Шифр: Еталонні значення

«ВИЗНАЧЕННЯ ЕТАЛОННИХ ЗНАЧЕНЬ КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ ТА КОЕФІЦІЄНТУ ВАГОМОСТІ ЙОГО ПАЛИВНОЇ СКЛАДОВОЇ»

Галузь науки: Енергетичне машинобудування

Секція: Двигуна внутрішнього згоряння

ЗМІСТ

ВСТУП…….. 3
1 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКОВОГО ОЦІНЮВАННЯ ЕТАЛОННИХ ЗНАЧЕНЬ КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ ЯК ФАКТОРА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ……...……. 8
2 ОТРИМАННЯ ЕТАЛОННИХ ЗНАЧЕНЬ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ПОРШНЕВИХ ДВЗ ……..... 12
3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕТАЛОННИХ ЗНАЧЕНЬ КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ ТА ЇХ АНАЛІЗ ...…….. 16
4. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕТАЛОННИХ ЗНАЧЕНЬ КОЕФІЦІЄНТУ ВАГОМОСТІ ПАЛИВНОЇ СКЛАДОВОЇ КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ …… 25
ВИСНОВКИ …… 29
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ …….……. 31
ДОДАТОК А. SWOT-АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ …….. 33
ДОДАТОК Б. АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ ПРОФ. І.В. ПАРСАДАНОВА ……..…. 35
ДОДАТОК В. ПІДХІД ДО ОПИСАННЯ РОЗПОДІЛІВ ЗНАЧЕНЬ СКЛАДОВИХ НАБОРУ ВИХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ВСЬОГО ПОЛЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ПОРШНЕВОГО ДВЗ ……. 38

ВСТУП

Актуальність дослідження, представленого у цій конкурсній студентській науковій роботі, зумовлена наступним.

У монографії [1] здійснено аналіз 9 відомих математичних апаратів, придатних для здійснення комплексного розрахункового оцінювання рівня екологічної безпеки (ЕкБ) процесу безаварійної експлуатації енергоустановок (ЕУ) з поршневим двигуном внутрішнього згоряння (ПДВЗ). За результатами аналізу і систематизації у вигляді відповідної класифікації встановлено, що найбільш придатними для досягнення поставленої мети можна визнати математичні апарати комплексного паливно-екологічного критерію проф. Парсаданова K_{fe} (описаний у монографії [2]) та узагальненої функції бажаності Харрінгтона D (описаний у роботі [3]). У тому ж джерелі здійснено порівняльний аналіз переваг і недоліків обраних альтернативних критеріальних математичних апаратів та винесено висновок про те, що доцільним для подальших досліджень є використання обох апаратів при взаємному посиленні переваг та послабленні недоліків.

Першим кроком на такому шляху є використання математичного апарату узагальненої функції бажаності зі структурою враховуваних впливаючих факторів, ідентичній комплексному паливно-екологічному критерію. Оскільки основною перевагою критерію K_{fe} є врахування масових годинних витрат палива ПДВЗ G_{fuel}, то для використання такої переваги слід визначити вагомість цього фактора ЕкБ у порівнянні з іншими – викидами законодавчо нормованих полютантів з потоком ВГ G_k, що здійснено у монографії [1], де також наведено вдосконалену класифікацію факторів ЕкБ, джерелом яких є ПДВЗ у складі ЕУ, яка складається з 15 пунктів, а також розкрито характер впливу величини G_{fuel} на усі інші фактори ЕкБ у вказаній класифікації. Тому, зважаючи на те, що паливна складова критерію K_{fe} повністю зумовлює його екологічну складову, як встановлено у монографії [1], раціонально також дослідити особливості застосування іншого підходу, а саме використання критерію K_{fe} як окремого впливаючого фактора у структурі узагальненої функції бажаності D. При цьому можливим стає враховувати показники вібрації (ступінь нерівномірності обертання колінчастого валу δ_{cs}, критерії Клімова-Стечкіна ξ_{cs} і η_{cs}), шуму (еквівалентний L_{Aequ} та максимальний L_{Amax} рівень шуму), теплового забруднення (масові годинні витрати палива G_{fuel} окремо від паливної

складової критерію K_{fe}), викидів оксидів сірки G_{SOx} тощо.

Для реалізації цього підходу необхідною є наявність даних щодо значень такого враховуваного фактора (тобто відгуку локального критерію якості r), які можуть бути співвіднесеними з реперними точками психофізичної шкали оцінки бажаності значення відгуку r «добре» та «погано», а також відповідними їх значеннями шкали значень базової оцінки значення часткової функції бажаності d = = 0,63 … 0,8 та d = 0,2 … 0,32. При цьому за зразкові значення показників екологічної складової критерію K_{fe} пропонується обрати значення викидів законодавчо нормованих полютантів, що містяться у відповідних стандартах (наприклад у [4, 5]), для поточного (оцінки «добре» та d = 0,8) та попередніх (оцінки «погано» та d = 0,2) рівнів EURO.

Однак, різні ПДВЗ, що наразі перебувають в експлуатації, відносяться до різних поколінь такої техніки та знаходяться у різному поточному технічному стані (що відповідає ступіню фізичного зносу і дотримання черговості регламентних робіт з обслуговування і ремонту) і тому характеризуються різним рівнем паливної економічності, тобто значенням питомих ефективних масових годинних витрат палива g_e. Тому слід отримати залежності значень критерію K_{fe}, у структурі якого показники екологічної складової набувають законодавчо встановлених значень, від значення паливної складової критерію для різних рівнів нормативів EURO. Проте, при аналізі науково-технічної літератури автором результатів такого дослідження не виявлено, тому отримання набору значень критерію K_{fe}, які можуть бути співвіднесені з реперними точками шкали часткової функції бажаності d, є актуальною науково-технічною задачею, що має ознаки наукової новизни та вирізняється практичною цінністю.

Слід зауважити, що ПДВЗ є потужним джерелом забруднення довкілля різноманітними за своєю фізичною природою факторами, у тому числі й споживає невідновний енергоресурс (моторне паливо нафтового походження) – це якісний аспект актуальності теми даного дослідження, вони у своїй сукупності виробляють до 75 % енергії (механічної та електричної) на теренах нашої держави [2] – це кількісний аспект актуальності теми даного дослідження.

Метою дослідження є визначення еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова та вагомості його паливної

складової як реперних точок психофізичної шкали часткової функції бажаності.

Завданням дослідження є визначення необхідних характеристик комплексного паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова та вагомості його паливної складової як часткових функцій бажаності для здійснення комплексного оцінювання рівня ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ на основі математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона.

Об'єктом дослідження є кількісні характеристики паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова та вагомості його паливної складової як фактора екологічної безпеки.

Предметом дослідження є значення еталонних значень паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова та вагомості його паливної складової для різних рівнів законодавчо встановлених екологічних нормативів та залежно від рівня паливної економічності ПДВЗ та інших впливаючих факторів.

Задачами дослідження є наступні пункти.

1. Створення методики розрахункового оцінювання еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію як реперних точок психофізичної шкали часткової функції бажаності при використанні його у якості фактора ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

2. Розрахункове оцінювання еталонних значень показників екологічності ПДВЗ як складових комплексного паливно-екологічного критерію.

3. Побудова підходу до описання розподілів значень складових набору вихідних даних для здійснення розрахункового дослідження для всього поля робочих режимів ПДВЗ.

4. Розрахункове оцінювання еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію, його екологічної та паливної скаладових та аналіз його результатів.

5. Розрахункове оцінювання значень коефіцієнтів часткових функцій бажаності для комплексного паливно-екологічного критерію відповідно до обраних реперних значень функцій відгуку та шкали бажаності.

6. Розрахункове оцінювання еталонних значень вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію та аналіз його результатів.

7. Здійснення SWOT-аналізу результатів дослідження.

Дослідження виконано на прикладі автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 (Д21А1), технічний опис якого наведено у джерелі [6].

Методи дослідження. Аналіз спеціалізованої науково-технічної, нормативної, патентної та довідникової літератури, аналіз даних стендових моторних випробувань за стандартизованими стаціонарними випробувальними циклами, основи наукової дисципліни «Теорія ПДВЗ» [7–10], вдосконалений математичний апарат комплексного паливно-екологічного критерію, метод найменших квадратів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному.

1. *Вперше* запропоновано підхід до розрахункового оцінювання еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова як реперних точок психофізичної шкали часткової функції бажаності Харрінгтона при використанні його у якості фактора ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

2. *Вперше* запропоновано підхід до розрахункового оцінювання еталонних значень вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова.

Практична значимість отриманих результатів полягає у наступному.

Методики, побудовані на запропонованих підходах, для розрахункового оцінювання еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова та вагомості його паливної складової як реперних точок психофізичної шкали часткової функції бажаності *придатні* для отримання необхідних даних для здійснення комплексного критеріального оцінювання рівня ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ з використанням узагальненої функції бажаності Харрінгтона, у структурі якої комплексний паливно-екологічний критерій виступає як окремий фактор.

Результати дослідження знайшли *використання* у:

– практиці господарчої діяльності ТОВ «Торгівельна фірма «ФЕНІКС – С» (м. Харків, довідка про використання);

– у навчальному процесі кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України (м. Харків, довідка про використання).

Результати *представлено* на:

– IV International Scientific and Practical Conference «Priority directions of

science and technology development» (20 – 22 December 2020, Kyiv, Ukraine);

– III International Scientific and Practical Conference «Science and education: problems, prospects and innovations» (29 – 31 December 2020, Kyoto, Japan);

– Міжнародну науково-практичну конференцію «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (15 – 16 квітня 2021 р., НУЦЗ України, Харків),

– XXIX Міжнародну науково-технічну конференцію «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD-2021» (14 – 16 травня 2021 р., НТУ «ХПІ», Харків),

та буде *опубліковано* у формі тез доповідей у збірниках матеріалів конференій.

Загальна характеристика наукової роботи. Робота складається із титульного аркуша, змісту, вступу, 4 розділів, висновків, списку джерел посилання, 3 додатків та анотації. Повний обсяг роботи складає 48 сторінок, 28 стор. основного тексту, в тому числі 29 рисунків, 4 таблиці; список джерел посилання містить 11 найменувань на 2 сторінках, додатоки викладено на 16 стор.

1 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКОВОГО ОЦІНЮВАННЯ ЕТАЛОННИХ ЗНАЧЕНЬ КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ ЯК ФАКТОРА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Математичний апарат узагальненої функції бажаності Харрінгтона D, що відноситься до нечіткої логіки, викладено у джерелі [1, 3]. Ця функція за своєю ідеєю є кількісним, однозначним, єдиним та універсальним показником якості досліджуваного об'єкту, а також характеризується адекватністю і статистичною чутливістю. Значення узагальненої функції бажаності D для i-го представницького режиму роботи ПДВЗ у моделі його експлуатації, у структурі якої у якості впливаючого фактора ЕкБ виступає комплексний паливно-екологічний критерій K_{fe}, визначається за формулою (1.1).

$$D_i = \sqrt[\sum_{k=1}^{n} \upsilon_k]{\prod_{k=1}^{n} d_{ki}^{\upsilon_k}} = \sqrt[(\upsilon_{k_1}+\upsilon_{k_2}+...+\upsilon_{k_n})]{d_i(k_1)^{\upsilon_{k_1}} \cdot d_i(k_2)^{\upsilon_{k_2}} \cdot ... \cdot d_i(k_n)^{\upsilon_{k_n}}}, \quad (1.1)$$

де d_k – часткова функція бажаності, що відповідає k-му критерію якості, $d_k = 0 \ldots 1{,}0$, причому $k_1 = K_{fe}$; n – кількість критеріїв якості, що розглядаються; υ_k – коефіцієнт вагомості k-го критерію якості, що розглядаються, $0 < \upsilon_k \leq 1$, причому $\upsilon_{k1} = 38{,}4 + 245{,}3 = 283{,}7$ (див. [1]).

Математичний апарат цієї функції передбачає перетворення значень відгуків локальних критеріїв якості r_k у безрозмірну шкалу бажаності – значення часткових функцій бажаності d_k – згідно до таблиці базової оцінки шкали бажаності, тобто табл. 1.1, яка також містить психофізичну шкалу [3].

У даному дослідженні у якості часткових функцій бажаності d_k обрано такі, котрі відповідають, по-перше, паливно-екологічному критерію K_{fe} (позначено індексом k_1 у формулі (1.1)), а по-друге, величини, що потенційно можуть виступати показниками інших факторів ЕкБ, внесених до вдосконаленої класифікації у джерелі [1], які втім не враховуються математичним апаратом критерію K_{fe} (тобто усі, окрім масових годинних викидів законодавчо нормованих полютантів – G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO}, а також опосередковано – масових годинних витрат палива дизелем G_{fuel}), а саме показники шуму (еквівалентний L_{Aequ} та максимальний L_{Amax} рівень шуму), вібрації (ступінь нерівномірності обертання колінчастого валу δ_{cs},

критерії Клімова-Стечкіна ξ_{cs} і η_{cs}), теплового забруднення (масові годинні витрати палива G_{fuel}), викидів оксидів сірки G_{SOx} тощо (позначено індексами k_2 … k_n у формулі (1.1)). Фактор ЕкБ у структурі функції бажаності D, обраний основним – критерій K_{fe}, являє собою випадок реального однобічного обмеження і описуються формулою (1.2).

$$d_{ki} = \exp[-\exp(a_{ki} + b_{ki} \cdot r_{ki})]; k = \{K_{fe}, G_{SO_x}, \delta_{cs}, \xi_{cs}, \eta_{cs}, L_{Aequ}, L_{A\max}, ...\}, \quad (1.2)$$

де r_{ki} – дійсне значення k-го критерію якості на i-му представницькому режимі роботи ПДВЗ у моделі його експлуатації; a_{ki} та b_{ki} – коефіцієнти, що визначаються на основі встановлення відповідності між парою характерних значень r_{ki} та d_{ki} згідно до вмісту табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Базові оцінки шкали реальної бажаності d_k [3]

Оцінка бажаності значення відгуку r_{ki}	Кількісне значення за шкалою бажаності d_{ki}
Дуже добре	1,0 … 0,8
Добре	0,8 … 0,63
Задовільно	0,63 … 0,37
Погано	0,37 … 0,2
Дуже погано	0,2 … 0,0

Дані, що дозволяють обрати параметри складових формул (1.2) для часткових функцій бажаності d_k отримуються шляхом вирішення систем з двох рівнянь (див. формули (1.3) – (1.5)) для випадків, що ставлять у відповідність одне одному характерні значення r_{ki} та d_{ki}, відомі з практики чи нормативних документів.

$$\begin{cases} d_{kidn} = \exp[-\exp(a_{ki} + b_{ki} \cdot r_{kidn})] \\ d_{kiup} = \exp[-\exp(a_{ki} + b_{ki} \cdot r_{kiup})] \end{cases}; \quad (1.3)$$

$$a_k = (\ln(-\ln(d_{kup})) \cdot r_{kdn} - \ln(-\ln(d_{kdn})) \cdot r_{kup}) / (r_{kdn} - r_{kup}), \quad (1.4)$$

$$b_k = (\ln(-\ln(d_{kdn})) - \ln(-\ln(d_{kup}))) / (r_{kdn} - r_{kup}), \quad (1.5)$$

де індексами up і dn позначено характерні парні значення r_{ki} та d_{ki}, що відповідають обраним оцінкам за психофізичною шкалою «добре» (тобто d_{kiup} = 0,63 … 0,8) і «погано» (тобто d_{kidn} = 0,2 … 0,32) з урахуванням специфічних особливостей величин r_{ki}.

Сутність пропонованої методики полягає у тому, що у якості значень r_{kiup} буде використано порежимне значення критерію K_{fe} (див. формулу (1.6)), фактори

екологічної складової якого (G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO}) відповідають сучасним чинним законодавчо встановленим нормативам (тобто рівню EURO VI, найбільш жорстким з точки зору історичної ретроспективи), а у якості значень r_{kidn} – значення критерію K_{fe}, фактори екологічної складової якого відповідають менш жорстким з точки зору історичної ретроспективи нормативам (тобто рівнів EURO I … VI). Такі вимоги у історичній ретроспективі зведено у таблицю 1.2.

$$K_{fei} = \frac{3600 \cdot N_{ei}}{H_u \cdot G_{fueli}} \cdot \frac{G_{fueli}}{G_{fueli} + \sigma \cdot f \cdot \sum_{k=1}^{h} (A_k \cdot G_{ki})} \cdot 1000, \text{‰} \qquad (1.6)$$

Таблиця 1.2 – Норми токсичності дизелів [1, 2, 4, 5, 7 – 10]

Рівень EURO	**Рік введення**	**Питомий ефективний масовий годинний викид g_k, г/(кВт·год)**			
		ТЧ	**NO_x**	**C_nH_m**	**CO**
I	1992	0,612	8,0	1,1	4,5
II	1996	0,25…0,15	7,0	1,1	4,0
III	2000	0,10	5,0	0,66	2,1
IV	2005	0,02	3,5	0,46	1,5
V	2008	0,02	2,0	0,25	1,5
VI	2012	0,01	0,5	0,2	1,0

У нормативах токсичності ВГ ПДВЗ [4, 5] вказано гранично допустимі значення питомих ефективних масових викидів полютантів з потоком ВГ (g_{PM}, g_{NOx}, g_{CnHm}, g_{CO} у кг/(кВт·год)), а не значення їх масового годинного викиду (G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO} у кг/год), які фігурують у формулі для визначення значення критерію K_{fe}. Такі величини співвідносяться між собою за формулою (1.7), тобто значення величини масового годинного викиду k-го полютанта G_k, що відповідає нормативно встановленому значенню величини питомого ефективного масового годинного викиду того ж полютанту g_k, залежать від значення ефективної потужності ПДВЗ N_e у кВт, а отже від координат поля робочих режимів двигуна (частоти обертання колінчастого валу $n_{кв}$ у хв$^{-1}$ та крутного моменту $M_{кр}$ у Н·м) що відображає формула (1.8).

$$G_k = g_k \cdot N_e, \text{ кг/год;} \qquad (1.7)$$

$$N_e = n_{кв} \cdot M_{кр} / 9550, \text{ кВт.} \qquad (1.8)$$

Отже, у цьому розділі запропоновано підхід та розроблено на його основі методику розрахункового оцінювання еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова як реперних точок психофізичної шкали часткової функції бажаності при використанні його у якості фактора ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

2 ОТРИМАННЯ ЕТАЛОННИХ ЗНАЧЕНЬ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ПОРШНЕВИХ ДВЗ

Залежності значень еталонних значень величин викидів G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO}, $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ та $\Sigma(G_k)$ від значень потужності N_e, описані формулою (1.7) за даними табл. 1.2, для різних рівнів EURO проілюстровані у вигляді графіків на рис. 2.1. Розподіл значень величини потужності N_e, описаних формулою (1.8), по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 наведено на рис. 2.2. Розподіл значень еталонних значень величин викидів G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO} та $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для крайніх рівнів EURO I та VI проілюстровано на рис. 2.3 і 2.4.

