner, separate equally spaced strips are applied with a laser on its inner surface at an angle of 45° to the forming liner so that the strips form a grid on the surface. The depth of the hardening zone is 0.6 ... 1.12 mm, the track thickness is up to 0.5 mm, allowance for final machining is 0.13...0.24 mm. As a result of processing, there is a decrease in wear intensity by 1.35...1.58 times [15].

The use of laser processing is advisable in flow and mass production in the case when other strengthening methods do not give the desired re-

sult [17]. A method of bimetalization of the friction surface by creating ordered or disordered inserts, inclusions, layers, etc. in the body of the main material from a material that has physical and mechanical properties different from the main one is proposed [17]. During wear and tear, the main material (cast iron liner) and more ductile non-ferrous metal (copper, brass) are destroyed. Copper and its alloys are characterized by plastic deformation due to the interaction of micro-uniformities. Plastic non-ferrous metal and particles of its wear, being directly in the friction zone, interact with the shaking micro-irregularities, "smear" on the contact areas of the micro-irregularities. The film formed between them has low shear resistance and is held on the friction surfaces due to molecular forces. Micro-uniformities present on the friction surface, falling into the zone of plastic deformations (copper, brass), deepen by a value greater than what happens in the zone of elastic deformations. When leaving the zone of plastic deformations in the zone of elastic deformations. The micro-irregularities fall on the cutting edge of the elastic layer and are cut, and the wedge of plastic material located in front of the micro-irregularities separates the connected surfaces and is captured by the moving micro-irregularities to the nearest depression, filling it.

At the same time, chemical processes of formation of spinel occur, which, falling into the depressions of the surface, rise increases its resistance to normal loads [15-18]. The advantage of this method is that there is no need for constant replenishment, as in the case of micropowders, of copper reserves, which participate in the friction process. In addition to being formed as a result of chemical reactions, $ZnFe_2O_4$ spinel is a high-temperature neutralizer of the exhaust gases of the combustion chamber. The thickness of the layer of non-ferrous metal that is formed on the surface of the liner, has 2-3 microns, and the presence of some non-ferrous metals, for example, copper or brass, directly in the combustion chamber leads to a decrease in the toxicity of engine exhaust gases. The technical and economic advantage of the liner with the use of fusible inserts is to increase the durability of the cylinder-piston group by reducing the coefficient of friction of its connected parts without adding, for example, expensive anti-friction additives to the lubricant, which must be applied at each oil change. The simplicity of the design of the modernized liner allows it to be produced at any repair plant, even in conditions of non-specialized production. Implementation of the method of bimetalization of the liner surface is currently a rather difficult task. It would be

most appropriate not to cover the entire surface with non-ferrous metal, but to use metal inserts.

However, in this case, the question arises as to how the inserts should be located in the surface of the cylinder liners. For this, it is necessary to justify the geometric parameters of the liner with inserts. It should be noted that the angle of inclination of the insert will be limited by the geometric parameters of the liner and the stroke length of the piston. Therefore, it is necessary to take into account these parameters. Knowing the angle of inclination of the insert, we will calculate the geometric parameters of the groove and the volume of the necessary metal to ensure wear reduction (Fig. 4).

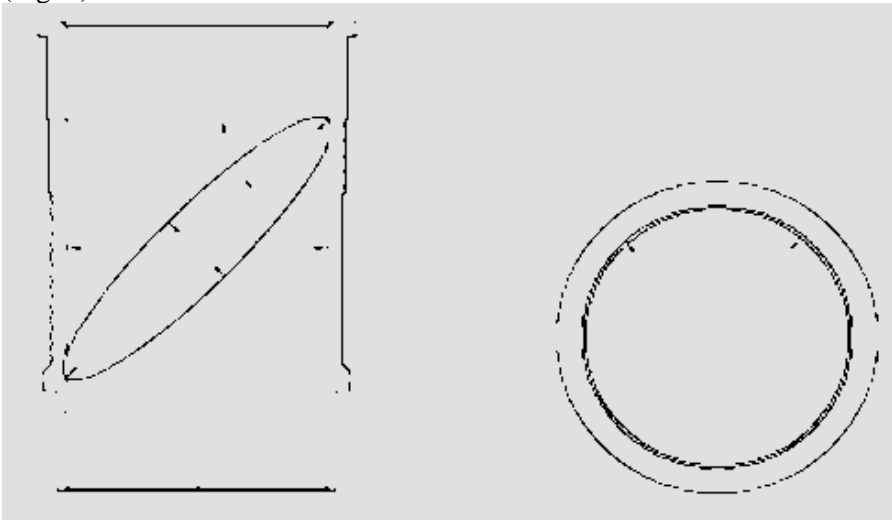


Fig. 4. Scheme of the geometric parameters of the insert.

Based on the condition of covering the entire rubbing surface of the cylinder liner with metal, and observing the requirements of a positive mechanical gradient, we will determine the amount of metal in the inserts. This can be done only if the depth of insertion of the piston rings does not exceed the thickness of the coating of the surface of the liner with the metal of the insert. Based on this and knowing the height of the surface irregularities of the cylinder liner, we will determine the amount of metal required to cover the rubbing surface of the liner.

$$V_m = \pi(r^2 - r_1^2)L \quad (1)$$

where r is the liner radius, mm, r_1 is the radius of the liner covering with metal, mm; L - stroke of the piston, mm. At the same time, it is necessary to comply with the terms:

$$r^2 - r_1^2 \geq h_{\max} \quad (2)$$

where h_{\max} is the maximum height of the surface irregularities of the cylinder liner, mm.

To calculate the number of inserts in the cylinder liner and specify their geometric parameters, it is necessary to calculate the amount of metal removed from one insert by piston rings. Volume of removed metal:

$$V_0 = hS_B \quad (3)$$

where h - the depth of the introduction of the piston ring into the metal insert, mm.

In the real operating conditions of the CPG, the depth of the introduction of the piston rings into the metal insert will decrease with each reciprocating cycle, and will reach zero when the friction surface is leveled (uniform coverage of the surface of the cylinder liner with a layer of non-ferrous metal). When the layer of non-ferrous metal (wear of the metal film) on the friction surface of the liner is reduced, there will be a difference in the height of the metal layer in the zone of the insert and the friction surface of the liner, which will cause an increase in the depth of insertion and the removal of the next layer of the insert metal with its further "smearing" on the friction surface liners. The cycle is repeated, which is the key to the bimetalization of the friction surfaces.

The proposed technological process of manufacturing bimetalized cylinder liners includes the operations of cleaning the cylinder liners, their defecting, eliminating cavitation damage, building up the landing strips and their processing, trimming the support edge, cutting annular grooves and their surfacing, cleaning the inner surface after surfacing, grinding the inner surface, honing it, control, conservation and packaging.

In contrast to the existing technological process, the proposed one contains operations of bimetalization of the friction working surface: cutting annular grooves, surfacing them, cleaning the inner surface after surfacing.

Instead of the boring operation, the rough and fine grindings of the inner surface of the liner were applied on center-grinding or internal grinding machines due to the risk of breaking of the boring head cutter and metal chips on the border of the annular grooves.

Ring grooves are cut on a centering lathe (Fig. 5). The cylinder liner is fixed in a three-jaw chuck during processing.

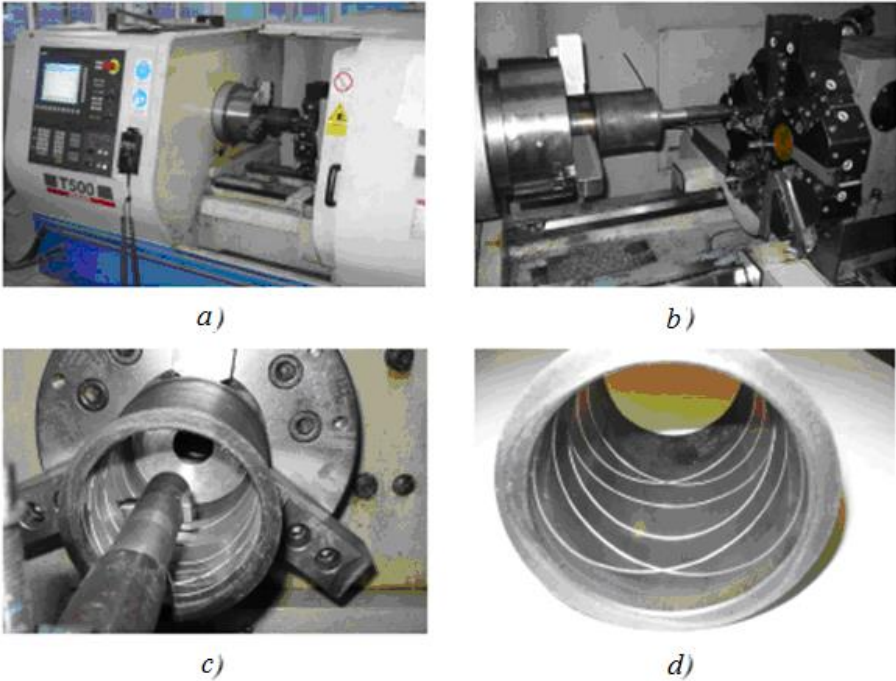
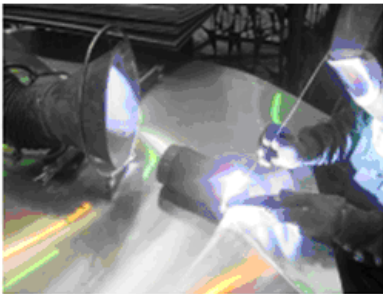


Fig. 5. Cutting ring grooves:

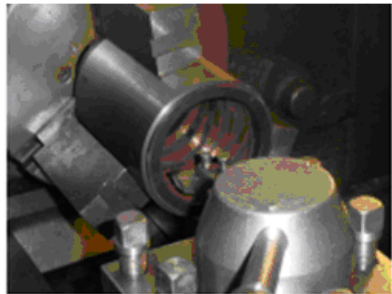
a) type of centering lathe; b) three-ball cartridge; c) VC 8 sharps; d) liner with annular grooves.

Liners are installed by checking their position in the horizontal and vertical planes on $0.032...0.054$ mm. Processing is carried out with a WNr cutter (German) or SS cutter (Sweden), which is chosen taking into account the processed material, the type of allowance and the recommended cutting depth. When processing, Universal cutting emulsion (UCE) is used. A vertical milling machining center, such as the M-450 model, equipped with a universal rotary table, can be used for cutting annular grooves. While processing, the cylinder liner is fixed in a three-jaw chuck installed on a universal rotary table, which in time is installed and fixed on the machine table with an angle of 170° . The liner is installed by checking its position and beating with an accuracy of $0.032...0.054$ mm. The processing is carried out with disk shaped cutters with a small tooth. The trapezoidal cross-section of the ring grooves is ensured by appropriate

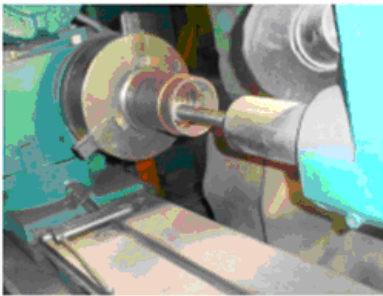
sharpening of the cutter teeth. The necessary step and direction of the ring arrays is ensured by the vertical feed of the machine and the rotation of the liner on the rotary table. The cutting depth and feed are determined taking into account the hardness of the processed material, the type of operation, the tool material, the type of cutter, and the method of its attachment. Ring grooves are filled by manual argon arc surfacing (Fig. 3.3 a). A wire with a diameter of 0.82 ... 1.12 mm is used for surfacing ring grooves; the material is copper C 1100. Taking into account the dimensions of the cylinder liners, surfacing is performed with an argon arc torch APГ-250 with a tungsten electrode, with filler metal supplied in the form of a wire directly into the zone.



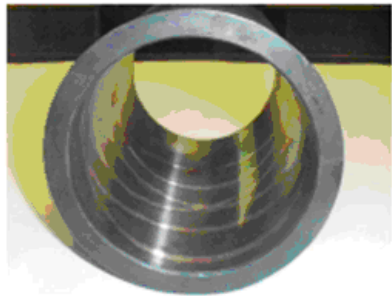
a)



b)



c)



d)

Fig. 6. Bimetalized cylinder liner processing technology:

- a) surfacing of grooves with M1 copper; b) cleaning of the inner surface;
- c) operation grinding; d) bimetalized cylinder liner with profiled insert.

As shielding gases, argon of the highest grade according to DSTU (National Standards of Ukraine) 10157-99, helium of the highest quality category of grades A and B according to TU 51-940-90, as well as their

mixtures in the ratio of 50 ... 75% argon by volume, have been used. The power of the burner has ensured surfacing of annular grooves and a small zone of thermal influence. First, the inner surface of the cylinder liner was cleaned and degreased. Then the cylinder liner was placed in a thermal furnace and heated to 300 ... 400 ° C. After installation in the frame, copper melting began, to prevent the cylinder liner from warping diagonally, tacks were made at the beginning and end of all annular grooves. The cylinder liner was reheated to 300 ... 400 ° C and welded from the center opposite the grippers. The electrode was located strictly in the plane of the joint; the electrode tilt was 60 ... 80 ° "at a backward angle". Welding modes: arc voltage - 60 V, current - 90 A, gas pressure - 0.05 MPa. To remove slag and metal inflows, after surfacing the screw grooves, the inner surface was cleaned on a lathe and screw-cutting machine, for example, 16K20. Grinding could be performed on honing machines ZG833, ZA83S - 33, and ZU142VM. Rough honing was done with EHU 525 bars or with M27 100% concentration diamond bars with a diamond content of 3.5 carats. Clean honing was carried out with KZM20SM1K bars or ASM20M1 diamond bars of 100% concentration. The material and hardness of the circle, the type of connection, were chosen taking into account the simultaneous processing of cast iron and copper alloys of high hardness. Honing was carried out in the following modes: peripheral speed - 60 ... 80 m / min; - 15 ... 25 m / min; pressure on bars - 0.53 ... 1.13 MPa (rough honing) and 0.43 ... 0.64 MPa (clean); UCE - kerosene; allowance for rough honing - 0.051 ... 0.073 mm, and for finishing - 0.011 ... 0.032 mm. Processing modes were selected taking into account the required accuracy and surface roughness, the hardness of the processed material, the material of the abrasive wheel, the method of fastening the workpiece, the use of lubricating and cooling fluid.

