

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»



RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ІНСТРУМЕНТАЛЬНА ПОХИБКА ВІДОМИХ ФОРМУЛ ПЕРЕРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ДИМНОСТІ У ПОКАЗНИКИ ТОКСИЧНОСТІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ПОРШНЕВИХ ДВЗ

О. М. Кондратенко¹, В. А. Андронов¹, О. П. Строков², В. М. Бабакин¹, В. А. Краснов¹

¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

²Кременчуцька філія Класичного приватного університету, Кременчук, Україна

УДК 504.064.4 : 621.431 : 389.14 : 528.088

DOI: 10.52363/2522-1892.2022.2.1

Отримано: 14 жовтня 2022

Прийнято: 25 листопада 2022

Cite as: Kondratenko O., Andronov V., Strokov O., Babakin V., Krasnov V. (2022). The instrumental accuracy of known formulas for the conversion of opacity indicators into indicators of toxicity of exhaust gases of reciprocating ICE. Technogenic and ecological safety, 12(2/2022), 3–18. doi: 10.52363/2522-1892.2022.2.1

Анотація

У статті виконано аналіз номенклатури найуживаніших показників димності відпрацьованих газів поршневих ДВЗ та математичних апаратів відомих формул перерахунку показників димності та токсичності відпрацьованих газів, з яких для подальших розрахункових досліджень обрано формулу перерахунку проф. Ігоря Парсаданова як таку, що враховує не лише показники димності, а й показники токсичності ВГ. Здійснено аналіз та перетворення обраної формули перерахунку та виявлено особливості впливу на значення отримуваної за нею фізичної величини незалежних змінних. Розроблено методику розрахункового оцінювання інструментальної точності отримання масового годинного викиду твердих частинок з потоком відпрацьованих газів за досліджуваною формулою перерахунку у двох послідовних наближеннях. За результатами розрахункового оцінювання за розробленою методикою для базового показника димності відпрацьованих газів та паспортної точності засобів вимірювальної техніки встановлено, що усереднене по особливим режимам роботи поршневого ДВЗ значення такої точності склало $\pm 8,3\%$. Виявлено і проаналізовано вплив виду показника димності відпрацьованих газів з відповідними йому одиницями вимірювання на інструментальну точність досліджуваної формули перерахунку. За ознакою величини такої точності для паспортної точності засобів вимірювальної техніки відомі показники димності відпрацьованих газів ранжовано.

Ключові слова: димність, токсичність, формула перерахунку, поршневий ДВЗ, відпрацьовані гази, технології захисту навколишнього середовища, екологічна безпека.

Постановка проблеми та аналіз літературних джерел

На сьогоднішній день в Україні діють законодавчо встановлені нормативи показників токсичності відпрацьованих газів (ВГ) поршневих двигунів внутрішнього згорання (ПДВЗ) автотранспортних засобів (АТЗ), зокрема питомого ефективного масового годинного викиду твердих частинок (ТЧ) з потоком ВГ двигуна g_{ePM} у г/(кВт·год) [1–6]. При цьому самі значення величини g_{ePM} отримують віднесенням значення величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ G_{PM} у г/год до значення величини ефективної потужності ПДВЗ N_e у кВт. Отримання величини N_e та значень її інструментальної абсолютної й відносної похибок не являє собою складної задачі. Основна складність в отриманні значень g_{ePM} як законодавчо нормованого показника екологічності поршневого ДВЗ за полютантом з найбільшим значенням показника відносної агресивності полягає в отриманні значень величини G_{PM} .

Як відомо з основних положень наукової дисципліни «Метрологія», жодні вимірювання неможливо виконати з абсолютною точністю, а лише з деякою похибкою [8], що також слід враховувати при плануванні експериментальних чи розрахункових досліджень.

Нормативні вимоги [6] до такого показника токсичності ВГ поршневих ДВЗ різного призначення також встановлюють спосіб експериментального отримання значень величини G_{PM} – гравіметричний

[1–6]. Проте, через загальновідомі обставини, характерні для нашої країни, широкого розповсюдження набули формули перерахунку різного виду, найбільш широкого розповсюдження серед яких набула формула проф. Ігоря Парсаданова (НТУ «ХПІ»), описана у монографії [3]. Ця формула перерахунку, на відміну від альтернативних їй, враховує не тільки показники димності ВГ (зокрема, коефіцієнт ослаблення світлового потоку N_D (у %)), а ще й токсичності ВГ (зокрема, об'ємна концентрація незгорілих вуглеводнів у ВГ C_{CH} (у ppm)) та дозволяє отримати на основі цих двох незалежних змінних значення величини $G_{TЧ}$ (у кг/(кВт·год)). При цьому така формула містить ще дві незалежні змінні – значення масових годинних витрат палива G_{fuel} та повітря G_{air} ПДВЗ (у кг/год).

Аналіз науково-технічної літератури за темою використання формул перерахунку методики оцінювання їх точності та його результатів не виявив. Там же наведено і аналіз кількісних і якісних аспектів точності отримання значень величини G_{PM} гравіметричним методом.

Ще одним невирішеним питанням застосування будь-якої формули перерахунку є вибір одиниць вимірювання показників димності ВГ та відповідних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), а саме димомірів різноманітних конструкцій. Різні показники димності ВГ з відповідними їм одиницями вимірювання співвідносяться одне з одним за нелінійними законами і безпосереднє використання у

певній формулі перерахунку альтернативних базовому показників димності ВГ неможливе. Такі питання постають на практиці у наступних випадках.

1) Вибір типу і моделі ЗВТ при комплектуванні моторного стенду новоствореної чи модернізованої лабораторії.

2) Стендові моторні дослідження ПДВЗ – окремо чи у складі АТЗ – у лабораторії, вже обладнаній ЗВТ певного типу, що дає альтернативні показники димності ВГ.

3) Критеріальне оцінювання паливно-екологічної досконалості ПДВЗ АТЗ за наявності готового набору вихідних даних, отриманого іншими дослідниками, серед яких присутні лише альтернативні показники димності ВГ.

