

Завітаєв В.Л., Горалік Є.Т., Федотов В.Г.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОПУСТИМОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РІВНЯ ФОРСОВАНИХ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НАНОМАТЕРІАЛІВ

Інтенсифікація процесів тепловіддачі в системі охолодження для зниження високих температур деталей КЗ відіграє істотну роль як за рахунок удосконалення режимних та конструктивних параметрів системи, так і за рахунок підвищення коефіцієнта теплопровідності охолоджувальних рідин (ОР). Останнє стало можливим з розвитком нанотехнологій (НТ), що дозволило створювати охолоджувальні нанорідини (ОН), які представляють собою стійкі, стабільні двофазні суспензії на основі базової ОР та твердих наночасток (НЧ) зі значно більшим коефіцієнтом теплопровідності, ніж у базового теплоносія.

Значне збільшення коефіцієнта теплопровідності теплоносія може дозволити істотно підвищити інтенсивність тепловіддачі в системах охолодження ВОД і за рахунок цього забезпечити допустимий температурний рівень їх ТД. Для введення ОН в експлуатацію необхідно провести комплекс досліджень процесів теплообміну при циркуляції цих теплоносіїв зі збільшеним коефіцієнтом теплопровідності в системі охолодження ВОД.

Тенденція по збільшенню питомої та агрегатної потужностей головних і допоміжних суднових дизелів разом з удосконалюванням їх масогабаритних показників вимагає нових, додаткових способів підвищення інтенсивності процесів теплообміну в СО двигунів для забезпечення допустимого температурного рівня їх ТД. Проведені дослідження показали, що модифікація теплоносіїв суднових дизелів високо теплопровідними вуглецевими НЧ МГ є ефективним способом інтенсифікації процесів тепловіддачі в СО дизелів з урахуванням розглянутих у магістерській роботі конструктивних заходів. Отримані при дослідженні результати зводяться до наступних основних висновків і рекомендацій:

Ключові слова: *двигун внутрішнього згорання, охолодження, наноматеріали, нанотехнології, охолоджувальні рідини.*

Вступ.

У сучасних умовах розвитку науки та техніки приділяється особлива увага розвитку суднового двигунобудування й розробці нових форсованих високооборотних дизелів (ВОД), що широко застосовуються як у якості головних, так і як допоміжних двигунів в складі суднових енергетичних установок (СЕУ). Головними тенденціями розвитку таких суднових дизелів є збільшення їх питомої та агрегатної потужностей, підвищення надійності і удосконалювання масогабаритних показників. Для сучасних форсованих ВОД характерні високі значення середнього ефективного тиску. Перспективні середньооборотні дизелі (СОД) в якості суднових двигунів мають значення середнього ефективного тиску на рівні 3,5-4,0 МПа, а ВОД - 4,0-4,5 МПа. Такі рівні форсування приводять до росту кількості тепла, що надходить у систему охолодження (СО), що поряд зі зниженням питомої маси двигуна та зменшенням його габаритних розмірів приводить до зростання середніх й максимальних питомих теплових потоків. Це обумовлює

підвищення температур теплонапружених деталей (ТД), що обмежують камеру згоряння (КЗ) дизеля.

Для перспективних форсованих ВОД температурний стан ТД та обмежує працездатність й надійність двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Тому роль системи охолодження з погляду забезпечення працездатності і надійності форсованого ВОД багаторазово зростає, що і підтверджує **актуальність** статті.

Аналіз публікацій за темою дослідження. При виконанні досліджень використовувалися роботи вчених і фахівців в області теорії машин, конструювання, виробництва й експлуатації дизельних двигунів В.А. Ваншейдта, М.М. Іванченко, П.А. Істоміна М.М. Круглова, А.С. Орліна, Л.І. Погодаєва, В.М. Половінкіна, Ю.Г. Шнейдера, Ю.І. Матвєєва, В.М. Бочкарева, А.Ф. Дорохова, Н.Я. Яхьяєва та ін.

Метою статті є обґрунтування можливості забезпечення допустимого температурного рівня форсованих суднових дизелів з використанням наноматеріалів.

Основна частина.

Дизелі є головними та допоміжними двигунами судів різного призначення. Основну долю парку суднових дизелів складають СОД та ВОД [1], для яких властиві досить високі механічні й теплові навантаження на ТД, які обмежують КЗ. В даний час доля таких двигунів складає більш 60 % [2].