Conclusions

1. Linear wear of the bimetalized cylinder liner is 3.1 times lower than that of a typical liner. The thickness of the anti-friction film on the friction surface of the liner of 2 ... 3 μm is achieved by annular grooves, which corresponds to at least 8.3% of the area of the grooves filled with copper to the area of the working surface of the friction of the cylinder liner.

2. When used copper with angles of inclination in the range of 15° ... 20°, wear is reduced on average by 2.7 times, wear intensity by 48 ... 83%,

friction moment by 14.7% compared to a solid sample. There is a 12.5% decrease in roughness in bimetalized samples compared to solid ones.

4. The technological process of manufacturing a bimetalized copper cylinder liner, on the working surface of which grooves are made in the form of three rows of closed rings separate from each other, with elevation angles of 17° to the diametrical plane of the liner and a step of 13 mm, is substantiated.

References

1. Баклі, П. Поверхневі явища при адгезії та фрикційному взаємодії: пров. з англ. / П. Баклі. - М.: Машинобудування, 1986. - 360 с.

2. Черноіванов, В.І. Організація і технологія відновлення деталей машин. - М.: Агропромиздат, 2009. - 336 с.

3. Польцер, Г. Основи тертя і зношування / Г. Польцер, Ф. Майснер. - М.: Машинобудування, 1984. - 264 с.

4. Хебда, М. Довідник по триботехніці: Т.1 Теоретичні основи / За заг. ред. М. Хебда, А.В.Чічінадзе. - М.: Машинобудування, 1989. - 400 с.

5. Крагельський, І.В. Основи розрахунків на тертя і знос / І.В. Крагельський, М.Н. Добичін, В.С. Комбалу. - М.: Машинобудування, 1977. - 526 с.

6. Крагельський, І.В. Вузли тертя машин: Довідник. / І.В. Крагельський, Н.М. Михин - М.: Машинобудування, 1984. - 280 с.

7. Хебда, М. Довідник по триботехніці: Т.2 Мастильні матеріали, техніка мастила, опори ковзання і кочення. / За заг. ред. М.Хебди, А.В.Чічінадзе. - М.: Машинобудування, 1990. - 416 с.

8. Гаркунов, Д.Н. Довговічність деталей, що труться. - М.: Машинобудування, 2000. - 352 с.

9. Орлин, А.С. Двигуни внутрішнього згоряння: Конструювання і розрахунок на міцність поршневих і комбінованих двигунів / За заг. ред. А.С.Орліна, М.Г.Круглова. - М.: Машинобудування, 2004. - 384 с.

10. Ульман, І.Є. Ремонт машин / За заг. ред. І.Є.Ульмана. - М.: Колос, 1996. - 448 с.

11. Чорновіл, М.І. Підвищення якості відновлення деталей машин / М.І. Чорновіл, С.Є. Поєдинок, Н.Є. Степанов - Київ, Техніка, 2009. - 168 с.

12. Хасуи, А., Морігакі, О. / Ремонт машин .Пер. з яп. В.Н. Попова; під ред. В.С. Степіна., Н.Г. Шестьоркін Ігор Олегович. - М .: Машинобудування, 1985. - 240 с.

13. Гуревич, СМ. Довідник по зварюванню кольорових металів. Київ: Наукова думка. 1981. – 610 С.

14. Болотін, В. В. Прогнозування ресурсу машин та конструкцій / В. В. Болотін. - М.: Машинобудування, 1984. - 312 с.

15. Браун, Е. Д. Моделювання тертя та зношування в машинах / Е. Д. Браун, Ю. А. Євдокимов, А. В. Чичінадзе. - М.: Машинобудування, 1982. - 191 с.

16. Корсаков, В. С. Підвищення довговічності машин технологічними методами / В. С. Корсаков, Г. Е. Тауріт, Г. Д. Василюк. - Київ: Техніка, 1986. - 158 с.

17. Рижов, Е. В. Технологічні методи підвищення зносостійкості деталей машин / Е. В. Рижов. - Київ: Наукова думка, 1984. - 315 с.

18. Oliver, W. C., Pharr, G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // J. Mater. Res. 2004. V. 19 № 1. P. 3-20.

10.31653/smf48.2024.173-184

Zhuravlov Yu.I., Dovidenko Yu.N., Latych O.M.

National University "Odessa Marine Academy"

ANALYSIS OF THE THERMOMECHANICAL CONDITION OF THE WORKING SURFACE OF "SHAFT-SLIDING BEARING" JOINTS' PARTS IN SHIP REPAIR

Statement of the problem and its connection with important scientific or practical tasks.

Increasing the durability of ship technical equipment (STE) parts is directly related to the wear resistance of machine parts. That is, this is an actual direction of research. The durability of many machines is determined by the wear resistance of parts that have internal cylindrical surfaces that work in conditions of sliding friction.

The given analysis of literature data [1] about the quality of the surface layer of "shaft-sliding bearing" joints' parts and its relationship with the operational properties of these products shows that the absence of defects such as burns and cracks significantly increases their performance and durability.

The properties of the composite material are considered in two directions. The first are those that depend exclusively on the geometric arrangement of the phases and their respective volume fractions, but do not depend on the sizes of the components at all. The second are those that depend on structural factors, such as the periodicity of the arrangement or particle sizes of two or more constituent phases.

It is indicated that frictional properties, such as wear resistance, can, for example, be significantly improved with the help of reinforcing inclusions: the tribological behavior is largely determined only by the surface material, it is less important if the reinforcing structure is fibrous or not.

Nanoparticles of SiC prevent the shift of grain boundaries and contribute to a significant improvement in creep resistance.

Improvements in creep resistance in other matrices for particle or tube composites are also observed, but generally low. However, increased creep resistance is obtained for multioxide-zirconium composites and Si₃N₄ composites, to improved strength and viscosity relative to monolithic Al₂O₃, Al₂O₃-SiC nanocomposites also have increased wear resistance.

Grains in Al₂O₃—SiC nanocomposites wear out slowly, in contrast to monolithic Al₂O₃, where wear, as a rule, involves the removal of whole grains due to a relatively weak surface between the grains.

In addition, the absence of grain removal in the nanocomposite allows you to prepare a higher quality surface (and preserve it during wear) than is possible for monolithic Al₂O₃.

The excellent strength and viscosity of the nanocomposite is maintained at room temperature up to 1000°C. In addition, studies have shown that at higher temperatures, the creep resistance of Al₂O₃ is significantly increased due to the presence of SiC particles, which have higher strength and viscosity, increased wear resistance, a decrease in the creep rate at elevated temperatures, and excellent microstructural stability, which makes nanocomposites are an attractive alternative to monolithic ceramics for many structural applications.

According to this scheme, it is possible to calculate the heating and cooling rates both in the zone of contact of the circle with the part and outside it, it is possible to take into account the influence of heat exchange on the nature of the friction temperature distribution. In particular, it is possible to analytically study the non-stationary temperature field in the surface layer formed during intense friction [5].

The performed analysis of the physical and mechanical properties, as well as the coating thickness, made it possible to determine the stress state from the operating temperatures at the "coating-matrix" boundary and to develop the limit defect-free cycles of operational parts with a wear-resistant coating.

A large number of technological parameters are involved, which significantly affect the stress-strain state of coated parts. Obtained relations on the stress state of the "coating-matrix" system as a function of the physical and mechanical properties of the coating and matrix material, the main technological characteristics, especially prone to cracking of products with a wear-resistant coating.

The mechanical interpretation of crack formation does not take into account the influence of thermal processes, which are the dominant factor in the friction process.

Structural transformations cannot be the "independent" cause of the appearance of cracks. They can contribute to the growth of cracks that were formed under the action of thermal shock. Moreover, the process of transformation of temporary thermomechanical stresses takes place during a time sufficient for significant structural and phase changes in the surface

layer, which in turn generates stresses that contribute to the further growth of cracks in contacting parts.

Analysis of recent research and publications.

Analysis of research on tribology showed that for the full life cycle of ship parts, operating costs are several times higher than the costs of manufacturing new equipment. Losses of funds from friction and wear in developed countries reach 4-5% of national income [2].

It is known that the task of increasing the wear resistance of a specific product often does not involve qualitative modification of the structural composition of the used material in its entire volume, but is transferred to the modification of the surface layer of the material, since the protection of parts from wear in some cases is solved by surface strengthening. In the general case, surface strengthening means increasing the hardness of the working surface of the part, which allows to increase the wear resistance [8].

A large number of works, in which various methods of strengthening are proposed, are devoted to increasing the mechanical characteristics that rub. Prospective directions for the development of surface-strengthening technologies involve the use of new methods of obtaining wear-resistant coatings, mainly using wear-resistant materials, that is, coatings based on compounds such as oxides, nitrides, and carbides. The use of reinforcing coatings made of heterogeneous materials leads not only to the modification of the surface layer, but also to the formation, in some cases, of a fundamentally new composite material of the surface layer, which has both high strength and sufficient plasticity, as well as increased wear resistance [1].

The study of the causes of the appearance of cracks is presented in works [7] from the standpoint of structural and phase transformations that generate the corresponding structural stresses and also have a private character and do not allow us to trace the true picture of the formation of defects such as cracks on the surface.

Setting the task.

The purpose of this study is to ensure the required quality of cylindrical surfaces of parts of STE with wear-resistant coatings, which are prone to crack formation by analyzing thermomechanical phenomena, which will allow to significantly reduce the formation of defects on their working surfaces.

Key words: ship technical equipment, defects of ship parts, "shaft-sliding bearing" connection, wear of surfaces.

The main research material

The conducted review of literature, domestic and foreign authors' inventions made it possible to systematize a number of works on increasing the level of reliability and features of the use of mating parts of the STE in combination with their maintenance bases.

The listed problems require a systemic solution based on resolving the contradictions between the aging of existing STE parts, for the renewal of which the state allocates insufficient funding, and maintenance bases that can potentially change their capabilities from degradation to a high level of development.

Here it can be emphasized that the current operating conditions of the aging STE fleet and the possible conditions for the development of maintenance and repair make it possible to structurally consider them as complex technical systems and propose new effective ways to increase the durability of existing STE. The latter circumstance opens up serious prospects for national manufacturers of STE parts.

Based on statistical patterns of loss of operability of the STE, analysis of the probabilities of the states of individual subsystems and elements, it becomes possible to build reliability models that adequately describe the behavior of systems with sufficient accuracy. Based on this, directions for increasing reliability are formed by increasing the probability of failure-free operation of individual elements, optimizing the structures of subsystems according to reliability criteria, as well as studying the probabilities of the state of subsystems in order to introduce elements of active and passive redundancy. The ultimate goal of such studies is the development of equipment with equal-resource subsystems that would reduce the costs of maintenance and repair to a minimum.

Using mathematical modeling [3], it is possible to assess the reliability of equipment at the stage of its creation when choosing options for structural construction and organizing future maintenance and repair operations.

A reliability model of such systems [4] is an analytical, statistical or physical way of displaying reality (machines, systems), which replaces them in the properties of formation and implementation of reliability, i.e. provides sufficient information about the reliability of the object being studied.

The more accurately the model describes the real object, the better it displays its reliability properties. However, increasing the accuracy of modeling is associated with the complication of the model itself. Therefore, it is rational to achieve a compromise between sufficient accuracy of modeling and the creation of models that are accessible for implementation.

Active factors supporting the required level of system reliability are operational and technical factors associated with the frequency of routine maintenance and repair of equipment if necessary.

Another group of operational factors is determined by the action of loads, the influence of the environment and operating conditions and is aimed at the formation of failures of elements and systems as a whole.

In general, a model that describes the reliability of systems can be presented implicitly as follows:

$$H = \Phi[F(r_i, \tau_i, N), U(r_i, \tau_i, \delta, T_c, T_n, N)],$$

where H is the reliability indicator of the system being studied;

$F(r_1, r_2, N)$ – is the functional representation of the structure of the system of interrelations of elements over a period of time r_i ;

r_i is the reliability indicator of the i -th element;

N is the number of elements in the system;

U is the operator that takes into account the degree of influence of controlled operational factors on the reliability level of systems;

δ is the volume of work on technical maintenance of systems;

T_n is the period of technical maintenance of systems;

T_c is the time of decrease in system availability during maintenance.

Modern marine diesel engines require an increase in their fuel economy along with an increase in the efficiency of the turbocharging system and an optimization of the combustion chamber shape.

At the same time, cooling of diesel oil with water from the "hot" circuit of the diesel cooling system was introduced instead of air cooling in radiators, which led to an increase in the temperature of the diesel oil supplied to the crankshaft bearings. The conditions of their loading with the new dynamics of the combustion process and increased oil temperature were not studied by manufacturers with due completeness. Changes that increased the mechanical and thermal loading of the crankshaft bearings were not compensated for by measures that would increase the bearing capacity of the bearings.

Therefore, many marine diesel engines were found to have increased defects in the liners of the connecting rod and main bearings of the

crankshafts. After several months of operation, the lead content in diesel oil was observed to increase above the limits established by current standards. Bearing clearances increased beyond the permissible values. It was necessary to unscheduledly replace the set of liners, causing significant economic damage. The defects of the working surface of the liners were in the form of squeezing out or wear of the babbitt layer with its frictional damage and were equally distributed to both main and connecting rod bearings. Then a one-time replacement of the complete set of main and connecting rod liners was required. This type of damage to the antifriction layer of the liners is typical for extreme pressures in bearings under conditions of oil starvation or low oil viscosity, when the thickness of the supporting oil layer decreases, boundary friction, progressive overheating, wear or squeezing out of the babbitt occur.