У зв'язку з вищенаведеними міркуваннями, постає також питання впливу виду одиниць вимірювання показників димності ВГ на кількісні та якісні аспекти інструментальної точності формул перерахунку, що і зумовлює його актуальність.

Дане дослідження виконано на прикладі автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 [10–12], використано математичний апарат формули перерахунку проф. Ігоря Парсаданова [3], нормативну документацію до ЗВТ [13, 14].

Мета дослідження. Створення методики розрахункового оцінювання значень інструментальної похибки отримання значень масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ дизельного ПДВЗ АТЗ, отриманих при використанні відомої формули перерахунку, з урахуванням виду показника димності ВГ.

Завданням дослідження є обґрунтування за результатами розрахунків принципу ранжування відомих показників димності ВГ ПДВЗ АТЗ з відповідними одиницями вимірювання при застосуванні їх у формулах перерахунку.

Об'єкт дослідження. Інструментальна точність формули перерахунку проф. Ігоря Парсаданова.

Предмет дослідження. Вплив типу показника димності ВГ з притаманними йому одиницями вимірювання на інструментальну точність обраної формули перерахунку.

Задачі дослідження є наступними.

1. Аналіз математичних апаратів відомих формул перерахунку та показників димності ВГ.

2. Створення методики розрахункового оцінювання інструментальної точності отримання величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ за обраною формулою перерахунку.

3. Виявлення впливу типу одиниць вимірювання показників димності ВГ на інструментальну точність обраної формули перерахунку.

Під час виконання даного наукового дослідження використано наступні **методи дослідження**: аналіз науково-технічної літератури; методика аналізу даних моторних стендових випробувань, розрахунку середньоексплуатаційних значень техніко-економічних і екологічних показників роботи ПДВЗ за стандартизованими стаціонарними випробувальними циклами; основні положення наукових дисциплін «Теорія ДВЗ», «Метрологія», методика застосування формули перерахунку проф. Ігоря Парсаданова, метод найменших квадратів.

Аналіз результатів проведеного дослідження дозволяє виділити наступні пункти їх **наукової новизни**.

1. Вперше запропоновано методику розрахункового оцінювання інструментальної точності отримання величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ за формулою перерахунку, що враховує показники димності й токсичності ВГ, з урахуванням впливу виду показника димності ВГ з відповідними йому одиницями вимірювання для окремого режиму роботи ПДВЗ.

2. Вперше ранжовано відомі показники димності ВГ при використанні їх у формулах перерахунку за ознакою інструментальної точності отримання значень величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ.

Результати виконаного дослідження можуть набути наступного **практичного використання**.

1. Запропонована методика придатна для здійснення оцінювання такої точності для випадку використання формули перерахунку довільного виду та для ПДВЗ будь-якого типу з використанням формули перерахунку довільного виду.

2. Розроблені рекомендації щодо ранжування показників димності ВГ при використанні їх у формулах перерахунку придатні для використання у практиці подальших досліджень.

1 Аналіз номенклатури відомих формул перерахунку та показників димності відпрацьованих газів ПДВЗ

1.1 Аналіз відомих формул перерахунку

Формула перерахунку, запропонована проф. Ігорем Парсадановим і описана у монографії [3], отримана як результат аналізу даних сертифікаційних випробувань автотракторного дизеля СМД-31 на моторному стенді фірми Ricardo, обладнаному повнопоточним тунелем розведення, має вид формули (1.1):

$$G_{PM} = \left(2,3 \cdot 10^{-3} \cdot N_D + 5 \cdot 10^{-5} \cdot N_D^2 + 0,145 \cdot \frac{C_{CnHm} \cdot 4,78 \cdot 10^{-7} \cdot (G_{air} + G_{fuel})}{0,7734 \cdot G_{air} + 0,7239 \cdot G_{fuel}} \right) + 0,33 \cdot \left(\frac{C_{CnHm} \cdot 4,78 \cdot 10^{-7} \cdot (G_{air} + G_{fuel})}{0,7734 \cdot G_{air} + 0,7239 \cdot G_{fuel}} \right)^2 \cdot \frac{(0,7734 \cdot G_{air} + 0,7239 \cdot G_{fuel})}{1000} \quad (1.1)$$

Формула перерахунку MIRA (The Motor Industry Research Association) має вид сукупності формул (1.2)–(1.4) [4].

$$N = 100 \cdot (1 - \exp(-\varepsilon \cdot I \cdot C)), \% \quad (1.2)$$

$$C_C = \ln(1 - N/100) / (\varepsilon \cdot l), \text{ г/м}^3; \quad (1.3)$$

$$\varepsilon = 3 \cdot d_A^2 / (2 \cdot \rho \cdot d_v^3), \text{ м}^2/\text{г}; \quad (1.4)$$

де C_C – концентрація ТЧ, г/м^3 ; $\varepsilon \approx 6,82 \text{ м}^2/\text{г}$ – питомий коефіцієнт світлопропускання; $\rho \approx 1 \text{ г/м}^3$ – щільність ТЧ; $d_A \approx 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – еквівалентний проєкційний діаметр ТЧ; $d_v \approx 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – еквівалентний об’ємний діаметр ТЧ.

Формула перерахунку А.С. Alkidas`а має вид формули (1.5) [4]

$$C_C = 565 \cdot \left(\ln \left(\frac{10}{10 - BSU} \right) \right)^{1,206}, \text{ мг/м}^3; \quad (1.5)$$

де BSU (BSN) – димність ВГ за шкалою Bosch (Bosch Soot Units or Number).