На рис. 2.1 видно, що такі залежності для будь-якого ПДВЗ носять лінійний характер, еталонні значення викидів зростають зі збільшенням значення ефективної потужності. Так при зростанні величини N_e з 0,05 до 25 кВт: а) значення G_{nPM} збільшуються від 0,03 до 15,3 г/год для EURO I та від 0,001 до 0,25 г/год для EURO VI; б) значення G_{nNOx} – від 0,4 до 200 г/год (EURO I) та від 0,025 до 12,5 г/год (EURO VI); в) значення G_{nCnHm} – від 0,055 до 27,5 г/год (EURO I) та від 0,01 до 5,0 г/год (EURO VI); г) значення G_{nCO} – від 0,023 до 112,5 г/год (EURO I) та від 0,05 до 25,0 г/год (EURO VI); д) значення $\Sigma(A_k \cdot G_k)_n$ – від 23,0 до 11480,5 г/год (EURO I) та від 1,2 до 604,8 г/год (EURO VI); е) значення $\Sigma(G_k)_n$ – від 0,71 до 355,3 г/год (EURO I) та від 0,09 до 24,8 г/год (EURO VI).

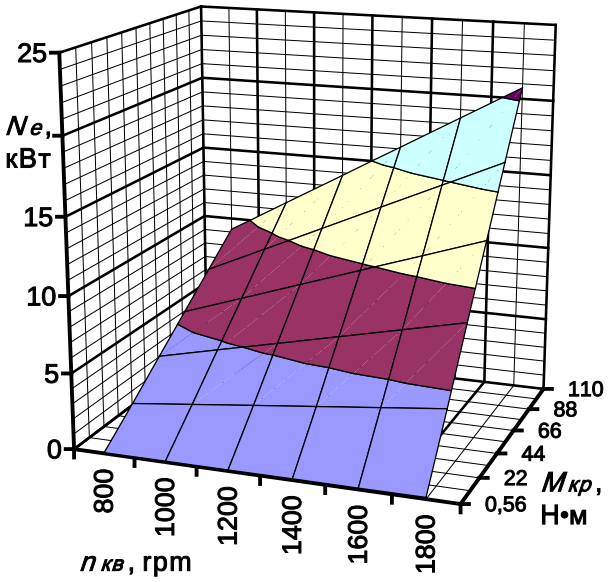


Рисунок 2.2 – Розподіл значень величини ефективної потужності N_e по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12

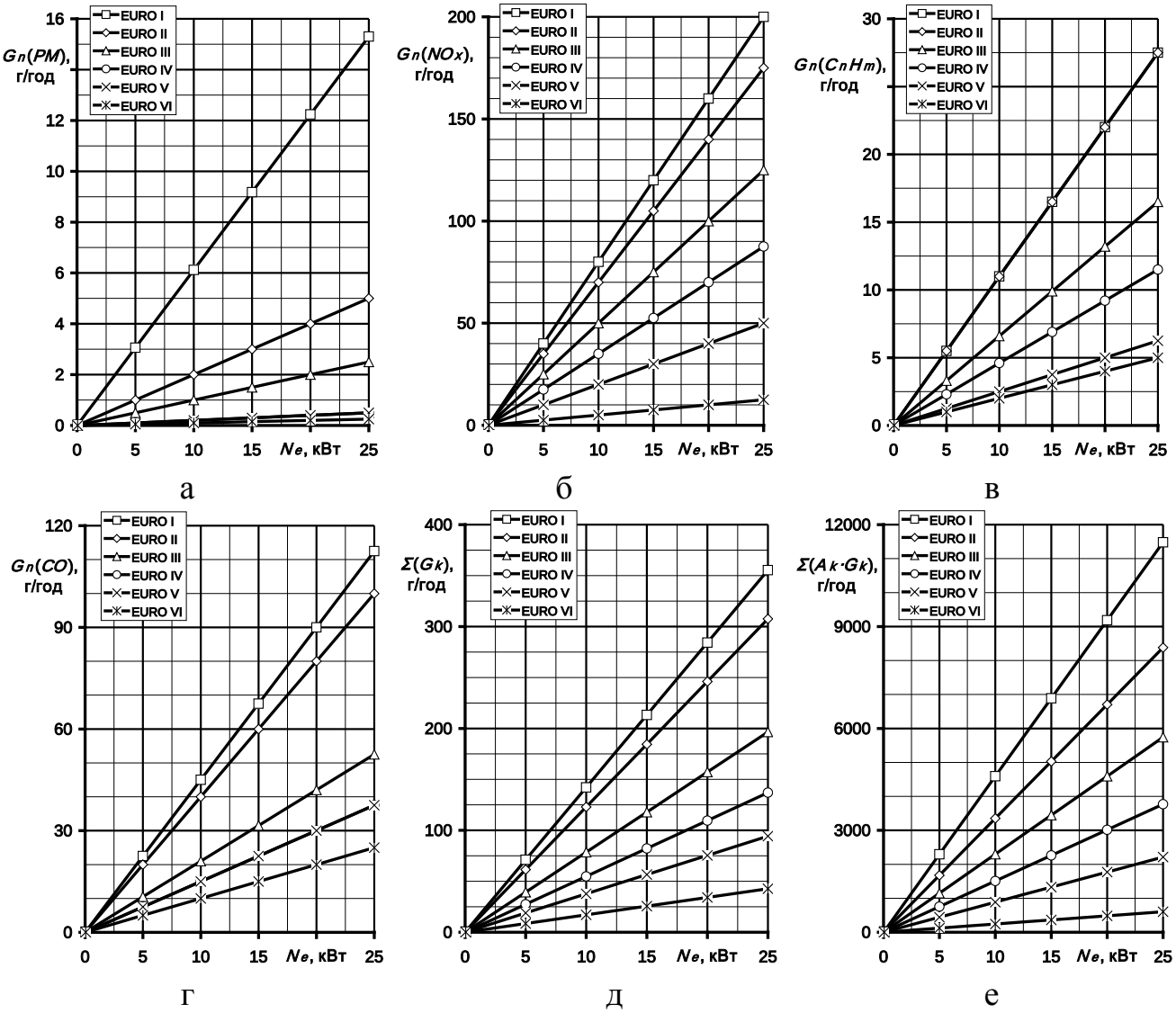


Рисунок 2.1 – Залежності значень еталонних значень величин масових годиних викидів G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO} (а – г) та еталонних значень величин масових годиних викидів $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ та $\Sigma(G_k)$ (д, е) від значень ефективної потужності N_e ПДВЗ для різних рівнів EURO

На рис. 2.2 – 2.4 видно, що такі розподіли для дизеля 2Ч10,5/12 мають вид площин, нахилених до вісей обох координат поля робочих режимів двигуна: а) величина G_{nPM} змінюється від 0,001 (EURO VI) і 0,029 (EURO I) (при $n_{кв}$ = 800 хв$^{-1}$ і $M_{кр}$ = 0,56 Н·м – режим А) до 0,207 (EURO VI) і 12,7 (EURO I) г/год (при $n_{кв}$ = = 1800 хв$^{-1}$ і $M_{кр}$ = 110 Н·м – режим Б); б) величина G_{nNOx} – від 0,023 (EURO VI) і 0,38 (EURO I) (режим А) до 10,4 (EURO VI) і 165,9 (EURO I) г/год (режим Б); в) величина G_{nCnHm} – від 0,009 (EURO VI) і 0,052 (EURO I) (режим А) до 4,1 (EURO VI) і 22,8 (EURO I) г/год (режим Б); г) величина G_{nCO} – від 0,047 (EURO VI) і 0,211 (EURO I) (режим А) до 20,7 (EURO VI) і 93,3 (EURO I) г/год (режим Б); д) величина $\Sigma(A_k \cdot G_k)_n$ – від 1,0 (EURO VI) і 2,2 (EURO I) (режим А) до 502 (EURO VI) і 9521 (EURO I) г/год (режим Б).

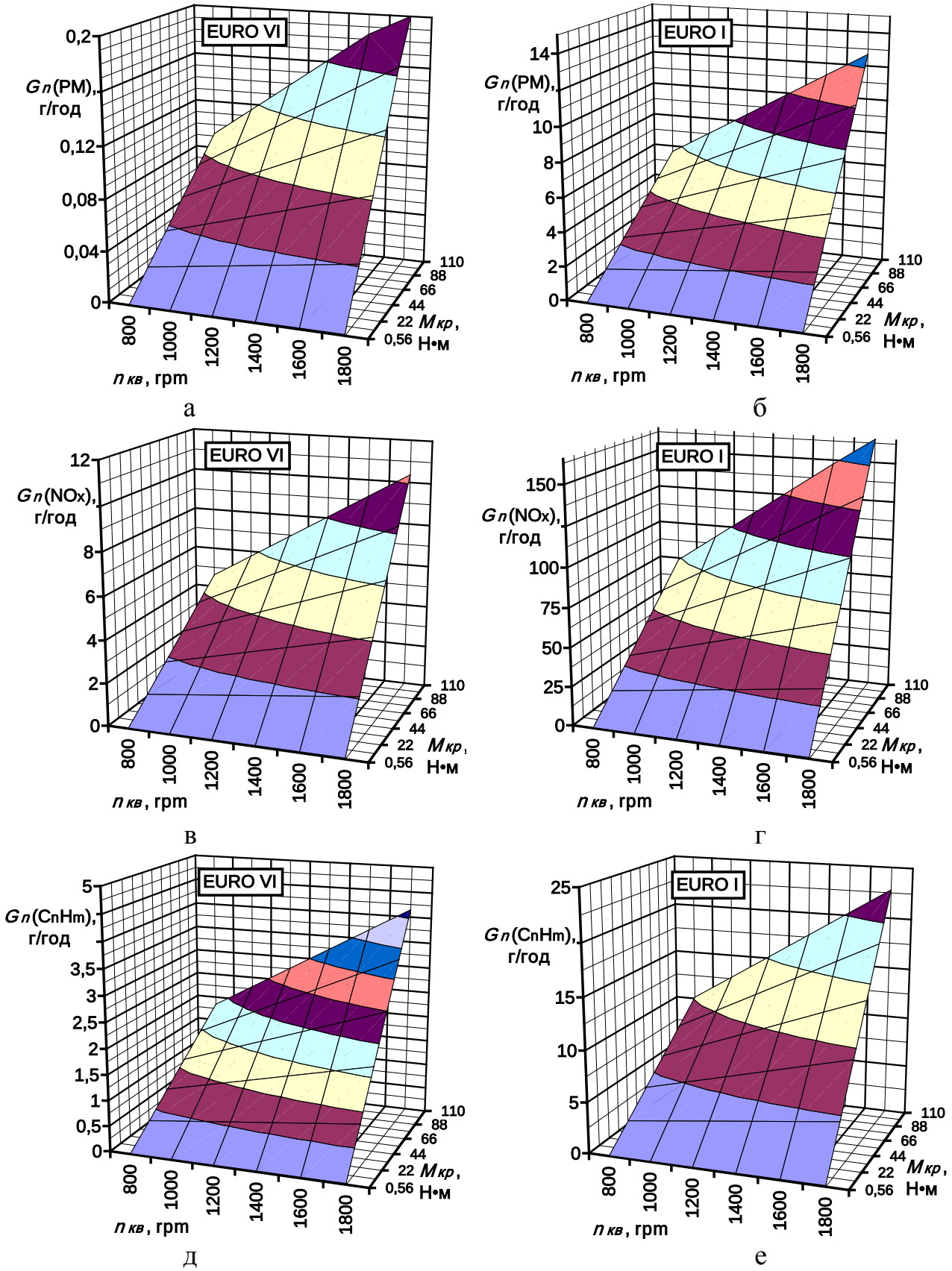


Рисунок 2.3 – Розподіл еталонних значень величини викидів G_{PM} (а, б), G_{NOx} (в, г) та G_{CnHm} (д, е) по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для крайніх рівнів EURO I та VI

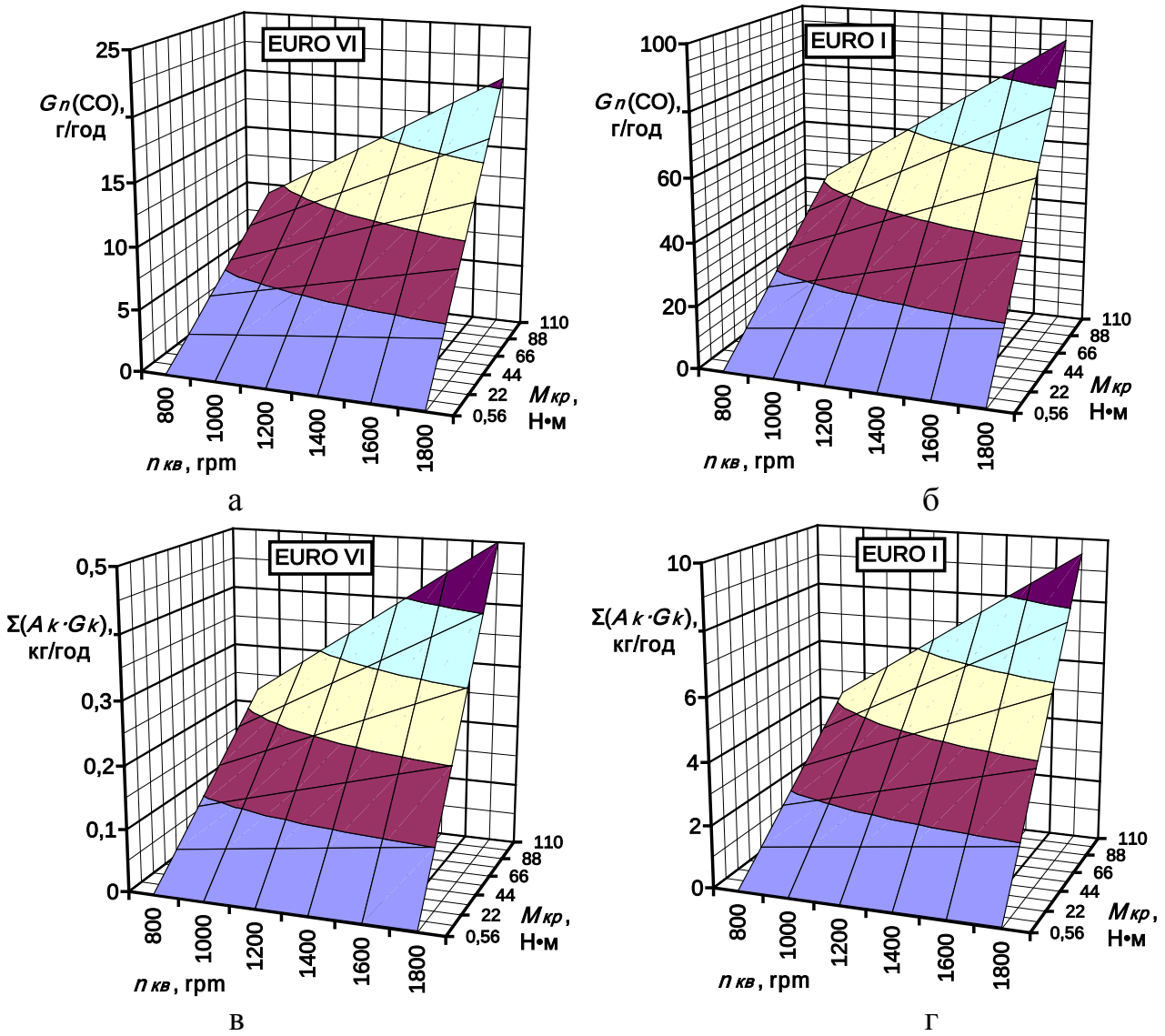


Рисунок 2.4 – Розподіл еталонних значень величини викидів G_{CO} (а, б) та $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ (в, г) по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для крайніх рівнів EURO I та VI

Отже, у цьому розділі роботи здійснено розрахункове оцінювання еталонних значень показників екологічності ПДВЗ як складових комплексного паливно-екологічного критерію у залежності від значення ефективної потужності та координат поля робочих режимів двигуна для різних рівнів законодавчо встановлених екологічних нормативів EURO, що діють на території України та діяли раніше.

Побудовано підхід до описання розподілів значень складових набору вихідних даних для здійснення розрахункового дослідження для всього поля робочих режимів ПДВЗ – див. Додаток В.