As a result, a connection was found between bearing defects and the parameters of the diesel engine and cooling system, as well as with the surface engineering indicators.

An increase in the fuel injection intensity by using high-pressure fuel pump (HPFP) washers caused an increase in the specific pressures in the connecting rod and main bearings. The criterion for the mechanical loading of the crankshaft connecting rod bearings is the value of the maximum load on the bearing, related to the area of the bearing projection on the plane normal to the direction of force [6]:

$$P = p_z * x F_{\pi} / D x L,$$

where: p_z is the maximum combustion pressure in the diesel cylinder; F is the piston area;

D , L are the diameter and width of the working surface of the bearing shell, respectively.

At the maximum combustion pressure p_z equal to 8.2 MPa, the value of the average specific pressure P in the connecting rod bearings reached 19.4 MPa instead of 15.6 MPa at $p_z = 7.0$ MPa. An increase in the bearing load by 18% could not but affect their performance, since the recommended values of the average specific pressure for liners filled with BK2 babbitt do not exceed 14.0 - 15.0 MPa [1].

One of the criteria for the need to repair mating parts is their ultimate wear, at which further normal operation of these mating parts is impossible.

A large number of damage sites are possible in the STE. The probability of their failure-free operation can be estimated statistically as a result of a series of experiments (Fig. 1) linking fault tolerance with the

number of damages that have occurred [2], where p is a statistical estimate of the probability of system failure; n is the number of failed elements and/or connections between them; n_1 is the maximum number of failed elements and/or connections at which the probability of failure is zero; n_2 is the minimum number of failed elements and/or connections at which the probability of failure is one.

The resulting family of experimental points is conditionally divided into three zones:

zone I: $0 < n < n_1$, $p = 0$ — no more damage than n_1 ; the system is absolutely operational;

zone II: $n_1 < n < n_2$, $0 < p < 1$ — more damage than n_1 , but less than n_2 ; the system remains operational only with a certain set of these damages;

zone III: $n_2 \leq n$; $p = 1$ — more damage than $n_2 - 1$; the system is inoperable with any set of them.

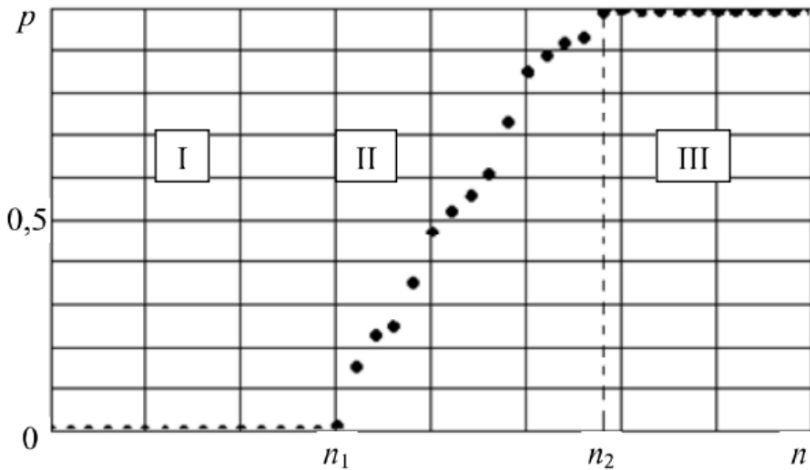


Fig. 1. Results of experimental statistical assessment of the probability of failure of the shaft-plain bearing coupling

It is obvious that the fault tolerance of the system depends on the values of n_1 and n_2 and is higher the longer the zero probability of failure is maintained (i.e., the greater n_1 , and the more the straight line approximating the experimental points in zone II is inclined to the abscissa axis (i.e., the greater the ratio $n_2 - n_1$).

One of the criteria for the need to repair mating parts is their ultimate wear, at which further normal operation of these matings is impossible.

The most important role is played by the conditions of contact of the surfaces. Friction is affected by the time of stationary contact, specific pressure on the contact, deformations, and the dimensions of the contact areas. As a result of the interaction of friction surfaces and the presence of surface energy, mechanical frictional bonds (elastic deformations and the introduction of microroughnesses) arise and stable atomic-molecular bonds (adhesion) are formed. In this case, a volumetric complex stress state arises in the contacting bodies and the formation of added masses of the boundary layer occurs [5].

External secondary conditions that have a significant effect on friction are characterized by a combination of factors. Firstly, these are the kinematics of motion (types of friction according to the kinematics of motion), the actual kinematic parameters of motion. These include the law (equations) of motion of a body (mechanism), the presence (absence) of reversibility of body motion; it is also necessary to take into account the trajectory of motion, the friction path, the speed and acceleration of the body. Secondly, these are the characteristics, conditions and parameters of dynamic effects. The mechanical behaviour of the system is influenced by dynamic factors: the laws of change of driving forces as a function of time, the presence and nature of oscillations, vibrations, impact, the number of loading cycles, the kinetic energy of a body or system of bodies, the work (power) of friction, the resistance to motion (friction force). The time factor of the process (the time of continuous operation, the duration of the process in the running-in mode of the friction unit and in the operating mode) is also taken into account.

The internal primary conditions of friction include those new phenomena and factors that arise on the friction contact and in the bodies themselves under the influence of the process of vision itself and the impact of the environment. The main thing here is the heating of the bodies, the growth of the friction temperature and the occurrence of a temperature gradient both in the bodies themselves and in the thin surface layer, leading to a change in the physical and mechanical properties of the materials.

Other scientific approaches are also used to assess the wear intensity of the friction pair "shaft journal - bearing shell". A joint solution of the basic equations of the energy theory of friction and wear of G. Fleischer and the molecular-mechanical theory of wear of I. V. Kragelsky can be

used. According to [8], the best deterministic basis for wear intensity is a multiplicative dependence on dimensionless generalized criteria of the system. As applied to plain bearings, the lubricating fluids of which may also contain a certain amount of mechanical impurities, such a dependence has the form

$$l = a_0 \left(\frac{p}{HB_{1,2}} \right)^{a_1} \left(\frac{\lambda}{h} \right)^{a_2} \left(\frac{E_{1,2}}{\sigma_0} \right)^{a_3} (1 + \alpha K)^{b_1} \left(1 + \frac{HB_a}{HB_{1,2}} \right)^{b_2} \left(1 + \gamma \frac{Sd_0}{V} \right)^{b_3}$$

where $p/HB_{1,2}$ is a dimensionless complex characterizing the stress state in contact (p is the specific load, MPa; $HB_{1,2}$ is the hardness of the working surfaces of the shaft and bearing, MPa); λ/h is a complex determining the contact mechanism (in the absence of mechanical impurities in the lubricating fluid)

$$\lambda = \sqrt{R_{a_1}^2 + R_{a_2}^2}$$

Here $R_{a1,2}$ is the standard deviation of surface roughness, μm ; d_0 is the reduced particle diameter; h is the thickness of the lubricating film; $E_{1,2}/\sigma_0$ is a complex that takes into account the plasticity and fatigue strength of materials ($E_{1,2}$ is the modulus of elasticity of the first kind, σ_0 is the fatigue limit of materials, MPa); $1 + \alpha K$ is the concentration criterion of mechanical impurities (α is the coefficient taking into account the degree of influence of particle concentration on wear; K is the concentration, kg of abrasive/kg of liquid); HB_a is the hardness of mechanical impurities, MPa; $1 + \gamma \frac{Sd_0}{V}$ - particle shape criterion (γ is a coefficient that takes into account the degree of influence of particle geometry on mating wear; S , d_0 , V are, respectively, the surface, reduced diameter and volume of particles); a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , b_3 - exponents determined on the basis of available information on the wear of materials or when testing similar samples.

Analysis of the deposits shows that due to the increased shortness of the working zone of the cylinder, the area of the spherical coating of the fiber increases due to the friction at this stage on the surface.

And this means that the destruction of the coating will occur even in the case when the technological stresses do not exceed the bond strength τ_{adh} .

With the existing operating stresses in the "cylinder-coating" system, the initial delamination in the area $(-\alpha, \alpha)$ will remain.

From the above, it can be determined that in order to ensure the necessary reliability and durability of the cylindrical group with a coating, it is necessary to ensure a roughness of $0.8 \leq Ra \leq 1.2$ when applying coatings on their working surfaces (Fig. 2). Such roughness can be achieved as a result of finishing grinding operations and subsequent finishing polishing. At the same time, the mathematical expectation of the delamination area $M(\alpha)$ will be within the capabilities of the technological process of applying the coating, in which the equilibrium state of the delamination area will be preserved under the action of technological stresses. In the case when, due to the roughness of the working surface of the cylinder, there is a system of delamination areas of the coating from the cylinder matrix (Fig. 2), a change in the stress intensity factor (SIF): SIF is possible due to their mutual influence. The dependence of the SIF on the relative distance between the areas of exfoliation is shown in Fig. 1.

As the distance d increases, the $2\alpha/d$ coefficient decreases and the stress intensity can reach large values without disturbing the equilibrium state of the delamination areas.

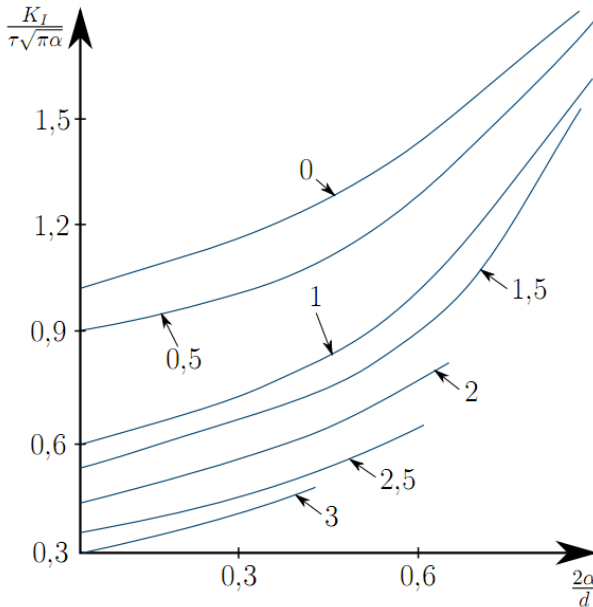


Fig. 2. Dependence of SIF K_i on d during longitudinal shear

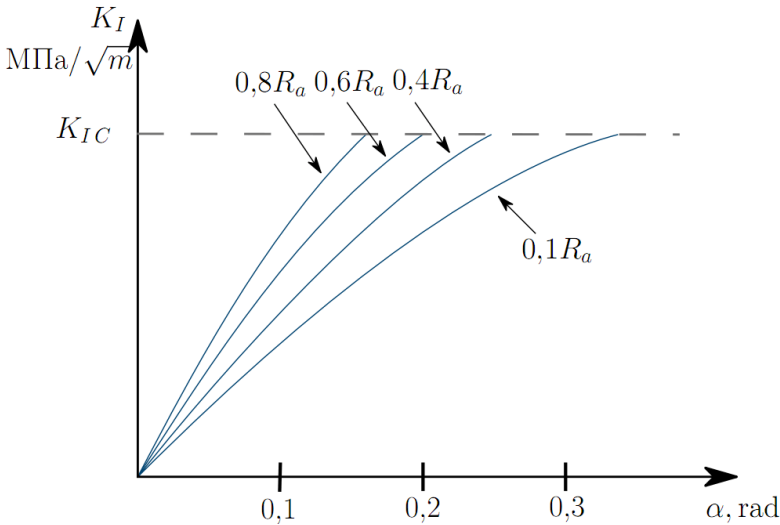


Fig. 3. Dependence of SIF on the peeling angle α and the roughness of the working zone of the cylindrical surface R_a .

In the case when, due to the roughness of the working surface of the cylinder, there is a system of delamination areas of the coating from the cylinder matrix, it is possible to change the SIF K_I due to their mutual influence and operating conditions [1].

Conclusions and prospects for further research.

1. The mechanism of the formation of defects in the surface layer of ship parts of "shaft-sliding bearing" connections with wear-resistant coatings prone to the formation of cracks is determined.

2. The criteria for the formation of cracks were determined and their relationship with the investigated technological factors of the process of friction of the working surfaces of cylinders with wear-resistant coatings was established.

3. A mathematical model was developed that describes thermomechanical processes in the surface layer during friction of cylindrical surfaces with wear-resistant coatings, taking into account their partial delamination with the base material.

References

1. D. N. Harkunov, P. I. Kornyk. Types of friction and wear. Operational damage of machine parts: monograph.—Lviv: LSHA. 2023.-

S. 343.

2. Measurement of Grinding Temperature of Active Grains Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber / T. Ueda, H. Tanaka, A. Torü, T. Matsuo // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. — 1993. — Vol. 42. no. 1. — P. 405-408.

3. Usov A. V., Batyren A. A. Mathematical modeling of the control processes of covered structural elements based on singular integral equations. // *Problems of machine building*. — 2010. — Vol. 13. No. 1. — P. 65-75.

4. Modeling of systems: monograph G, A, Oborsky. A, F, Dashchenko, A. V. Usov, D. V. Dmytryshp.—Odessa: Astroprint, 2013. —P. 664.

5. Balokhonov R.R. Surface layers and internal interface boundaries in heterogeneous materials: monograph Edited by V, E, Panin. — Kyiv: Publishing House of SB RAS, 2006, —S. 520.

