

УДК 621.89

ОПТИМІЗАЦІЯ ПІДБОРУ МОТОРНИХ ОЛИВ ДО ДВЗ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КРИТЕРІЙНОГО АНАЛІЗУ

Д-р техн. наук С. В. Воронін, кандидати техн. наук В. О. Мазепа, Г. М. Афанасов, асп. Ю. К. Орлюк, магістр М. О. Воронін

OPTIMIZATION OF ENGINE OIL SELECTION FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING CRITERIA ANALYSIS

Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, PhD (Tech.) V. Mazepa, PhD (Tech.) H. Afanasov, postgraduate student Y. Orliuk, master O. Voronin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341832>



Анотація. У статті розглянуто актуальну науково-практичну проблему – підбір моторних олив для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) в умовах насиченого та неоднорідного споживчого ринку України. Показано, що традиційні підходи щодо підбору моторної оливи, базовані виключно на класифікаціях і рекламних характеристиках, не дають змогу забезпечити оптимальні умови роботи ДВЗ відносно зносу та надійності. Зазначено, що навіть оливи, які формально належать до однієї експлуатаційної групи, можуть демонструвати кардинально різні результати залежно від конструктивних особливостей і ступеня форсування конкретного двигуна.

Запропоновано використовувати критеріальний підхід для підбору моторної оливи, що враховує фізичні параметри трибосистеми ДВЗ і складність умов експлуатації моторної

оливи. Методологічною основою дослідження є π -теорема теорії подібності та моделювання, що дає змогу сформулювати безрозмірний критерій подібності, який адекватно відображує взаємозв'язки між основними впливаючими параметрами. Запропонований критерій формують на таких величинах, як літрова потужність двигуна (N_L), питомі витрати палива (g_e), сумарна площа циліндрів ($F_{\text{ц}}$) і параметр «жорсткості» режиму експлуатації моторної оливи (n/G_M), який характеризує інтенсивність забруднення моторної оливи та її деградацію в процесі роботи.

У результаті аналізу розмірностей із застосуванням базисних змінних системи СІ (метр, кілограм, секунда) було теоретично обґрунтовано безрозмірність критерію подібності $\pi_{\text{ДВЗ}}$, що підтверджено відповідними математичними розрахунками. Проведено експертне опитування фахівців у галузі двигунобудування, хімотології та експлуатації машин, на основі якого верифіковано вибрані параметри. На основі аналізу понад 180 моделей двигунів внутрішнього згорання вітчизняного та зарубіжного виробництва здійснено практичну апробацію критерію $\pi_{\text{ДВЗ}}$, що дало змогу побудувати графічні залежності між значенням критерію подібності та групою експлуатації моторної оливи.

Запропонований критерій подібності має високу кореляцію з групою експлуатації моторної оливи, що дає змогу використовувати його як ефективний інструмент для обґрунтованого підбору моторних оливи для будь-якого типу ДВЗ на етапах конструювання, технічного обслуговування та експлуатації техніки.

Ключові слова: підбір моторних оливи, критеріальний підхід, критерій подібності, двигун внутрішнього згорання, група експлуатації, тип оливи, жорсткість роботи оливи, метод аналізу розмірностей, π -теорема, кореляція.

Abstract. This article addresses a topical scientific and practical issue—the selection of motor oils for internal combustion engines (ICEs) in the context of a saturated and heterogeneous consumer market in Ukraine. It is shown that traditional approaches to oil selection, based solely on classifications and advertising specifications, fail to ensure optimal operating conditions in terms of engine wear and reliability. Notably, even oils formally belonging to the same operational group can yield significantly different results depending on the engine's design features and performance characteristics.

We propose a criteria-based approach to motor oil selection that considers the physical parameters of the ICE tribosystem and the complexity of operating conditions. The methodological foundation of the study is the π -theorem of similarity theory and modeling, which enables the formulation of a dimensionless similarity criterion that accurately reflects the relationships among key influencing parameters. This proposed criterion is based on variables such as engine power per liter (N_L), specific fuel consumption (g_e), total cylinder area ($F_{\text{ц}}$), and the operational «rigidity» parameter (n/G_M), which characterizes the intensity of oil contamination and degradation during use.