Формула перерахунку G.G. Muntean`а має вид формули (1.6) [4].

$$C_C = (-184 \cdot BSU - 727,5) \cdot \log(1 - BSU/10), \text{ мг/м}^3. \quad (1.6)$$

1.2 Аналіз відомих показників димності відпрацьованих газів ПДВЗ

Найчастіше димність ВГ характеризують значенням коефіцієнта ослаблення світлового потоку (непрозорості – opacity) N (далі у цій роботі буде позначатися як N_D) [4] визначається формулами (1.7) і (1.8), у яких τ – коефіцієнт світлопропускання (transmittance); I та I_0 – світловий потік крізь пробу ВГ що вийшов з джерела світла та прийшов на прийомник світла, лм. За визначенням величини N та K

співвідносяться між собою за формулою [4] (1.9), при $L = 0,43 \text{ м}$ [13]. Співвідношення між одиницями вимірювання димності ВГ за шкалою Harritage HSN (Harritage Soot Number) та шкалою Bosch BSU описується формулою (1.10) [4].

$$N = 100 - \tau, \% \quad (1.7)$$

$$\tau = I / I_0 \cdot 100, \% \quad (1.8)$$

$$K = -\ln(1 - N/100) / L, \text{ м}^{-1}; \quad (1.9)$$

$$HSN = -2,64 \cdot 10^{-4} \cdot BSU^2 + 0,111642 \cdot BSU - 1,023 \cdot 10^{-3}. \quad (1.10)$$

У табл. 1.1 показано співвідношення між одиницями димності ВГ, отримане з джерела [4], у табл. 1.2 містяться нормативи димності ВГ за ДСТУ 4276:2004 [7], а у табл. 1.3 – співвідношення між одиницями димності ВГ, отримане з [15]. Рис. 1.1 містить залежність нормативно встановленого значення димності ВГ дизельного ПДВЗ від об’ємної секундної витрати ВГ за ДСТУ 4276:2004 [4].

На рис. 1.2 проілюстровано співвідношення між величинами HSN та BSN (BSU) як показниками димності ВГ дизельного поршневого ДВЗ за даними з джерела [15]; на рис. 1.3 – співвідношення між величинами N та K як показниками димності ВГ за даними джерела з [4]; на рис. 1.4 – співвідношення між величинами N та BSU як показниками димності ВГ за даними джерела [4]; на рис. 1.5 – співвідношення між величинами N та C_C як показниками димності ВГ за даними з джерела [4]; на рис. 1.6 – співвідношення між величинами N та HNS як показниками димності ВГ за даними з джерел [4, 15].

Інформація з рис. 1.2–1.6 зведена на рис. 1.7, де подано співвідношення між альтернативними показниками димності ВГ та базовим показником за даними з джерел [4, 15].

Таблиця 1.1 – Співвідношення між одиницями димності ВГ [4]

N	K	Bosch unit	C_C	N	K	Bosch unit	C_C	N	K	Bosch unit	C_C
%	м^{-1}	BSU	мг/м^3	%	м^{-1}	BSU	г/м^3	%	м^{-1}	BSU	г/м^3
10	0,25	1,10	33	38	1,11	3,26	181	66	2,51	4,72	416
12	0,30	1,30	42	40	1,19	3,37	193	68	2,65	4,81	439
14	0,35	1,48	52	42	1,27	3,47	206	70	2,80	4,91	462
16	0,41	1,67	62	44	1,35	3,59	220	72	2,96	5,01	489
18	0,46	1,84	71	46	1,43	3,70	234	74	3,13	5,12	514
20	0,52	2,02	81	48	1,52	3,80	248	76	3,32	5,23	544
22	0,58	2,18	91	50	1,61	3,91	264	78	3,52	5,34	575
24	0,64	2,34	101	52	1,71	4,01	281	80	3,74	5,45	609
26	0,70	2,50	111	54	1,81	4,12	299	82	3,99	5,57	648
28	0,76	2,64	122	56	1,91	4,22	317	84	4,26	5,72	691
30	0,83	2,77	133	58	2,02	4,32	335	86	4,57	5,87	737
32	0,90	2,89	144	60	2,13	4,42	355	88	4,93	6,04	786
34	0,97	3,02	156	62	2,25	4,52	375	90	5,35	6,22	844
36	1,04	3,14	168	64	2,38	4,62	395				

Таблиця 1.2 – Нормативи димності ВГ за ДСТУ 4276:2004 [4]

Об'ємна секундна витрата ВГ, V_{EG} , dm^3/c	Натуральний показник ослаблення світлового потоку K , m^{-1} , не більше	Коефіцієнт ослаблення світлового потоку N , приведений до шкали димоміра оптичного типу ($L = 0,43$ м), %, не більше	Димове число FSN фільтра, приведене до шкали димоміра фільтраційного типу ($L_F = 0,405$ м), умовних одиниць, не більше
до 75 включно	1,857	55	4,2
від 75 до 85	1,707	52	4,0
від 85 до 95	1,612	50	3,9
від 95 до 110	1,521	48	3,8
від 110 до 125	1,433	46	3,7
від 125 до 140	1,348	44	3,6
від 140 до 160	1,267	42	3,5
від 160 до 185	1,188	40	3,4
від 185 до 210	1,112	38	3,3
від 210 до 250	1,038	36	3,2
від 250 до 290	0,966	34	3,0
від 290 до 350	0,897	32	2,9
від 350 до 400	0,829	30	2,8
від 400 до 500	0,764	28	2,7
від 500 до 600	0,700	26	2,5
від 600 до 700	0,638	24	2,3
від 700 до 900	0,578	22	2,2
від 900 до 1150	0,519	20	2,0
від 1150 до 1500	0,461	18	1,8
від 1500 до 2000	0,405	16	1,7
від 2000 до 3000	0,351	14	1,5
від 3000	0,297	12	1,3

Таблиця 1.3 – Співвідношення між одиницями димності ВГ [15]

Harritage number	Carbone concentration	Bosch number	Coeff. of light abs. k
HSN	g/m^3	BSN	m^{-1}
10	0,038	1,1	0,26
20	0,100	2,0	0,53
30	0,142	2,8	0,84
40	0,197	3,4	1,19
50	0,265	3,9	1,62
60	0,350	4,4	2,11
70	0,460	4,9	2,81
80	0,620	5,5	3,75
90	0,835	6,2	–
100	–	–	∞

