

**Дакі О.А.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Маннапова О.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Тришин В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

## **ПОБУДОВА КРИТЕРІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ В СИСТЕМАХ ОХОЛОДЖЕННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМУ РЕЖИМІ ПЛІНУ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ НАНОРІДИНИ**

*Метою роботи є побудова критеріального рівняння для тепловіддачі в системі охолодження при турбулентному режимі плин охолоджувальної нанорідини, як основи для розрахунку теплообміну в системах охолодження суднових і транспортних дизелів при застосуванні теплоносіїв з наночасток мультиграфена, з урахуванням конструктивних особливостей порожнин охолодження двигунів внутрішнього згоряння. Поставлена мета досягається шляхом аналізу відповідних джерел інформації та визначенням можливих підходів щодо побудови рівняння. Значне збільшення коефіцієнта теплопровідності теплоносія може дозволити істотно підвищити інтенсивність тепловіддачі в системах охолодження форсованих високооборотних дизелів і за рахунок цього забезпечити допустимий температурний рівень їх теплонапружених деталей. Для введення охолоджувальної нанорідини в експлуатацію необхідно провести комплекс досліджень процесів теплообміну при циркуляції цих теплоносіїв зі збільшеним коефіцієнтом теплопровідності в системі охолодження форсованих високооборотних дизелів. Поставлена мета досягається шляхом зіставлення та аналізу експериментальних значень показників в системі охолодження суднових і транспортних дизелів з використанням графоаналітичного методу обробки результатів експериментів. Найважливішим результатом досліджень є отримане в статті критеріальне рівняння, яке дозволяє розрахувати коефіцієнт тепловіддачі в системах охолодження суднових і транспортних дизелів на режимі конвективного теплообміну при змушеному русі охолоджувальної нанорідини з мультиграфена. Таким чином, це рівняння враховує вплив на тепловіддачу відношення коефіцієнтів теплопровідності охолоджувальної нанорідини з мультиграфена та базової рідини.*

**Ключові слова:** критеріальне рівняння, система охолодження, суднові дизелі, теплопровідність, охолоджувальна нанорідини, мультиграфен.

**Постановка проблеми.** 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 та удосконалення 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 обмежує працездатність й надійність двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Тому роль системи охолодження з погляду забезпечення працездатності та надійності форсованого ВОД багаторазово зростає, що і підтверджує актуальність дослідження.

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. При цьому, в рамках відповідних досліджень, важливим етапом є формальне визначення та побудова критеріального рівняння для тепловіддачі в СО при турбулентному режимі плинину ОН як основи для розрахунку теплообміну в СО суднових і транспортних дизелів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дизелі є головними та допоміжними двигунами суден різного призначення. Основну долю парку суднових дизелів складають СОД та ВОД [1, 2], для яких властиві досить високі механічні й теплові навантаження на ТД, які обмежують КЗ. Сьогодні частина таких двигунів складає більш 60% [3].

Однією 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, питому літрову потужність, питому поршневу потужність. Аналіз розвитку цих показників [4–8] свідчить про постійну тенденцію до їх зростання.

З метою інтенсифікації тепловіддачі в СО теплових ДВЗ останнім часом розглядається можливість застосування ОН з підвищеним коефіцієнтом теплопровідності. Охолоджувальні нанорідини мають нові властивості, що роблять їх перспективними в області теплопередачі, трибології [9–14].

**Мета статті (постановка завдання).** Мета роботи полягає у побудові критеріального рівняння для тепловіддачі в СО при турбулентному режимі плинину ОН як основи для розрахунку теплообміну в СО суднових і транспортних дизелів при застосуванні теплоносіїв з НЧ мультиграфена (МГ) з урахуванням конструктивних особливостей порожнин охолодження двигуна внутрішнього згорання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Теорія теплової подоби дозволяє встановити величину коефіцієнта тепловіддачі за допомогою відповідного критеріального рівняння. Так, при змушеній конвекції та турбулентному режимі плинину теплоносія в каналах різної форми  $f$  процес тепловіддачі від нагрітої стінки до ОР описується рівнянням виду:

$$N_{uf} = C Re_f^m Pr_f^n, \quad (1)$$

де  $N_{uf}$  – число Нуссельта;

$C$  – постійна інтегрування;

$Re_f^m$  – число Рейнольдса;

$Pr_f^n$  – число Прандтля;

$m, n$  – постійні показники ступеня.