3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕТАЛОННИХ ЗНАЧЕНЬ КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1. Результати попередніх розрахунків та їх аналіз

Формула (Б.1) у Додату Б перетворена до виду формули (3.1).

$$K_{fei} = \frac{3600 \cdot N_{ei}}{H_u \cdot \left(G_{fueli} + \sigma \cdot f \cdot N_{ei} \cdot \sum_{k=1}^{h} (A_k \cdot g_{ki}) \right)} = \left| \begin{array}{l} U = 3600 / H_u = const; \\ V = \sigma \cdot f \cdot \sum_{k=1}^{h} (A_k \cdot g_{ki}) = f(EURO) \end{array} \right| =$$

$$= \frac{U \cdot N_{ei}}{G_{fueli} + V \cdot N_{ei}} = \frac{U \cdot N_{ei}}{g_{ei} \cdot N_{ei} + V \cdot N_{ei}} = \frac{U}{g_{ei} + V} = f(g_{ei}; EURO), ‰ \quad (3.1)$$

де U = 84,3 кг/(кВт·год) – постійна величина; V – підстановка, що є постійною для певного рівня EURO, кг/(кВт·год).

Введені величини U та V мають наступний фізичний зміст: U – зачення питомої ефективної масової годинної витрати палива дизелем за умови рівності його ефективного ККД η_e одиниці; V – зачення приведеного ефективного масового годинного викиду повного набору законодавчо нормованих полютантів за певних умов експлуатації ПДВЗ. Еталонні значення величини V та значення її відносної зміни δV для різних рівнів EURO для базових значень величин σ = 1,0 і f = 1,0 та H_u = 42,7 МДж/кг проілюстровано на рис. 3.1 у вигляді гістограми. Значення величини U для різних видів моторного палива, тобто величини H_u, та для базових значень величин σ = 1,0 і f = 1,0 проілюстровано на рис. 3.2 у вигляді графіку. На рис. 3.1 видно, що еталонні значення величини V з підвищенням рівня EURO (збільшенням жорсткості екологічних вимог до ПДВЗ) знижується, для EURO VI на 95 % у порівнянні з EURO I.

Еталонні значення питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ g_e для різних видів моторного палива (з різним значенням теплотворної здатності H_u у МДж/кг) залежать від значення ефективного ККД двигуна η_e. Такі залежності проілюстровано на рис. 3.3. На рис. 3.3 видно, що такі залежності мають вид сімейства гіпербол, величина g_e при цьому змінюється у межах від 1440 (η_e = 0,1, H_u = 25 МДж/кг) до 28,8 г/(кВт·год) (η_e = 1,0, H_u = 125 МДж/кг).

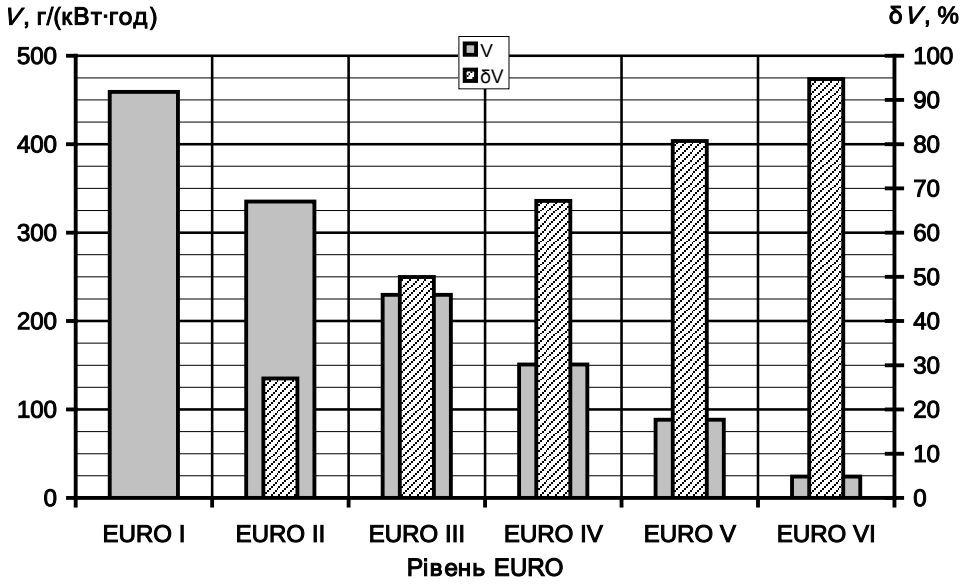


Рисунок 3.1 – Значення величин V та δV для різних рівнів EURO для базових значень величин $\sigma = 1{,}0$ і $f = 1{,}0$ та $H_u = 42{,}7$ МДж/кг

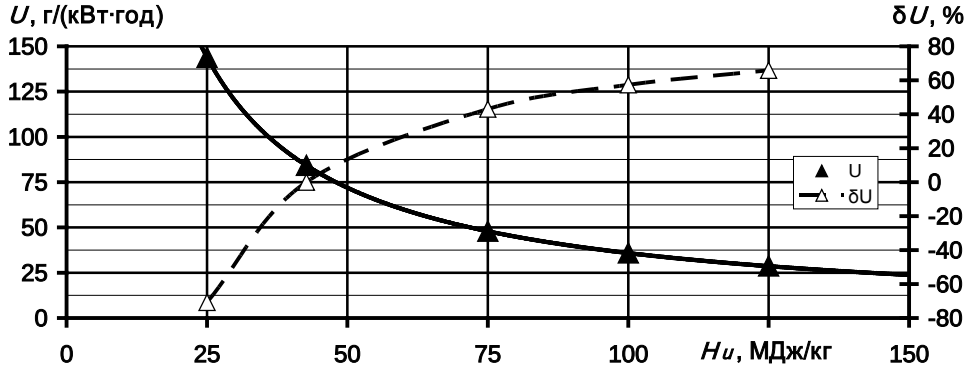


Рисунок 3.2 – Значення величин U та δU для різних видів моторного палива та для базових значень величин $\sigma = 1{,}0$ і $f = 1{,}0$

На рис. 3.2 видно, що еталонні значення величини U з підвищенням значення величини H_u спадають за гіперболічним законом та у повному діапазоні зміни впливаючого фактора (від 25 до 152 МДж/кг) змінюються на ±70 % у порівнянні з базовим значенням $H_u = 42{,}7$ МДж/кг, що дорівнює 84,5 г/(кВт·год).

На рис. 3.4 наведено графіки залежності еталонних значень величини g_e від значення ефективного ККД η_e для різних видів моторного палива та для базових значень величин $\sigma = 1{,}0$ і $f = 1{,}0$. На рис. 3.4 видно, що такі значення величини g_e спадають за гіперболічним законом про зростанні значення величини η_e. При значенні $\eta_e = 0{,}5$, що відображає об’єктивну межу можливостей сучасних ПДВЗ, для звичайного дизельного палива ($H_u = 42{,}7$ МДж/кг) значення $g_e = 168{,}6$ г/(кВт·год), при зменшенні ККД до 0,1 воно зростає на 400 %, а при зростанні ККД до 1,0 – зменшується на 50 %.

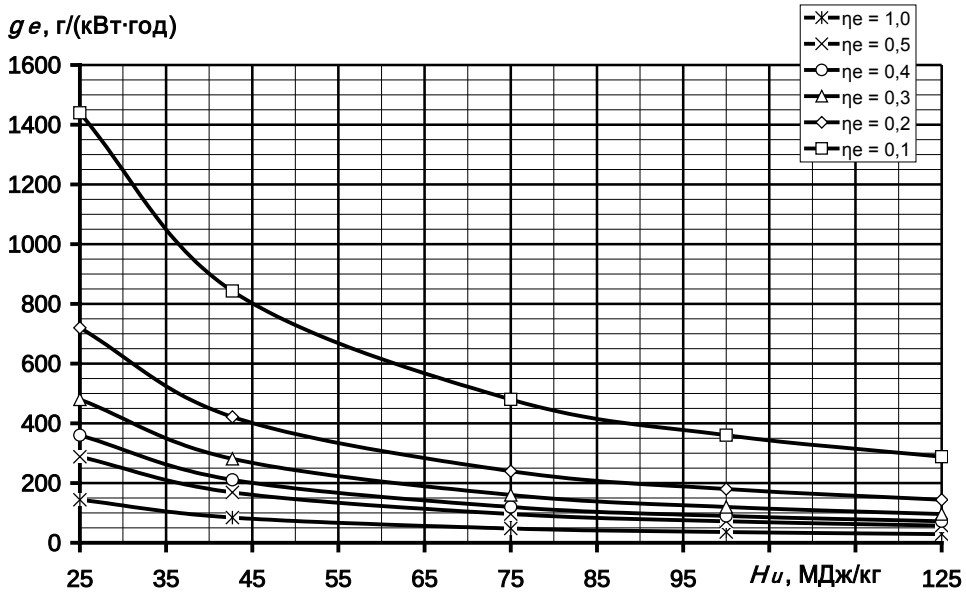


Рисунок 3.3 – Графіки залежності значень величини g_e від значень величини H_u для різних постійних значень величини η_e

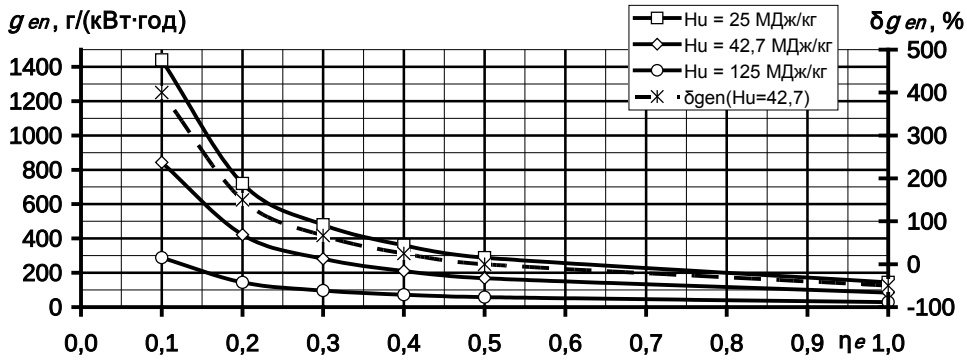
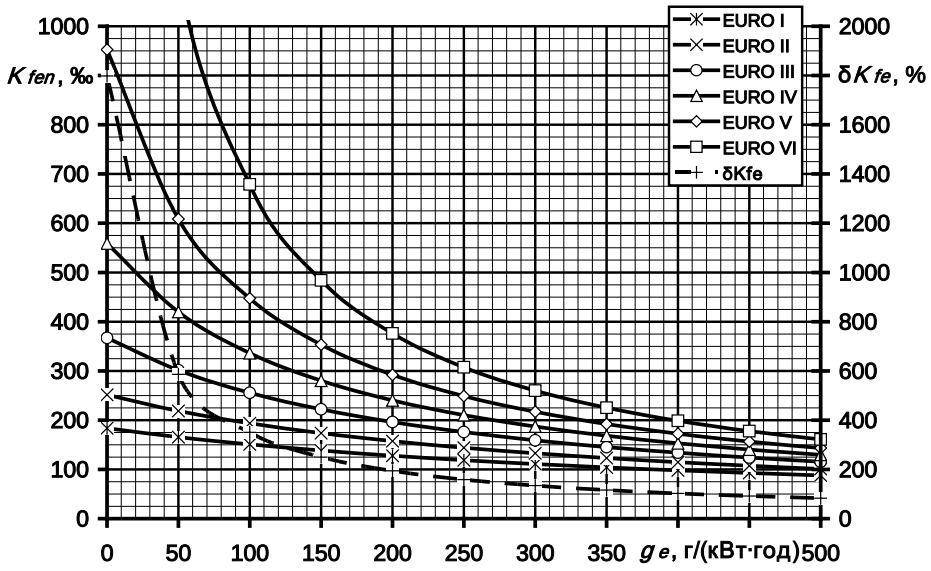
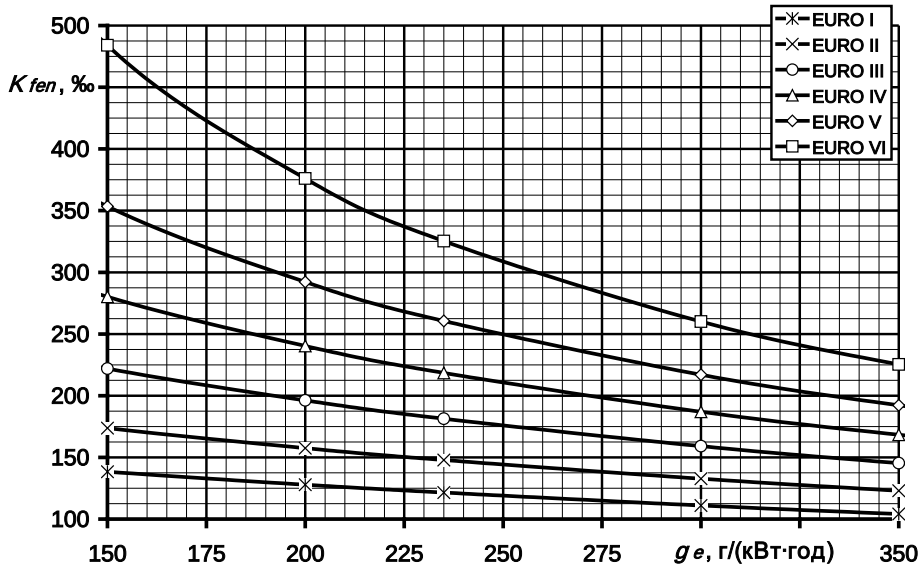


Рисунок 3.4 – Еталонні значення величини g_e від значення ефективного ККД η_e для різних видів моторного палива та для базових значень величин σ = 1,0 і f = 1,0

Залежність еталонних значень критерію K_{fe} від значення питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ g_e для різних рівнів EURO та базових значень величин σ = 1,0, f = 1,0 і H_u = 42,7 МДж/кг, описані формулою (3.1), відображено на рис. 3.5. Власне графіки на рис. 3.5 виступають основою для отримання шуканих значень реперних точок відповідної часткової шкали бажаності. Вони побудовані у найбільш широких з теоретично можливих межах зміни значень величини g_e – від 0 до 500 г/(кВт·год) та самого критерію K_{fe} – від 0 до 1000 ‰. Реальні ж межі зміни цих величин є наступними: g_e – від 150 до 350 г/(кВт·год) (див. рис. 3.2), K_{fe} – від 100 до 500 ‰ (див. рис. 3.4). Такі графіки, побудовані у вказаних реальних межах зміни координат наведено на рис. 3.5,б. На рис. 3.5 видно, що зображені на ньому графіки є сімейством гіпербол, еталонні значення критерію K_{fe} спадають зі зростанням значення величини g_e, а різниця між такими значеннями для крайніх значень рівня EURO – зменшується з 1800 (при g_e = 0 г/(кВт·год)) до 83 % (при g_e = 500 г/(кВт·год)).



а



б

Рисунок 3.5 – Графіки залежності еталонних значень критерію K_{fe} від значення питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ g_e для різних рівнів EURO та базових значень величин σ = 1,0, f = 1,0 і H_u = 42,7 МДж/кг

Відомо, що фізичний зміст критерію K_{fe} полягає у тому, що він являє собою ефективний ККД ПДВЗ з урахуванням законодавчо нормованих екологічних показників його ВГ. Таким чином, його граничні значення для будь-якого стаціонарного режиму роботи двигуна є значеннями ефективного ККД η_e. Таких значень він набуває при ідеальних показниках екологічності, тобто у випадку, коли у потоці його ВГ відсутні законодавчо нормовані полютанти. Розподіл значень ефективного ККД η_e дизеля 2Ч10,5/12 по полю його робочих режимів наведено на рис. 3.6. На рис. 3.6 видно, що значення величини ефективного ККД η_e розподіляються по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 нерівномірно та набувають значень у межах від 0,08 (режим А) до 0,356 (режим Б).

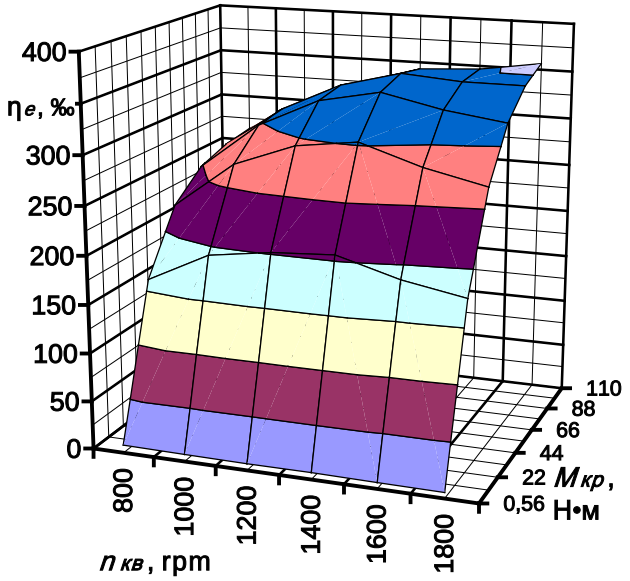
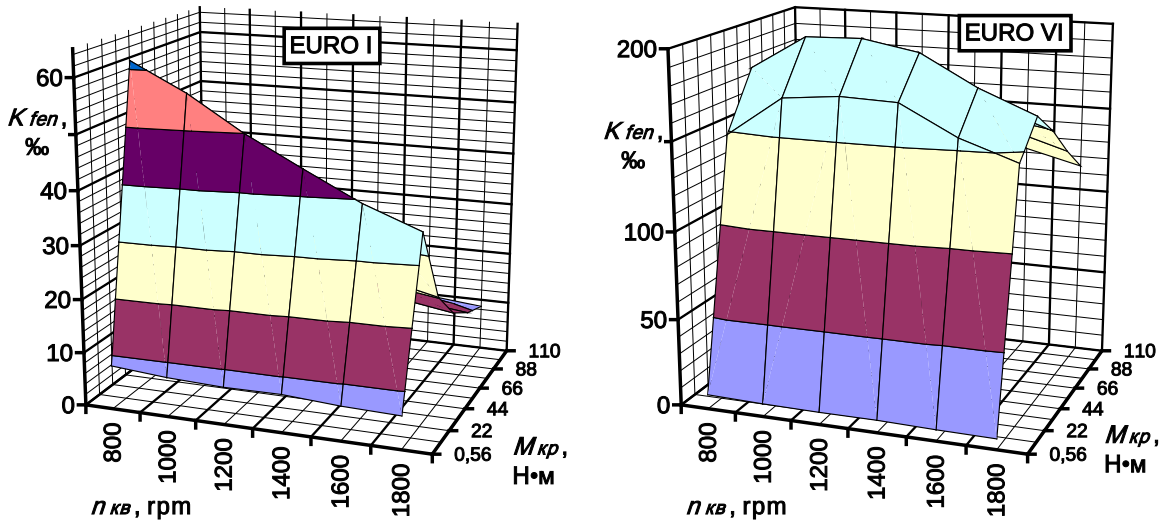


Рисунок 3.6 – Розподіл значень ефективного ККД η_e
по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12

Розподіл еталонних значень критерію K_{fe} по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для крайніх значень рівня EURO – I та VI, та базових значень величин σ = 1,0, f = 1,0 і H_u = 42,7 МДж/кг наведено на рис. 3.7. На рис. 3.7 видно, що такі еталонні значення критерію K_{fe} розподіляються по полю робочих режимів нерівномірно і сягають максимумів 61 та 200 ‰ відповідно для EURO I і EURO VI на різних стаціонарних режимах роботи двигуна. Характер розподілу суттєво відрізняється для різних рівнів EURO. Така відмінність зумовлена особливостями розподілу величини ефективного ККД цього дизеля та еталонних значень викидів полютантів по такому полю, представлених на рис. 2.2 – 2.4.