Однієї з головних тенденцій розвитку суднових ДВЗ є безперервне збільшення їх питомої й агрегатної потужностей, підвищення надійності поряд з удосконалюванням масогабаритних показників. Для оцінки ступеня досконалості конструкції двигуна та рівня його форсування використовують: середній ефективний тиск p_e , питому літрову потужність N_l , питому поршневу потужність N_p .

Аналіз розвитку цих показників [3,4] свідчить про постійну тенденцію до їх зростання. Динаміка росту p_e двигунів різних типів показана на рис. 1.

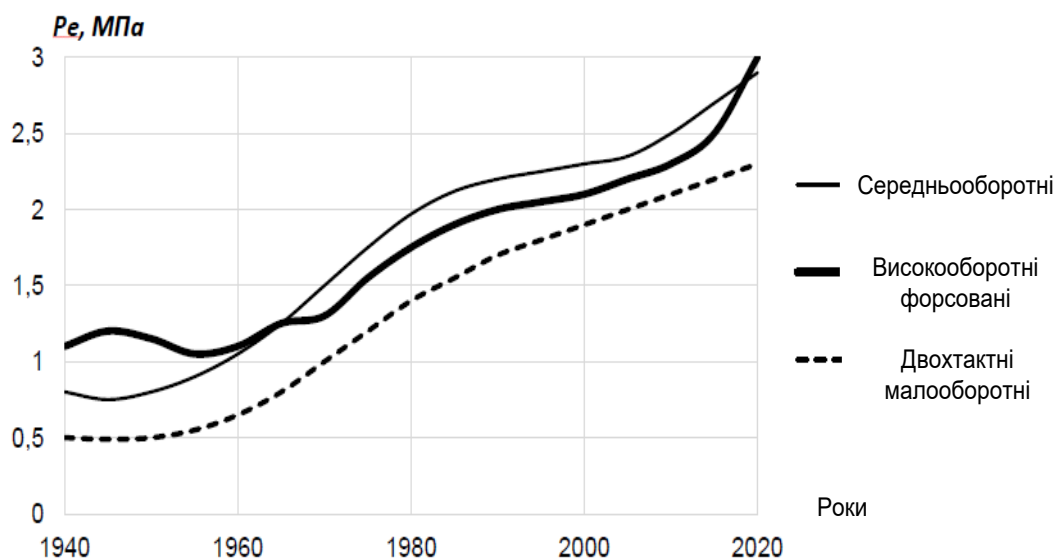


Рисунок 1 – Динаміка зростання p_e дизелів різних типів

Для сучасних форсованих суднових дизелів характерні високі значення $p_e = 2,5 \dots 3$ МПа. Перспективні СОД ДВЗ можуть мати середній ефективний тиск на рівні $3,5 \dots 4,0$ МПа, ВОД – $4,0 \dots 4,5$ МПа [2]. Такі рівні форсування, що забезпечуються, в основному, за рахунок застосування систем газотурбінного наддуву, призводять до зростання кількості тепла, яке надходить у СО ДВЗ. Для оцінки середнього питомого теплового потоку $q_{охл}$ через охолоджувані поверхні гільзи циліндра дизелів використовують наступну формулу [5]:

$$q_{охл} = B \cdot \frac{C_m^{0,566} \cdot p_e \cdot g_e \cdot 1,36 \cdot T_k}{D^{0,5} \cdot (\eta_v \cdot p_k)^{0,428}} \quad (1)$$

де B – коефіцієнт (для чотирьохтактних двигунів $B=147$, для двохтактних дизелів $B=262$); C_m - середня швидкість поршня, м/с; g_e - питома ефективна витрата палива, кг/кВт год; p_e – середній ефективний тиск, МПа; T_k та p_k відповідно температура й тиск наддувочного повітря (К та МПа); D - діаметр циліндру двигуна, м; η_v - коефіцієнт наповнення.

У таблиці 1 представлені дані по динаміці збільшення літрової та поршневої потужностей для різних типів двигунів у різні тимчасові інтервали [3, 6, 7].