Through dimensional analysis using SI base units (meter, kilogram, second), the dimensionlessness of the similarity criterion $\pi_{\text{ДВЗ}}$ was theoretically substantiated and confirmed through mathematical calculations. An expert survey involving professionals in engine design, tribology, and machine operation was conducted to validate the selected parameters. Based on the analysis of over 180 models of domestic and foreign ICEs, the $\pi_{\text{ДВЗ}}$ criterion was practically tested, enabling the construction of graphical relationships between the criterion value and motor oil operational groups.

The proposed similarity criterion demonstrates a high correlation with motor oil operational groups, making it an effective tool for the rational selection of motor oils for various ICE types at the design, maintenance, and operational stages.

Keywords: engine oil, selection of engine oils, criteria-based approach, similarity criterion, internal combustion engine, engine oil service group, engine oil type, engine oil rigidity, dimensional analysis method, π -theorem, correlation.

Вступ. На сучасному споживчому ринку моторних олив навіть продукти з однаковим маркуванням можуть істотно розрізнятися за триботехнічними характеристиками. Це обумовлено різними класами якості (ACEA, API), формулами базових олив і присадок, брендовою політикою тощо [1, 2].

Різноманітність хімічних складів і властивостей, дуже велика кількість комерційних видів продукції, безліч нормативних документів, виданих різними організаціями, і широкий спектр застосування роблять правильний підбір моторних олив для ДВЗ транспортних засобів, якими щодня користуються мільйони людей, складним завданням [3-5].

Нерідко дослідники робили спроби створити універсальний показник, за яким можна виконати адекватний підбір моторної оливи та який би відображував усю складність роботи ДВЗ. Однак ці спроби не дали бажаних результатів через індивідуальність і багатогранність процесів, що протікають у разі роботи ДВЗ. Більш правильним було б відмовитися від одного універсального критерію і розробити кілька критеріїв, кожен із яких оцінював би одну якусь експлуатаційну властивість. Математичні моделі оцінювання якості моторної оливи, необхідної для конкретного двигуна, не враховують увесь комплекс фізичних величин, що визначають процеси його експлуатації, мають неуніверсальний наближений характер. Тому, підбираючи моторну оливу для двигуна, необхідно використовувати критеріальний підхід, де параметр жорсткості роботи моторної оливи в ДВЗ математично описано безрозмірними критеріями подібності в будь-якому типі двигуна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багаторічний досвід експлуатації автомобільної техніки показує,

що одним з основних факторів, який визначає безвідмовність і довговічність двигуна, є надійна робота його вузлів тертя. Якщо прийняти зношування всіх спряжень двигуна за 100 %, то на зношування циліндро-поршневої групи (ЦПГ) і кривошипно-шатунного механізму (КШМ) припадає 70–80 %, а на інші спряження – 20–30 %.

Основними механізмами, що визначають «жорсткість» роботи оливи в двигуні, є ЦПГ і КШМ [6].

Проведений аналіз робіт, присвячених дослідженню трибохімічних процесів у контактній зоні під час тертя, показує, що з випробуванням малих об'ємів оливи в досить жорстких умовах, що характерно для ЦПГ, можна викликати прискорене фрикційне окиснення оливи, за якого досягають ефекту її старіння. Отримані при цьому закономірності зміни протизношувальних і протизадирних властивостей можна використовувати для розроблення діагностичного алгоритму оцінювання технічного стану моторної оливи [7, 8].

Процес тертя багато в чому залежить від властивостей змащувального елемента, тому що основне призначення моторної оливи – запобігання зносу і заїданню пар тертя.

Як показує практика, вибір моторної оливи насамперед має бути визначений її сумісністю з ДВЗ. Сумісність мастильного матеріалу як складового конструкційного елемента такої складної трибосистеми, як ДВЗ, визначає надійність і довговічність його деталей. Часто оливи вищої якості викликають більшу інтенсивність зношування вузлів тертя ДВЗ. Це пояснюють так: той запас хімічно активних присадок в оливі не реалізується в робочому процесі двигуна, і тому присадки починають поводитися хімічно агресивно відносно ущільнень двигуна і матеріалів

трибосполучень або викликати абразивне зношування в результаті великої зольності.