а б

Рис. 3.7 – Розподіл еталонних значень критерію K_{fe} по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для крайніх рівнів EURO I та VI

3.2. Результати основних розрахунків та їх аналіз

У цьому дослідженні пропонується розділити підходи до формування середньоексплуатаційних (Підхід А) та порежимних (Підхід Б) значень реперних точок часткової шкали бажаності критерію K_{fe}.

Підхід А

У якості середньоексплуатаційних значень реперних точок пропонується обрати еталонні значення критерію K_{fe}, що відповідають середньоексплуатаційному значенню питомої ефективної масової годинної витрати палива дизелем g_e та відповідним рівням EURO. Згідно до технічного описання дизеля 2Ч10,5/12 [6] середньоексплуатаційне значенням величини g_{eme} становить 235 г/(кВт·год).

Верхньою реперною точкою пропонується обрати точку, що відповідає рівню EURO VI та значенню часткової функції бажаності $d_{k\text{up}} = 0{,}63$ (відповідає початку діапазону оцінки «добре» психофізичної шкали), нижньою – рівню EURO I та значенню часткової функції бажаності $d_{k\text{dn}} = 0{,}32$ (відповідає кінцю діапазону оцінки «погано» психофізичної шкали). Вибір значень верхніх та нижніх реперних точок часткової функції бежeності $d_{k\text{up}} = 0{,}63$ та $d_{k\text{dn}} = 0{,}32$, а не а не 0,8 та 0,2 відповідно, зумовлено тим, що:

– обрані значення у шкалі бажаності обрано виходячи зі зручності обчислень за формулою (1.3), адже $0{,}63 \approx 1 - 1/e$, а $0{,}37 \approx 1/e$, крім того, при значеннях часткових функцій бажаності $d_{ki} < 0{,}2$ чи $d_{ki} > 0{,}8$ значення відгуків локальних критеріїв r_{ki} чинять не такий значний вплив на значення узагальненої функції бажаності D критерію якості;

– значення ефективного ККД η_e, до якого наближаються показники найкращих екземплярів дизелів і яке навряд чи буде перевищено у найближчому майбутньому, становить 0,5;

– кінцева мета будь-яких заходів з підвищення рівня ЕБ ПДВЗ – це досягнення нормативно встановлених значень її показників, які мають тенденцію до подальшого посилення;

– необхідно передбачити можливість реалізоації вирішення задачі оцінювання рівня ЕБ для процесу експлуатації ЕУ з утилізацією і рекуперацією теплоти ВГ, охолоджуючої рідини і моторного мастила, для якої η_e може сягати 0,9 і вище, а також АТЗ з системами рекуперації механічної енергії гальмування тощо;

– техніко-економічні й екологічні показники дизеля 2Ч10,5/12 наразі досить низький у порівнянні з кращими сучасними аналогами, а поточний технічний стан можна охарактеризувати не вище, ніж як «задовільний», однак у експлуатації перебуває значна кількість ПДВЗ зі ще нижчим технічним рівнем і станом.

При такому підході:

$r_{\text{kup}} = K_{feme}(g_{eme}$, EURO VI) = 325 ‰,

$r_{\text{kdn}} = K_{feme}(g_{eme}$, EURO I) = 121 ‰.

Тоді коефіцієнти у формулі (1.3), визначені за формулами (1.4) і (1.5), становлять $a_k = 0{,}666$, $b_k = -4{,}425 \cdot 10^{-3}$ і формула (1.2) набуває виду формули (3.2), що відображає рис. 3.8. На рис. 3.8 видно, що графік залежності $d(K_{fe}) = f(K_{fe})$ має помірний плин як на основному робочому відрізку значень аргумента (при K_{fe} = = 121 … 325 ‰ та $d(K_{fe})$ = 0,32 … 0,63), так і на відрізках поза значеннями $d(K_{fe})$ = 0,2 і 0,8, де розрізнювальна здатність цього математичного апарату критеріального оцінювання різко знижується, що дозволяє його застосувати для ПДВЗ зі значно гіршим і значно ліпшим у порівнянні з кращими аналогами і нормативними вимогами технічним рівнем.

$$d\left(K_{fe}\right) = \exp\left[-\exp\left(0{,}666 - 4{,}425 \cdot 10^{-3} \cdot K_{fe}\right)\right], \qquad (3.2)$$

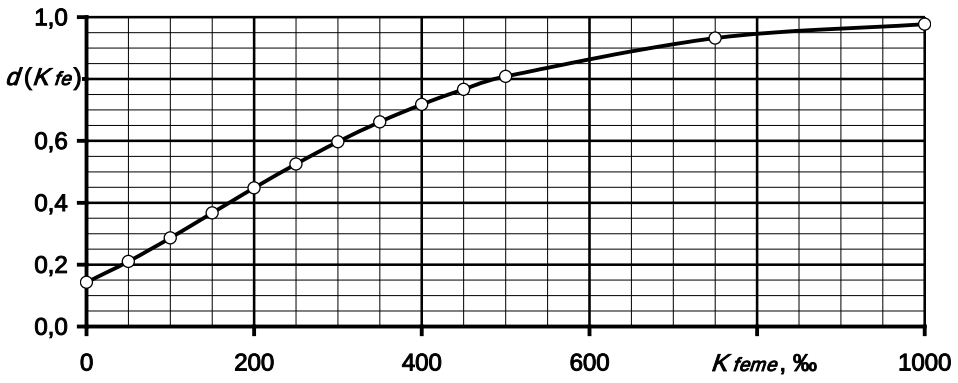


Рисунок 3.8 – Графік залежності значень часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ від середньоексплуатаційних значень критерію K_{fe}

Підхід Б

У якості порежимних значень реперних точок пропонується обрати не постійні значення критерію K_{fe}, що відповідають рівням EURO I і EURO VI, а залежності цих значень від величини g_e.

Значення верхньої реперної точки при σ = 1,0, f = 1,0 і H_u = 42,7 МДж/кг

визначає формула (3.3), а нижньої (3.4).

$$r_{kup} = K_{fe}(g_e, EURO_VI) = 84{,}3/(g_e + 24{,}2)\ ‰, \quad (3.3)$$

$$r_{kdn} = K_{fe}(g_e, EURO_I) = 84{,}3/(g_e + 459{,}2)\ ‰. \quad (3.4)$$

Тоді коефіцієнти у формулі (1.2), визначені за формулами (1.4) і (1.5), описуються формулами (3.5) і (3.6), проілюстровані на рис. 3.9, на якому видно, що залежність значень коефіцієнта a_k часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ від порежимного значення величини g_e носить лінійний характер, а коефіцієнта і b_k – може бути апроксимована поліномом 2-го ступеня.

$$a_k = 2{,}075 \cdot 10^{-3} \cdot g_e + 0{,}181; R^2 = 1{,}0, \quad (3.5)$$

$$b_k = -2{,}462 \cdot 10^{-8} \cdot g_e^2 - 1{,}190 \cdot 10^{-5} \cdot g_e - 2{,}735 \cdot 10^{-4}; R^2 = 1{,}0, \quad (3.6)$$

Оскільки значення коефіцієнтів a_k і b_k залежать від значення величини g_e, то формула (3.2) набуває виду формули (3.7), результати її застосування зведено проілюстровані на рис. 3.10, на якому видно, що плин графіків залежностей значень часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ від порежимних значень критерію K_{fe} суттєво відрізняється для різних порежимних значеннь величини g_e.

$$d(K_{fe}) = \exp\left[-\exp\left(a_k(g_e) + b_k(g_e) \cdot K_{fe}\right)\right], \quad (3.7)$$

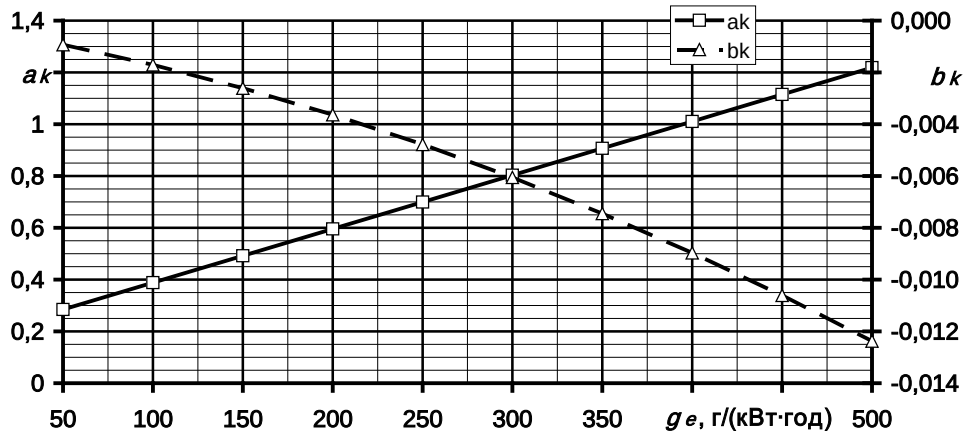


Рисунок 3.9 – Графіки залежності значень коефіцієнтів a_k і b_k часткової функції бажаності d(K_{fe}) від порежимного значення величини g_e

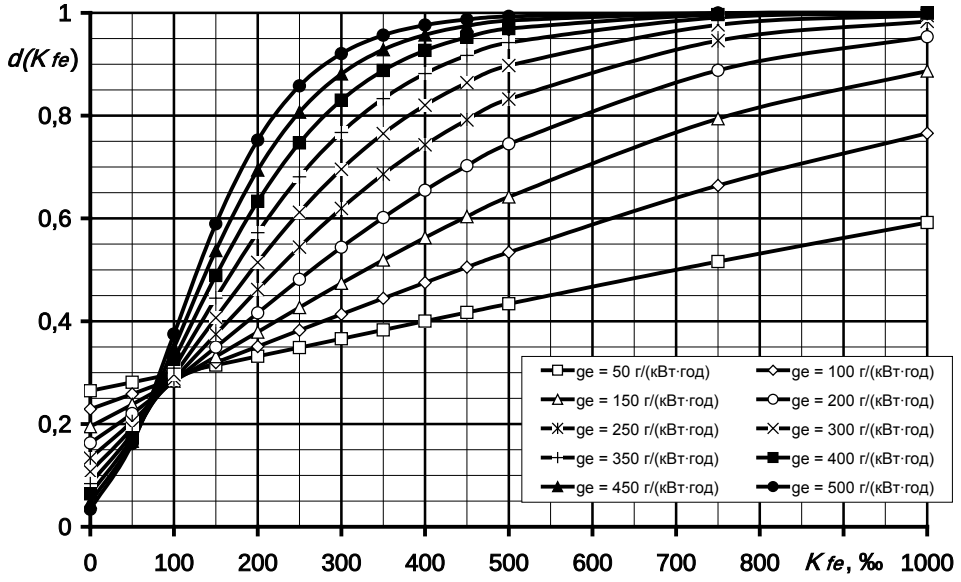


Рисунок 3.10 – Графіки залежності значень часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ від порежимних значень критерію K_{fe} в залежності від порежимного значення величини g_e

Отже, у цому розділі даної наукової конкурсної роботи здійснено розрахункове оцінювання еталонних значень паливної та екологічної складової комплексного паливно-екологічного критерію у залежності від значень рівня екологічних нормативів EURO, ефективного ККД двигуна та нижчої теплотворної здатності моторного палива.

Отримано еталонні значення комплексного паливно-екологічного критерію у залежності від значень рівня екологічних нормативів EURO та питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ, а також розподіли таких еталонних значень по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для різних рівнів EURO.

Здійснено розрахункове оцінювання значень коефіцієнтів часткових функцій бажаності для комплексного паливно-екологічного критерію відповідно до обраних реперних значень функцій відгуку та шкали бажаності із застосуванням окремих підходів для середньоексплуатаційних та порежимних значень критерію.

Отримано вирази для визначення значень часткових функцій бажаності для комплексного паливно-екологічного критерію, їх коефіцієнтів та функцій відгуку з урахуванням середньоексплуатаційних та порежимних значень питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ.

4. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕТАЛОННИХ ЗНАЧЕНЬ КОЕФІЦІЄНТУ ВАГОМОСТІ ПАЛИВНОЇ СКЛАДОВОЇ КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ

У роботі [1] запропоновано підхід до визначення вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію A_{fuel} та описао і проаналізовано результати його реалізації у вигляді розрахунків за відповідною методикою. Вказаний підхід виражається у тому, що шукана величина виражається з рівняння, де прирівнюються частинні похідні критерію K_{fe} за масовим годинним викидом k-го законодавчо нормованого полютанту $\partial K_{fe}/\partial G_k$ та за масовою годинною витратою моторного палива $\partial K_{fe}/\partial G_{fuel}$ і має ті самі властивості, що й безрозмірний індекс відносної агресивності k-го полютанту A(k), що формулами (4.1) – (4.3), а результати реалізації підходу проілюстровано на рис. 4.1.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial K_{fe}}{\partial G_{fuel}} &= -\frac{3600\cdot M_{кр}\cdot n_{кв}}{9550\cdot H_u\cdot G_{fuel}^2}\cdot\left(1+\frac{\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma\cdot\left(\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma+2\cdot G_{fuel}\right)}{\left(\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma+G_{fuel}\right)^2}\right)= \\
&= -\frac{3600\cdot M_{кр}\cdot n_{кв}}{9550\cdot H_u\cdot G_{fuel}^2}\cdot\frac{\left(G_{fuel}+2\cdot\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma\right)^2-2\cdot\left(\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma\right)^2}{\left(\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma+G_{fuel}\right)^2}= \quad ; \qquad (4.1)\\
&= \left|C=\left(G_{fuel}+2\cdot\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma\right)^2-2\cdot\left(\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma\right)^2\right| = -K_{fe}/D\cdot C/G_{fuel}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial K_{fe}}{\partial G_k} &= -\frac{3600\cdot M_{кр}\cdot n_{кв}\cdot\sigma\cdot\delta\cdot A_k}{9550\cdot H_u\cdot\left(\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma+G_{fuel}\right)^2} = -\frac{3600\cdot M_{кр}\cdot n_{кв}\cdot\sigma\cdot\delta\cdot A_k}{9550\cdot H_u\cdot D^2}= \quad ; \qquad (4.2)\\
&= \left|\partial\left(\sum_{k=1}^{h}\left(A_k\cdot G_k\right)\right)/\partial G_k = A_k\right| = -K_{fe}/D\cdot\sigma\cdot\delta\cdot A_k
\end{aligned}$$

$$A_{fuel}=\left(G_{fuel}+2\cdot\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma\right)^2-2\cdot\left(\sigma\cdot\delta\cdot\Sigma\right)^2/\left(\sigma\cdot\delta\right)=C/\left(\sigma\cdot\delta\cdot G_{fuel}^2\right). \qquad (4.3)$$

На рис. 4.1 видно, що значення коефіцієнта A_{fuel} розподіляються по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 нерівномірно, а їх залежність від значень координат цього поля є нелінійною. Коефіцієнт A_{fuel} набуває значень у діапазоні від 6,1 ($n_{кв}$ = 1200 rpm, $M_{кр}$ = 0,55 Н·м – режим А) до 60,0 ($n_{кв}$ = 800 rpm і $M_{кр}$ = 88 Н·м – режим Б), тобто зростає у 9,8 разів зі зростанням величини N_e у 450 разів, величини $M_{кр}$ у 200 разів, величини $n_{кв}$ у 2,3 рази, величини G_{fuel} у 9,8 разів, величини $\Sigma(A_k\cdot G_k)$ у 21,7 рази.