Таблиця 1 – Значення N_l та N_p для різних типів двигунів

Двигун	N_l , кВт/л		N_p , кВт/дм ²	
	1970-1980 рр	2000-2020 рр	1970-1980 рр	2000-2020 рр
автомобільний	25 – 40	40 – 75	30 – 50	50 – 70
судовий	1,5 – 7,4	12 – 22	11 – 33,1	35 – 55
тепловозний	7,4 – 14,7	19 – 21,5	22 – 33,1	35 – 55
стаціонарний	1,5 – 7,4	30 – 40	7,4 – 14,7	14 – 25

За останні 40 років показники літрової та поршневої потужностей для двигунів різних типів й призначень збільшилися в середньому в 2 рази, а середній ефективний тиск зріс більш ніж у 1,5 рази, що поряд зі зниженням питомої маси двигунів та їх габаритних показників призвело до зростання максимальних й середніх питомих теплових потоків, відповідно до формули (1), більш ніж на 40 %.

Це обумовило значне зростання температур ТД, які обмежують КЗ ДВЗ. Для перспективних форсованих ВОД температурний стан ТД лімітує працездатність і надійність ДВЗ. Австрійська компанія AVL провела випробування перспективних дизелів екологічного класу Євро 6, що володіють рівнем форсування $p_e = 2,6...2,8$ МПа та максимальним тиском $p_z = 25$ МПа. За даними цієї компанії, для двигунів з таким рівнем форсування температури головки блоку циліндрів досягають значень понад 400 °С, що є небезпечним з погляду механічної міцності металу (рисунок 2).

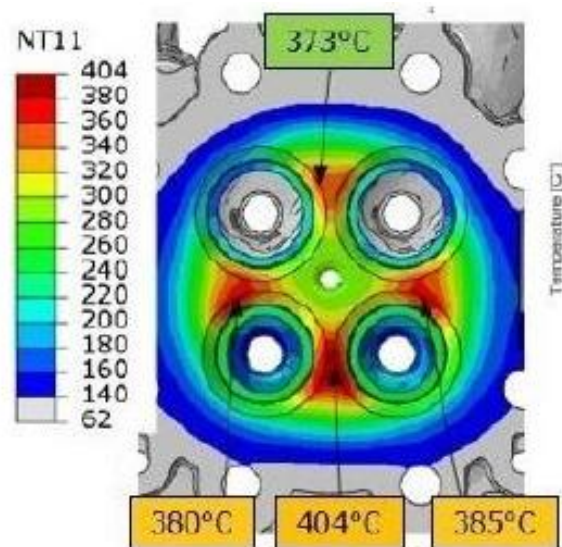


Рисунок 2 – Розподіл температур головки блоку циліндрів перспективного дизеля австрійської компанії AVL

При форсуванні суднового дизеля 16ЧН 26/26 до рівня $p_e = 2,2$ МПа значення температури гільзи циліндра в зоні зупинки першого компресійного кільця склало 193 °С, а температура міжклапанної перемички головки блоку циліндрів досягла значення 385 °С [8]. Відзначені температури голівок і гільзи циліндра є небезпечними з погляду працездатності й надійності ДВЗ

З метою інтенсифікації тепловіддачі в СО теплових ДВЗ останнім часом розглядається можливість застосування охолоджувальних нанорідин (ОН) з підвищеним коефіцієнтом теплопровідності. ОН мають нові властивості, що роблять їх перспективними в області теплопередачі, трибології.

Нанорідини – це стійкі і стабільні двофазні суспензії типу “рідина” – “тверді частки”. Ці тверді частки в них називають наночастками (НЧ), що мають розміри до 100 нм і коефіцієнт теплопровідності в багато разів переважаючий коефіцієнт теплопровідності базової охолоджувальної рідини (ОР). Матеріалами для НЧ можуть бути метали, окисли металів і неметалів, а також матеріали на основі вуглецю. Як базові рідини можуть використовуватися рідини, які дозволяють при введенні в них твердих НЧ створити ОН, що задовольняють основним експлуатаційним вимогам. Значення коефіцієнтів теплопровідності НЧ різних матеріалів представлені в таблиці 2.