Щоб правильно підбирати і застосовувати оливи, необхідно насамперед знати основні закономірності процесів тертя і зношування деталей машин, умови, у яких працюють оливи, режими навантаження двигуна, для якого підбирають оливу, якість, склад і можливі зміни якості і складу оливи у двигунах [9].

Підбирають оливу для конкретного двигуна з урахуванням найбільш повної відповідності такому двигуну з урахуванням його конструктивних та експлуатаційних характеристик. Як правильно підібрати оливу для конкретного двигуна, як зміняться терміни заміни оливи з переходом від однієї групи експлуатації до іншої, як врахувати конструктивні та експлуатаційні особливості того чи іншого двигуна?

Властивості та якість мастильної речовини багато в чому залежать від властивостей сировини базової оливи, процесів виробництва та глибини очищення, а також компаундування та введення присадок [9].

Аналіз сучасних стандартних методів визначення якості моторних олив показав, що отримані експлуатаційні показники на еталонних двигунах відповідають тільки цим типам двигунів і не можуть дати повних підстав для рекомендації щодо застосування на інших двигунах, тому що вони можуть бути виконані з інших матеріалів.

Визначення мети та завдання дослідження. Зважаючи на відсутність універсального показника для підбору моторної оливи до ДВЗ, нами була зроблена спроба розробити критерій ($\pi_{\text{ДВЗ}}$), що враховує ступінь форсування, вид виконаної роботи, ступінь зносу і конструктивні особливості двигуна, на основі системного підходу, фізичного моделювання і теорії подібності. Відповідно до цього метою дослідження є обґрунтування параметрів, що входять до критерію $\pi_{\text{ДВЗ}}$ та оцінювання кореляції цього критерію з групою експлуатації моторної оливи.

Основна частина дослідження. У процесі експертного опитування фахівців у галузі двигунобудування, хімотології та експлуатації ДВЗ і багатофакторного аналізу параметрів, що впливають на умови роботи оливи (жорсткість роботи), були вибрані такі величини:

1) $N_{\text{л}}$ – літрова потужність двигуна, $\text{кг/м} \cdot \text{с}^3$, що характеризує відношення ефективної потужності двигуна до робочого об'єму циліндрів;

2) $g_{\text{е}}$ – питомі витрати палива, $\text{с}^2/\text{м}^2$, що характеризують експлуатаційні особливості та знос двигуна;

3) $F_{\text{ц}}$ – сумарна площа циліндрів, м^2 , що характеризує конструктивні особливості двигуна;

4) $n/G_{\text{м}}$ – параметр, що характеризує «жорсткість» роботи оливи в двигуні.

За другою теоремою подібності (π -теореми) теорії подібності та моделювання, будь-яке рівняння фізичного процесу, записане в певній системі одиниць вимірювання, може бути подано у вигляді функціональної залежності між критеріями подібності [6]

$$F(\pi_i) = 0, \quad (1)$$

де π_i – критерій подібності, що характеризує фізичний процес.

Причому кількість критеріїв подібності (i) менше кількості параметрів, що характеризують процес, на кількість незалежних змінних. Кількість незалежних змінних визначають на основі аналізу розмірностей величин.

Отримання критеріїв подібності методом аналізу розмірностей із використанням π -теореми обумовлено тим фактом, що параметри, які впливають на роботу ДВЗ будь-якого типу, і властивості застосовуваних моторних олив ще не описані системою рівнянь у замкнутій формі, а той математичний опис, який є, дуже наближений і не враховує весь

комплекс фізичних величин, що визначають цей фізичний процес.

За правилами отримання критеріїв подібності методом аналізу розмірностей як одиниці вимірювання вибрано довжину – L , м; масу – M , кг; час – T , с. Як базисні змінні у вибраній системі одиниць вимірювання можна використовувати такі поєднання параметрів ДВЗ: F_{Π} , m^2 ; n/G_M , $\frac{1}{kg \cdot s}$; g_e , c^2/m^2 .