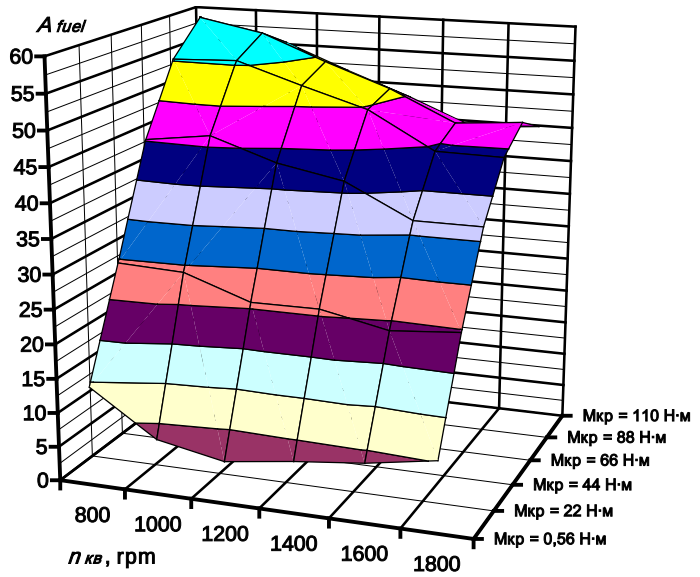


Рисунок 4.1 – Графіки залежності значень величини A_{fuel} від координат поля робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для H_u = 42,7 МДж/кг, σ = 1,0 і f = 1,0

Значення витрати моторного палива двигуном за умови постійності завданого значення його ефективного ККД η_e описується формулою (4.1), значення величини A_{fuel} за умови постійності завданих значень ефективного ККД двигуна η_e та рівня норм EURO – формулою (4.2). Сімейство залежностей, описаних формулою (4.2), проілюстровано на рис. 4.2. На ньому видно, що ці залежності носять нелінійний характер, а саме парабол 2-го ступеня, котрі проходять крізь початок координат, тобто за значення η_e = 0 для будь-якого рівня норм EURO вагомість витрат палива двигуном також дорівнює нулю. Також видно, що зі збільшенням значення η_e зростає також і значення A_{fuel}, рівно як і зі зниженням рівня норм EURO. Для об'єктивної межі значення ККД для поршневих ДВЗ η_e = 0,5 занчення A_{fuel} = 26,7 для EURO I, 16,9 для EURO II, 10,2 для EURO III, 6,2 для EURO IV, 3,7 для EURO V та 1,6 для EURO VI. Для теоретичної межі значення ККД для ЕУ з рекуперацією теплової енергії, АТЗ з рекуперацією механічної енергії та ін. η_e = 1,0 занчення A_{fuel} = 82,1 для EURO I, 48,5 для EURO II, 26,7 для EURO III, 14,6 для EURO IV, 7,4 для EURO V та 2,3 для EURO VI. Останні залежності проілюстровано на рис. 4.3 сімействами гістограм. На ньому видно, що залежності значення A_{fuel} від рівня норм EURO здя фіксованого значення η_e є також нелінійними.

$$G_{fuel} = 3{,}6 \cdot n_{cs} \cdot M_{кр} / (9550 \cdot \eta_e \cdot H_u), \text{ кг/год.} \quad (4.1)$$

$$A_{fuel} = (((G_{fuel}(\eta_e) + 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma(A_k \cdot G_k)(\text{EURO}))^2 - 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma(A_k \cdot G_k)(\text{EURO})^2) / (\sigma \cdot f \cdot G_{fuel}(\eta_e)^2). \quad (4.2)$$

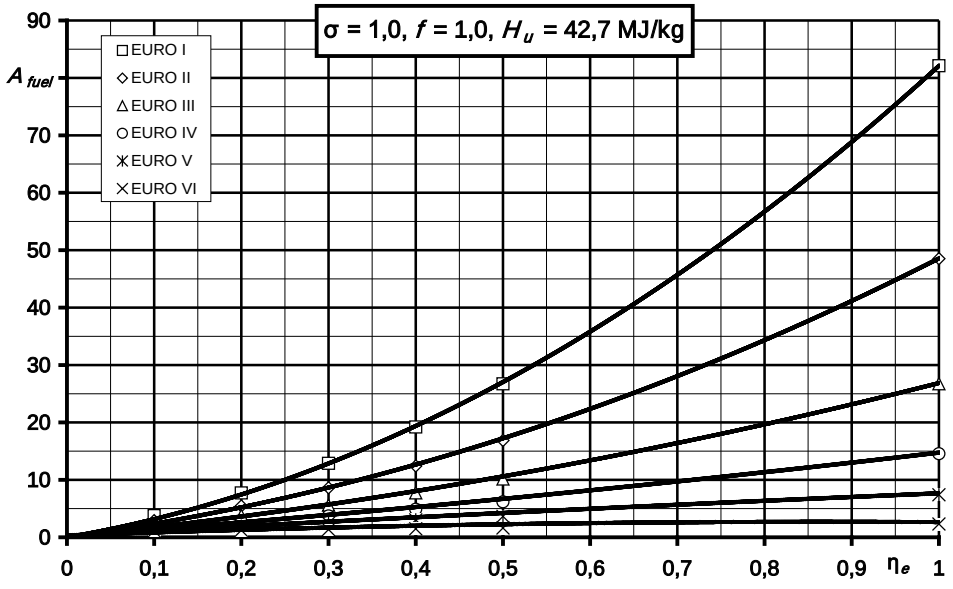


Рисунок 4.2 – Графіки залежності значення величини A_{fuel} від значень ефективного ККД двигуна η_e за фіксованого значення рівня норм EURO

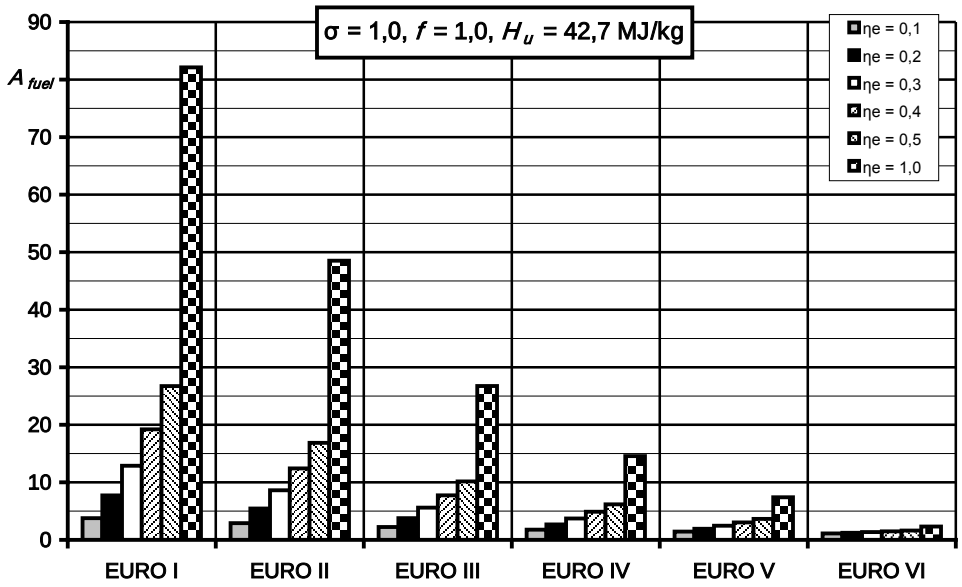


Рисунок 4.3 – Гістограми залежності значення величини A_{fuel} від значень рівня норм EURO за фіксованого значення ефективного ККД двигуна η_e

Інформація на рис. 4.2 і 4.3 отримана за умови σ = 1,0, f = 1,0 та H_u = 42,7 МДж/кг. У роботі також досліджено вплив заначень факторів, які характеризують умови експлуатації ЕУ з ПДВЗ (σ та f) і властивості моторного палива (H_u), на значення A_{fuel}, результати такого дослідження проілюстровано на рис. 4.4 і 4.5.

Слід зауважити, що згідно до методики [11], на основі якої побудовано математичний апарат критерію K_{fe}, ці впливаючі фактори приймають значення у наступних межах: σ = [0,025 … 10], f = [0,5 … 2,0], H_u = [25 … 125] МДж/кг.

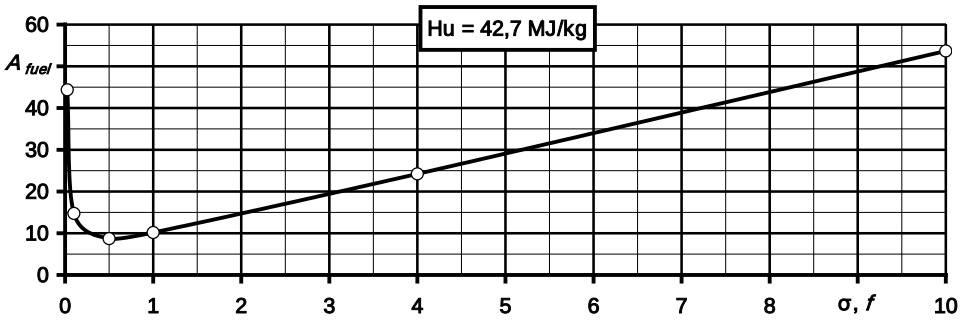


Рисунок 4.4 – Залежність усередненого значення величини A_{fuel} від значення коефіцієнта σ та індексу f за значення H_u = 42,7 МДж/кг

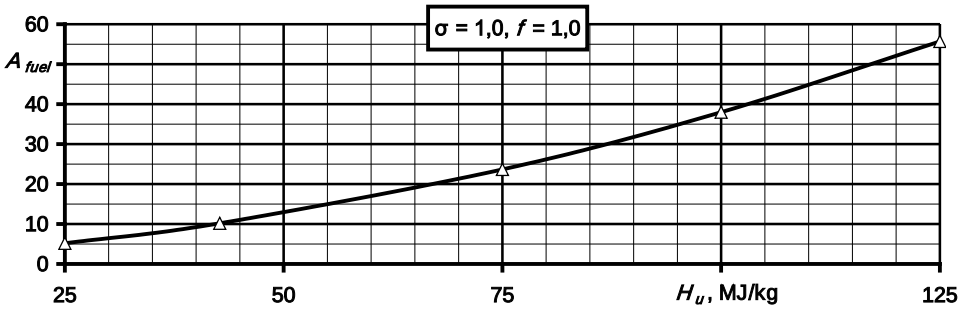


Рисунок 4.5 – Залежність усередненого значення величини A_{fuel} від значення теплотворної здатності моторного палива H_u за значень σ = 1,0, f = 1,0

На рис. 4.4 видно, що залежність $A_{fuel} = f(\sigma, f)$ носить складний характер: у діапазоні σ, f = 0,5 … 10 – A_{fuel} лінійно зростає від 8,7 до 53,7, а в діапазоні σ, f = = 0,5 … 0 – також зростає , але за гіперболічним законом, асимптотично наближаючись до вісі ординат.

На рис. 4.5 видно, що залежність $A_{fuel} = f(H_u)$ носить нелінійний характер, значення A_{fuel} зростають за параболічним законом від 8,7 до 14,6 зі зростанням H_u, а при H_u = 0 МДж/кг графік перетинає початок координат.

Отже, у цьому розділі роботи, завершальному у її структурі, здійснено розрахункове оцінювання еталонних значень вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію та аналіз його результатів.

Отримано залежності вказаної вагомості від від значень ефективного ККД двигуна за фіксованих значень рівня норм EURO, залежності такої вагомості від значень рівня норм EURO за фіксованого значення ефективного ККД двигуна, а також залежності усередненого значення означеної вагомості від заначень факторів, які характеризують умови експлуатації ЕУ з ПДВЗ і властивості моторного палива.

ВИСНОВКИ

Таким чином, за результатами аналізу результатів дослідження, відображеного у рукописі цієї конурсної роботи, можна зробити наступні висновки.

1. Запропоновано підхід та створено на його основі методику розрахункового оцінювання еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова як реперних точок психофізичної шкали часткової функції бажаності при використанні його у якості фактора ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

2. Здійснено розрахункове оцінювання еталонних значень показників екологічності ПДВЗ як складових комплексного паливно-екологічного критерію у залежності від значення ефективної потужності та координат поля робочих режимів двигуна для різних рівнів законодавчо встановлених екологічних нормативів EURO, що діють на території України та діяли раніше.

3. Побудовано підхід до описання розподілів значень складових набору вихідних даних для здійснення розрахункового дослідження для всього поля робочих режимів ПДВЗ.

4. Здійснено розрахункове оцінювання еталонних значень паливної та екологічної складової комплексного паливно-екологічного критерію у залежності від значень рівня екологічних нормативів EURO, ефективного ККД двигуна та нижчої теплотворної здатності моторного палива.

Отримано еталонні значення комплексного паливно-екологічного критерію у залежності від значень рівня екологічних нормативів EURO та питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ, а також розподіли таких еталонних значень по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для різних рівнів EURO.

5. Здійснено розрахункове оцінювання значень коефіцієнтів часткових функцій бажаності для комплексного паливно-екологічного критерію відповідно до обраних реперних значень функцій відгуку та шкали бажаності із застосуванням окремих підходів для середньоексплуатаційних та порежимних значень критерію.

Отримано вирази для визначення значень часткових функцій бажаності для комплексного паливно-екологічного критерію, їх коефіцієнтів та функцій відгуку з урахуванням середньоексплуатаційних та порежимних значень питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ.

6. Здійснено розрахункове оцінювання еталонних значень вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію та аналіз його результатів.

Отримано залежності вказаної вагомості від значень ефективного ККД двигуна за фіксованих значень рівня норм EURO, залежності такої вагомості від значень рівня норм EURO за фіксованого значення ефективного ККД двигуна, а також залежності усередненого значення означеної вагомості від заначень факторів, які характеризують умови експлуатації ЕУ з ПДВЗ і властивості моторного палива.

Виявлені залежності описано формулами методом найменших квадратів.

Здійснення SWOT-аналізу результатів дослідження, намічено стратегій подальших досліджень.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кондратенко О.М. Метрологічні аспекти комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки експлуатації поршневих двигунів енергетичних установок : монографія / О.М. Кондратенко. – Х.: Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2019. – 532 с.

2. Парсаданов І.В. Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію: монографія / І.В. Парсаданов – Х.: Центр НТУ «ХПІ», 2003. – 244 с.

3. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств / А.В. Пичкалев // Исследования наукограда. – Январь-март 2012. – № 1 (1). – С. 25–28. – URL: http://www.journal-niss.ru/journal/archive/01/paper6.pdf.

4. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positive-ignition (P.I.) engines fuelled with liquefied petroleum gas (LPG) and vehicles equipped with C.I. and NG engines and P.I. engines fuelled with LPG, with regard to the emissions of pollutants by the engine: regulation United Nations Economic and Social Council Economics Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles of 26 January 2013 year Regulation No. 49, Revision 6 [Electronic recourse]. – Geneva: UNECE, 2013. – 434 p. – URL: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29 regs/2013/R049r6e.pdf.

5. ISO 8178-4:2017. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Test cycles for different engine applications. – 237 p. – URL: https://www.iso.org/standard/65278.html.

6. Дизели с воздушным охлаждением Владимирского тракторного завода / В.В. Эфрос [и др.]. – М.: Машиностроение, 1976. – 277 с.

7. Каніло П.М. Автомобіль та навколишнє середовище / П.М. Каніло, І.С. Бей, О.І. Ровенський. – Х.: Прапор, 2000. – 304 с.

8. Двигуни внутрішнього згоряння: серія підручників у 6 томах. Т.5. Екологізація ДВЗ / А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, Л.Л. Товажнянський, А.Ф. Шеховцов; за ред. А.П. Марченко та А.Ф. Шеховцова. – Х.: Прапор, 2004. – 360 с.

9. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания . – 2-е изд., переаб. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.

10. Марков В.А. Оценка экологической безопасности силовых установок с дизельными двигателями / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.В. Маркова // Безопасность в техносфере. – № 2. – 2014. – С. 23 – 32. – DOI: 10.12737/3668.

11. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хазяйству загрязнением окружающей среды [Текст] / А.С. Быстров, В.В. Варанкин, М.А. Виленский и др. – М.: Экономика, 1986. – 96 с.

ДОДАТОК А. SWOT-АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Переваги (***S*** – *Strengths*). Результати дослідження, наведеного у цій роботі вирізняються наступними перевагами. Запропоновані підходи до визначення еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова та вагомості його паливної частини як реперних точок психофізичної шкали часткової функції бажаності при використанні його у якості фактора ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ та комплекс супутніх досліджень, дозволяє надати кількісну та якісну оцінку ефективності застосування технічних систем та комплексів заходів, що зменшують чи зводять нанівець якомога більшу кількість факторів негативного впливу ПДВЗ у складі ЕУ на усі компоненти довкілля і людину, а також обґрунтувати необхідність їх розробки та впровадження.

Недоліки (***W*** – *Weaknesses*). Результати цього дослідження вирізняються двома основними недоліками. Не наведено прикладу застосування узагальненої функції бажаності, як з використанням у структурі враховуваних її математичним апаратом факторів ЕкБ, котрі відповідають такій структурі комплексного паливно-екологічного критерію, так і з використанням власне критерію у якості самостійного фактора ЕкБ. Також не виконано оцінки екологічного, економічного й енергетичного ефектів від практичного впровадження результатів роботи.

Можливості (***O*** – *Opportunities*). Результати дослідження відкривають наступні можливості для подальшого їх практичного застосування, а також окреслюють коло напрямків подальших досліджень, що виражається у реалізації наступного кроку у побудові нового математичного апарату для здійснення комплексного критеріального оцінювання рівня ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, що передбачає посилення переваг комплексного паливно-екологічного критерію та послаблення його недоліків.

Ризики (***T*** – *Threats*). Результати, отримані у даному дослідженні, складаючи основу пунктів розробленого списку рекомендацій щодо практичного їх застосування, водночас є джерелом наступних ризиків. Необов’язковість здійснення та врахування результатів критеріального оцінювання взагалі та результатів даного дослідження зокрема, через відсутність відповідної законодавчої основи.

Сформовано наступні *стратегії*.

SO-стратегія, спрямована на подальше посилення сильних сторін за рахунок використання можливостей. Полягає у реалізації подальших досліджень щодо розширення числа враховуваних факторів ЕкБ аж до вичерпання вмісту згаданого

ієрархічного класифікатора, особливо тих, котрі за фізичною суттю не являють собою викид полютанту чи сподивання речовини, шляхом використання узагальненої функції бажаності з комплексним паливно-екологічним критерієм у структурі.

ST-стратегія, спрямована на усунення загроз шляхом використання сильних сторін. Передбачає доведення ступеня досконалості й універсальності математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію, а в ідеалі – нового апарату, котрий поєднує в собі усі основні переваги й позбавлений переважної більшості їх критичних недоліків – на основі узагальненої функції бажаності, й відповідної методики критеріального оцінювання рівня ЕкБ процесу експлатації ЕУ з ПДВЗ до стану, за якого можливим буде закріплення процедури такого оцінювання на законодавчому рівні та створення для цього відповідного програмного комплексу для мобільних платформ.