Таблиця 1.2 - Значення коефіцієнтів теплопровідності НЧ різних матеріалів при температурі 20 °С

Матеріал НЧ	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/м К
Алюміній Al	237
Оксид алюмінію Al_2O_3	40
Мідь Cu	401
Оксид міді CuO	76,5
Карбід кремнію, SiC	120
Золото, Au	318
Вуглецеві нанотрубки	-3000
Оксид графена	-3500
Графен	-3000-5000

Нанорідини з погляду їх працездатності повинні володіти стабільністю, стійкістю до агломерації твердих НЧ та їх випаданню їх в осад протягом терміну експлуатації. Необхідно відзначити, що в НР повинні бути відсутнітніми хімічні реакції. З погляду експлуатаційних характеристик при використанні нанорідин як теплоносія СО ДВЗ вони не повинні викликати корозію конструкційних металів, які застосовуються у двигунобудуванню, не повинні роз’їдати неметалеві матеріали систем ущільнення, шлангів, прокладок та інш.

На коефіцієнт теплопровідності нанорідин впливають наступні основні фактори:

- концентрація НЧ у базовій рідині;
- температура нанорідини;
- коефіцієнт теплопровідності НЧ;
- розмір, форма, маса НЧ;
- питома площа поверхні НЧ;
- технологія одержання НЧ;
- технологія диспергування НЧ у базовій рідині;
- фізико-хімічні властивості базової рідини.

Збільшення концентрації НЧ у базових рідинах, у загальному випадку, приводить до збільшення коефіцієнта теплопровідності ОН [7] (рис. 3). Слід зазначити загальну

тенденцію до лінійної залежності коефіцієнта теплопровідності від концентрації НЧ. А в роботах [7, 8] представлена нелінійна залежність коефіцієнта теплопровідності від концентрації вуглецевих нанотрубок та НЧ, що володіють сферичною формою. Нанорідини, виготовлені на основі НЧ із більш теплопровідними матеріалами, демонструють більше збільшення коефіцієнта λ у порівнянні з менш теплопровідними матеріалами [6].

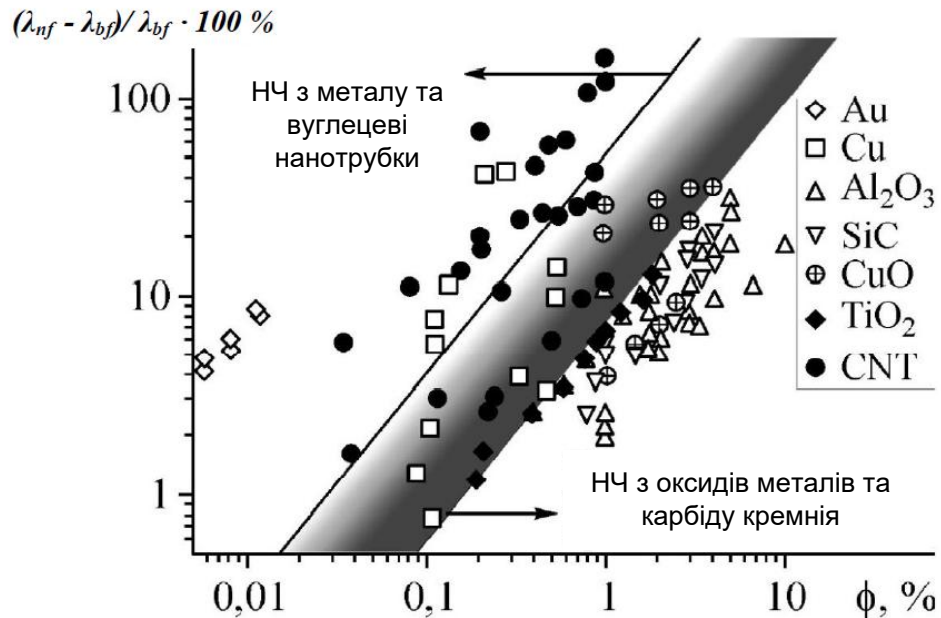


Рисунок 3 – Залежність відносного коефіцієнта теплопровідності нанорідин від об'ємної концентрації різних видів наночасток: λ_{nf} та λ_{bf} – коефіцієнти теплопровідності нанорідини та базової рідини відповідно [37]

Збільшення температури нанорідин призводить до лінійного підвищення їх коефіцієнта теплопровідності (рис. 4).