До базисних параметрів не включають вихідні параметри трибосистеми, за якими відбувається моделювання.

Для зменшення кількості факторів були об'єднані в один параметр (n/G_M) величини, що характеризують забруднення оливи, яка знаходиться в картері, продуктами окиснення, що скидаються зі стінок циліндра (тобто жорсткість умов роботи оливи у двигуні). Фізичний зміст цієї величини полягає в тому, що чим більша кількість оливи G_M у двигуні, тим менша

інтенсивність забруднення оливи (тобто менш жорсткі умови роботи оливи).

Про незалежність вибраних параметрів свідчить відмінність від нуля базисного визначника, складеного зі ступенів розмірностей зазначених величин:

$$D_0 = \begin{vmatrix} F_{\Pi} & L & M & T \\ n/G_M & 2 & 0 & 0 \\ g_e & 0 & -1 & -1 \\ & -2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = -4. \quad (2)$$

Із базисними параметрами F_{Π} , n/G_M , g_e пов'язують параметр, що залишився і який входить в опис процесу N_L , отримавши критерій подібності. Критерій подібності має вигляд добутку степеневих комплексів. Для визначення форми запису критеріїв подібності необхідно знати значення визначників для критерію ДВЗ:

$$\begin{vmatrix} N_L & L & M & T \\ n/G_M & -1 & 1 & -3 \\ g_e & 0 & -1 & -1 \\ & -2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = 10;$$

$$\begin{vmatrix} F_{\Pi} & L & M & T \\ N_L & 2 & 0 & 0 \\ g_e & -1 & 1 & -3 \\ & -2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = 4;$$

$$\begin{vmatrix} F_{\Pi} & L & M & T \\ n/G_M & 2 & 0 & 0 \\ N_L & 0 & -1 & -1 \\ & -1 & 1 & -3 \end{vmatrix} = 8.$$

За правилами запису формул критеріїв подібності [10] отримуємо критерій ДВЗ

$$\pi_{ДВЗ} = \frac{N_L \cdot F_{\Pi}^{5/2} \cdot n \cdot g_e^2}{G_M}, \quad (3)$$

де N_L – літрова потужність двигуна, $kg/m \cdot s^3$;
 F_{Π} – сумарна площа циліндрів, m^2 ;
 n – частота обертання колінчастого вала, s^{-1} ;
 g_e – питомі витрати палива, c^2/m^2 ;
 G_M – об'єм системи змащення, kg .

Отже, на основі використання другої теореми теорії подібності та моделювання (π -теореми) методом аналізу розмірностей отримано критерій подібності досліджуваного процесу.

Отримуючи критерії подібності методом аналізу розмірностей або іншими методами, потрібно ретельно теоретично та експериментально перевірити коректність їх отримання.

Із метою перевірки правильності отримання критерію подібності фізичного моделювання було перевірено їхні безрозмірності. Підставивши в критерій

подібності замість величин формули їхні розмірності, отримуємо, що параметр $\pi_{\text{ДВЗ}}$ – безрозмірний. Отже, теоретично перевірено правильність виведення критерію подібності через перевірку його безрозмірності.

Наступним етапом для розроблення критерію $\pi_{\text{ДВЗ}}$ стало його практичне застосування. Під час практичної роботи проаналізовано літературу та оброблено дані більш ніж 180 двигунів як вітчизняних, так і імпортованих фірм-виробників. У результаті отримали графічні залежності $\pi_{\text{ДВЗ}}$ від групи експлуатації оливи. Дані розрахунку наведені в таблиці.