WO-стратегія, спрямована на посилення поки що слабких сторін за рахунок використання можливостей. Включає в себе в вдосконалення (доповнення) математичного апарату застосовуваного критерію у частині розрахунку його складових, що мають вартісні еквіваленти, з урахуванням актуального коливання курсу основних резервних світових вільноконвертованих валют та явища інфляції.

WT-стратегія, спрямована на посилення поки що слабких сторін шляхом уникнення загроз. Пропонується подолати сформульовані недоліки шляхом розробки проекту нормативного документу, що включатиме оновлену методику застосування обох вдосконалених критеріальних математичних апаратів, а також запитів на фінансування екологічної програми щодо здійснення такого виду природоохоронної діяльності (відповідно до «Переліку видів діяльності, що належать до природоохоронних заходів», затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України від 17.09.1996 р. № 1147) з Державного чи Обласного чи фонду охорони навколишнього природного середовища згідно до вмісту «Положення про Державний фонд охорони навколишнього природного середовища», затвердженому Постановою кабінету Міністрів України від 07.05.1998 р. № 634 а також вмісту «Порядку планування та фінансування природоохоронних заходів», затверджений Наказом Міністерства екології та природних ресурсів України від 12.06.2015 р. № 194.

ДОДАТОК Б. АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ ПРОФ. І.В. ПАРСАДАНОВА

За результатами аналізу математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію проф. І.В. Парсаданова K_{fe} у монографії [1] встановлено, що він має наступні переваги. 1) Врахування значень повного набору законодавчо нормованих показників токсичності відпрацьованих газів ПДВЗ. 2) Наявність фізичного змісту. 3) Врахування особливостей моделі експлуатації двигуна. 4) Врахування значення витрат палива ПДВЗ. 5) Наявність складових, що мають вартісні еквіваленти. 6) Наявність абсолютної внутрішньої шкали з однією реперною точкою, хо характеризує конкретний об’єкт оцінювання. 7) Оперування питомими значеннями впливаючих факторів.

Ни цьому основними недоліками критерію K_{fe} є наступні. 1) Неврахування законодавчо встановлених норм або інших особливих значень впливаючих факторів. 2) Отримання лише середньоексплуатаційних значень (оригінальний математичний апарат, описаний у монографії [2], не дає порежимних значень). 3) Залежність значення реперної точки внутрішньої шкали від типу і стану оцінюваного об’єкту. 4) Невизначеність для режимів холостого ходу та невисока інформативність для режимів малої ефективної потужності. 5) Невизначеність певних аспектів інструментальної та методичної складової систематичної похибки визначення його значень. 6) Неможливість врахування більш широкого спектру факторів ЕкБ, відмінних за фізичною природою від викидів газоподібних речовин-полютантів.

У тому ж джерелі сформульовано концепцію вдосконалення математичного апарату та методики застосування критерію K_{fe}, одним з основних пунктів якої є часткове подолання пункту 6 недоліків, а саме, введення у математичний апарат критерію нових факторів ЕкБ, які за своєю фізичною суттю є викидами газоподібних речовин-полютантів.

Значення критерію K_{fe} для i-го стаціонарного режиму експлуатації ПДВЗ зі значенням вагового фактора WF визначається за формулою (Б.1) [1, 2], а місце у ній масових годинних викидів враховуваних у базовому варіанті законодавчо нормованих полютантів – за формулою (Б.2).

$$K_{fe} = \eta_e \cdot (1-\beta) = \frac{3600}{H_u \cdot g_e} \cdot \left(1 - \frac{Z_e(P_f)}{Z_f(P_f) + Z_e(P_f)}\right) \cdot 10^3 =$$

$$= \frac{3600 \cdot N_e(M_{кр}, n_{кв})}{H_u \cdot G_{fuel}} \cdot \frac{1}{1 + \sigma \cdot f \cdot \sum_{m=1}^{h} (A_k \cdot G_k) / G_{fuel}} \cdot 10^3, \qquad (Б.1)$$

$$\sum_{m=1}^{h} (A_k \cdot G_k) = A(PM) \cdot G(PM) + A(NO_x) \cdot G(NO_x) + \\ + A(C_nH_m) \cdot G(C_nH_m) + A(CO) \cdot G(CO), \text{ кг/год}, \qquad (Б.2)$$

де індексом i позначено величини для окремого представницького режиму роботи ПДВЗ чи полігоні у моделі його експлуатації; H_u = 42,7 МДж/кг [2] – нижча теплота згоряння палива; N_e – ефективна потужність дизеля, кВт; G_{fuel} – годинна витрата палива, кг/год; G_k – масовий викид k-го забруднюючого компоненту ВГ, кг/год; A_k – безрозмірний показник відносної агресивності k-го забруднюючого компоненту ВГ ($A(NO_x)$ = 41,1; A(PM) = 200; $A(C_nH_m)$ = 3,16; A(CO) = 1,0 [2]); h = 4 [2] – загальна кількість забруднюючих компонентів; σ – безрозмірний показник відносної небезпеки забруднення на різних територіях (для автомобільного дизеля σ = 1,0, для тракторного σ = 0,25 [2]); f – безрозмірний коефіцієнт, що враховує характер розсіювання ВГ в атмосфері (при експлуатації двигунів різного призначення на території України f = 1,0 [2]); δ = P_f – розмірний показник, що переводить бальну оцінку в вартісну, \$/кг; WF – відносне дольове напрацювання двигуна на i-ому полігоні моделі експлуатації або ваговий фактор; η_e – ефективний ККД дизеля; β – коефіцієнт відносних експлуатаційних екологічних грошових витрат; Z_e і Z_f – грошові витрати на відшкодування екологічної шкоди та на паливо, \$/(кВт·год); g_e – питомі ефективні масові годинні витрати палива дизелем, кг/(кВт·год); $M_{кр}$ і $n_{кв}$ – крутний момент і частота обертання колінчастого валу дизеля, Н·м і хв$^{-1}$; P_f = 0,871 \$/кг – ціна одиниці ваги моторного палива (при P_f = = 20,0 UAH/л та курсі 27,0 UAH/\$); U_e – вартісне відшкодування екологічної шкоди, \$/кг; g_{pr} – питомий приведений масовий викид шкідливих речовин з ВГ, кг/(кВт·год).

Для застосування формули (Б.2), необхідною є наявність інформації про вагомість величин G(k) у порівнянні з вагомістю викиду еталонного полютанта G(CO), яку визначає величина безрозмірного показника відносної агресивності k-

го полютанта A_k, що згідно до методики [11] визначається формулами (Б.3) і (Б.4). У джерелі [7] міститься інформація щодо складових формул (Б.3) і (Б.4).

$$A_k = a_k \cdot \alpha_k \cdot \beta_k \cdot \delta_k , \qquad (Б.4)$$

$$a_k = \sqrt{\frac{ГДК_{сд}(CO) \cdot ГДК_{рз}(CO)}{ГДК_{сд}(k) \cdot ГДК_{рз}(k)}} , \qquad (Б.5)$$

де a_k – показник відносної небезпеки присутності k-го газоподібного чи аерозольного полютанта у повітрі, яким дихає людина; α_k – поправка, що враховує ймовірність накопичення вихідного k-го газоподібного чи аерозольного полютанта у компонентах НПС, трофічних ланцюгах та його надходження в організм людини неінгаляційним шляхом; β_k – поправка, що враховує ймовірність утворення за участю вихідного викинутого у атмосферу k-го газоподібного чи аерозольного полютанта інших (вторинних) полютантів, більш шкідливих, аніж вихідний; δ_k – поправка, що враховує дію k-го газоподібного чи аерозольного полютанта на інших реципієнтів, окрім людини; $ГДК_{сд}(CO)$ і $ГДК_{рз}(CO)$, $ГДК_{сд}(k)$ і $ГДК_{рз}(k)$ – гранично допустима концентрація еталонного (CO, оскільки A_{CO}= 1,0, $ГДК_{сд}(CO)$ = 3,0 мг/м^3, $ГДК_{рз}(CO)$ = 20,0 мг/м^3) та k-го полютанта у повітрі середньодобова і максимальна разова, мг/м^3.

Табл. Б.1 – Параметри SO_2, ПАВ та Б(а)П як полютанта у складі ВГ дизельного ПДВЗ [7]

Полютант	**Показник**				
	a_k	α_k	β_k	δ_k	A_k
CO	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C_nH_m	0,63	1,0	5,0	1,0	3,16
NO_2	27,4	1,0	1,0	1,5	41,1
SO_2	11,0	1,0	1,0	2,0	22,0
C	17,5	2,0	1,0	1,2	41,5
PM	–	–	–	–	200
B(a)P	$6{,}3 \cdot 10^5$	2,0	1,0	1,0	$12{,}6 \cdot 10^5$
PAH	$6{,}3 \cdot 10^5$	2,0	1,0	1,0	$12{,}6 \cdot 10^3$

ДОДАТОК В. ПІДХІД ДО ОПИСАННЯ РОЗПОДІЛІВ ЗНАЧЕНЬ СКЛАДОВИХ НАБОРУ ВИХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ВСЬОГО ПОЛЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ПОРШНЕВОГО ДВЗ

В усіх попередніх дослідженнях з цієї тематики авторського колективу даної наукової роботи у якості набору вихідних даних використовувались результати стендових мотрних випробувань автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 за декількома стандартизованими стаціонарними випробувальними циклами, апроксимованими для всього поля робочих режимів вказаного двигуна методом найменших квадратів у вигляді абсолютних значень техніко-економічних і екологічних показників роботи ПДВЗ.

Однак раціональним є завдання такого набору вихідних даних у дещо відмінному виді. Зокрема, пропонується задавати вихідні дані щодо окремо взятих техніко-економічних і екологічних показників роботи ПДВЗ комплектом з розподілу по полю робочих режимів двигуна відносних значень таких фізичних величин X_{rev} (тобто результатів ділення абсолютних значень X_{abs} на обране за зразкове з-поміж них же значення X_{ref}) та таблицею зразкових значень X_{ref}. Тобто підхід описується формулою (В.1).

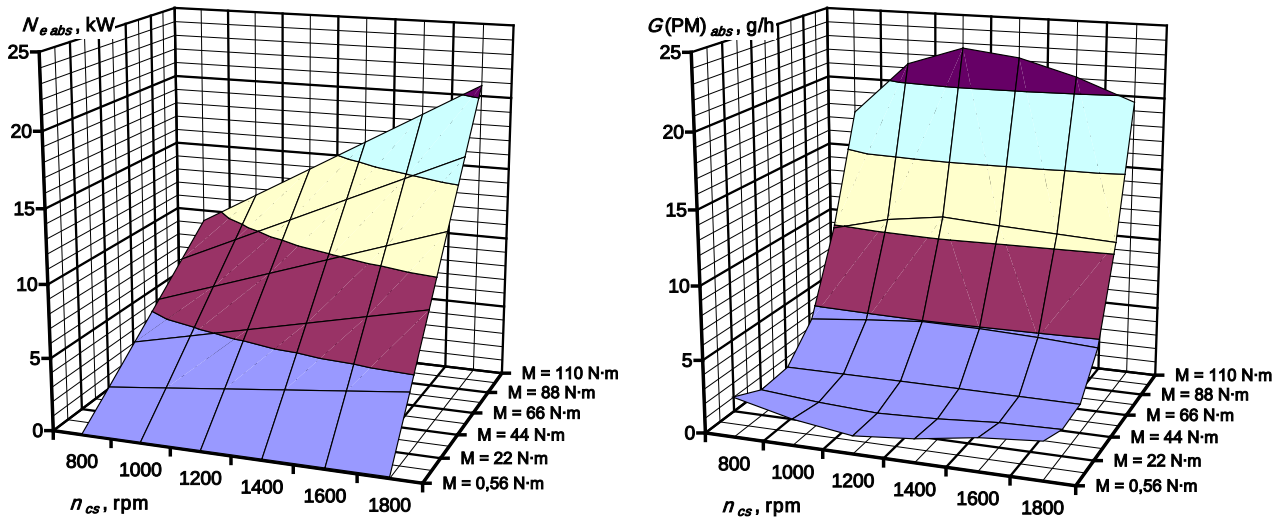
$$X_{rev} = X_{abs} / X_{ref}. \qquad (В.1)$$

Міркування щодо вибору зразкових значень X_{ref} є наступними. Бажано, щоб усі відносні значення X_{rev} лежали у межах [0, …, 1,0] для всього поля робочих режимів, тоді у якості зразкових значень X_{ref} має бути максимальне значення з-поміж абсолютних значень X_{abs} ($X_{ref} = X_{abs\max}$). Проте, як буде показано у Додатку Г, значення $X_{abs\max}$ для різних техніко-економічних і екологічних показників роботи ПДВЗ припадає на різні стаціонарні режими роботи двигуна, тобто відповідають різним точкам поля робочих режимів та мають різні значення координат такого поля – частоти обертання колінчастого валу n_{cs} та крутного момнету $M_{кр}$. Тому для уніфікації даних у таблиці зразкових значень у цьому дослідженні обрано у якості X_{ref} значення, що спостерігається на особливому режимі роботи двигуна – режимі максимального крутного моменту $M_{кр\max}$ (для дизеля 2Ч10,5/12 n_{cs} = 1200

rpm та $M_{кр}$ = 110 Н·м), для усіх описуваних фізичних величин. При такому підході порушується умова X_{rev} = [0, …, 1,0], але спрощується та скорочується таблиця зразкових значень. Тобто формула (В.1) перетворюється на формулу (В.2).

$$X_{rev} = X_{abs} / X_{abs}(n_{cs} = 1200 \text{ rpm}, M_{кр} = 110 \text{ Н·м}). \quad (В.2)$$

Порівняння результатів застосування обох підходів наведено на рис. В.1 і–В.3. Результати застосування другого підходу – графіки розподілу значень величин X_{rev} по полю робочих режимів автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 для усіх описуваних фізичних величин винесено на рис. В.4 – В.10, а таблицею зразкових значень є табл. В.1.



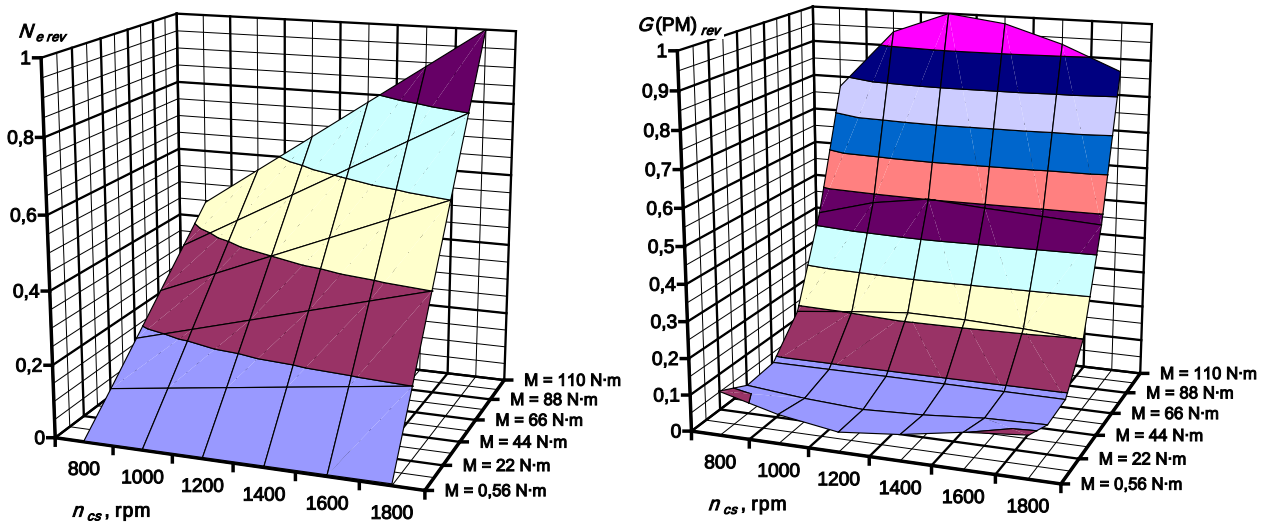
а б

Рисунок В.1 – Розподіли по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 абсолютних значень техніко-економічних показників роботи з різним розміщенням X_{absmax}

Отже, по-суті йдеться про відшукання форм розподілів описуваних величин по полю робочих режимів двигуна, які для значної кількості техніко-економічних і екологічних показників роботи ПДВЗ для різних (різної марки(моделі)) двигунів одного типу, членів типорозмірного ряду двигунів однієї марки (моделі), чи двигунів одного виробника та оної моделі різних поколінь чи у різному технічному стані (на різних етапах життєвого циклу), якщо не ідентично, то близькі за формою.