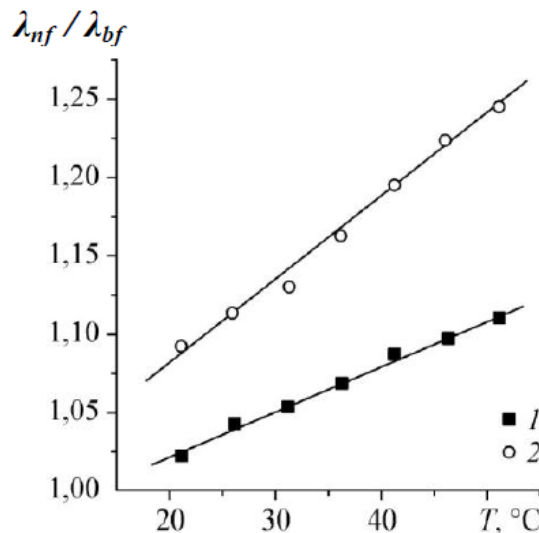


Рисунок 4 – Залежність відносного коефіцієнта теплопровідності нанорідини з частками оксиду алюмінію від температури:
1) $\phi = 1\%$; 2) $\phi = 4\%$.

Аналіз впливу розміру НЧ на коефіцієнт λ ОН показує, що коефіцієнт теплопровідності нанорідин зростає при збільшенні розміру НЧ [51,52]. Вплив розміру НЧ

оксиду алюмінію в етиленгліколі на відносний коефіцієнт теплопровідності нанорідини показано на рис. 5.

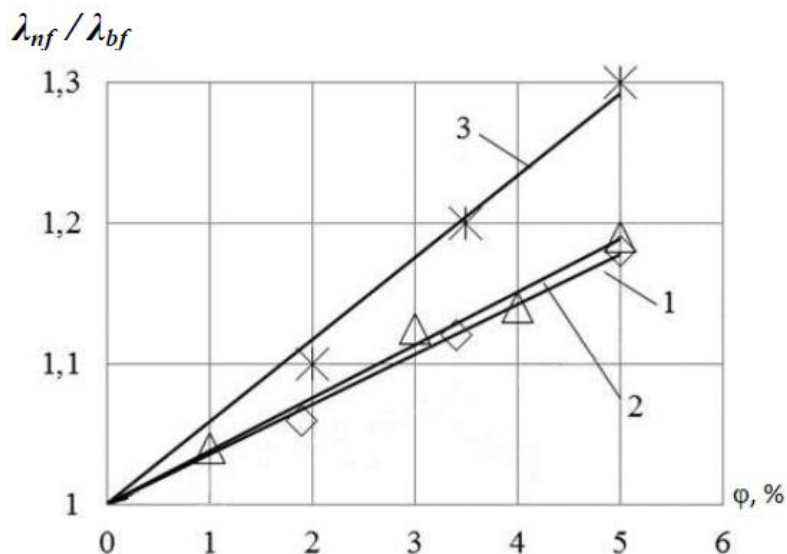


Рисунок 5 – Відносний коефіцієнт теплопровідності нанорідин у залежності від концентрації часток Al_2O_3 : 1 - 15 нм; 2 - 35 нм; 3 - 80 нм. [52]

Проведений аналіз дозволив установити, що всі розглянуті фактори по-різному впливають на збільшення коефіцієнта теплопровідності нанорідини щодо базової рідини. Можна управляти величиною коефіцієнта теплопровідності нанорідини, концентрацією НЧ. Інші фактори визначаються технологією. Технологія одержання НЧ і спосіб їх диспергування в базових рідинах визначають багато розглянутих факторів. Найбільш відомі три методи диспергування НЧ:

- 1) механічне дроблення НЧ;
- 2) використання полімерів, які огортають НЧ;
- 3) застосування фільтрації НЧ [5].

За інших рівних умов технологія диспергування твердих НЧ в однакових базових рідинах буде впливати на коефіцієнт теплопровідності нанорідини.

При створенні нанорідини необхідно вибрати базову рідину, матеріал НЧ і їх форму, виходячи з конкретних задач досліджень і області використання такої ОН.