6. Popoi G, Ya, Concentration of elastic tension near the cutting dies. thin included and reinforced. — Kyiv: Nauka, 1982, — P. 344, —

7. Storozhen V, P., Causes and patterns of gradual failures of the main tribotechnical objects of the ship's power system and increasing their resource, — Odessa: Storozhen-VP, 2001. — P. 341,

8. Hotz A.N. The method of calculation of the crankshaft according to the data of fatigue teSTE // *Transport, ecology - sustainable development: Reports of the 12th scientific and technical conference with international participation*. - Varna: TU Publishing House, 2006. - T. 13. - C. 223–227.

РЕФЕРАТИ

***Богач В.М., Парменова Д.Г., Обертюр К.Л.* Математична модель руху мастила по дзеркалу циліндра**

Публікація присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності роботи суднових дизелів шляхом вивчення процесів мащення циліндрів.

Розглянуто одночасний рух рідкої плівки потоку мастила і газу в тому випадку, коли останній є турбулентним. Показана перспектива практичного застосування двофазного газорідного руху плівки, особливо в тому ж напрямку, коли проявляється стабілізуючий ефект.

Кількісний опис такого руху вважається вичерпним, якщо визначені компоненти вектора швидкості, тиск масла і товщина плівки. Ці характеристики отримують шляхом вирішення основних рівнянь механіки суцільних середовищ, включаючи рівняння передачі імпульсу, неперервності та макроскопічного балансу.

Встановлено, що витрата мастила в плівці, що стікає по дзеркалу циліндра під дією сили тяжіння визначається співвідношенням його ваги, в'язкості й сил, що діють на поверхні розділу газ-рідина.

Аналітичні залежності вказують на той факт, що вимушений рух газу істотно впливає на рух плівки, при цьому однаковий напрямок руху газу й мастила (період руху поршня до н.м.т.) робить на двофазний рух стабілізаційний вплив.

У випадку ж зустрічного руху газу і мастила (рух поршня в напрямку в.м.т.) різке зростання перепаду тиску приводить у результаті до явища «захлинання», при якому відносно тонкий шар мастила захоплюється газом, що рухається йому назустріч.

Ключові слова: судновий дизель, система мащення, змащувальний канал, процес мащення, циліндр, поршень, поршневе кільце.

***Bogach V.M., Parmenova D.G., Obertyur K.L* Mathematical model of lubricant movement on the cylinder mirror**

The publication is devoted to solving the current problem of increasing the efficiency of marine diesel engines by studying cylinder lubrication processes.

The simultaneous movement of the liquid film of the flow of lubricant and gas in the case when the latter is turbulent is considered. The prospect of practical application of the twophase gasliquid movement of the film is shown, especially in the same direction when the stabilizing effect is manifested.

A quantitative description of such movement is considered comprehensive if the components of the velocity vector, oil pressure, and film thickness are determined. These characteristics are obtained by solving the basic equations of solid mechanics, including the equations of momentum transfer, continuity, and macroscopic balance.

It was established that the consumption of lubricant in the film flowing down the mirror of the cylinder under the influence of gravity is determined by the ratio of its weight, viscosity and forces acting on the gas-liquid interface.

Analytical dependences indicate the fact that the forced movement of gas significantly affects the movement of the film, while the same direction of movement of gas and lubricant (piston movement period to n.m.t.) has a stabilizing effect on the twophase movement.

In the case of counter movement of gas and lubricant (movement of the piston in the direction of the v.m.t.), a sharp increase in the pressure difference results in the phenomenon of "choking", in which a relatively thin layer of lubricant is captured by the gas moving towards it .

Key words: marine diesel, lubrication system, lubrication channel, lubrication process, cylinder, piston, piston ring.

***Будаишко В.В., Заблоцький Ю.В.* Аналіз термодинамічних циклів охолодження природного газу під час його транспортування морськими суднами-газовозами**

Розглянуті питання щодо визначення найбільш оптимальних термодинамічних циклів охолодження природного газу під час його транспортування морськими суднами-газовозами. Визначено, що в останнє десятиріччя природний газ розглядається як основне джерело енергії для багатьох типів енергетичних установок. Скритий «недолік» природного газу – необхідність його транспортування від міста видобутку до споживачів. Найбільш ефективною технологією, яка дозволяє транспортувати великі об'єми природного газу – є його зрідження. Зріджений природний газ – криогенна рідка багатоконпонентна суміш легких вуглеводнів, основу якої становить метан. Транспортування зрідженого природного газу може здійснюватися або континентальними шляхами – трубопровідним способом, або океанськими / морськими – суднами-газовозами. Зазначено, що транспортування природного газу в зрідженому стані є значно економічним, ніж трубопровідний, починаючи з відстаней до споживачів газу більше 2000...3000 км, але потребує більш високих початкових вкладень в інфраструктуру, ніж трубопровідний. Основну вартість в цьому випадку складає не транспортування, а вантажно-розвантажувальні роботи. До переваг цього методу відноситься також той факт, що зріджений газ більш безпечний під час перевезення та зберігання, ніж стислий. Крім того, це єдина технологія для трансокеанських перевезень, яку здійснюють судна-газовози. Розглянуті та визначені основні переваги та недоліки основних циклів охолодження зрідженого природного газу: одноступеневого та багатоступеневого. Розглянуто каскадний процес отримання зрідженого природного газу. Наведені криві охолодження природного газу та чистих холодоагентів під час використання одноступеневих та триступеневих циклів охолодження. Розглянуто цикл охолодження природного газу зі змішаним холодоагентом. Визначено, що під

час перевезення ЗПГ суднами-газовозами найбільш ефективною технологією його зрідження з економічної, енергетичної та екологічної точок зору є використання циклів охолодження зі змішаним холодоагентом. Констатовано, що зріджений природний газ є найбільш перспективним паливом, що в найближчий час буде використовуватися у всіх видах енергетики, в тому числі суднової.

Ключові слова: багатоступеневий цикл охолодження, ефективність транспортування, зріджений природний газ, морський транспорт, одноступеневий цикл охолодження, перевезення зрідженого природного газу, судногазовоз, термодинамічні цикли охолодження.

Budashko V.V., Zablotzkyi Y.V. Analysis of thermodynamic cycles of natural gas cooling during its transportation by marine gas carriers

Issues regarding the determination of the most optimal thermodynamic cycles of natural gas cooling during its transportation by marine gas carriers are considered. It is clear that in the last decade, natural gas is considered as the main source of energy for many types of power plants. The hidden "disadvantage" of natural gas is the need to transport it from the production city to consumers. The most effective technology that allows transporting large volumes of natural gas is its liquefaction. Liquefied natural gas is a cryogenic liquid multicomponent mixture of light hydrocarbons, the basis of which is methane. Transportation of liquefied natural gas can be carried out either by continental routes - pipeline method, or by ocean / sea - gas carriers. It is noted that liquefied natural gas transportation is significantly more economical than pipeline transportation, starting from distances to gas consumers of more than 2,000...3,000 km, but requires higher initial infrastructure investments than pipeline transportation. The main cost in this case is not transportation, but loading and unloading operations. Another advantage of this method is the fact that liquefied gas is safer to transport and store than compressed gas. In addition, it is the only technology for transoceanic transportation carried out by gas carriers. The main advantages and disadvantages of the main cooling cycles of liquefied natural gas: single-stage and multi-stage are considered and determined. The cascade process of obtaining liquefied natural gas is considered. The cooling curves of natural gas and pure refrigerants when using single-stage and three-stage cooling cycles are given. The cooling cycle of natural gas with a mixed refrigerant was considered. It was determined that during the transportation of LNG by gas carriers, the most effective technology for its liquefaction from the economic, energy and environmental points of view is the use of cooling cycles with a mixed refrigerant. It was established that liquefied natural gas is the most promising fuel that will be used in all types of energy, including shipping, in the near future.

Key words: gas carrier, liquefied natural gas, multi-stage cooling cycle, sea transport, single-stage cooling cycle, thermodynamic cooling cycles, transportation efficiency, transportation of liquefied natural gas.

Козицький С. В. Застосування наноматеріалів для збільшення надійності та ресурсу суднових установок

Наноматеріал ХАДО (Україна) утворюється сумішшю нанорозмірних оксидів Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 та їх гідратів, або Al_2O_3 , MgO і Fe_2O_3 чи Al_2O_3 , CaO та Fe_2O_3 і їх гідратів. Введення ревіталізанта до мастильних матеріалів приводить до формування металокерамічного градієнтного криття на металевих деталях механізмів. Використання ревіталізанта ХАДО усуває овальності та конусності на робочій поверхні циліндрів двигуна до 0,15 мм; повністю усуває подряпин і мікрозадирів на робочій поверхні циліндрів глибиною до 0,03 мм; підвищує ресурс пар тертя в 1,5 ~ 2,5 рази; економить палива до 18%; у викидних газах знижує вміст CO і HC від 2 до 10 разів.

Наноматеріал Nano Vit Motor Renovator (NVMR) є сумішшю нанодисперсних порошків SiO_2 - 80%, Al_2O_3 - 10% та інтеркальованного графіту - 10%. У зоні тертя, де виникають високі напружень, відбувається розрив зв'язків алюміній-кисень у триоксиді алюмінію, що викликає заміщення атомів заліза атомами алюмінію на поверхні. Утворена плакувальна плівка представляє собою твердий розчин зі значною пластичністю та міцністю, а частинки графіту на поверхнях тертя беруть участь в утворенні зносостійкого шару, який утримує мастильний матеріал. Випробування на реальному двигуні при високих навантаженнях показали, що обробка NVMR призводить до зниження швидкості зносу поршневих кілець в 3 рази, а вкладишів підшипників колінчастого валу в 5 і більше разів, приріст максимальної потужності двигунів на 2-3% та відповідного зменшення витрат палива на 5-8% та зниження рівня шуму в діапазоні від 1,5 до 2 разів.

Дія наноматеріалу NanoI полягає у формуванні на поверхнях тертя окислювально-відновної реакції, що зменшує кількість іонів міді в добавці з подальшим відкладенням частинок міді на поверхні металу. Утворений захисний наночастинок міді не дає водню руйнувати контактні поверхні. захищає підшипника кочення від утворення білих поверхневих тріщин у 14 раз у порівнянні з традиційними присадками. У суднових натурних випробуваннях спостерігалось зниження втрат на тертя на 4%, зниження витрати палива до 3% і збільшення крутного моменту на 1% ,

Ефективна дія наноматеріалів при утворенні міцної та пластичної плакувальної плівки може бути пояснена процесами самоорганізації у нерівноважних системах та переносом електронів з наночастинок на металічну поверхню.

Ключові слова: наноматеріали, трибопокриття, ефективність, збільшення ресурсу

Kozytskyi S.V. Application of nanomaterials to increase reliability and resource of ship mechanisms

Khado nanomaterial (Ukraine) is formed by a mixture of nanosized oxides Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 and their hydrates, or Al_2O_3 , MgO and Fe_2O_3 , or Al_2O_3 , CaO

and Fe_2O_3 and their hydrates. The introduction of revitalizant to lubricants leads to the formation of a metal-ceramic gradient coating on the metal parts of the mechanisms. The use of Khado revitalizant eliminates ovality and conicity on the working surface of engine cylinders up to 0.15 mm; completely eliminates scratches and microburrs on the working surface of cylinders with a depth of up to 0.03 mm; increasing the resource of friction pairs by 1.5 ~ 2.5 times; saving fuel by up to 18%; reduction of CO and HC in exhaust gases from 2 to 10 times

Nano Vit Motor Renovator nanomaterial is a mixture of nanodispersed powders SiO_2 - 80%, Al_2O_3 - 10% and thermally split intercalated graphite - 10%. In the friction zone, where high stresses occur, aluminum-oxygen bonds in aluminum trioxide are broken and cause replacement of iron atoms by aluminum atoms on the surface. The formed coating film is a solid solution with significant plasticity and strength, and graphite particles on the friction surfaces participate in the formation of a wear-resistant layer that holds the lubricant. Tests on a real engine at high loads showed that NVMR processing leads to a reduction in the rate of wear of piston rings by 3 times, and the wear of crankshaft bearing liners by 5 or more times, an increase in the maximum power of engines by 2-3%, a decrease in fuel consumption engine loads is 5 - 8%, noise level reduction in the range from 1.5 to 2 times.

The action of the Nanol nanomaterial consists in the formation of a redox reaction on friction surfaces, which reduces the amount of copper ions in the additive with subsequent deposition of copper particles on the metal surface. The formed protective nanolayer of copper atoms prevents hydrogen from destroying the contact surfaces. In ship full-scale tests, a 4% reduction of friction losses, a 3% reduction in fuel consumption and a 1% increase in torque was observed, the appearance of white surface cracks in the bearings is observed 14 times later.

The effective effect of nanomaterials in the formation of a strong and plastic protecting layer can be explained by self-organization processes in non-equilibrium systems and the transfer of electrons from nanoparticles to the metal surface.

Keywords: nanomaterials, tribocoating, efficiency, resource increase

Колегасє М.О., Бражнік І.Д. Забезпечення процесу інертизації вантажних приміщень нафтових танкерів за допомогою системи інертних димових газів

Розглянуті питання щодо забезпечення процесу інертизації вантажних трюмів танкерів за допомогою системи інертних газів. Визначено, що експлуатація танкера завжди має на увазі використання процесу інертизації його вантажних танків. Реалізація цього процесу на судні забезпечує головні вимоги до створення та підтримання безпечної з погляду виникнення пожеж та вибухів атмосфери у вантажних приміщеннях. На всіх танкерах цей процес є попереднім перед операцією отримання нового вантажу. Використання системи інертних газів є обов'язковим і з 1978 р. регламентується

вимогами SOLAS. Одночасно з цим, під час проведення інертизації вантажних приміщень виникають технічні, технологічні та метрологічні труднощі її забезпечення. Як розв'язання цієї проблеми запропоновано використання процесу примусової інертизації трюму за рахунок нової технології подачі інертних газів у трюм судна. Аналіз такого процесу інертизації вантажного танку танкера було проведено на підставі результатів теоретичних та експериментальних досліджень, які були виконані під час експлуатації судна, що призначено для перевезення сирої нафти.