Для визначення значень величин  $C, m, n$ , які входять у рівняння (1), прийнятий графоаналітичний метод обробки результатів експериментів. Оскільки шукана величина критерію  $N_{uf}$  є функцією двох аргументів ( $Re_f^m, Pr_f^n$ ), те спочатку визначають залежність  $N_{uf} = f(Pr_f^n)$  при фіксованому значенні критерію  $Re_f^m$ . Для цього в логарифмічній системі координат відображають експериментальні крапки, що розташовуються уздовж прямої лінії, що описується формулою:

$$\ln(N_{uf}) = \ln(C Pr_f^n) + m \cdot \ln Re_f^m. \quad (2)$$

Показник ступеня  $m$  визначається як тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис. Визначення показника ступеня  $n$  здійснюється аналогічно шляхом представлення досвідчених даних на графіку у виді залежності  $N_{uf} = f(Pr_f^n)$  при фіксованому значенні критерію  $Re_f^m$ . У логарифмічній системі координат експериментальні точки лягають уздовж прямої лінії, що описується рівнянням:

$$\ln\left(\frac{N_{uf}}{Re_f^m}\right) = \ln(C) + n \cdot Pr_f^n. \quad (3)$$

Величину коефіцієнта  $C$  знаходять зі співвідношення (4):

$$C = \frac{N_{uf}}{Re_f^m \cdot Pr_f^n} \quad (4)$$

У результаті обробки експериментальних даних щодо тепловіддачі для базової рідини відповідно до описаної методики були визначені такі значення: коефіцієнта  $C=0,021$  і ступенів  $m=0,8$  та  $n=0,43$ , що відповідає відомому рівнянню:

$$N_{uf} = 0,021 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \quad (5)$$

Зіставлення експериментальних даних за коефіцієнтом  $\alpha$  для водно-етиленгліколевого розчину (ВЕГ) з результатами розрахунку за рівнянням (5) показало їх відповідність даному рівнянню (рис. 1).

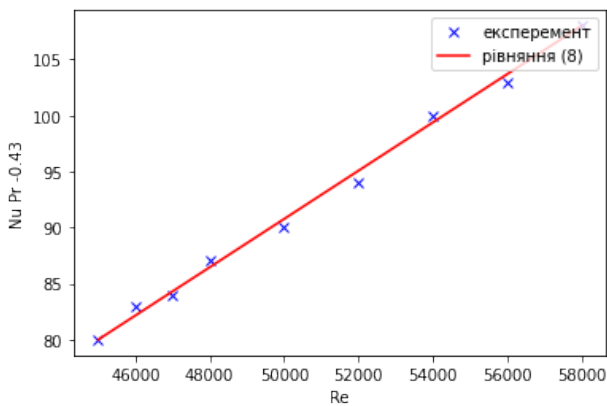


Рис. 1. Зіставлення експериментальних значень для базової рідини з емпіричним рівнянням (5)

Для графічного визначення ступенів  $m, n$ , а також коефіцієнта  $C$ , експериментальні дані для всіх зразків нанорідин з МГ представлені у виді залежностей  $N_{uf} = f(Re_f^m)$  та  $N_{uf} = f(Pr_f^n)$  у логарифмічній системі координат (рис. 2–4).

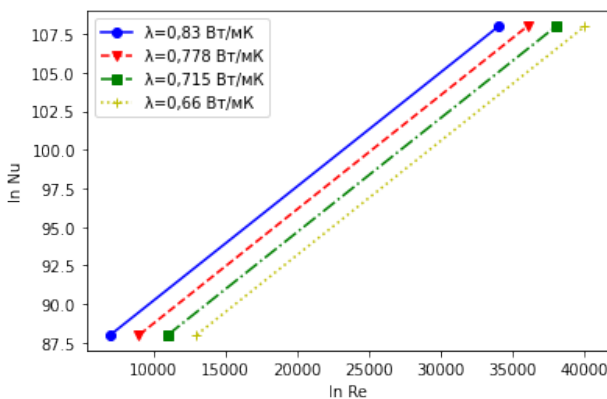


Рис. 2. Залежність чисел  $N_{uf}$  від  $Re_f^m$  для зразків нанорідин з МГ при температурі 60°C

По представленим графікам було встановлено, що  $m = 0,8$  та  $n = 0,43$  для всіх зразків ОН (рис. 6–8).