У рідинних системах охолодження ряду суднових двигунів застосовують, в основному, низькозамерзаючі рідини, що представляють собою суміші етиленгліколя з водою в пропорціях, пов'язаних з необхідною температурою замерзання розчину. Водні розчини етиленгліколю задовольняють вимогам, висунутим ДСТ 28084-84 до характеристик теплоносіїв рідинних СО двигунів, зокрема ОР повинна володіти:

– оптимальною в'язкістю, при якій, з одного боку, будуть виключені втрати ОР через всілякі ущільнення і сполучні вузли, а, з іншого боку, не будуть потрібні значні витрати енергії на прокачування теплоносія через систему охолодження двигуна;

– такою температурою її замерзання, що буде нижче, ніж температура навколишнього середовища, що дозволить полегшити запуск двигуна та його експлуатацію;

– такою температурою її кипіння, що буде вище на 25...30 °С максимально допустимої температури теплоносія в СО, що дозволить не допустити появу пароповітряних пробок у СО та знизити втрати ОР у процесі випаровування;

– високим значенням питомої теплоємності, що дозволить при порівняно невеликому обсязі теплоносія, який циркулює в СО, підтримувати необхідний температурний режим ДВЗ.

З урахуванням вищевикладеного були прийняті водні розчини етиленгліколю як базові рідини.

Визначити матеріал НЧ можна на підставі значень коефіцієнтів теплопровідності різних матеріалів, представлених у таблиці 2. При цьому необхідно враховувати значення коефіцієнтів теплопровідності суспензій, що досягаються при сполученнях різних базових рідин і матеріалів НЧ (таблиця 3).

Аналізуючи дані, представлені в таблиці 2, найбільш перспективні вуглецеві НЧ, оскільки вони мають найбільший коефіцієнт теплопровідності. До вуглецевих НЧ відносяться НЧ графена та його модифікацій, такі як оксид графена й мультиграфен. При сполученні вуглецевих НЧ та базових рідин досягається найбільш істотне збільшення коефіцієнта λ нанорідин при відносно невеликих концентраціях НЧ (таблиця 3). Слід зазначити, що найбільше збільшення коефіцієнта λ суспензій з вуглецевими НЧ досягається при мінімальному вмісті ЕГ у ВЕГ аж до чистої води.

Графен – це двовимірна алотропна модифікація вуглецю, яка утворена шаром з атомів вуглецю, що має товщину в один атом, який знаходяться в sp^2 - гібридизації і з'єднаних за рахунок σ - та π - зв'язків у гексагональні кристалічні решітки.

Таблиця 3 – Коефіцієнти теплопровідності нанорідин

Базова рідина	Матеріал НЧ	Розмір часток, нм	ϕ , %	Підвищення λ , %
Вода	Оксид алюмінію	33	5	30
Етиленгліколь		28	8	40
Моторне мастило		28	7,5	30
Вода	Оксид міді	23	10	35
Етиленгліколь		23	15	55
Вода	Мідь	100	7,5	75
Етиленгліколь		10	0,2	40
Моторне мастило		100	7,5	45
Вода	Оксид титана	27	4,35	10,7
Вода	Золото	15	0.00026	3,3
Вода	Графен	50	1	70
Вода		-	0,05	75
ВЕГ (90 % ЕГ)		-	0,4	15
ВЕГ (90 % ЕГ)		-	0,5	5
Етиленгліколь		-	0,07	30
Етиленгліколь	Оксид графена	-	5	86
ВЕГ (60 % ЕГ)		-	0,1	10,5
Вода		-	0,1	28
ВЕГ (60 % ЕГ)	Мультиграфен	-	0,2	60

Графен представляє собою одиночний плоский (двовимірний) лист, що складається з атомів вуглецю, пов'язаних між собою утворюючими ґратками (рис. 5). Відстань між найближчими атомами вуглецю в графене складає близько 0,14 нм. Світлі сфери і відгалуження на представленій схематичній ілюстрації відображає відповідно атоми вуглецю та зв'язки, які утримують ці атоми в одному листі графена.

НЧ графена, оксиду графена і мультиграфена представляють собою пласкі двовимірні пластинки з розмірами 2-100 нм і мають коефіцієнт теплопровідності в діапазоні 3000...5000 Вт/м К [7]. Вихідним компонентом для технологічного процесу одержання зазначених НЧ є графіт. Графіт являє собою стопку з аркушів графена (рис. 6).