Встановлено, що створення безпечної атмосфери з пожежної та вибухової точки зору всередині вантажного танку танкера під час проведення вантажних операцій може досягатися за більш короткий період її виконання. Використання примусових механізмів збільшення швидкості процесу масообміну повітря та інертних газів базується на впровадженні технології подання інертних газів у вигляді струменів. Показано, що за умовою інертизації вантажного приміщення примусова подача інертних газів повинна ґрунтуватися на розподілі поля температур і структурі потоку, що рухається з невисокими швидкостями всередині жорстких стінок танку, що обмежують його. Подача струменів інертних газів в ядро потоку, що витікає, призводить до турбулізації сталої течії в середній частині вантажного приміщення танкера і скорочує час процесу його інертизації. Визначено, що на танкерах доцільно використовувати примусову подачу інертних газів до вантажного приміщення судна з кутом розпилу в сопловій насадці рівним 30° . В цьому випадку через збільшення зони конвективної взаємодії інертних газів з повітрям значення концентрації кисню всередині трюму в цьому випадку будуть найменшими. Доведено, що використання цієї технології призводить до скорочення часу інертизації обробки трюмів танкера на 56,47 %.

Ключові слова: вантажний трюм, генератор інертного газу, експлуатація танкерів, інертизація вантажних танків, інертний газ, концентрація кисню, морський транспорт, танкер, час інертизації.

Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Ensuring the process of inertization of cargo spaces of oil tankers using a system of inert flue gases

Considered issues related to ensuring the process of inerting cargo holds of tankers using the inert gas system. It was determined that the operation of a tanker always implies the use of the process of inerting its cargo tanks. The implementation of this process on the ship provides the main requirements for creating and maintaining a safe atmosphere in cargo spaces from the point of view of the occurrence of fires and explosions. On all tankers, this process is preliminary before the operation of receiving a new cargo. The use of an inert gas system is mandatory and has been regulated by SOLAS since 1978. At the same time, technical, technological and metrological difficulties arise during the inertization of cargo attachments. As a solution to this problem, the use of the process of forced

inertization of the hold due to the new technology of supplying inert gases to the ship's hold is proposed. The analysis of this process of inertization of the cargo tank of the tanker was carried out on the basis of the results of theoretical and experimental studies that were carried out during the operation of the vessel intended for the transportation of crude oil. It was established that the creation of a safe atmosphere from the point of view of fire and explosion inside the cargo tank of a tanker during cargo operations can be achieved in a shorter period of its execution. The use of forced mechanisms to increase the speed of the mass exchange process of air and inert gases is based on the introduction of the technology of supplying inert gases in the form of jets. It is shown that under the condition of inertization of the cargo space, the forced supply of inert gases should be based on the distribution of the temperature field and the structure of the flow moving at low speeds inside the rigid walls of the tank, which limit it. Supplying jets of inert gases into the core of the outflowing flow leads to turbulence of the steady flow in the middle part of the cargo space of the tanker and shortens the time of its inertization process. It was determined that on tankers it is expedient to use a forced supply of inert gases to the cargo space of the vessel with a spray angle in the nozzle equal to 30° . In this case, due to the increase in the zone of convective interaction of inert gases with air, the oxygen concentration inside the hold will be the lowest in this case. It has been proven that the use of this technology leads to a reduction in the time of inertization of tanker holds by 56.47 %.

Key words: cargo hold, inert gas generator, inert gas, inertization of cargo tanks, inertization time, operation of tankers, oxygen concentration, sea transport, tanker

***Корх М.В.* Властивості та застосування вуглецевих нанотрубок для збільшення ресурсу судна та його обладнання**

У даній роботі досліджено перспективи застосування вуглецевих нанотрубок для збільшення ресурсу судна та його обладнання. Представлено фундаментальний інтерес до цього об'єкта обумовлений, насамперед, його незвичайною структурою та широким діапазоном зміни фізико-хімічних властивостей залежно від хіральності. Встановлені важливі незвичайні властивості вуглецевих нанотрубок та їх модифікацій: підвищення міцності та легкості матеріалів; покращення теплопровідності.

У роботі описані методи одержання вуглецевих нанотрубок з різною структурою та властивостями для різноманітних застосувань: метод хімічного осаження; метод дугового розряду; метод лазерного випаровування.

Проведено аналіз застосування вуглецевих нанотрубок для збільшення ресурсу судна та його обладнання. Встановлено широке сучасне застосування композитних матеріалів у напрямку суднобудування — особливо під час створення високошвидкісних, пасажирських та рибальських суден. Головними якостями яких є: зносостійкість та стійкість до дії агресивних середовищ.

Були представлені експериментальні дослідження Норвезької компанії Advanced Marine Coatings, що спеціалізується на розробці покриттів для морських судів, яка представила нове покриття, у складі якого вперше використані вуглецеві нанотрубки Baytubes®.

У роботі висвітлено вплив нанотрубок на ефективність їх використання в моторних мастилах і охолоджуючих сумішах для підвищення ресурсу механічних вузлів тертя морських транспортних систем. Перехід від присадок мікронних розмірів до нанорозмірних широко починають впроваджуватися у техніці.

Стаття окреслює перспективи подальших досліджень фахівців, які прогнозують зростання даної галузі в найближчі роки. Буде спостерігатися значне зростання виробничих можливостей, що забезпечить істотні зміни в морських галузях, машинобудуванні, оптоелектроніці, мікроелектроніці. Ця технологія відкриває нові можливості для інженерів та дослідників, які працюють над розвитком більш ефективних та стійких морських транспортних засобів.

Ключові слова: наноматеріали, вуглецеві нанотрубки, властивості, покриття.

Korkh M.V. Properties and Application of Carbon Nanotubes for Increasing the Lifespan of Ships and Equipment

This study explores the prospects of using carbon nanotubes (CNTs) to enhance the lifespan of ships and their equipment. The fundamental interest in this material is primarily due to its unique structure and a wide range of physicochemical properties depending on chirality. Important and unusual properties of carbon nanotubes and their modifications have been identified, including: increased strength and lightweight materials; improved thermal conductivity.

The paper describes methods for obtaining CNTs with different structures and properties for various applications, including chemical vapor deposition, arc discharge, laser ablation, and chemical etching.

An analysis of the application of CNTs for increasing the lifespan of ships and equipment is provided. The modern use of composite materials in shipbuilding, especially for high-speed, passenger, and fishing vessels, is highlighted. The qualities of wear resistance and resistance to aggressive environments make composite materials attractive for ship construction, enhancing safety and cost-effectiveness.

Experimental research from the Norwegian company Advanced Marine Coatings is discussed, presenting a new coating incorporating carbon nanotubes Baytubes®.

The impact of nanotubes on the efficiency of their use in motor oils and cooling mixtures to enhance the lifespan of frictional mechanical components in maritime transport systems is highlighted. The transition from micron-sized additives to nanosized ones is being increasingly implemented in technology.

The paper outlines perspectives for further research in this field, anticipating substantial growth in production capabilities, leading to significant changes in maritime industries, shipbuilding, optoelectronics, and microelectronics. This technology opens new possibilities for engineers and researchers working on the development of more efficient and durable maritime transportation means.

Keywords: nanomaterials, carbon nanotubes, properties, coatings.

Latysh O.M. Prospects for the application of nanomaterials and nanotechnologies in the marine industry

The use of nanotechnology allows to reach a qualitatively new level of solving technical problems. Nanotechnology is already used in various sectors of the marine industry. It:

1. Low-temperature welding electrodes, which contain nanoparticles of titanium carbide (TiC), have a very low operating temperature. Such low-temperature welding electrodes eliminate cracks in the material during welding, demonstrate tensile strength both during welding and after welding, and form a strong molecular bond between two metals.

2. The use of nanofuel additives is one of the ways to reduce emissions, reduce fuel consumption and increase engine performance. Metal nanopowders are added to both diesel fuel and biodiesel fuel.

3. Thanks to nanotechnology, new paints are created that are highly resistant to corrosion and other harmful effects of the environment. In addition, the use of nanotechnology in the paint industry prevents algae from sticking to the hull and extends the life of ships.

4. Nanotechnology creates nanomaterials that absorb very large amounts of vibrational energy, so the vibration is well controlled. Acoustic shock absorbers, like vibration shock absorbers, absorb sound energy, despite their lightness and thinness.

5. Application of nanofiltration to remove harmful chemicals in water, to destroy harmful organisms, remove heavy metals, purify wastewater, decolorize and remove impurities. Nanofilters can be used to obtain fresh water from salty seawater.

6. Nanotechnologies make it possible to improve the electrical capacity and capacity of batteries, provide an opportunity to increase charging cycles and the safety of modern electricity storage devices.

7. Nanomaterials and nanotechnology enable us to significantly reduce friction and wear in mechanisms compared to traditional materials and technologies.

Key words: nanomaterials, nanotechnologies, fuel, nanofilters, accumulators, friction.

Латиш О.М. Перспективи застосування наноматеріалів та нанотехнологій в морський галузі

Використання нанотехнологій дозволяє вийти на якісно новий рівень

вирішення технічних проблем. Нанотехнології вже мають застосування в різних секторах морської промисловості. Це:

1. Низькотемпературні зварювальні електроди, які містять наночастинки карбїду титану (TiC), мають дуже низьку робочу температуру. Такі низькотемпературні зварювальні електроди усувають тріщини в матеріалі при зварюванні, демонструють міцність на розрив як під час зварювання, так і після зварювання, утворюють міцний молекулярний зв'язок між двома металами.

2. Застосування нанодобавок до палива є одним із способів зменшення викидів, зниження витрат палива та підвищення продуктивності двигуна. Нанопорошки металів додають як до дизельного палива, так і до біодизельного палива.

3. Завдяки нанотехнології створюють нові фарби, які мають високу стійкість до корозії та інших шкідливих впливів навколишнього середовища. Крім того, використання нанотехнології в лакофарбовій промисловості запобігає прилипанню водоростей до корпусу і продовжує термін служби кораблів.

4. Нанотехнології створюють наноматеріали, які поглинають дуже велику кількість коливальної енергії, таким чином вібрація добре контролюється. Акустичні амортизатори, як і амортизатори вібрації, поглинають звукову енергію, незважаючи на їх легкість і тонкість.

5. Застосування нанофільтрації для видалення шкідливих хімічних речовин у воді, для знищення шкідливих організмів, видалення важких металів, очищення стічних вод, знебарвлення та видалення забруднень. Нанофільтри можна використовувати для отримання прісної води з солоної морської води.

6. Нанотехнології дозволяють покращити електроємність та потужність акумуляторів, дають можливість збільшення циклів зарядки та безпеку сучасних накопичувачів електроенергії.

7. Наноматеріали та нанотехнології дають нам можливість значно зменшити тертя та зношування в механізмах порівняно з традиційними матеріалами та технологіями.

Ключові слова: наноматеріали, нанотехнології, паливо, нанофільтри, акумулятори, тертя.

Матейко О.В. Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів

Розглянути питання щодо оптимізації процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів. Визначено, що транспортування вантажів суднами-газовозами завершується обов'язковою інертизацією вантажних танків, мета якою – зниження в них концентрації кисню до рівню, за яким неможливо виникнення самозаймання або вибуху залишків вантажу. Також зазначено, що одним з найбільш поширених способів інертизації є використання азоту,

отримання якого забезпечують спеціальні генератори, які через вуглецеву адсорбцію виділяють азот з повітря. Інертизація вантажних танків суден-газовозів виконується за каскадною, напівкаскадною та паралельною схемами. Завданням дослідження було визначення оптимальної схеми інертизації вантажних танків суден-газовозів з різною вантажомісткістю. Дослідження щодо визначення найбільш оптимальної схеми інертизації вантажних танків виконувались на основі статистичних даних щодо забезпечення даної операції на суднах-газовозах різної вантажомісткості. Обробка та аналіз інформації з інертизації вантажних танків виконувався для суден-газовозів, обсяги вантажних танків яких становили 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³, 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³, 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³. Під час проведення досліджень дані судна були скомпоновані в три групи: менше ніж 50000 м³, 50000...100000 м³, більше за 100000 м³. Усі судна виконували перевезення одного й того ж вантажу між портами Близького Сходу та Китаю. На всіх суднах було можливе виконання каскадної, напівкаскадної та паралельної схем інертизації. Експериментально встановлено, що: для суден вантажомісткістю до 100000 м³ найбільш оптимальною схемою інертизації є каскадна, далі слідують паралельна та напівкаскадна; для суден вантажомісткістю більш за 100000 м³ найбільш оптимальною схемою інертизації є паралельна, далі слідують каскадна та напівкаскадна. Вибір схеми інертизації залежить від рейсового завдання, вимог берегової адміністрації та можливостей порту-вивантаження щодо забезпечення судна азотом, а також характеристик суднової системи генерації інертних газів.

Ключові слова: витрата азоту, генератор інертних газів, ефективність інертизації, інертизація вантажних танків, морський транспорт, судно-газовоз, транспортування вантажів суднами-газовозами, час інертизації.