Таблиця

Результати розрахунку критерію подібності $\pi_{\text{ДВЗ}}$

Тип ДВЗ	Потужність двигуна N, Вт	Робочий об'єм двигуна V, м ³	Робоча площа циліндрів F, м ²	Літрова потужність двигуна N/V, Вт/м ³	Середні годинні витрати палива G, кг/год	Питомі витрати палива g, кг/Вт·с·3600	Тип моторної оливи	Об'єм системи змащення G, кг	Значення критерію подібності $\pi_{\text{ДВЗ}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗИЛ-375	129000	0,007	0,025926	$1,84857 \cdot 10^7$	8,91424	$1,919517 \cdot 10^{-8}$	SE	9	$0,994174 \cdot 10^{-10}$
ЗМЗ-53-11	88300	0,00425	0,184782	$2,07747 \cdot 10^7$	8,91424	$1,639562 \cdot 10^{-8}$	SE	8	$1,380526 \cdot 10^{-10}$
ВАЗ 2131	6000	0,00169	0,0824	$3,55295 \cdot 10^7$	3,2752	$1,516296 \cdot 10^{-8}$	SF	6,2	$1,5001 \cdot 10^{-10}$
ЗМЗ-4022,10	74000	0,002446	0,1063	$3,02347 \cdot 10^7$	3,53152	$1,325645 \cdot 10^{-8}$	SF	6	$1,7525 \cdot 10^{-10}$
Alfa Romeo1551, 8 Twin	103000	0,001747	0,0852	$5,89824 \cdot 10^7$	2,24992	$0,606774 \cdot 10^{-8}$	SG	5,6	$2,9695 \cdot 10^{-10}$
Volvo 460 1,8i	66000	0,001783	0,0868	$3,70626 \cdot 10^7$	2,16448	$0,910976 \cdot 10^{-8}$	SG	5,3	$2,09463 \cdot 10^{-10}$
Nissan Sunny 1,6 LX Traveller	66000	0,001597	0,084	$4,13748 \cdot 10^7$	2,07904	$0,875016 \cdot 10^{-8}$	SG	3,4	$2,1396 \cdot 10^{-10}$
Mersedes-Benz S 600	290000	0,005987	0,2691	$4,84828 \cdot 10^7$	4,04416	$0,387376 \cdot 10^{-8}$	SH	8	$2,3310 \cdot 10^{-10}$
AudiA3 1,6	74000	0,001595	0,0788	$4,69498 \cdot 10^7$	2,05056	$0,769729 \cdot 10^{-8}$	SJ	3,5	$2,4364 \cdot 10^{-10}$
BMW 750 Li	240000	0,005379	0,2531	$4,46795 \cdot 10^7$	3,38912	$0,392259 \cdot 10^{-8}$	SL	7,5	$3,3637 \cdot 10^{-10}$
ЯМЗ-236	132000	0,01115	0,343077	$1,18856 \cdot 10^7$	6,88	$1,447811 \cdot 10^{-8}$	CE	24	$0,84337 \cdot 10^{-10}$
ЯМЗ-238 Л	220000	0,01486	0,457231	$1,48484 \cdot 10^7$	12,32	$1,555555 \cdot 10^{-8}$	CE	24	$0,98289 \cdot 10^{-10}$

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
КамАЗ 740,10	154000	0,01085	0,361667	$1,41954 \cdot 10^7$	6,56	$1,183261 \cdot 10^{-8}$	CE	30,5	$1,15334 \cdot 10^{-10}$
Peugeot 505 GRD	95000	0,002446	0,1064	$3,88892 \cdot 10^7$	2,24	$0,654976 \cdot 10^{-8}$	CF-4	6	$1,4921 \cdot 10^{-10}$
Toyota Hilux 2GD-FTV	55000	0,001974	0,0934	$2,78228 \cdot 10^7$	1,92	$0,969696 \cdot 10^{-8}$	CF-4	5,3	$1,5472 \cdot 10^{-10}$
Toyota Avensis	66000	0,00187	0,0935	$3,52941 \cdot 10^7$	1,76	$0,740747 \cdot 10^{-8}$	CG-4	5	$1,7972 \cdot 10^{-10}$
Citroën Xantia	100000	0,002996	0,1378	$3,33783 \cdot 10^7$	2,368	$0,657778 \cdot 10^{-8}$	CG-4	8	$1,825 \cdot 10^{-10}$
Ford Ranger 2.5	85000	0,002498	0,1249	$3,40722 \cdot 10^7$	2,208	$0,721568 \cdot 10^{-8}$	CH-4	5,5	$1,8652 \cdot 10^{-10}$
Chevrolet Cruze Clean Diesel 2.0 Multijet	60000	0,001686	0,0852	$3,58718 \cdot 10^7$	2,016	$0,933333 \cdot 10^{-8}$	CI-4	3,5	$2,2261 \cdot 10^{-10}$
Skoda Octavia III 2.0 TDI	125000	0,004164	0,1772	$3,01921 \cdot 10^7$	3,584	$0,796444 \cdot 10^{-8}$	CJ-4	9,3	$2,4341 \cdot 10^{-10}$