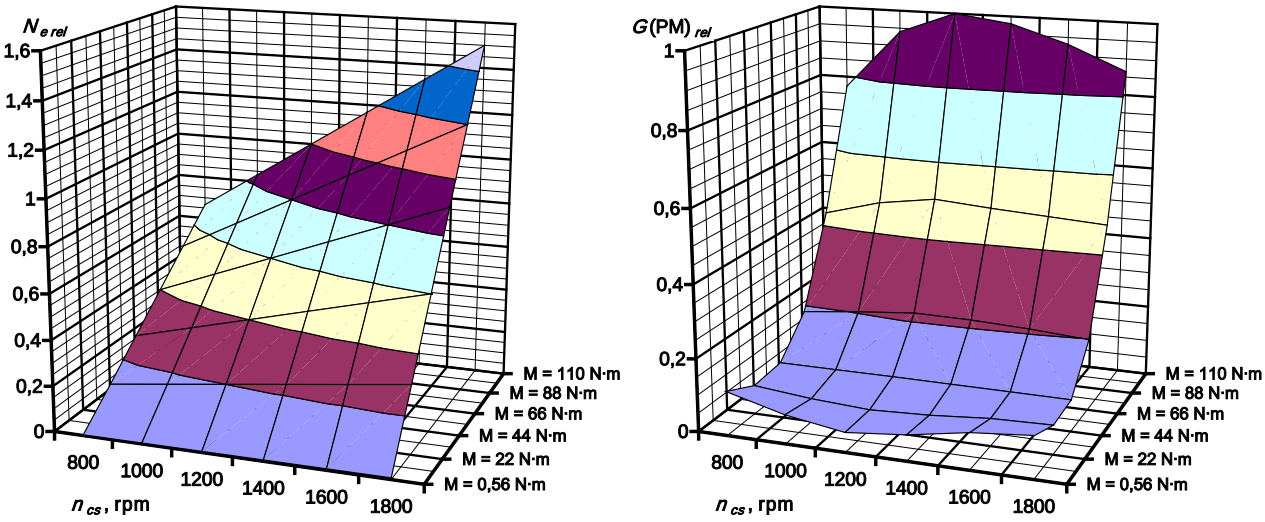
Тому в першому наближенні такий підхід відкриває значний потенціал до здешевлення, скорочення та спрощення процедури отримання набору вихідних даних для розрахункового дослідження шляхом того, що пропонується їх експериментальне отримання тільки для декількох точок на полі робочих режимів дви-

гуна, а саме $X_{abs\max}$ – для першого підходу, або навіть взагалі однієї точки (стаціонарного режиму) $X_{abs}(n_{cs}$ = 1200 rpm, $M_{кр}$ = 110 Н·м) – для другого.



а б

Рисунок В.2 – Розподіли по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 відносних значень техніко-економічних показників роботи з різним розміщенням $X_{abs\max}$ при $X_{ref} = X_{abs\max}$



а б

Рисунок В.3 – Розподіли по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 відносних значень техніко-економічних показників роботи з різним розміщенням $X_{abs\max}$ при $X_{rev} = X_{abs} / X_{abs}(n_{cs}$ = 1200 rpm, $M_{кр}$ = 110 Н·м)

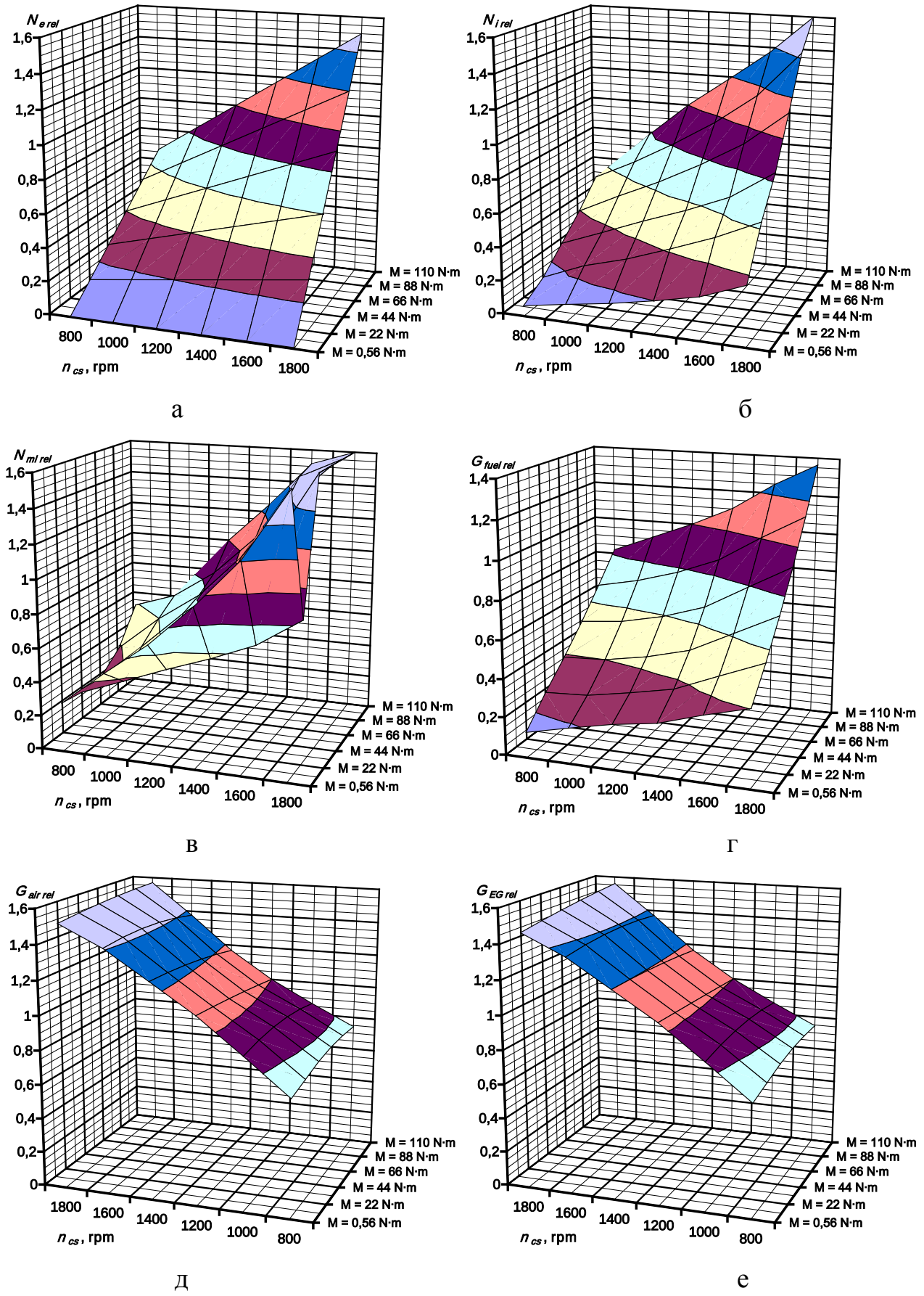
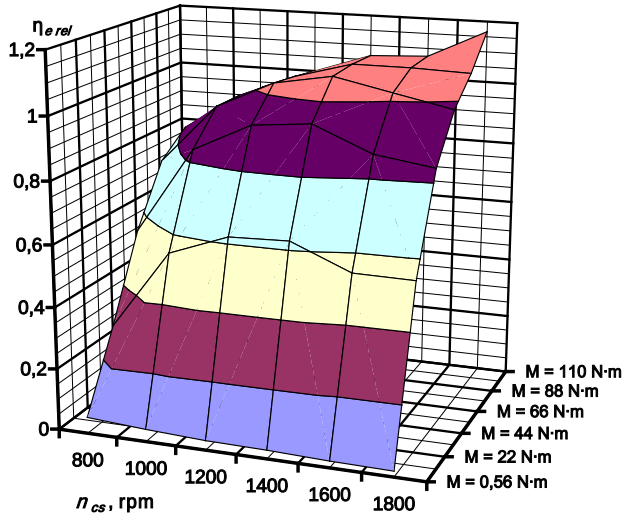
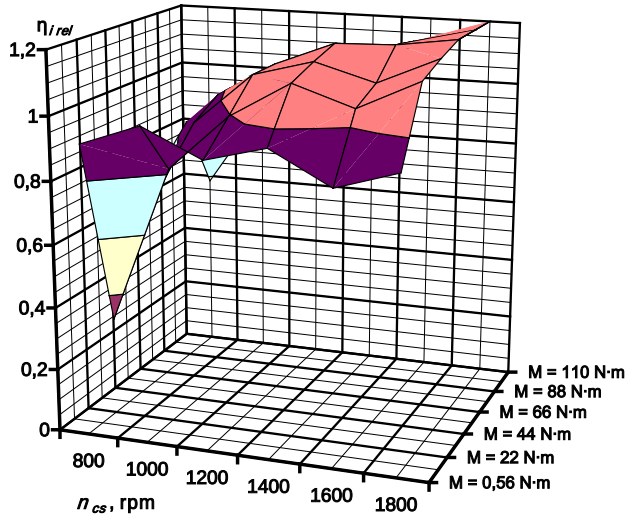


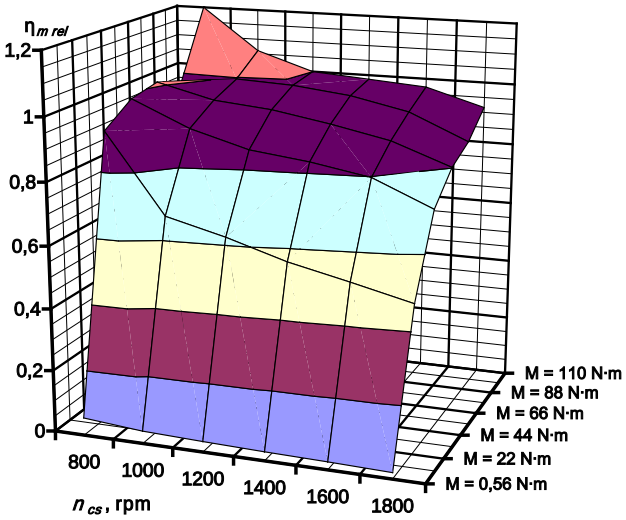
Рисунок В.4 – Розподіл значень техніко-економічних показників роботи автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 по полю його робочих режимів



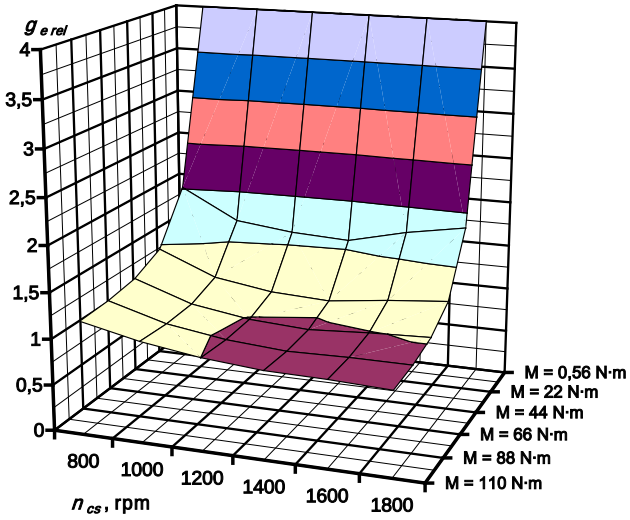
а



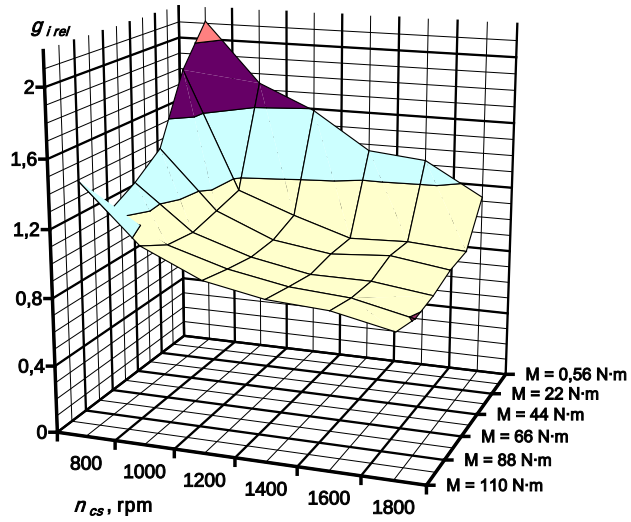
б



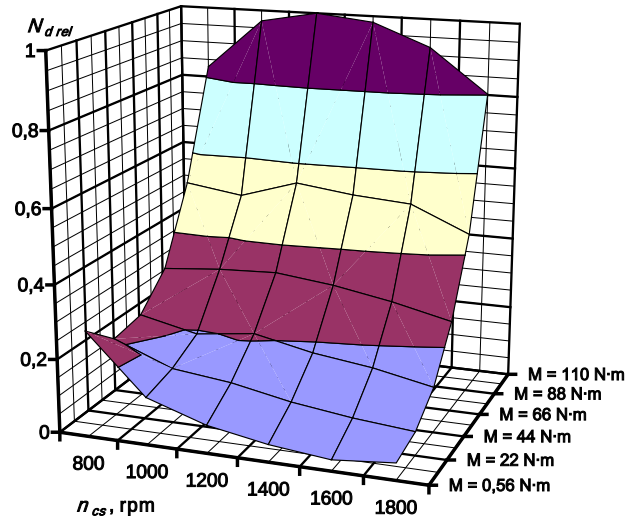
в



г



д



е

Рисунок В.5 – Розподіл значень техніко-економічних показників роботи автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 по полю його робочих режимів

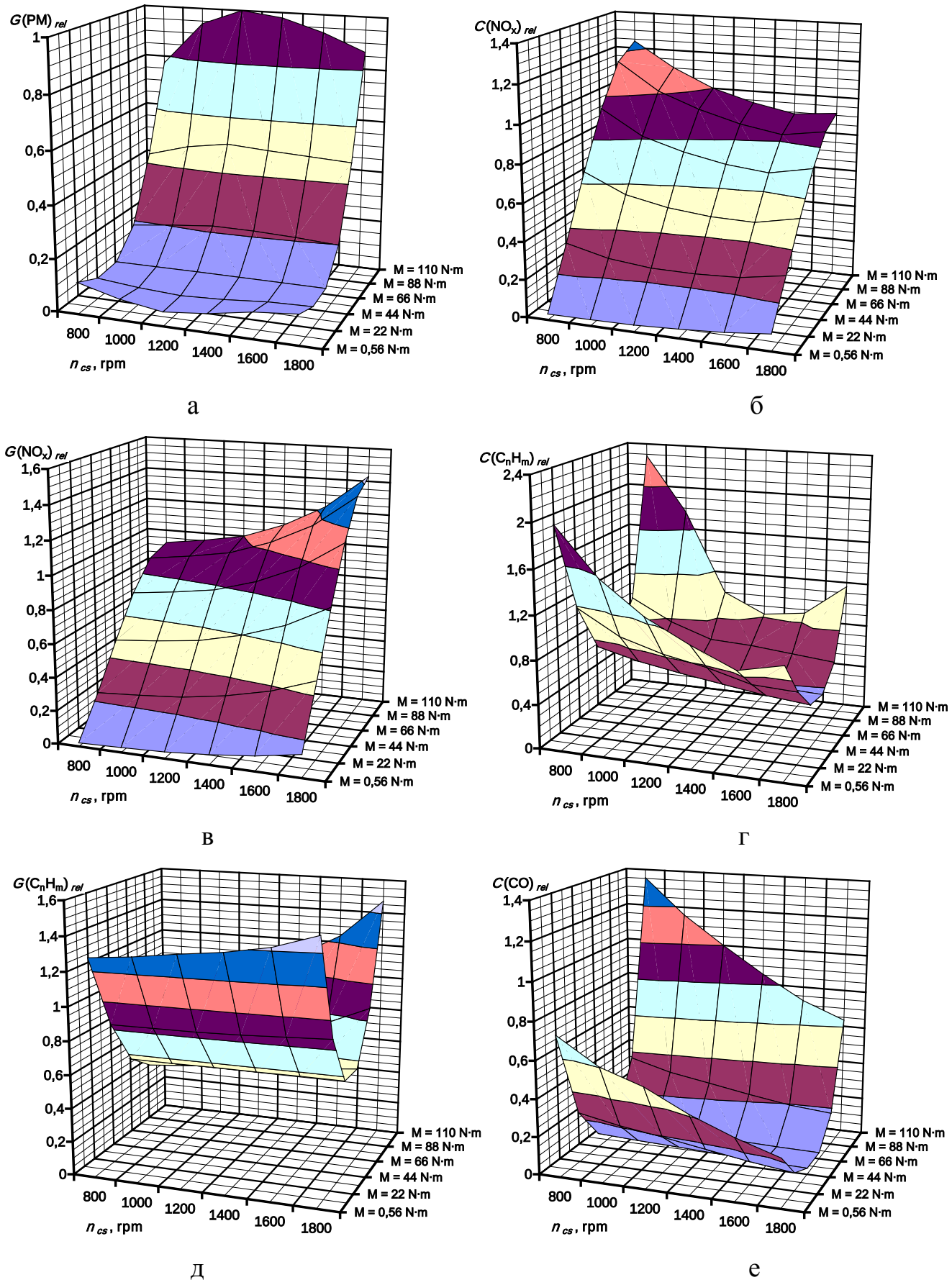


Рисунок В.6 – Розподіл значень екологічних показників роботи автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 по полю його робочих режимів