Matieiko O. Optimization of the process of inertization of cargo tanks of gas carriers

Consider the issue of optimization of the process of inertization of cargo tanks of gas carriers. It was determined that the transportation of cargo by gas tankers ends with mandatory inertization of cargo tanks, the purpose of which is to reduce the concentration of oxygen in them to a level at which spontaneous ignition or explosion of cargo residues is impossible. It is also stated that one of the most common methods of inertization is the use of nitrogen, which is obtained by special generators that release nitrogen from the air through carbon adsorption. Inertization of cargo tanks of gas carriers is carried out according to cascade, semi-cascade and parallel schemes. The task of the study was to determine the optimal scheme of inerting cargo tanks of gas carriers with different cargo capacities. Research on determining the most optimal scheme of inertization of cargo tanks was carried out on the basis of statistical data on the provision of this operation on gas carriers of different cargo capacities. Processing and analysis of information on inertization of cargo tanks was carried out for gas carriers, the volumes

of which were 38646 m³, 42427 m³, 42563 m³, 72312 m³, 88248 m³, 88274 m³, 88302 m³, 145673 m³, 146817 m³, 162233 m³. During the research, these vessels were divided into three groups: less than 50,000 m³, 50,000...100,000 m³, more than 100,000 m³. All vessels carried the same cargo between ports in the Middle East and China. On all ships, it was possible to implement cascade, semi-cascade and parallel inerting schemes. It was experimentally established that: for ships with a cargo capacity of up to 100,000 m³, the most optimal inerting scheme is cascade, followed by parallel and full-cascade; for vessels with a cargo capacity of more than 100,000 m³, the most optimal inertization scheme is parallel, followed by cascade and half-cascade. The choice of the inertization scheme depends on the voyage task, the requirements of the coastal administration and the capabilities of the unloading port to supply the ship with nitrogen, as well as the characteristics of the ship's inert gas generation system.

Key words: cargo transportation by gas carrier ships, gas carrier ship, inert gas generator, inerting time, inertization efficiency, inertization of cargo tanks, nitrogen consumption, sea transport.

Половинка Е.М., Табулінський І.М. Швидкісна характеристика системи паливоподачі **common rail** двигунів **rt-flex**

Наведено огляд досліджень у галузі паливоподачі дизелів. Виявлено тенденцію переходу на акумуляторні системи з електронним керуванням.

Проведено детальний аналіз конструктивних та функціональних особливостей акумуляторних систем паливоподачі Common Rail двигунів RT-Flex. Складено розрахункову схему системи для імітаційного моделювання.

Виконано розрахункове дослідження процесу впорскування на режимах швидкісної характеристики. Як умови прийнято постійне значення кута відкриття керуючого клапана, що склало 12 оПКВ, і змінна частота обертання $n = 68 - 149$ об/хв для 6 режимів. Швидкісна характеристика представлена формі узагальнених залежностей та детального опису процесів в елементах системи.

Процеси в БУВ, що надає визначальний вплив на характеристики паливоподачі, описані зміною тиску палива в робочій та буферній порожнинах, а також динамікою переміщення поршня, що дозує.

Встановлено, що за умов постійного кута відкриття керуючого клапана зі зростанням частоти обертання скорочується перебіг ДП: $h_p = 13,5 - 6,36$ мм при $n = 68 - 149$ об/хв. Це, своєю чергою, призводить до зменшення циклової подачі: діапазон зміни q_c становив $30,9 - 13,39$ г.

Виявлено умови, що визначають характер переміщення ДП. Оскільки ДП не має кінематичного зв'язку з елементами двигуна, його рух визначається рівнодіючим тиском палива в робочій та буферній порожнинах БУВ. Розгін ДП супроводжується падінням тиску в буферній порожнині БУВ з 800 до 764 бар. Протягом основного впорскування рб.п залишається в діапазоні 764-775 бар. При реверсі ДП спостерігається підйом рб.п до 848

бар. Зворотний хід ДП йде з рб.п 848-830 бар.

Тиск у робочій порожнині при підключенні форсунок падає з 800 до 633 бар, зберігаючись у діапазоні 633 – 640 бар протягом основного періоду впорскування палива. Заклучна фаза паливоподачі супроводжується підвищенням рр.п до 700 бар. На ділянці зворотного ходу ДП та заповнення РП рр.п змінюється незначно, залишаючись на рівні 680 бар.

Визначено показники руху ДП в залежності від кута обертання колінчастого вала при різних частотах його обертання.

Ключові слова: система паливоподачі Common Rail, гідродинаміка, швидкісна характеристика.

Polovynka E.M., Tabulinskyi I.M. Speed characteristics of the fuel supply system of the common rail rt-flex engines

An overview of research in the field of diesel fuel delivery is presented. The trend of switching to accumulate systems with electronic control has been revealed.

A detailed analysis of the structural and functional features of Common Rail accumulate fuel supply systems of RT-flex engines was carried out. Compiled calculation scheme of the system for simulation modeling.

A computational study of the injection process at the speed characteristic modes was performed. As conditions, a constant value of the opening angle of the control valve, which was 12оCA, and a variable rotation frequency $n = 68 - 149$ rpm for 6 modes were adopted. The speed characteristic is presented in the form of generalized dependencies and a detailed description of the processes in the system elements.

Processes in the fuel pump, which has a decisive influence on the characteristics of the fuel delivery, are described by the change in fuel pressure in the working and buffer cavities, as well as the dynamics dosing piston (QP Quantity Piston) movement.

It was established that under conditions of constant opening angle of the control valve, with increasing rotation frequency, the stroke of the QP decreases: $h_p = 13.5 - 6.36$ mm at $n = 68 - 149$ rpm. This, in turn, leads to a decrease in the cyclic delivery: the range of q_c change was 30.9 - 13.39 g.

The conditions that determine the nature of the motion of QP have been identified. Since the QP has no kinematic connection with the engine elements, its movement is determined by the pressure forces of the fuel in the working (WC) and buffer (BC) cavities of the Injection Control Unit-ICU. Acceleration of the DP is accompanied by a drop in the pressure in the buffer cavity of the ICU pb.c from 800 to 764 bar. During the main injection, pressure remains in the range of 764-775 bar. When the DP is reversed, a rise in pressure to 848 bar is observed. The return stroke of the DP goes from pb.c equal to 848-830 bar.

The pressure in the working cavity pw.c when the injectors are connected drops from 800 to 633 bar, remaining in the range of 633 - 640 bar during the

main period of fuel injection. The final phase of fuel supply is accompanied by an increase in pressure $p_{w.c}$ to 700 bar. In the section of the return stroke of the DP and filling of the WP, the pressure changes slightly, remaining at the level of 680 bar.

The parameters of DP movement depending of crankshaft rotation angle at different frequencies of its rotation are determined.

Keywords: Common Rail fuel delivery system, hydrodynamics, speed characteristics.

Сазін С.В., Куропятник О.А. **Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива**

Розглянуті питання щодо визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива. Зазначено, що функціонування суднових двигунів внутрішнього згоряння (як найбільш розповсюдженого типу теплових двигунів) неможливе без використання палива, основним видом якого є рідке паливо нафтового походження. Одночасно з цим всі провідні дизелебудівні фірми займаються питаннями використання в дизелях альтернативних видів палива, до одного з яких відноситься паливо біологічного походження. Зазначено, що використання біопалива змінює перебіг робочого циклу в циліндрі дизеля, насамперед процес згоряння. Це призводить до зміни експлуатаційних показників дизелів, при цьому виникає завдання визначення фаз паливоподачі (насамперед кута випередження подачі палива), за якими зміна цих показників підвищує ефективність роботи дизеля та покращує його екологічні показники. Ви рішення цієї задачі можливе шляхом проведення експериментів на основних експлуатаційних режимах роботи дизеля. Завданням досліджень було визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива. Дослідження проводились на судовому дизелі 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group та трьох суднових дизелях 6DL-16 Daihatsu Diesel, які виконували функції головного та допоміжного двигунів в складі судової енергетичної установки балкера водотоннажністю 68340 тонн. Експлуатація дизелів здійснювалася з використанням палив нафтового походження DMA та RMG380, а також біодизельного палива B10, яке включає 90 % дизельного палива, а також 10 % палива біологічного походження FAME. Доведено, що підвищення ефективності використання біопалива полягає не тільки у виборі його оптимального складу, але також у визначенні оптимальних кутів випередження подачі біопалива в циліндр дизеля. Встановлено, що залежності основних експлуатаційних показників роботи як двотактних, так і чотиритактних дизелів від кута випередження подачі палива мають синусоїдальний вигляд та характеризуються наявністю оптимуму – мінімальних значень температури випускних газів, концентрації оксидів азоту у випуск-

них газах, питомої ефективної витрати палива, а також максимального значення тиску згорання. Оптимальний кут випередження подачі біопалива визначається експериментальним шляхом та залежить від характеристик дизеля.

Ключові слова: біодизельне паливо, екологічна стійкість, екологічні показники, експлуатація суднових дизелів, енергетичні показники, морський транспорт, паливо для суднових дизелів, паливо нафтового походження, судновий двигун внутрішнього згорання.

Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determining the optimal operating modes of marine internal combustion engines when using biodiesel fuel

Considered issues related to determining the optimal operating modes of marine internal combustion engines when using biodiesel fuel. It is noted that the functioning of ship's internal combustion engines (as the most widespread type of heat engines) is impossible without the use of fuel, the main type of which is liquid fuel of petroleum origin. At the same time, all leading diesel manufacturing companies are dealing with the use of alternative types of fuel in diesel engines, one of which includes fuel of biological origin. It is noted that the use of biofuel changes the course of the operating cycle in the diesel cylinder, primarily the combustion process. This leads to a change in the operational indicators of diesel engines, while the task of determining the fuel supply phases (primarily the advance angle of the fuel supply), according to which the change of these indicators increases the efficiency of the diesel engine and improves its environmental indicators, arises. Solving this problem is possible by conducting experiments on the main operating modes of diesel engines. The task of the research was to determine the optimal modes of operation of marine internal combustion engines when using biodiesel fuel. The research was conducted on the 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group marine diesel engine and three 6DL-16 Daihatsu Diesel marine diesel engines, which served as the main and auxiliary engines in the ship power plant of a bulker with a displacement of 68,340 tons. Diesel engines were operated using DMA and RMG380 petroleum-based fuels, as well as B10 biodiesel, which includes 90% diesel fuel and 10% FAME biological fuel. It has been proven that increasing the efficiency of biofuel use consists not only in choosing its optimal composition, but also in determining the optimal angles of advancement of biofuel supply into the diesel cylinder. It was established that the dependences of the main operating indicators of both two-stroke and four-stroke diesel engines on the fuel advance angle have a sinusoidal form and are characterized by the presence of an optimum - the minimum values of the exhaust gas temperature, the concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases, the specific effective fuel consumption, as well as the maximum value combustion pressure. The optimal advance angle of biofuel supply is determined experimentally and depends on the characteristics of the diesel engine.

Key words: biodiesel fuel, energy indicators, environmental indicators, envi-

ronmental sustainability, fuel for marine diesels, fuel of petroleum origin, marine internal combustion engine, marine transport, operation of marine diesels.

Сазін А.С., Заблоцький Ю.В. Аналіз ефективності морських перевантажувальних терміналів під час транспортування зрідженого природного газу суднами-газовозами

Розглянуті питання щодо ефективності морських перевантажувальних терміналів під час транспортування зрідженого природного газу суднами-газовозами. Визначено, що останніми роками попит на перевезення зрідженого природного газу значно зріс, що зумовлено глобальними змінами в енергетичній галузі. Країни по всьому світу прагнуть зменшити залежність від вуглеводнів і перейти на більш екологічно чисті види палива. Зріджений природний газ став одним із ключових компонентів цього переходу, оскільки під час його згоряння утворюється менше викидів вуглекислого газу порівняно з вугіллям і нафтою. Зазначено, що через кризу в Червоному морі та загрози для судноплавства багато компаній, що займаються транспортуванням зрідженого природного газу в країни Азії, приділяють увагу до альтернативних маршрутів навколо Африканського континенту. Щоб мінімізувати витрати та підвищити ефективність у більш тривалих перевезеннях, зростає інтерес до використання перевалочних баз. Такі бази дозволяють тимчасово зберігати або перевантажувати зріджений природний газ на інші судна-газовози, що дає змогу оптимізувати логістичні процеси та скоротити час перебування суден у морі. Зазначено, що однією зі складових процесу транспортування зрідженого природного газу є регазифікаційні термінали, які призначені для прийому зрідженого природного газу з суден-газовозів і підготовки природного газу до використання. В теперішній час як регазифікаційні термінали використовуються плавучі установки, здатні самостійно пересуватися на відстань до 2 морських миль від берегової лінії. Порівняно з наземними терміналами зрідженого природного газу плавучі установки мають низку переваг: нижчу вартість; менший термін будівництва (близько 1..1,5 років – в порівнянні з наземним терміналом 3...5 років); менша площа та морське розташування мінімізує вплив на довкілля. Надана принципова схема регазифікаційного терміналу, а також перевалочного терміналу, наведені вирази з визначення теплових потоків та втрат енергії, що виникають під час завантаження / розвантаження та зберігання зрідженого природного газу на таких терміналах. Зазначено, що специфіка роботи перевалочного терміналу зрідженого природного газу полягає в тому, що він не пов'язаний з магістральним трубопроводом, а зберігання зрідженого природного газу у резервуарах здійснюється короткими циклами. Попередня оцінка випаровування зрідженого природного газу на таких терміналах дозволяє обґрунтувати технологічні рішення щодо їх пропускної спроможності, а також кількості зрідженого природного газу, якій може на них зберігатися з метою подальшого перевантаження на інші судна-газовози.

Ключові слова: випаровування зрідженого природного газу, екологічна безпека, захист довкілля, зріджений природний газ, морський транспорт, регазифікація зрідженого природного газу, судно-газовоз, транспортування зрідженого природного газу.