Обговорення результатів. На основі отриманих даних були побудовані залежності критерію подібності від групи моторної оливи (рис. 1, 2). Із графічних

залежностей можна зробити висновок, що критерій подібності має хорошу кореляцію з групою експлуатації моторної оливи.

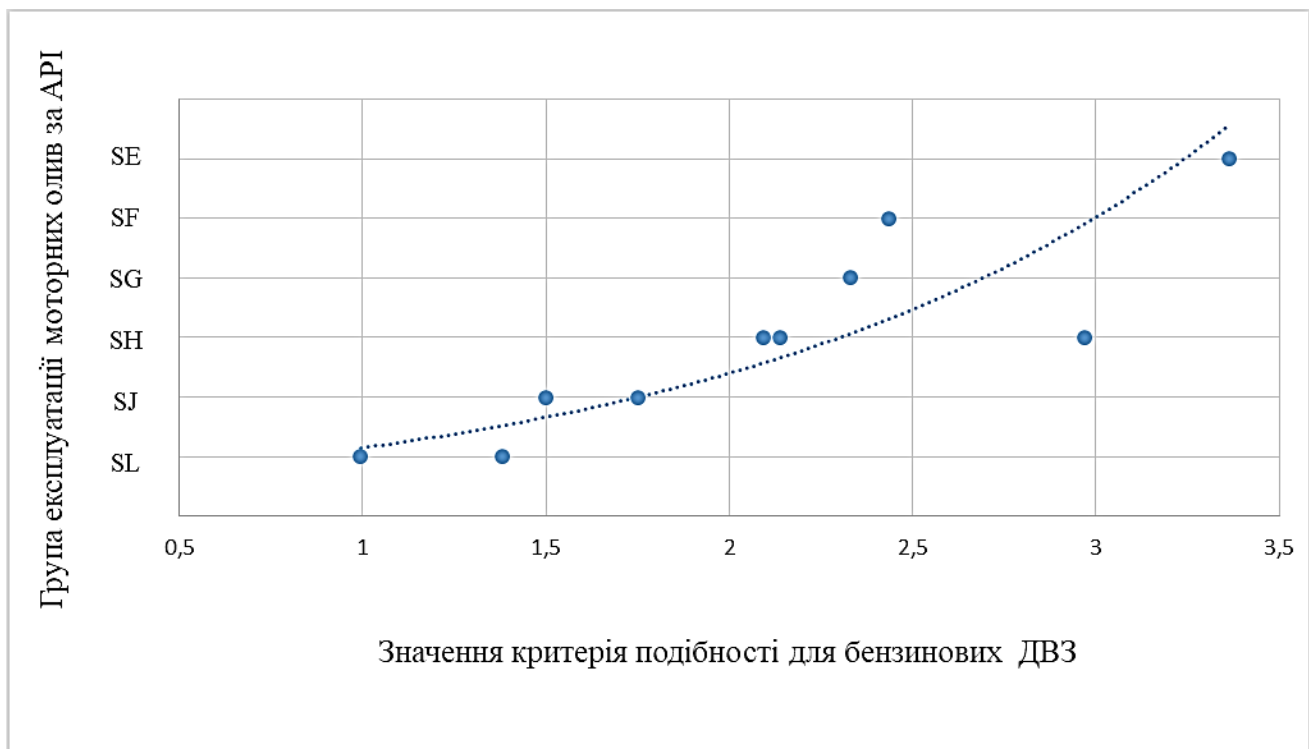


Рис. 1. Залежність критерію подібності від групи експлуатації моторних олив (за API) для бензинових ДВЗ