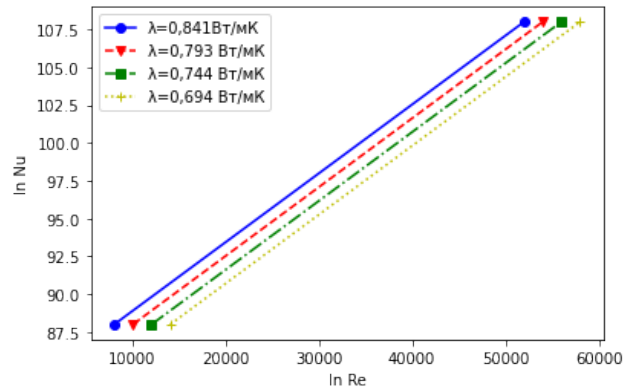


Рис. 3. Залежність чисел  $N_{uf}$  від  $Re_f^m$  для зразків нанорідин з МГ при температурі 70°C

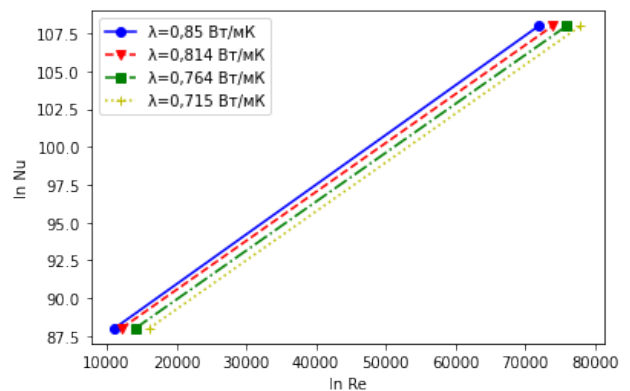


Рис. 4. Залежність чисел  $N_{uf}$  від  $Re_f^m$  для зразків нанорідин з МГ при температурі 80°C

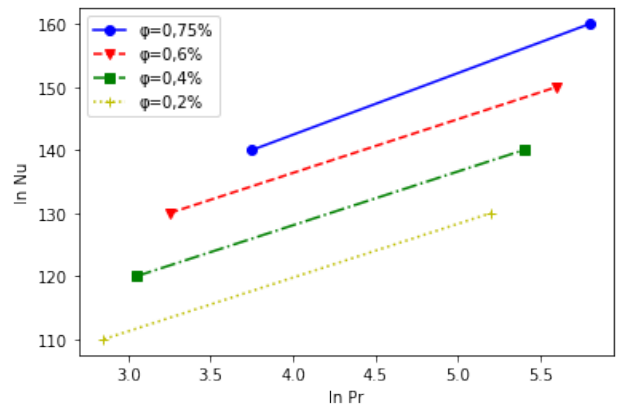


Рис. 5. Залежність чисел  $N_{uf}$  від  $Pr_f^n$  для зразків нанорідин з МГ при  $Re_f^m = 18000$

Коефіцієнт  $C$  обчислювався за формулою (4), а його величина залежить від відношення коефіцієнтів теплопровідності нанорідини з НЧ МГ  $\lambda_{nf}$  та базової рідини  $\lambda_{bf}$  при відповідній температурі теплоносіїв (рис. 9).

Вплив коефіцієнта теплопровідності нанорідин з високотеплопровідними твердими НЧ МГ

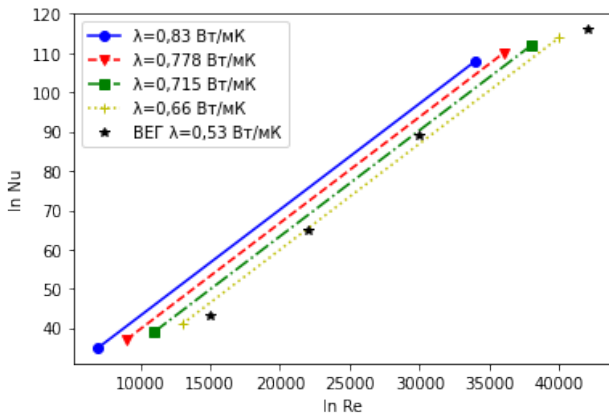


Рис. 6. Тепловіддача від охолоджуваної стінки випробувальної секції до нанорідин з МГ при середній температурі 60°C