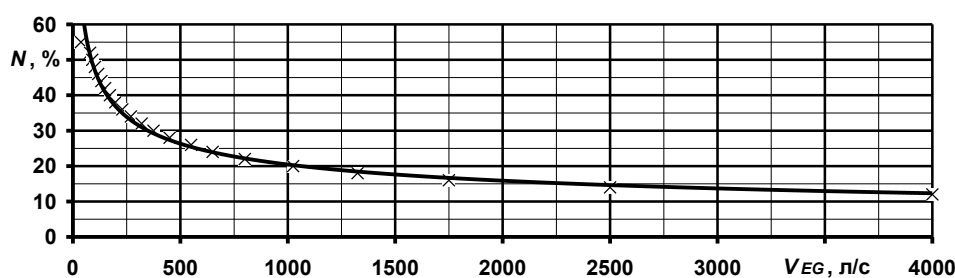


Рисунок 1.1 – Залежність нормативно встановленого значення димності ВГ дизельного ПДВЗ від об'ємної секундної витрати ВГ за ДСТУ 4276:2004 [4]

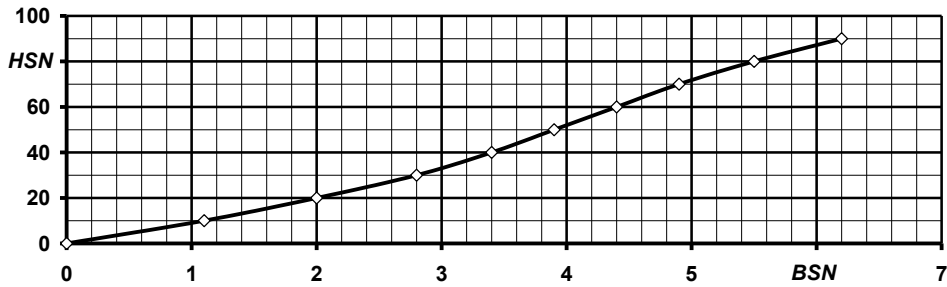


Рисунок 1.2 – Співвідношення між величинами HSN та BSN (BSU) як показниками димності ВГ дизельного ПДВЗ за даними [14]

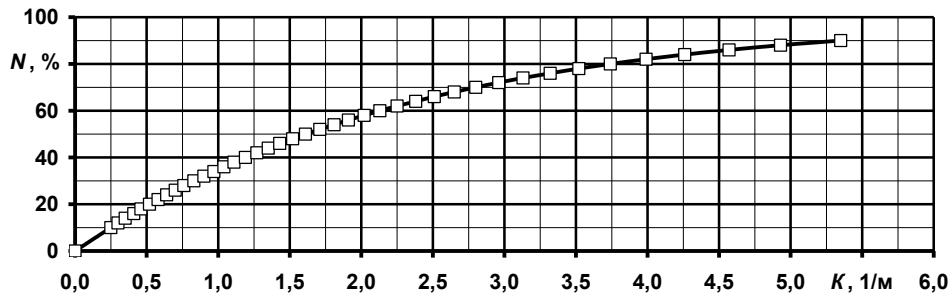


Рисунок 1.3 – Співвідношення між величинами N та K як показниками димності ВГ дизельного ПДВЗ за даними [4]

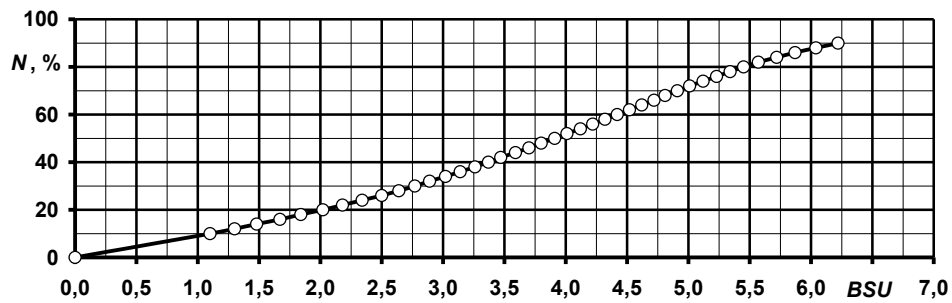


Рисунок 1.4 – Співвідношення між величинами N та BSU як показниками димності ВГ дизельного ПДВЗ за даними [4]

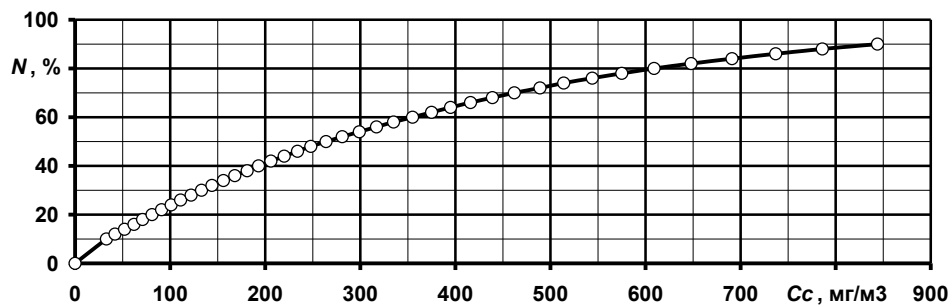


Рисунок 1.5 – Співвідношення між величинами N та C_s як показниками димності ВГ дизельного ПДВЗ за даними [4]

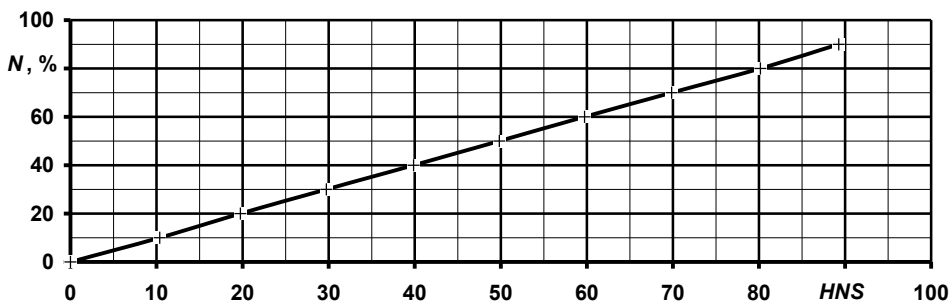


Рисунок 1.6 – Співвідношення між величинами N та HSN як показниками димності ВГ дизельного ПДВЗ за даними [4, 14]