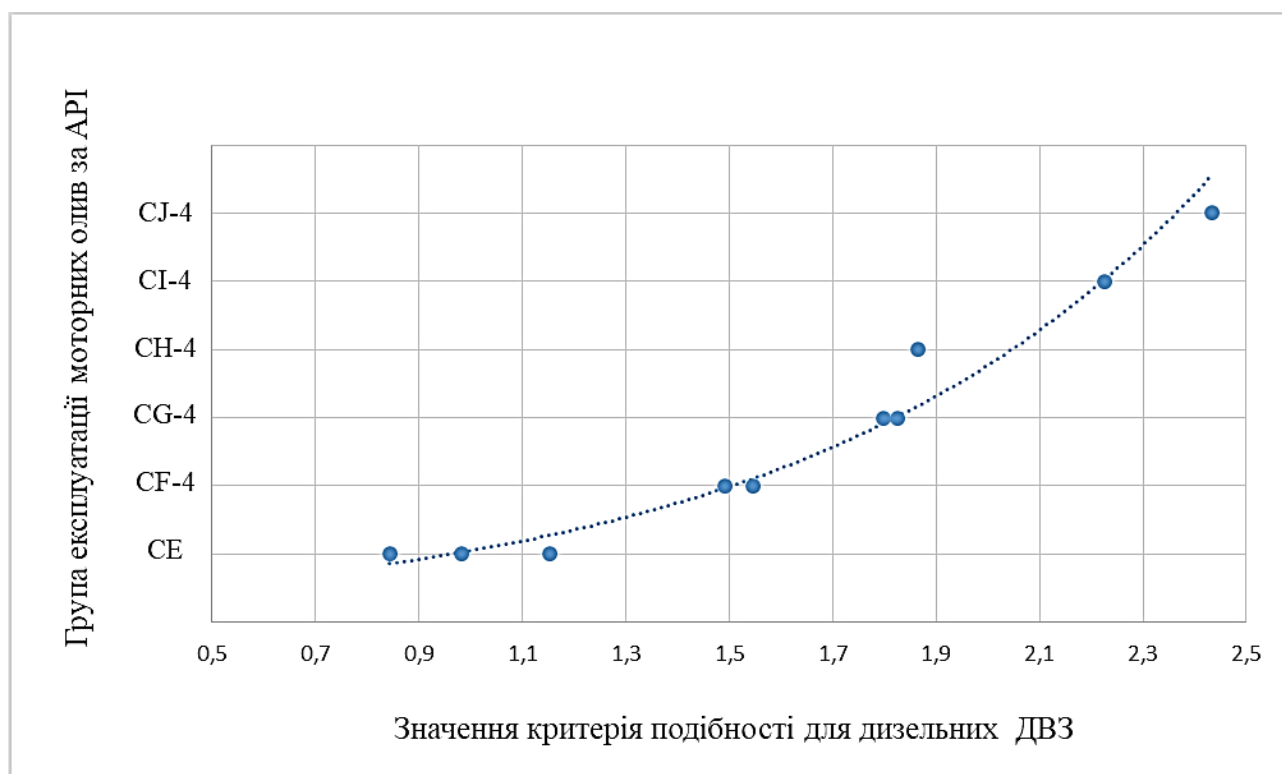


Рис. 2. Залежність критерію подібності від групи експлуатації моторних олив (за API) для дизельних ДВЗ

Висновки. В основу методичного підходу для вирішення поставлених завдань покладено системний аналіз, де об'єктом дослідження служив двигун внутрішнього згоряння – моторна олива. Вирішуючи це завдання, автори застосували основні теореми теорії подібності та моделювання.

На основі другої теореми теорії подібності та моделювання (π -теореми), у якій сказано, що будь-який складний фізичний процес можна подати у вигляді функціональних залежностей між критеріями подібності, було отримано критерій подібності ($\pi_{\text{ДВЗ}}$).