Sagin A.S., Zablotzkyi Y.V. Analysis of the efficiency of marine transshipment terminals during the transportation of liquefied natural gas by gas carriers

Considered questions regarding the efficiency of marine transshipment terminals during the transportation of liquefied natural gas by gas carriers. It was determined that in recent years the demand for the transportation of liquefied natural gas has increased significantly, which is due to global changes in the energy industry. Countries around the world are striving to reduce dependence on hydrocarbons and switch to more environmentally friendly fuels. Liquefied natural gas has become one of the key components of this transition, as its combustion produces fewer carbon dioxide emissions compared to coal and oil. It is noted that due to the crisis in the Red Sea and threats to shipping, many companies involved in the transportation of liquefied natural gas to Asian countries are paying attention to alternative routes around the African continent. In order to minimize costs and increase efficiency in longer transportation, there is a growing interest in the use of transshipment bases. Such bases make it possible to temporarily store or transship liquefied natural gas to other gas-carrying ships, which makes it possible to optimize logistics processes and reduce the time the ships stay at sea. It is noted that one of the components of the liquefied natural gas transportation process are regasification terminals, which are designed to receive liquefied natural gas from gas carriers and prepare natural gas for use. Currently, floating installations capable of moving independently up to 2 nautical miles from the coastline are used as regasification terminals. Compared to land-based liquefied natural gas terminals, floating installations have a number of advantages: lower cost; shorter construction period (about 1-1.5 years – compared to 3-5 years for the ground terminal); smaller area and maritime location minimizes environmental impact. A schematic diagram of a regasification terminal and a transshipment terminal is given, expressions for determining heat flows and energy losses occurring during loading / unloading and storage of liquefied natural gas at such terminals are given. It is noted that the specificity of the liquefied natural gas transshipment terminal is that it is not connected to the main pipeline, and liquefied natural gas is stored in tanks in short cycles. A preliminary assessment of the evaporation of liquefied natural gas at such terminals allows to substantiate technological decisions regarding their throughput capacity, as well as the amount of liquefied natural gas that can be stored in them for the purpose of further transshipment to other gas carriers.

Key words: ecological safety, environmental protection, evaporation of liquefied natural gas, gas carrier, liquefied natural gas, regasification of liquefied natu-

ral gas, sea transport, transportation of liquefied natural gas.

Солодовніков В.Г., Руснак Д.Ю. Використання ультразвукової обробки палива у паливних системах суднових середньообертових дизелів

Наведені результати досліджень, щодо використання ультразвукової обробки палива у паливних системах суднових середньообертових дизелів. Визначено, що суднові середньообертові дизелі використовуються на всіх без винятку судах морського та внутрішнього водного транспорту, забезпечуючи необхідною потужністю як пропульсивний комплекс (у разі їх роботи на гвинт), також і суднову електростанцію (у разі, коли вони використовуються як приводи генераторів електричного струму). Зазначено що, під час експлуатації суднових середньообертових дизелів виникає необхідність використання високов'язких палив з високим вмістом сірки наслідком чого стає підвищений сірчистий знос циліндропоршневої групи – циліндрових втулок та поршневих кілець. Як один зі способів, що покращує процес підготовки суднових важких палив з високим вмістом сірки, запропоновано використання додаткової ультразвукової обробки. Зазначено що, цей спосіб насамперед сприяє поліпшенню дисперсних якостей палива, а явище кавітації, що супроводжує цей процес, призводить до додаткової активації його вуглеводневих складових та розщепленню C-S зв'язків. Одним із варіантів застосування ультразвукової обробки палива є дообладнання штатних систем паливопідготовки додатковими модулями, які здійснюють цей процес. Під час проведення досліджень саме таким модулем була доукомплектована система паливопідготовки дизелів 6NSD-M Nigita Power Systems, які мають номінальну потужність 480 кВт за частотою обертання валу 1450 об/хв, та входили у кількості трьох штук до складу суднової допоміжної енергетичної установки. Наведені результати експериментів по визначенню лінійного та масового зносу деталей циліндропоршневої групи під час використання палива, що піддалося різним варіантам паливопідготовки. Експериментально встановлено, що під час додаткової ультразвукової обробки палива забезпечується зниження на 63...65 % лінійного зносу циліндрових втулок, а також масового зносу поршневих кілець в порівнянні з аналогічними величинами, що отримані для дизеля, який працює на важкому паливі без додаткової підготовки. Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність застосування ультразвукової обробки сірчистих палив як додаткового методу паливопідготовки, що сприяє зниженню сірчистого зношування деталей циліндрової групи суднових середньообертових дизелів.

Ключові слова: мастило для суднових дизелів, паливо для суднових дизелів, система мащення, система паливопідготовки, сірчистий знос, судновий середньообертовий дизель, ультразвукова обробка палива, циліндропоршнева група.

Solodovnikov V.G., Rusnak D.Y. The use of ultrasonic fuel treatment in

the fuel systems of marine medium-speed diesel engines

The results of research on the use of ultrasonic fuel treatment in the fuel systems of marine medium-speed diesel engines are given. It was determined that marine medium-speed diesel engines are used on all marine and inland water transport vessels without exception, providing the necessary power as a propulsive complex (in the case of their operation on a propeller), as well as the ship's power plant (in the case when they are used as drives of electric current generators). It is noted that, during the operation of marine medium-speed diesel engines, there is a need to use high-viscosity fuels with a high sulfur content, as a result of which there is increased sulfur wear of the cylinder-piston group - cylinder sleeves and piston rings. As one of the methods that improves the process of preparing marine heavy fuels with a high sulfur content, the use of additional ultrasonic treatment is proposed. It is noted that this method primarily improves the dispersion qualities of the fuel, and the cavitation phenomenon accompanying this process leads to additional activation of its hydrocarbon components and splitting of C-S bonds. One of the options for the application of ultrasonic fuel treatment is the retrofitting of standard fuel preparation systems with additional modules that perform this process. During the research, the fuel preparation system of 6NSD-M Nigita Power Systems diesel engines, which have a nominal power of 480 kW at a shaft rotation frequency of 1450 rpm, was retrofitted with such a module, and were part of the ship's auxiliary power plant in the amount of three. The results of experiments to determine the linear and mass wear of parts of the cylinder-piston group during the use of fuel subjected to various options for fuel preparation are given. Experimentally, it was established that during additional ultrasonic fuel treatment, linear wear of cylinder liners, as well as mass wear of piston rings, is reduced by 63–65 % in comparison with similar values obtained for a diesel engine running on heavy fuel without additional preparation. Thus, the obtained results confirm the feasibility of using ultrasonic treatment of sulfur fuels as an additional method of fuel preparation, which contributes to the reduction of sulfur wear of parts of the cylinder group of marine medium-speed diesel engines.

Key words: cylinder-piston group, fuel for marine diesels, fuel preparation system, lubricant for marine diesels, lubrication system, marine medium-speed diesel, sulfur wear, ultrasonic fuel treatment.

Черемісін В.І., Ігнатенко О.А. Дизельна форсунка з керованим уприскуванням палива в циліндр

Наведен опис дослідної гідрокерованої форсунки з регульованим законом подання палива. Встановлено, що зміною тиску керованої рідини можна змінити закон подання палива у циліндр двигуна під час його роботи

Ключові слова: дизелі, форсунка, гідравлічне управління, закон подання палива.

Cheremisin V.I., Ignatenko O.A. Diesel injector with the regulated law of fuel in cylinder

In the article describes an experimental hydraulic-driven fuel injector with adjustable law of fuel supply (injection). It has been established that by changing pressure of the control (driving) liquid, it is possible to change the law of fuel supply (injection) to the engine cylinder during its operation (while it is working)

There are numerous attempts to create a special fuel equipment for obtaining various laws of fuel supply to the cylinder of the internal combustion engine.

It is more expedient to change the injection characteristic just before the spraying holes.

The purpose of this work is to obtain various laws of fuel supply on an experienced hydraulic injector with a regulated fuel supply law.

The method of changing the law of fuel supply in the experimental injector gave the ability to organise a step-by-step characteristic of fuel injection, the parameters of which can be changed widely.

An experimental study of the experienced fuel injector was carried out on the non-motorised stand.

The simplicity of the method of obtaining different laws of fuel supply allows this method to be used in any conditions using the parts of the common (standard) injector.

Keywords: engines, the injector, hydro-controlled equipment, law of fuel supply

Шестопалов К. О. Експериментальне дослідження ефективності ежектора та холодильної машини у складі суднової системи кондиціонування повітря.

Актуальність роботи пов'язана з необхідністю підвищення ефективності суднової холодильної техніки з метою зниження електроспоживання та емісії парникових газів. Показано, що вторинна низькопотенційна теплота судових енергетичних установок з температурою 85...120 °С може використовуватися для ефективної та стабільної роботи суднової ежекторної холодильної машини (СЕХМ) на озонобезпечному та негорючому холодоагенті R245fa для кондиціонування повітря та отримання холоду при $t > 8$ °С. Надзвуковий ежектор є ключовим компонентом у СЕХМ і забезпечує всмоктування, стиснення та нагнітання вторинної пари (пари з випарника) за допомогою первинної пари (пари високого тиску з генератора). Експериментально випробувано вдосконалений надзвуковий ежектор з трьома соплами та шістьма камерами змішування. Результати показали, що при роботі системи в судових умовах при параметрах навколишнього середовища, що постійно змінюються, потрібно використовувати ежектор зі змінною геометрією для забезпечення необхідної холодопродуктивності с заданою температурою кипіння t_c . Показано, що критична температура конденсації t_c^* суттєво збільшується при збільшенні як температури генерації t_g , так й

температури кипіння t_c . Тобто, при фіксованій t_c можливості роботи СЕХМ при високих температурах навколишнього середовища розширюються з ростом температури джерела теплоти. Але при цьому енергоефективність, а саме коефіцієнт ежекції та тепловий коефіцієнт COP_{therm} знижуються зі збільшенням t_g . Показано, що застосування конічно-циліндричної камери змішування у всьому визначеному діапазоні критичних температур конденсації $t_c^* = 29,0 \dots 37,5$ °C дозволяє підвищити COP_{therm} СЕХМ на величину від 17 до 32 %.

Ключові слова: суднова холодильна техніка, тепловикористовуюча суднова ежекторна холодильна машина, енергоефективність, вторинна теплота, коефіцієнт ежекції, ежектор.

Shestopalov K. O. Experimental study of the ejector efficiency and the refrigeration machine as part of the ship air conditioning system

The relevance of the work is related to the need to increase the efficiency of ship refrigeration equipment in order to reduce electricity consumption and greenhouse gas emission. It is shown that the secondary low-grade heat of ship power plants with a temperature of 85...120 °C can be used for efficient and stable operation of the ship ejector refrigeration machine (SERM) operating with the ozone-safe and non-flammable refrigerant R245fa for air conditioning and refrigeration production at $t > 8$ °C. The supersonic ejector is a key component in the SERM and provides suction, compression and injection of secondary vapor (vapor from the evaporator) by means of primary vapor (high-pressure vapor from the generator). An improved supersonic ejector with three nozzles and six mixing chambers was experimentally tested. The results showed that during the operation of the system in ship conditions with constantly changing environmental parameters, it is necessary to use an ejector with a variable geometry to ensure the necessary cooling capacity with a given boiling temperature t_c . It is shown that the critical condensing temperature t_c^* increases significantly with an increase in both the generating temperature t_g and the boiling temperature t_c . Thus, with a fixed t_c the possibility of SERM operation at high ambient temperatures are expanded with increasing of the heat source temperature. But at the same time, the energy efficiency, namely the entrainment ratio and the thermal coefficient COP_{therm} decrease with increasing in t_g . It is shown that the use of a conical-cylindrical mixing chamber in the entire defined range of critical condensing temperatures $t_c^* = 29.0 \dots 37.5$ °C results in increase of the SERM by 17...32%.

Keywords: ship refrigerating equipment, heat-driven ship ejector refrigeration machine, energy efficiency, waste heat, entrainment ratio, ejector.

Лебедев Б., Умінський С., Королькова М., Лебедева Л. Технологія підвищення довговічності ресурсопределяючих деталей двигуна внутрішнього згорання

Розглянуто можливості відновлення біметалізацією гільз циліндрів, об-

грунтування форми, геометричних розмірів, необхідної кількості канавок на робочій поверхні тертя гільз циліндрів, заповнених міддю, обґрунтовано технологічний процес виготовлення біметалізованої міддю гільзи циліндрів.

Міжнародний досвід вказує що частка відновлюваних деталей в загальному обсязі споживання запасних частин досягає в розвинених зарубіжних країнах 30-35%. Відновлення деталей, як правило, включає в себе операції нанесення шару матеріалу на зношені поверхні з метою отримання номінальних розмірів. Це створює передумови для додаткового зміцнення деталей при відновленні шляхом нанесення на швидкозношувані ділянки деталей матеріалів з зносостійкістю у багато разів вище, ніж матеріал самої деталі. Ефективність техніки визначається її здатністю виконувати задані функції і, що не менш важливо, рівнем надійності, який характеризує властивість техніки довго зберігати і, при необхідності, відновлювати свою працездатність при мінімальних витратах часу. Тому основна і найважливіша задача при експлуатації водного транспорту - повне використання надійності, а при ремонті - якісне і недороге відновлення довговічності до оптимального рівня, що забезпечує найменшу питому вартість напрацювання між ремонтами.

Тому проблема вдосконалення експлуатаційно ремонтних циклів силових агрегатів (двигунів) і технологічних процесів відновлення їх основних деталей є актуальною і від її рішення залежатиме довговічність агрегатів і рівень витрат на підтримання їх працездатності.

При застосованні, середній знос біметалізованих міддю гільз циліндрів менше в 3,4 рази в порівнянні з типовими. Застосування біметалізованих гільз циліндрів дозволить підвищити ефективну потужність на 4,8%, зменшити часову і питому витрати палива відповідно на 4,8% і 9,1%, а також знизити вміст у відпрацьованих газах оксиду вуглецю на 10% і вуглеводнів на 8% в порівнянні з двигуном зі штатними гільзами. Порівняльні експлуатаційні випробування, укомплектованих двигуном з біметалізованими гільзами циліндрів показують, що знижується лінійний знос робочої поверхні тертя гільз циліндрів в 2,7 рази; розход на 4% і збільшується тиск газів в камері згоряння в кінці такту стиснення на 6,5% в порівнянні з двигуном, укомплектованим штатними гільзами циліндрів.