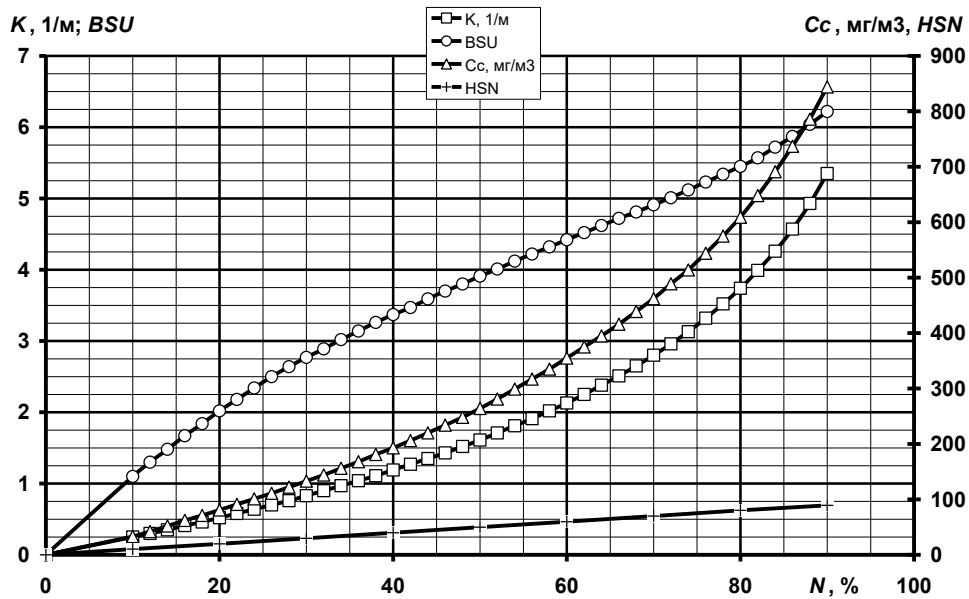


Рисунок 1.7 – Співвідношення між альтернативними показниками димності ВГ дизельного ПДВЗ та базовим показником за даними [4, 14]

Таблиця 1.4 – Коефіцієнти апроксимуючих поліномів залежностей показників димності ВГ дизельного ПДВЗ між собою

Коефіцієнт	a_4	$\times 10^x$	a_3	$\times 10^x$	a_2	$\times 10^x$	a_1	$\times 10^x$
$N_D = f(K), a_0 = 0 \%, R^2 = 1,0$								
од. вим.	%·м ⁴		%·м ³		%·м ²		%·м	
значення	-4,985	-2	9,863	-1	-8,681	0	4,266	1
$N_D = f(BSU), a_0 = 0 \%, R^2 = 1,0$								
од. вим.	%·BSU ⁴		%·BSU ³		%·BSU ²		%·BSU	
значення	-1,169	-1	1,219	0	-2,471	0	1,082	1
$N_D = f(Cc), a_0 = 0 \%, R^2 = 0,999$								
од. вим.	%/(мг/м ³) ⁴		%/(мг/м ³) ³		%/(мг/м ³) ²		%/(мг/м ³)	
значення	-1,932	-10	4,381	-7	-4,350	-4	2,773	-1
$N_D = f(HSN), a_0 = 0 \%, R^2 = 1,0$								
од. вим.	%·HSN ⁴		%·HSN ³		%·HSN ²		%·HSN	
значення	0	0	0	0	0	0	1,0	0
$K = f(N_D), a_0 = 0 \text{ 1/м}, R^2 = 0,999$								
од. вим.	1/(м·%) ⁴		1/(м·%) ³		1/(м·%) ²		1/(м·%)	
значення	1,475	-7	-1,731	-5	8,534	-4	1,433	-2
$BSU = f(N_D), a_0 = 0 \text{ BSU}, R^2 = 0,999$								
од. вим.	BSU/% ⁴		BSU/% ³		BSU/% ²		BSU/%	
значення	0	0	7,562	-6	-1,301	-3	1,242	-1
$Cc = f(N_D), a_0 = 0 \text{ мг/м}^3, R^2 = 0,999$								
од. вим.	мг/(м ³ ·%) ⁴		мг/(м ³ ·%) ³		мг/(м ³ ·%) ²		мг/(м ³ ·%) ¹	
значення	1,954	-5	-2,351	-3	1,333	-1	2,074	0
$HSN = f(N_D), a_0 = 0 \text{ HSN}, R^2 = 1,0$								
од. вим.	HSN/% ⁴		HSN/% ³		HSN/% ²		HSN/%	
значення	0	0	0	0	0	0	1,0	0

На рис. 1.1 видно, що нормативно встановлені значення димності ВГ перебувають у нелінійній залежності від значення об'ємної секундної витрати ВГ дизелем. Тобто більш потужні ПДВЗ мають характеризуватися меншими значеннями димності їх ВГ. На рис. 1.2 видно, що альтернативні показники димності ВГ HSN і BSU не є ідентичними одне одному, а співвідношення між їх значеннями є нелінійним. На рис. 1.3–1.6 видно, що співвідношення між значеннями базового показника димності ВГ та аль-

тернативних є нелінійними, графіки цих залежностей за формою відмінні одне від одного (тобто мають описуватись різними математичними апаратами – див. формули (1.2)–(1.6), (1.10)), окрім співвідношення N та HSN які є суть одним і тим же показником димності ВГ (див. рис. 1.6). На рис. 1.7 видно, що залежності значень альтернативних показників димності ВГ від значень базового показника підтверджують висновки щодо графіків залежностей на рис. 1.3–1.6.