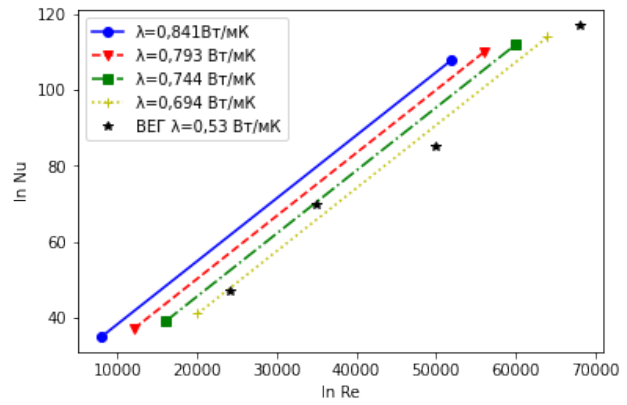


Рис. 7. Тепловіддача від охолоджуваної стінки випробувальної секції до нанорідин з МГ при середній температурі 70°C

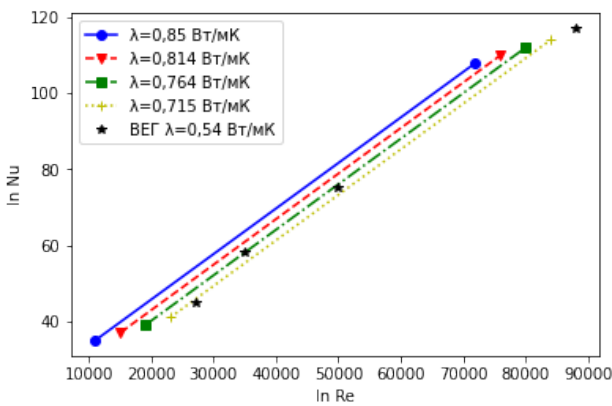


Рис. 8. Тепловіддача від охолоджуваної стінки випробувальної секції до нанорідин з МГ при середній температурі 80°C

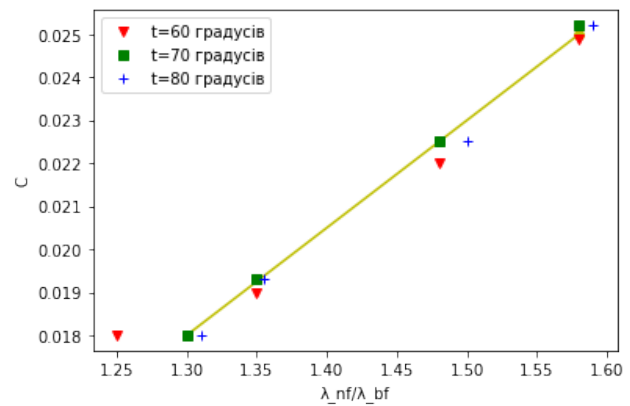


Рис. 9. Залежність коефіцієнта  $C$  від відношення коефіцієнтів теплопровідності нанорідини з МГ та базової рідини при різних їх температурах

на коефіцієнт тепловіддачі враховується безрозмірним коефіцієнтом  $C$ , що входить у рівняння:

$$C = 0,014 \left( \frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} \right)^{1,25} \quad (6)$$

Узагальнення даних, відповідно до рис. 7–8 та формули (6) щодо тепловіддачі від нагрітої стінки циліндричного каналу до досліджених зразків нанорідин з МГ у залежності від їх коефіцієнта теплопровідності описується рівнянням (7). Воно засновано на апроксимації експериментальних даних за методом найменших квадратів з величиною коефіцієнта детермінації не нижче  $R^2=0,98$ :

$$N_{u_f} = 0,014 \left( \frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} \right)^{1,25} Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \quad (7)$$

Отримане критеріальне рівняння (7) справедливо в діапазоні значень коефіцієнта теплопровідності нанорідини з НЧ МГ  $\lambda_{nf} = 0,66 \dots 0,85$  Вт/м·К, чисел Рейнольдса  $Re_f^m = 0,8 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^4$  та температури  $t = 60 \dots 80$  °С. Максимальне відхилення

значень за формулою (7) від експериментальних даних складає 8%.

Отримане рівняння (7) для тепловіддачі в СО при турбулентному режимі плинину ОН може бути основою для розрахунку теплообміну в СО судових і транспортних дизелів при застосуванні теплоносіїв з НЧ МГ з урахуванням конструктивних особливостей порожнин охолодження ДВЗ.

**Висновки.** Тенденція щодо збільшення питомої та агрегатної потужностей головних і допоміжних судових дизелів разом з удосконаленням 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 судових дизелів високо теплопровідними вуглецевими НЧ МГ є ефективним способом інтенсифікації процесів тепловіддачі в СО дизелів. Безпосередньо отримане критеріальне рівняння дозволяє розраху-

вати коефіцієнт тепловіддачі в СО суднових і транспортних дизелів на режимі конвективного теплообміну при змушеному русі ОН з МГ.