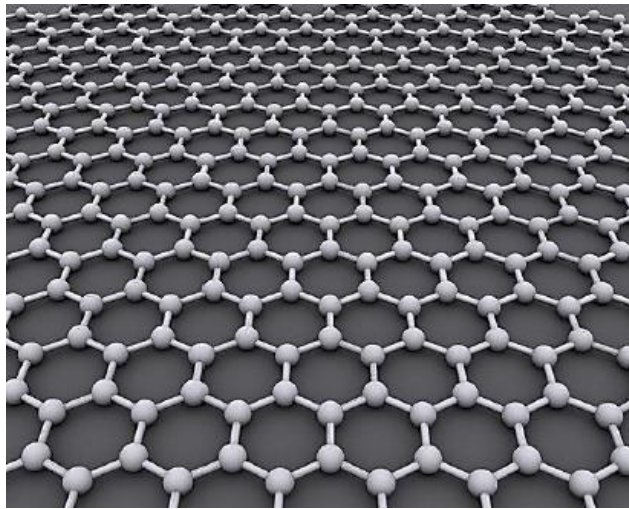


Рисунок 5 – Схематична ілюстрація одного листа графена

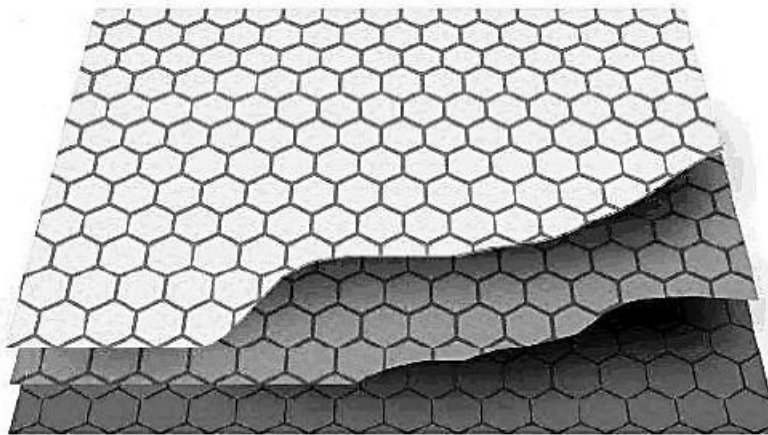


Рисунок 6 - Схематичне зображення трьох листів графена, що знаходяться один над одним у графіті

Оксид графена – це окислений лист графена, який має по краях базальної площини епоксидні та гідроксилвмісні групи, на додаток до карбонільних та карбоксильних груп. Мультиграфен представляє собою стопку з декількох нанорозмірних аркушів графена.

Аналіз експериментальних робіт показує, що навіть при додаванні малих об'ємних часток НЧ графена та його модифікацій у базову охолодну рідину досягається значний приріст у коефіцієнті теплопровідності теплоносія.

Висновки

Тенденція по збільшенню питомої та агрегатної потужностей головних і допоміжних суднових дизелів разом з удосконалюванням їх масогабаритних показників вимагає нових, додаткових способів підвищення інтенсивності процесів теплообміну в СО двигунів для забезпечення допустимого температурного рівня їх ТД. Проведені дослідження показали, що модифікація теплоносіїв суднових дизелів високо теплопровідними вуглецевими НЧ МГ є ефективним способом інтенсифікації процесів тепловіддачі в СО дизелів з урахуванням розглянутих у магістерській роботі конструктивних заходів. Отримані при дослідженні результати зводяться до наступних основних висновків і рекомендацій:

1. Вуглецеві НЧ МГ є перспективними для істотного збільшення коефіцієнта теплопровідності базових ОР суднових дизелів. Отримані стійкі стабільні ОН зі збільшеним коефіцієнтом теплопровідності на базі водного розчину ЕГ та НЧ МГ не

роблять додаткового корозійного впливу на основні конструкційні матеріали ДВЗ у порівнянні з ВЕГ.

2. Підвищення коефіцієнта теплопровідності ОН визначається зміною масової концентрації НЧ МГ в базовій рідині. Це дозволяє створювати теплоносії з такими теплофізичними характеристиками, що потрібні для забезпечення інтенсивного теплообміну в СО суднових дизелів різного рівня форсованості.

3. Введення у водний розчин ЕГ високотеплопровідних НЧ МГ в масовій концентрації 0,75 % призводить до збільшення його коефіцієнта теплопровідності на 60 % у порівнянні з базовою рідиною при температурі теплоносія 90 °С, що характерно робочій температурі СО суднових дизелів. Таким чином, при зазначеній температурі базова рідина (ВЕГ) має коефіцієнт теплопровідності 0,545 Вт/м·К, тоді як для ОН з МГ його значення складає 0,872 Вт/м·К.