Графіки залежності на рис. 1.2–1.7 описано поліномами методом найменших квадратів [9], коефіцієнти яких зведено у табл. 1.4, оскільки показник R^2 для цих поліномів знаходиться у діапазоні від 0,999 до 1,0, то отримані поліноми можна використовувати як альтернативні формулам (1.2)–(1.6), (1.10).

Дані, зведені до табл. 1.4 дозволяють запропонувати формули для описання графіків на рис. 1.3–1.7 у вигляді поліномів 4-го ступеня як

$$G_{PM} = A \cdot N_D \cdot (D \cdot G_{air} + H \cdot G_{fuel}) + B \cdot N_D^2 \cdot (D \cdot G_{air} + H \cdot G_{fuel}) + C \cdot C_{CH} \cdot (G_{air} + G_{fuel}) + M \cdot C_{CH}^2 \cdot (G_{air} + G_{fuel})^2 / (D \cdot G_{air} + H \cdot G_{fuel}) = f(N_D; C_{CH}; G_{fuel}; G_{air}) = f(x_1; x_2; x_3; x_4), \quad (1.11)$$

де $A = 2,3 \cdot 10^{-6}$ кг/(год·%); $B = 5,0 \cdot 10^{-8}$ кг/(год·%²); $C = 6,93 \cdot 10^{-9}$ кг/(год·ppm); $D = 0,7734$; $H = 0,7239$; $M = 7,54$ кг/(год·ppm²).

На рис. 1.8 наведено результати дослідження обраної формули перерахунку у вигляді розподілу

однотипну альтернативу різноманітним формулам (1.2)–(1.6), (1.10), частинні похідні для формули (3.1) з яких отримувати значно простіше.

1.3 Аналіз математичного апарату обраної формули перерахунку

Для виконання даного дослідження та за результатами аналізу математичного апарату формули (1.1), ця формула перетворена на формулу (1.11):

значень величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ дизельного ПДВЗ $G_{TЧ}$ по полю значень складових формули перерахунку – коефіцієнту ослаблення світлового потоку у ВГ N_D та об'ємної концентрації незгорілих вуглеводнів у ВГ C_{CH} .

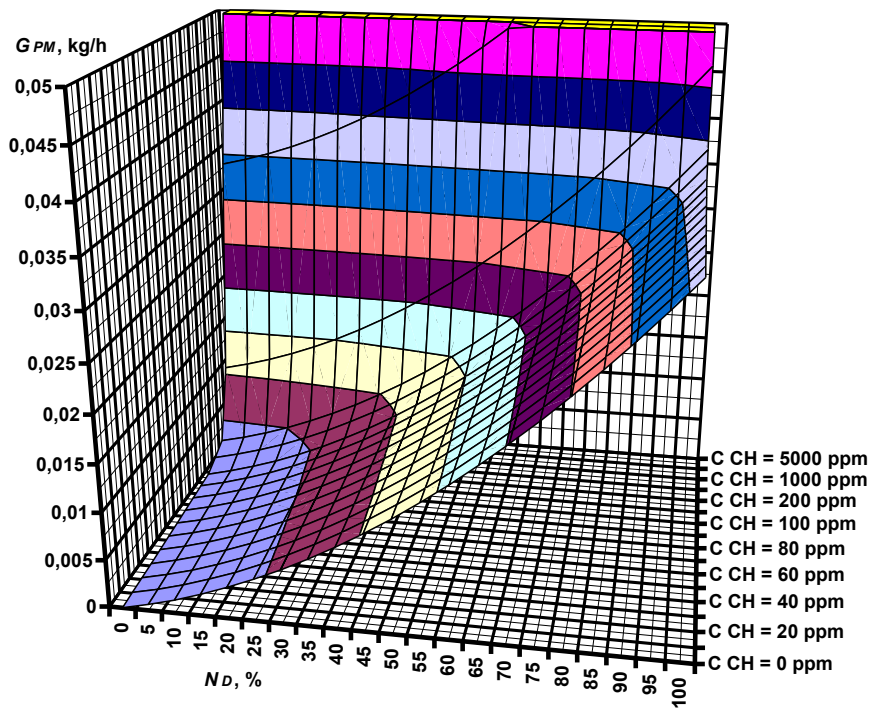


Рисунок 1.8 – Розподіл значень величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ дизельного ПДВЗ $G_{TЧ}$ по полю значень складових формули перерахунку – коефіцієнту ослаблення світлового потоку у ВГ N_D та об'ємної концентрації незгорілих вуглеводнів у ВГ C_{CH}

2 Методика оцінювання інструментальної точності обраної формули перерахунку

Для випадків використання у формулі перерахунку альтернативних показників димності ВГ абсолютна і відносна похибка визначення впливаючого фактора N_D визначається за загальною формулами (2.1) і (2.2) [8].

$$\Delta y = \sum_{j=1}^n \left(\left| \frac{\partial y}{\partial x_j} \right| \cdot \Delta x_j \right), [y]; \quad (2.1)$$

$$\delta x = \Delta x / x \cdot 100, \%; \quad (2.2)$$

де n – кількість впливаючих факторів; $\partial y / \partial x_j$ – частинна похідна величини y за величиною x_j ; Δy – абсолютна похибка результату непрямого вимірювання величини y , [y]; Δx – абсолютна похибка визначення впливаючого фактора, [x]; δx – відносна похибка визначення впливаючого фактора, %.