Це рівняння враховує вплив на тепловіддачу відношення коефіцієнтів теплопровідності ОН з МГ та базової рідини.

#### Список літератури:

1. Jianhao Zhu Prospects and Challenges for the Future Development of Ships URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/25/e3sconf\\_caes2020\\_06011.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/25/e3sconf_caes2020_06011.pdf) / (дата звернення: 20.01.2023).
2. Report of the Working Party on the Standardization of Technical and Safety Requirements in Inland Navigation on its Sixtieth Session. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2022-06/ECE-TRANS-SC.3-WP.3-120e.pdf>. (дата звернення: 20.01.2023).
3. Alternative fuels and propulsion systems for fishing vessels. URL: [https://www.sintef.no/contentassets/f18e738f011347999884e200f817b956/coolfish-report-propulsion\\_and\\_fuels-signed.pdf](https://www.sintef.no/contentassets/f18e738f011347999884e200f817b956/coolfish-report-propulsion_and_fuels-signed.pdf). (дата звернення: 20.01.2023).
4. Wang, S.J. The change of the concept of green shipping. China. Ship. Insp.,11:23-26. (2019)
5. Peng, C.S. Selection of methods to meet the sulfur requirements of IMO 2020. China. Ocean. Shipp.,12:68-71. (2019)
6. Zong, Y.H., Huang, L. Cheng, Z.P. Research status and development of denitration and purification technology for marine diesel engine. Environ. Eng., A1:560-564. (2016)
7. Chen, W.H. The risk of using low sulfur fuel oil should not be unknown. China. Ship. Surv.,12:112-114. (2019)
8. Tang, M. Discussion on the strategy of using low sulfur fuel oil on ships. Technol. Inf. 33:49-51. (2017)
9. 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.
10. Azmi W. H, K. Abdul Hamid, Usri N. A, Rizalman Mamat, Sharma K. V. Heat transfer augmentation of ethylene glycol: water nanofluids and applications. A review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016. № 75. Pp. 13–23.
11. Wong, Kaufui & De Leon, Omar. Applications of nanofluids: Current and future. *Advances in Mechanical Engineering*. 2010. № 2. 11 p.
12. Mohammad Mehrali. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets. *Nanoscale Research Letters*. 2014. 12 p.
13. W. Yu, H. Xie, X. Wang. Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets. *Physics Letters A*. 2011. Vol. 375. № 10. Pp. 1323–1328.
14. Choi S.U.S., Zhang Z. G., Yu W., Lockwood F. E., Grulke E. A. Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions. *Applied Physics Letters*. 2001. № 79. Pp. 2252–2254.

#### **Daki O.A., Mannapova O.V., Tryshyn V.V., Riashchenko O.I. CONSTRUCTION OF A CRITERION EQUATION FOR HEAT TRANSFER IN MARINE DIESEL ENGINE COOLING SYSTEMS UNDER TURBULENT FLOW OF COOLING NANOFLUID**

*The aim of the work is to build a criterion equation for heat transfer in the cooling system under the turbulent flow regime of the cooling nanofluid as a basis for calculating heat transfer in the cooling systems of marine and transport diesel engines when using coolants from multigraphene nanoparticles, considering the design features of the cooling cavities of internal combustion engines. The aim of the work is achieved by analysing relevant sources of information and determining possible approaches to constructing the equation. A significant increase in the thermal conductivity of the coolant can significantly increase the intensity of heat transfer in the cooling systems of forced high-speed diesel engines and thus ensure the permissible temperature level of their heat-stressed parts. To put the cooling nanofluid into operation, it is necessary to conduct a set of studies of heat transfer processes during the circulation of these coolants with an increased thermal conductivity coefficient in the cooling system of forced high-speed diesel engines. This goal is achieved by comparing and analysing the experimental values of indicators in the cooling system of marine and transport diesel engines using the graph-analytical method of processing the results of experiments. The most important result of the research is the criterion equation obtained in the article, which allows calculating the heat transfer coefficient in the cooling systems of marine and transport diesel engines in the convective heat transfer mode with the forced movement of the cooling nanofluid from the multigraphene. Thus, this equation takes into account the effect on heat transfer of the ratio of the coefficients of thermal conductivity of the cooling nanofluid made of multigraphene and the base fluid.*

**Key words:** criterion equation, cooling system, marine diesel engines, thermal conductivity, coolant nanofluid, multigraphene.