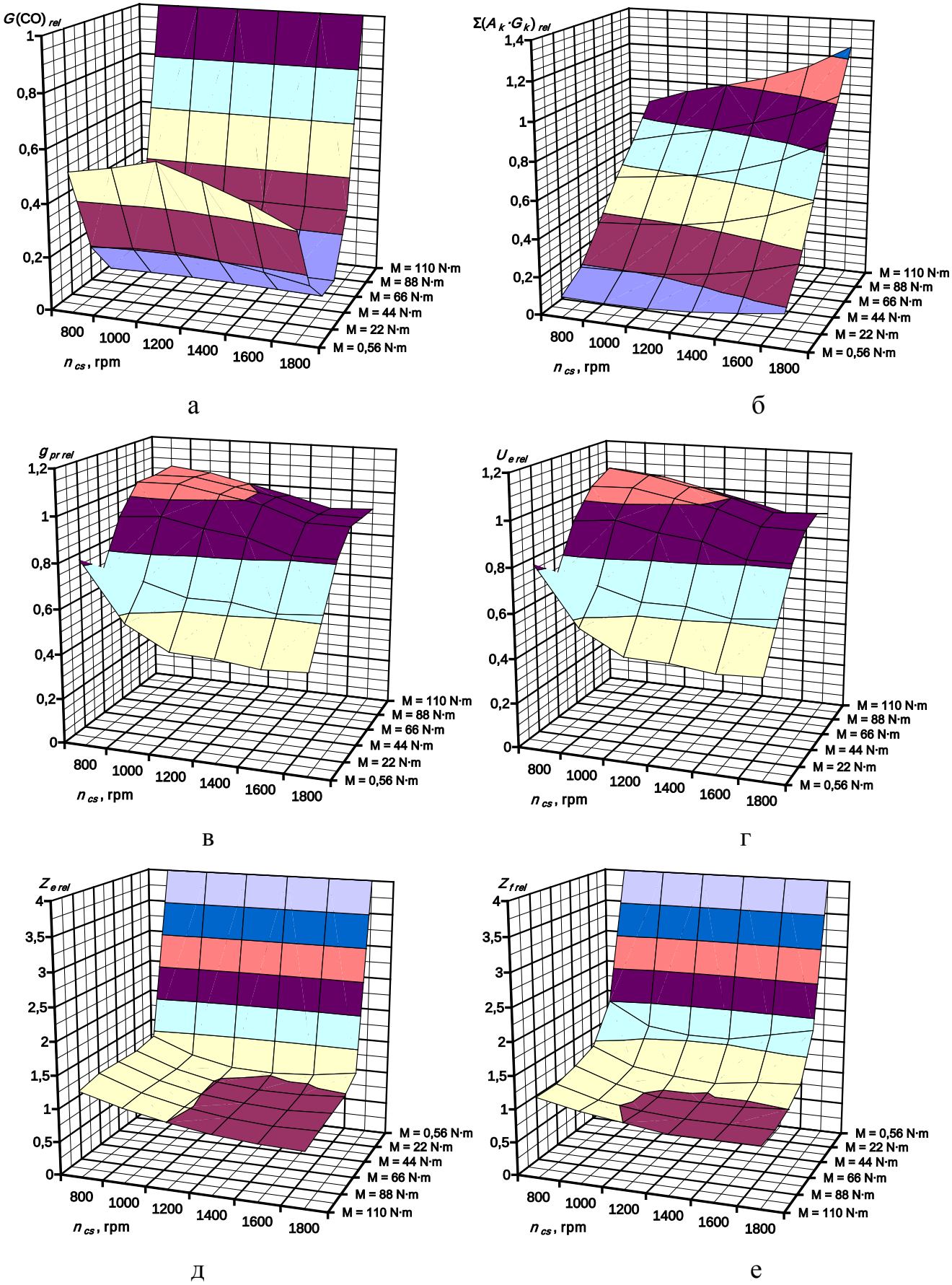


Рисунок В.7 – Розподіл значень екологічних показників роботи автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 та складових комплексного паливно-екологічного критерію по полю його робочих режимів

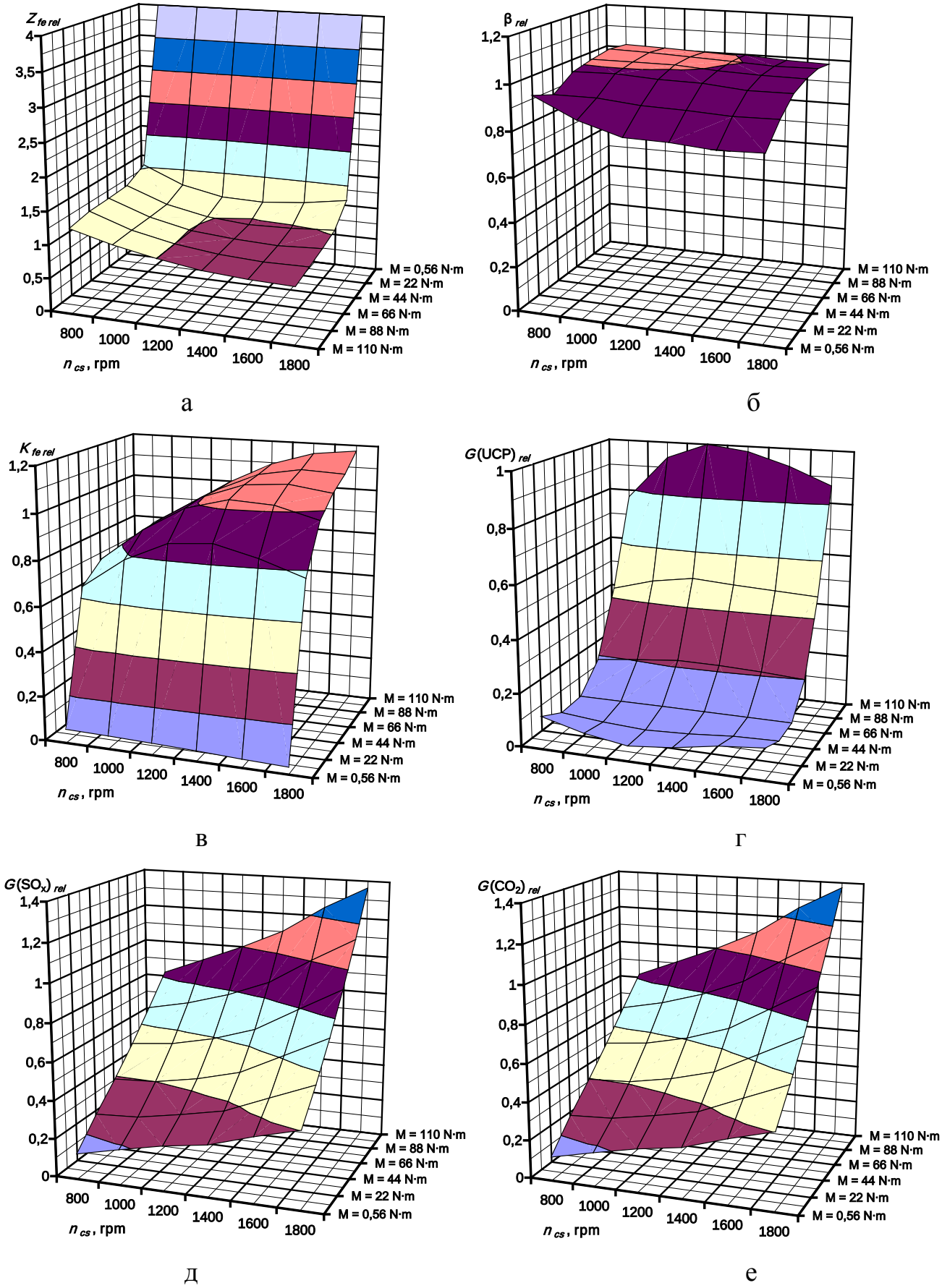


Рисунок В.8 – Розподіл значень екологічних показників роботи автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 та складових комплексного паливно-екологічного критерію по полю його робочих режимів

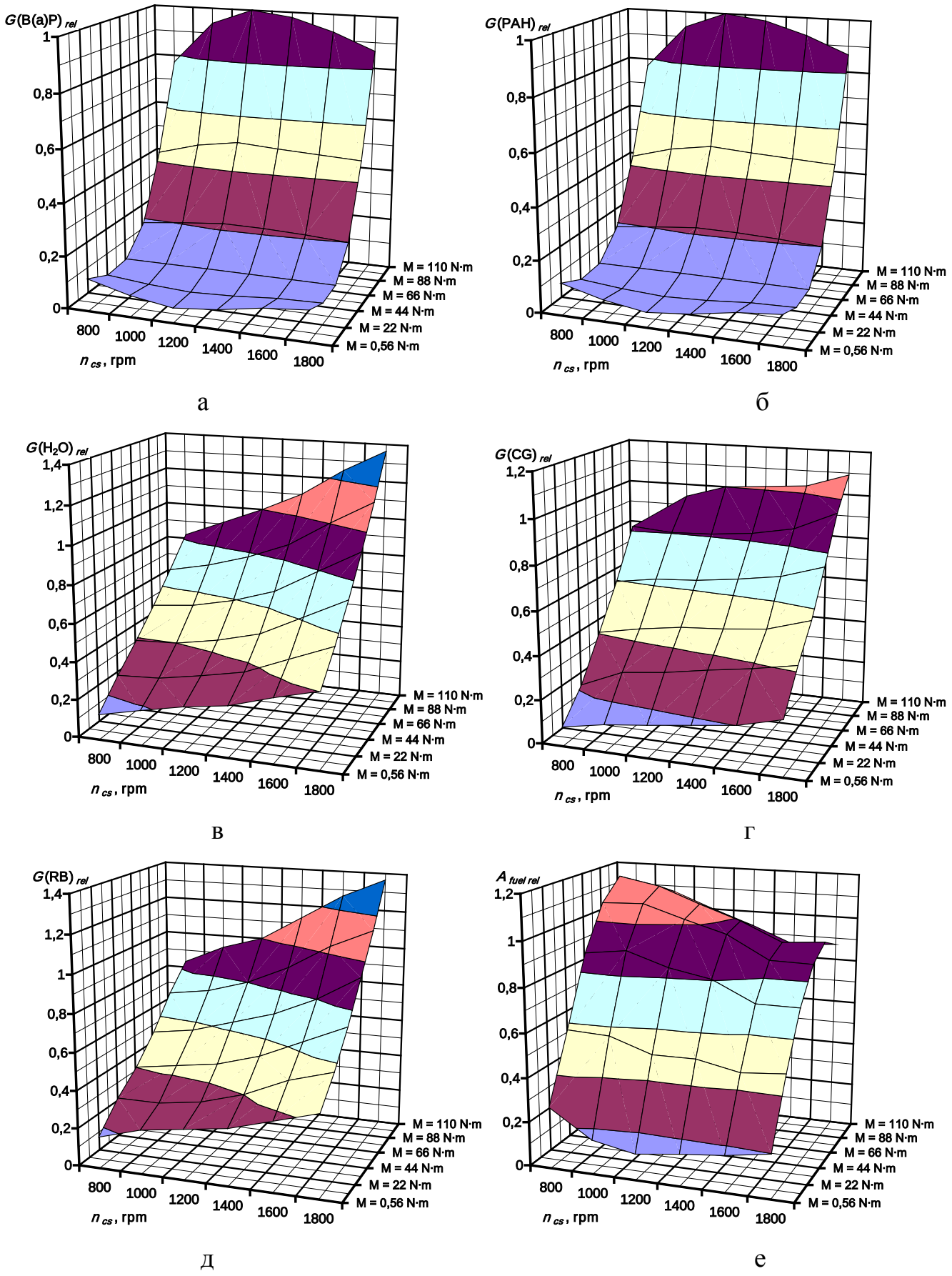
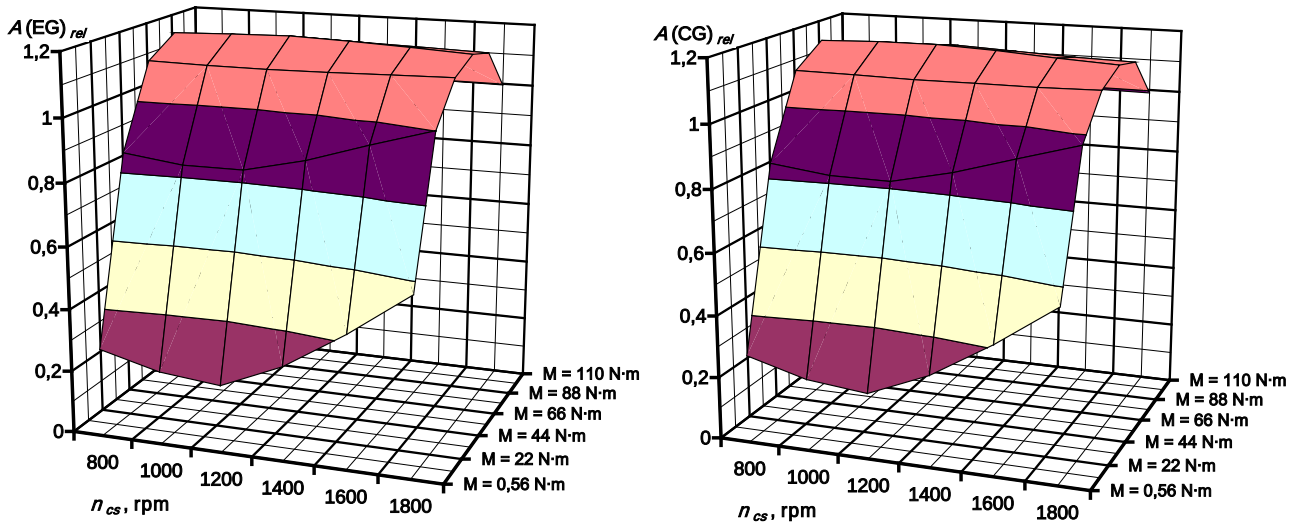


Рисунок В.9 – Розподіл значень екологічних показників роботи автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 та вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію по полю його робочих режимів



а б

Рисунок В.10 – Розподіл значень вагомості відпрацьованих та картерних газів як факторів ЕкБ автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 по полю його робочих режимів

Отже, побудовано підхід до описання розподілів значень складових набору вихідних даних для здійснення розрахункового дослідження для всього поля робочих режимів поршневого ДВЗ.

Підхід передбачає заміну сукупності розподілів абсолютних значень техніко-економічних й екологічних показників роботи ПДВЗ по полю робочих режимів, отриманих у ході стендових моторних випробувань та апроксимованих методом найменших квадратів, на аналогічну сукупність з розподілів відносних значень таких фізичних величин по полю робочих режимів та таблиці зразкових значень цих величин для одного обраного стаціонарного режиму роботи двигуна. Такий підхід дозволяє значно зменшити матеріально-часові витрати на отримання набору вихідних даних для здійснення розрахункового дослідження за припущення про незмінність форм таких розподілів для однотипних двигунів.

Таблиця В.1 – Таблиця зразкових значень техніко-економічних та екологічних показників роботи автотракторного дизеля 2Ч10,5/12, складових комплексного паливно-екологічного критерію та їх вагомості

Показник	Од. вим.	Абсолютні значення				Відносні значення			
		min	aver	max	ref	min	aver	max	ref
G_{fuel}	кг/год	0,483	2,249	4,904	3,593	0,134	0,626	1,365	1,0
G_{air}	кг/год	49,148	82,475	113,372	72,317	0,680	1,140	1,568	1,0
G_{EG}	кг/год	49,631	84,724	118,276	75,910	0,654	1,116	1,558	1,0
P_e	Па	3208	333142	665183	665159	0,005	0,501	1,0	1,0
P_i	Па	75252	485145	917476	840923	0,089	0,577	1,091	1,0
P_{ml}	Па	27702	152002	266889	175764	0,158	0,865	1,518	1,0
η_e	–	0,006	0,234	0,378	0,324	0,019	0,722	1,167	1,0
η_m	–	0,016	0,580	0,960	0,791	0,020	0,734	1,214	1,0
η_i	–	0,129	0,404	0,521	0,410	0,314	0,987	1,273	1,0
N_e	кВт	0,050	7,499	20,733	13,822	0,004	0,543	1,500	1,0
N_i	кВт	1,111	11,181	28,597	17,474	0,064	0,640	1,637	1,0
N_{ml}	кВт	0,384	3,681	8,318	3,652	0,105	1,008	2,278	1,0
g_e	кг/(кВт·год)	0,237	2,295	14,460	0,260	0,910	8,828	55,627	1,0
g_i	кг/(кВт·год)	0,163	0,229	0,435	0,206	0,793	1,112	2,114	1,0
N_d	%	2,1	25,0	70,2	70,2	0,030	0,357	1,0	1,0
G(PM)	г/год	1,2	7,0	22,7	22,7	0,054	0,307	1,0	1,0
$C(NO_x)$	ppm	70	1312	2720	2196	0,032	0,598	1,239	1,0
$G(NO_x)$	г/год	5,4	164,6	352,9	246,8	0,022	0,667	1,430	1,0
$C(C_nH_m)$	ppm	38	90	240	105	0,362	0,861	2,286	1,0
$G(C_nH_m)$	г/год	1,7	3,2	5,7	3,8	0,447	0,849	1,503	1,0
C(CO)	ppm	66	656	2710	2002	0,033	0,328	1,357	1,0
G(CO)	г/год	7,0	46,6	133,5	133,3	0,053	0,349	1,001	1,0
$\Sigma(A_k \cdot G_k)$	кг/год	1,557	8,244	18,439	14,695	0,106	0,561	1,255	1,0
g_{pr}	–	1,780	3,432	4,350	4,090	0,435	0,839	1,064	1,0
U_e	$/кг	1,550	3,006	3,930	3,560	0,435	0,844	1,104	1,0
Z_e	$/(кВт·год)	0,770	3,582	22,880	0,930	0,828	3,852	24,601	1,0
Z_f	$/(кВт·год)	0,210	1,594	12,590	0,230	0,913	6,929	54,739	1,0
Z_{fe}	$/(кВт·год)	0,980	5,176	35,470	1,160	0,845	4,462	30,578	1,0
β	–	0,640	0,766	0,821	0,802	0,798	0,956	1,023	1,0
K_{fe}	‰	2,1	50,4	74,9	63,8	0,032	0,791	1,175	1,0
G(UCP)	г/год	258,3	1402,3	4544,2	4544,2	0,057	0,309	1,0	1,0
$G(SO_x)$	г/год	7,3	33,7	73,6	53,9	0,135	0,626	1,365	1,0
$G(CO_2)$	кг/год	1,411	7,095	15,408	11,210	0,126	0,633	1,374	1,0
G(B(a)P)	г/год	0,173	0,937	3,036	3,036	0,057	0,309	1,0	1,0
G(PAH)	г/год	1,9	10,2	33,2	33,2	0,057	0,309	1,0	1,0
$G(H_2O)$	кг/год	0,522	2,429	5,296	3,881	0,135	0,626	1,365	1,0
G(CG)	кг/год	0,134	0,866	1,637	1,500	0,089	0,577	1,091	1,0
G(RB)	г/год	5,0	19,5	41,0	30,0	0,168	0,650	1,366	1,0
A_{fuel}	–	6,092	38,427	60,040	51,513	0,118	0,746	1,166	1,0
A(EG)	–	7,844	34,288	43,197	36,451	0,215	0,941	1,185	1,0
A(CG)	–	5,761	25,476	32,199	27,351	0,211	0,931	1,177	1,0