Формули (2.1) і (2.2) для випадку досліджуваної формули перерахунку набувають виду формул (2.3) і (2.4).

$$\Delta G_{PM} = \sum_{j=1}^4 \left(\left| \frac{\partial G_{PM}}{\partial x_j} \right| \cdot \Delta x_j \right) = \left| \frac{\partial G_{PM}}{\partial N_D} \right| \cdot \Delta N_D + \left| \frac{\partial G_{PM}}{\partial C_{CH}} \right| \cdot \Delta C_{CH} + \left| \frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{fuel}} \right| \cdot \Delta G_{fuel} + \left| \frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{air}} \right| \cdot \Delta G_{air} =$$

$$= \left| \frac{\partial G_{PM}}{\partial N_D} \right| \cdot \Delta N_D + W, \text{ кг/год};$$

$$W = \left| \frac{\partial G_{PM}}{\partial C_{CH}} \right| \cdot \Delta C_{CH} + \left| \frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{fuel}} \right| \cdot \Delta G_{fuel} + \left| \frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{air}} \right| \cdot \Delta G_{air} = const, \text{ кг/год},$$

де $N_D, C_{CH}, G_{fuel}, G_{air}$ – впливаючі фактори; $\Delta N_D, \Delta C_{CH}, \Delta G_{fuel}, \Delta G_{air}$ – абсолютні похибки визначення впливаючих факторів; $\partial G_{PM}/\partial N_D, \partial G_{PM}/\partial C_{CH}, \partial G_{PM}/\partial G_{fuel}, \partial G_{PM}/\partial G_{air}$ – частинні похідні.

Частинні похідні у формулах (2.3) і (2.4) визначаються формулами (2.5)–(2.8):

$$\frac{\partial G_{PM}}{\partial N_D} = (A + 2 \cdot B \cdot N_D) \cdot (D \cdot G_{air} + H \cdot G_{fuel}), \text{ кг/(год} \cdot \text{ \%)};$$

$$\frac{\partial G_{PM}}{\partial C_{CH}} = C \cdot (G_{air} + G_{fuel}) + 2 \cdot M \cdot C_{CH} \cdot \frac{(G_{air} + G_{fuel})^2}{(D \cdot G_{air} + H \cdot G_{fuel})}, \text{ кг/(год} \cdot \text{ ppm)};$$

$$\frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{fuel}} = A \cdot H \cdot N_D + B \cdot H \cdot N_D^2 + C \cdot C_{CH} + M \cdot C_{CH}^2 \cdot \frac{(G_{air}^2 \cdot (2 \cdot D - H) + 2 \cdot D \cdot G_{air} \cdot G_{fuel} + H \cdot G_{fuel}^2)}{(D \cdot G_{air} + H \cdot G_{fuel})^2};$$

$$\frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{air}} = A \cdot D \cdot N_D + B \cdot D \cdot N_D^2 + C \cdot C_{CH} + M \cdot C_{CH}^2 \cdot \frac{(G_{fuel}^2 \cdot (2 \cdot H - D) + 2 \cdot H \cdot G_{air} \cdot G_{fuel} + D \cdot G_{air}^2)}{(D \cdot G_{air} + H \cdot G_{fuel})^2}.$$

У табл. 2.1 зведено вихідні дані для розрахункового дослідження, а саме параметри впливаючих факторів у формулі (1.1), отримані з нормативної літератури та за результатами стендових випробувань дизеля 2Ч10,5/12, а у табл. 2.2 – вихідні дані для розрахункового дослідження частинних похідних формули (1.1). Технічне описання автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 (Д21А1) наведено у джерелі [10], а його експериментально отримані характеристики – у джерелах [1, 2, 11, 12].

годинних витрат палива G_{fuel} та повітря G_{air} автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 для всього діапазону їх значень та крайніх значень показника димності ВГ N_D . На рис. 2.2 наведено залежність значень частинної похідної $\partial G_{PM}/\partial N_D$ від значень показника димності ВГ N_D для всього діапазону його значень та для масових годинних витрат палива G_{fuel} та повітря G_{air} автотракторного дизеля 2Ч10,5/12, та режимів А (мінімального холостого ходу), В (максимального крутного моменту) і С (номінальної потужності).

На рис. 2.1 проілюстровано залежність значень частинної похідної $\partial G_{PM}/\partial N_D$ від значень масових

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахункового дослідження. Параметри впливаючих факторів у формулі (1.1)

Фактор	N_D	δN_D	ΔN_D	C_{CH}	δC_{CH}	ΔC_{CH}	G_{fuel}	δG_{fuel}	ΔG_{fuel}	G_{air}	δG_{air}	ΔG_{air}
Од. вим.	%	%	%	ppm	%	ppm	кг/год	%	г/год	кг/год	%	кг/год
Познач.	x_1	δx_1	Δx_1	x_2	δx_2	Δx_2	y_1	δy_1	Δy_1	y_2	δy_2	Δy_2
Режим	[2]	[13]		[2]	[14]		[2]	[7]		[2]	[7]	
А – min х.х.	19,1	±2,5	±0,48	210	±5,0	±10,5	0,493	±1,0	±4,9	48,8	±5,0	±2,440
В – max $M_{кр}$	67,6	±2,5	±1,69	105	±5,0	±5,3	3,593	±1,0	±35,9	72,3	±5,0	±3,615
С – nom N_e	38,9	±2,5	±0,97	72	±5,0	±3,6	4,321	±1,0	±43,2	109,1	±5,0	±5,455

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для розрахункового дослідження частинних похідних формули (1.1)

Впливаючий фактор	Познач.	Од. вим.	min	max	Δ_{step}	n_{step}
N_D	x_1	%	20	70	10	6
C_{CH}	x_2	ppm	50	250	50	5
G_{fuel}	x_3	кг/год	0,5	4,5	1,0	5
G_{air}	x_4	кг/год	45	120	15	6