Ключові слова: знос, технологія, експлуатація, гільза, відновлення, зносостійкість.

Lebediev B., Uminsky S., Korolkova M., Lebedieva L The technology of increasing the durability of resource-determining parts of the internal combustion engine

The possibility of restoration of cylinder liners by bimetalization, giving reasons of the shape, geometric dimensions, the necessary number of grooves on the working surface of the friction of the cylinder liners filled with copper is consid-

ered, the technological process of manufacturing the cylinder liner bimetallized with copper is substantiated.

International experience states that the share of renewable parts in the total consumption of spare parts reaches 30-35% in developed foreign countries. Restoration of parts, as a rule, includes operations of applying a layer of material to worn surfaces in order to obtain nominal dimensions. This creates background for additional strengthening of the parts during restoration by applying materials with a wear resistance many times higher than the material of the part itself to the fast-wearing areas of the parts. The efficiency of the equipment is determined by its ability to perform the specified functions and, no less important, the level of reliability, which characterizes the ability of the equipment to be stored for a long time and, if necessary, to restore its efficiency in minimal time. Therefore, the main and most important task in the operation of water transport is the full use of reliability, and in the case of repairs - high-quality and inexpensive restoration of durability to the optimal level, which ensures the lowest specific operating cost between repairs.

Therefore, the problem of improving the operational repair cycles of power units (engines) and the technological processes of restoring their main parts is urgent, and the durability of the units and the level of costs for maintaining their efficiency depend on its choice.

When used, the average wear of bimetallized copper cylinder liners is 3.4 times less compared to typical ones. The use of bimetallized cylinder liners will make it possible to increase the effective power by 4.8%, reduce the time and specific fuel consumption by 4.8% and 9.1%, respectively, as well as reduce the content of carbon monoxide in the exhaust gases by 10% and hydrocarbons by 8% in compared to an engine with standard bushings. Comparative operational tests of the engine equipped with bimetallized cylinder liners show that the linear wear of the friction working surface of the cylinder liners is reduced by 2.7 times; consumption by 4% and the gas pressure in the combustion chamber at the end of the compression stroke is increased by 6.5% compared to an engine equipped with regular cylinder liners.

Key words: wear, technology, operation, liner, recovery, durability.

***Zhuravlov Yu.I., Dovidenko Yu.N., Latysh O.M.* Аналіз термомеханічного стану робочої поверхні деталей сполучень «вал-підшипник ковзання» в судноремонті**

В статті приведений аналіз термомеханічного стану робочої поверхні деталей сполучень «вал-підшипник ковзання» в судноремонті. Було показано, що за повний життєвий цикл судових деталей експлуатаційні витрати в кілька разів перевищують витрати на виготовлення нової техніки.

Підкреслено, що завдання підвищення зносостійкості конкретного виробу часто не передбачає якісної модифікації структурного складу використуваного матеріалу в усьому його об'ємі, а переноситься на видозміну по-

верхнього шару матеріалу, оскільки захист деталей від зносу в ряді випадків вирішується поверхневим зміцненням. У загальному випадку під поверхневим зміцненням розуміється підвищення твердості робочої поверхні деталі, що дозволяє збільшити зносостійкість.

Перспективні напрямки розвитку поверхнево-зміцнюючих технологій припускають використання нових методів отримання зносостійких покриттів, в основному з використанням зносостійких матеріалів, тобто покриттів на основі сполук типу оксидів, нітридів і карбідів. Використання зміцнюючих покриттів із різномірних матеріалів призводить не тільки до модифікації поверхневого шару, але й до утворення, у ряді випадків принципово нового композиційного матеріалу поверхневого шару, що володіє як високою міцністю й достатньою пластичністю, так і підвищеною зносостійкістю.

Дослідження причин виникнення тріщин викладені в роботах [76-82] із позицій структурних і фазових перетворень, що породжують відповідні їм структурні напруження та також мають приватний характер і не дозволяють у цілому простежити справжню картину утворення дефектів типу тріщин на поверхні.

Таким чином, актуальним є забезпечення необхідної якості обробки циліндричних поверхонь зі зносостійкими покриттями, які схильні до тріщиноутворення, на основі дослідження технологічних можливостей процесу експлуатації шляхом аналізу термомеханічних явищ та розробки технологічних критеріїв вибору, реалізація яких дозволить технологічним параметрам суттєво знизити дефектоутворення на їх робочих поверхнях.

Також визначений механізм формування дефектів у поверхневому шарі судових деталей сполучення «вал-підшипник ковзання» зі зносостійкими покриттями, схильних до утворення тріщин.

Визначені критерії утворення тріщин і пріпків і встановлений їх зв'язок із досліджуваними технологічними факторами процесу тертя робочих поверхонь циліндрів зі зносостійкими покриттями.

З урахуванням цього була розроблена математична модель, що описує термомеханічні процеси в поверхневому шарі при терті циліндричних поверхонь зі зносостійкими покриттями з урахуванням їх часткового відшарування з основним матеріалом.

Ключові слова: судові технічні засоби, дефекти судових деталей, сполучення «вал-підшипник ковзання», зношування поверхонь.

Zhuravlov Yu.I., Dovidenko Yu.N., Latych O.M. Analysis of the thermomechanical condition of the working surface of "shaft-sliding bearing" joints' parts in ship repair

The article presents an analysis of the thermomechanical state of the working surface of the "shaft-sliding bearing" connection parts in ship repair. It was shown that for the full life cycle of ship parts, operating costs are several times higher than the costs of manufacturing new equipment.

It is emphasized that the task of increasing the wear resistance of a specific product often does not involve a qualitative modification of the structural composition of the used material in its entire volume, but is transferred to the modification of the surface layer of the material, since the protection of parts from wear in some cases is solved by surface strengthening. In the general case, surface strengthening means an increase in the hardness of the working surface of the part, which allows for increased wear resistance.

Prospective directions for the development of surface-strengthening technologies involve the use of new methods of obtaining wear-resistant coatings, mainly using wear-resistant materials, that is, coatings based on compounds such as oxides, nitrides, and carbides. The use of reinforcing coatings made of heterogeneous materials leads not only to the modification of the surface layer, but also to the formation, in some cases, of a fundamentally new composite material of the surface layer, which has both high strength and sufficient plasticity, as well as increased wear resistance.

Research on the causes of the appearance of cracks is presented in works [76-82] from the standpoint of structural and phase transformations, which generate the corresponding structural stresses and also have a private character and do not allow us to trace the true picture of the formation of defects such as cracks on the surface in general.

Thus, it is important to ensure the necessary quality of processing of cylindrical surfaces with wear-resistant coatings that are prone to cracking, based on the study of the technological possibilities of the operation process by analyzing thermomechanical phenomena and developing technological selection criteria, the implementation of which will allow the technological parameters to significantly reduce the formation of defects on their working surfaces.

Also, the mechanism of formation of defects in the surface layer of ship parts of "shaft-sliding bearing" joints with wear-resistant coatings, prone to the formation of cracks, is determined.

The criteria for the formation of cracks and burns were determined and their relationship with the investigated technological factors of the process of friction of the working surfaces of cylinders with wear-resistant coatings was established.

Taking this into account, a mathematical model was developed that describes thermomechanical processes in the surface layer during friction of cylindrical surfaces with wear-resistant coatings, taking into account their partial delamination with the base material.

Key words: ship technical equipment, defects of ship parts, "shaft-sliding bearing" connection, wear of surfaces.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ І ПОДАННЯ РУКОПИСІВ ДЛЯ ЗБІРНИКА «СУДНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ»

Науково-технічний збірник національного університету «Одеська морська академія» «Суднові енергетичні установки» є науковим виданням, в якому можуть публікуватись основні результати дисертаційних робіт зі спеціальностей 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» та 275 «Транспортні технології (за видами)».

Стаття повинна відповідати правилам оформлення наукових статей і містити постановку проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями, аналіз останніх досліджень і публікацій за темою статті, формулювання цілей статті (постановку завдання), виклад основного матеріалу з необхідними обґрунтуваннями, висновки та перспективи подальших досліджень.

Рукопис подається на електронному носії у форматі *.doc з паперовою копією і рефератами на українській та англійській мовах, підписаною всіма авторами, з контактною інформацією: адреси, телефони. Обсяг статті — до 0,5 авторського аркуша з урахуванням ілюстрацій, підписані підписів і реферату.

Реферат двома мовами – українською та англійською – наводиться наприкінці рукопису та повинен містити: ФІО авторів, назву статті, скорочений зміст та ключові слова. Обсяг реферату кожною мовою повинен складати не менше 1800 знаків (з пробелами), включаючи ключові слова.

Формат паперу А5 (148×210) Усі поля — 16 мм. Текст - через 1 інтервал, Times New Roman, 11 пт; таблиці, заголовки таблиць, підписані підписи — 10 пт.

На першій сторінці рукопису повинні бути вказані наступні елементи: ФІО авторів; найменування закладу, в якому виконувалася робота; назва статті. Заголовки статті оформляти за стилем Заголовок 1, кегль 11 пт, без переносу слів, усі прописні.

При необхідності робиться перенос тексту, але не в заголовку статті.

Усі формули повинні бути набрані в Mathtype. Змінні, функції, вектори, матриці і т.п. оформляються латинським шрифтом. Змінні виконуються похилим шрифтом, вектори — напівжирним, без нахилу; грецькі символи — у всіх випадках без нахилу; індекси: латинські

— з нахилом, кириличні — без нахилу. Розміри в MathType: основний — 11 пт, збільшений — 16,5 пт, індекс — 7 пт, субіндекс — 6 пт. Нумеруються тільки ті формули, на які є посилання в тексті. Формули відділяються від тексту рядками висотою 2 пт. Одиниці фізичних величин повинні відповідати ДСТУ 3651.0-97, ДСТУ 3651.1-97, ДСТУ 3651.2-97 "Метрологія. Одиниці фізичних величин" і мати загальноприйняті позначення.

Таблиці слід розташовувати на одній сторінці крім випадків, коли таблиця займає більше 1 сторінки. Заголовок — 10 пт, без переносу, інтервал перед — 8 пт, після — 2 пт, основний шрифт таблиці — 10 пт.

Рисунки відділяються від тексту зверху інтервалом 8 пт, від назви — 2 пт. Назва рисунку — кегль 10 пт, без переносу, інтервал після — 8 пт. На всі таблиці і рисунки повинні бути посилання в тексті статті у скороченому вигляді (рис., табл.).

Ілюстрації, які підготовлені в графічних редакторах, додаються в якості окремих файлів у вихідному форматі. Розмір написів повинен забезпечувати їхню читаність (8-10 пт).

Посилання на літературні джерела у тексті оформлюються у квадратних дужках з вказанням номера джерела.

Бібліографічний опис оформлюється з урахуванням Національного стандарту України ДСТУ 8302:2015 «Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання».

Приклад оформлення списку літератури наведено нижче:

Книги одного, двох або трьох авторів

Заблоцький Ю.В., Сагін С.В. Робочий цикл судових двигунів внутрішнього згоряння. Теорія та розрахунок основних параметрів: навчальний посібник. Одеса: НУ «ОМА», 2018. 108 с.

Книги чотирьох і більше авторів

Колегаєв М.О., Парменова Д.Г., Мамкічев М.А., Ніколаєва Г.В., Розлуцький О.М., Роман Г.Г., Сваричевська А.П., Осадчук Д.Д. Безпека та охорона на морі: навчальний посібник. Одеса: Фенікс, 2020. 832 с.

або

Безпека та охорона на морі: навчальний посібник / М.О. Колегаєв та ін. Одеса: Фенікс, 2020. 832 с.

Стаття у періодичному виданні, розділ книги

Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик

моторних мастил суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки*. 2021. Вип. 43. С. 69-80. <https://doi.org/10.31653/smf343.2021.69-80>.

Shestopalov K., Khliyeva O., Ierin V., Konstantinov O., Khliiev N., Neng G., Kozminykh M. Novel marine ejector-compression waste heat-driven refrigeration system: technical possibilities and environmental advantages. *International Journal of Refrigeration*. 2024. Vol. 158. P. 202-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.11.015>

Праці конференції

Голіков В.А., Данілов К.С., Сінюта К.О. Експлуатація і ремонт транспортних засобів морського та річкового флоту. *Науково-техн. конф. «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт»*, Одеса, 22-23 березня 2023 р. Одеса: НУ "ОМА". С. 10-13.

Дисертації

Будашко В. В. Підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів: дис. д-ра техн. наук: 05.22.20. Одеса, 2017. 422 с.

Законодавча та нормативна документація, стандарти

Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення ваhti 1978 року (консолідований текст з манільськими поправками). К.: ВПК «Експрес-Поліграф», 2012. 568 с.

ДСТУ 7152:2010 (ISO 8:2019, NEQ; ISO 18:1981, NEQ; ISO 215:1986, NEQ). Видання. Оформлення публікацій у журналах і збірниках. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 11 с. (Інформація та документація)

Електронні ресурси

Marine Environment Protection Committee progress on GHG Strategy and next set of GHG reduction measures, adopts SOx control area. *International Maritime Organisation: website*. URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC-79.aspx> (date: 01.12.2023)

Про освіту: Закон України від 01.07.2014 р. № 1556-VII. Дата оновлення: 28.09.2018. URL:<http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1556-18> (дата звернення: 15.11.2018).

Контактна інформація - e-mail: ivanovich1zh@gmail.com

Суднові енергетичні установки:
науково-технічний збірник.
Випуск 48.

Підписано до друку 26.08.2024. Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. 10,80. Наклад 100. Зам. № И12-12 52.

НУОМА, центр „Видавінформ”
Свідчення ДК № 1292 від 20.03.2003
65029, м. Одеса, вул. Дидрихсона, 8
тел./факс: 048-234-14-12
publish@ma.odessa.ua