ЛІТЕРАТУРА

1. Безюков О. К. Парк дизелей судов внутрєнного и смешанного плавания и перспективы его развития / О. К. Безюков, О. В. Афанасьева // Труды Международной научно-практической конференции «Безопасность водного транспорта». – 2003. – Т. 3. – С. 12-17.

2. Жуков В. А. Научные основы повышения эксплуатационных показателей высокооборотных судовых ДВС совершенствованием их охлаждения : дис. ... д-р. техн. наук : 05.08.05 / Жуков Владимир Анатольевич. – Санкт-Петербург, 2012. – 422 с.

3. Чайнов Н. Д. Конструирование и расчет поршневых двигателей : учебник для вузов / Н. Д. Чайнов, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков ; под ред. Н. Д. Чайнова. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 536 с. : ил.

4. Хоссам Элдин Салех Абдель Гхани Хассан. Повышение удельной мощности двигателей внутреннего сгорания : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Элдин Салех Абдель Гхани Хассан Хоссам. – Москва, 2004. – 139 с.

5. Emad Sadeghinezhad, Mohammad Mehrali, R. Saidur, Mehdi Mehrali, Sara Tahan Latibari, Amir Reza Akhiani, Hendrik Simon Cornelis Metselaar. A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications // Energy Conversion and Management. – 2016. – № 111. – Pp. 466-487.

6. Ding, Yulong & Chen, Haisheng & Wang, Liang & Yang, Chane-Yuan & He, Yurong & Yang, Wei & Lee, Wai Peng & Zhang, Lingling & Huo, Ran. Heat Transfer Intensification Using Nanofluids // KONA Powder and Particle Journal. – 2007. – № 25. – Pp. 23-38.

7. Goharshadi E. K, Ahmadzadeh H, Samiee S, Hadadian M. Nanofluids for Heat Transfer Enhancement // Phys. Chem. Res. – 2013. – Vol. 1. – №1. – Pp. 1-33.

8. Kalpana Sarojini K. Gandhi, Manojisiva Velayutham, Sarit K. DAS. Measurement of thermal and electrical conductivities of graphene nanofluids // Sundararajan Thirumalachari. – 2011. – 7 p.

9. Ali Ijam, Saidur R., Ganesan P., Moradi Golsheikh A. Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – № 87. – Pp. 92-103.

10. A. Khan M. F. Shahil, Alexander A. Balandin. Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials // Solid State Communications. – 2012. – № 152. – Pp. 1331-1340.

11. Tessa Theres Baby. Enhanced convective heat transfer using graphene dispersed nanofluids // Nanoscale Research Letters. – 2011. – № 6. – Pp. 289-298.

Zavitaiev V.L., Horalik Ye.T., Fedotov V.H.

**ENSURING THE PERMISSIBLE TEMPERATURE LEVEL OF FORCED SHIP
DIESELS USING NANOMATERIALS**

Intensification of heat transfer processes in the cooling system to reduce high temperatures of short circuit parts plays a significant role both by improving the regime and design parameters of the system and by increasing the thermal conductivity of coolants (OR). The latter became possible with the development of nanotechnology (NT), which allowed to create cooling nanofluids (OH), which are stable, stable two-phase suspensions based on basic OR and solid nanoparticles (NS) with a much higher thermal conductivity than the base coolant.

A significant increase in the coefficient of thermal conductivity of the coolant can significantly increase the intensity of heat transfer in cooling systems of water and due to this to ensure the allowable temperature level of their TD. To put OH into operation, it is necessary to conduct a set of studies of heat transfer processes during the circulation of these heat carriers with an increased coefficient of thermal conductivity in the cooling system of water.

The tendency to increase the specific and aggregate capacities of main and auxiliary marine diesels together with the improvement of their mass and dimensions requires new, additional ways to increase the intensity of heat transfer processes in CO engines to ensure acceptable temperature levels of their TD. Studies have shown that the modification of coolants of marine diesel engines with highly thermally conductive carbon LF MG is an effective way to intensify the heat transfer processes in the CO of diesels, taking into account the design measures considered in the master's thesis. The results obtained during the study are reduced to the following main conclusions and recommendations:

Key words: internal combustion engine, cooling, nanomaterials, nanotechnologies, coolants.