При цьому як критерій використано безрозмірні комплекси, до яких можуть входити N незалежних факторів.

Було отримано критерій подібності ($\pi_{\text{ДВЗ}}$) і побудовано залежності критерію подібності ($\pi_{\text{ДВЗ}}$) від групи експлуатації моторних олив (за API) для бензинових і дизельних ДВЗ.

Це дає змогу підбирати моторні оливи для будь-яких типів ДВЗ із повним урахуванням конструктивних особливостей двигуна, роду виконуваних робіт (завантаженості), ступеня зносу як на етапах проєктування, так і для технічного сервісу.

Список використаних джерел

1. Wolak A., Zajac G., Fijorek K. & Matwijczuk A. (2020). Experimental investigation of the viscosity parameters ranges—Case study of engine oils in the selected viscosity grade. *Energies*. 13(12). 3152. <https://doi.org/10.3390/en13123152>.
2. Исследование триботехнических характеристик зарубежных моторных масел /Л. И. Куксенова, Л. М. Рыбалкова и др. *Вісник машинобудування*. 1999. С. 7-11.

3. Guan L., Feng X. L. & Xiong G. (2008). Engine lubricating oil classification by SAE grade and source based on dielectric spectroscopy data. *Analytica Chimica Acta*. 628. 117–120. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.09.004>.
 4. Wakiru J. M., Pintelon L., Muchiri P. N. & Chemweno P. K. (2019). A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 118. 108–132. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.08.034>.
 5. Zhu J., He D. & Bechhoefer E. (2013). Survey of lubrication oil condition monitoring, diagnostics, and prognostics techniques and systems. *Journal of Chemical Science and Technology*. 2. 100–115.
 6. Бажинов А. В. Прогнозирование остаточного ресурса автомобильного двигателя: монографія. Харків: ХДАДТУ, 2001. 95 с.
 7. Бажинов А. В., Полянский А. С., Бажинов Е. А. Метод определения сроков смены моторных масел транспортных машин. *Вісник ХДТУСХ*. 2003. № 14. С. 212–216.
 8. Бажинов А. В. Управление надежностью автомобильного двигателя в конкретных условиях эксплуатации. *Автомобільний транспорт*. Київ: Техніка, 1988. Вип. 25. С. 18–21.
 9. Klamann D. Lubricants and related products: synthesis, properties, applications, international standards. Weinheim: Verlag Chemie, 1984. 489 p. ISBN 3-527-26022-6.
 10. Захаров С. М., Жаров И. А. Методология моделирования сложных трибосистем. *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 5. С. 825-834.
-

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Мазепа Віталій Олександрович, кандидат технічних наук, докторант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0009-8617-5015. Тел.: +38(050)703-32-36. E-mail: mazepavitalii@gmail.com.

Афанасов Георгій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0003-1730-1785. Тел.: +38(066)452-40-39. E-mail: 0674274770@kart.edu.ua.

Орлюк Юрій Костянтинович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0001-1004-490X. Тел.: +38(067)923-14-85. E-mail: orlyuk525@gmail.com.

Воронін Максим Олексійович, магістр з галузевого машинобудування. ORCID iD: 0009-0001-8841-0615.

Тел.: +38(066)721-33-26. E-mail: max.voronin@gmail.com.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Tel.: +38 (095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Vitalii Mazepa, PhD (Tech.), doctoral student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0009-0009-8617-5015. Tel.: +38(050)703-32-36. E-mail: mazepavitalii@gmail.com.

Afanasov Heorhii, PhD (Tech.), associate professor, doctoral student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0003-1730-1785. Tel.: +38(066)452-40-39. E-mail: 0674274770@kart.edu.ua.

Orliuk Yurii, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0009-0001-1004-490X. Tel.: +38(067)923-14-85. E-mail: orlyuk525@gmail.com.

Voronin Maksym, master's degree in industrial mechanical engineering.

ORCID iD: 0009-0001-8841-0615. Tel.: +38(066)721-33-26. E-mail: max.voronin@gmail.com.

Статтю прийнято 09.09.2025 р.