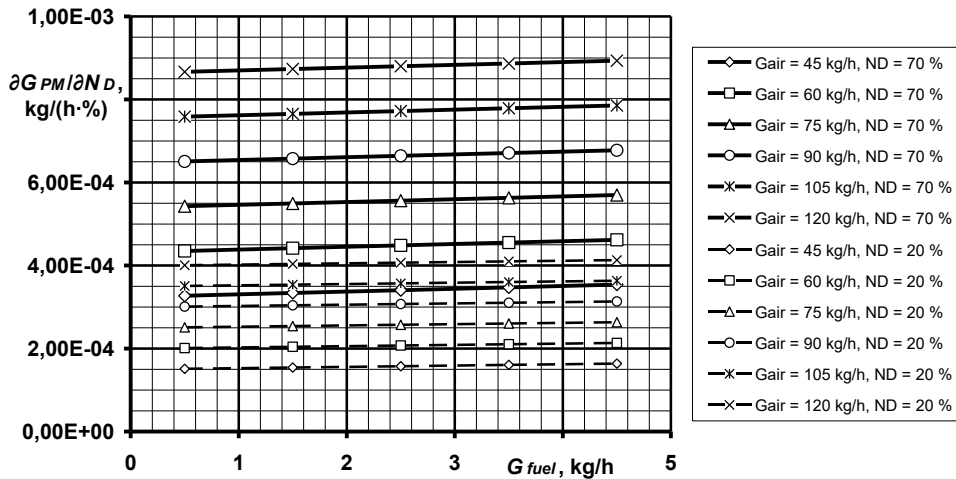


Рисунок 2.1 – Залежність значень частинної похідної $\partial G_{PM}/\partial N_D$ від значень масових годинних витрат палива G_{fuel} та повітря G_{air} автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 для всього діапазону їх значень та крайніх значень показника димності ВГ N_D

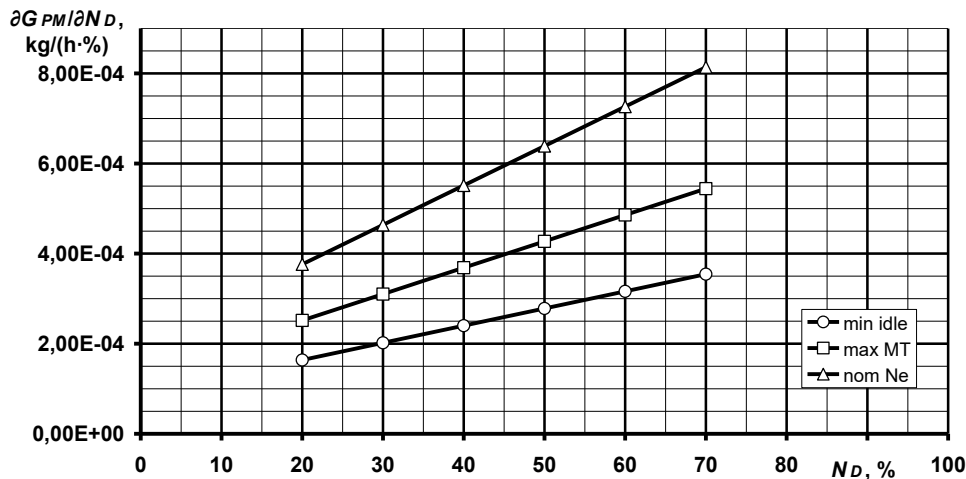


Рис. 2.2 – Залежність значень частинної похідної $\partial G_{PM}/\partial N_D$ від значень показника димності ВГ N_D для всього діапазону його значень та для масових годинних витрат палива G_{fuel} та повітря G_{air} автотракторного дизеля 2Ч10,5/12, особливих режимів його роботи

3 Методика виявлення впливу типу одиниць вимірювання показників димності ВГ ПДВЗ на інструментальну точність обраної формули перерахунку

Для випадків використання у формулі перерахунку альтернативних показників димності ВГ абсолютна похибка визначення впливаючого фактора N_D визначається за формулою (3.1).

$$\Delta N_D = \left| \frac{\partial N_D}{\partial x_{1,k}} \right| \cdot \Delta x_{1,k}; \quad (3.1)$$

$$\frac{\Delta G_{PM}(x_{1k})}{\Delta G_{PM}(x_{11})} = \frac{|\partial G_{PM}(x_{11})/\partial x_{11}| \cdot |\partial x_{11}(x_{1k})/\partial x_{1k}| \cdot \Delta x_{1k} + W}{|\partial G_{PM}(x_{11})/\partial x_{11}| \cdot \Delta x_{11} + W} = \frac{|\partial G_{PM}(N_D)/\partial N_D| \cdot |\partial N_D(x_{1k})/\partial x_{1k}| \cdot \Delta x_{1k} + W}{|\partial G_{PM}(N_D)/\partial N_D| \cdot \Delta N_D + W}, \quad k = [2;3;4;5] \quad (3.2)$$

$$x_{11} = N_D = a_{4,k} \cdot x_{1k}^4 + a_{3,k} \cdot x_{1k}^3 + a_{2,k} \cdot x_{1k}^2 + a_{1,k} \cdot x_{1k} + a_{0,k}; \quad (3.3)$$

$$\partial x_{11}/\partial x_{1k} = \partial N_D/\partial x_{1k} = 4 \cdot a_{4,k} \cdot x_{1k}^3 + 3 \cdot a_{3,k} \cdot x_{1k}^2 + 2 \cdot a_{2,k} \cdot x_{1k} + a_{1,k}. \quad (3.4)$$

де $x_{1,k}$ – альтернативний показник димності ВГ, індекс $k = 1$ для N_D ; $k = 2$ для K ; $k = 3$ для BSU ; $k = 4$ для C_C ; $k = 5$ для HSN ; $\partial N_D/\partial x_{1,k}$ – частинна похідна базового показника димності ВГ N_D за величиною альтернативного показника димності ВГ $x_{1,k}$.

Співвідношення значень абсолютних похибок визначення величини G_{PM} при використанні альтернативного і базового показника токсичності ВГ ПДВЗ визначаються формулою (3.2), а її складові – форм. (3.3) і (3.4).

На рис. 3.1 – залежності значень частинних похідних основного показника димності ВГ N_D за альтернативними показниками димності ВГ – K , BSU , C_c та HSN , отримані з поліномів (див.

табл. 1.4), від їх абсолютних значень для всього діапазону зміни для автотракторного дизеля 2Ч10,5/12. На рис. 3.2 – такі залежності від відносних значень альтернативних показників димності ВГ.

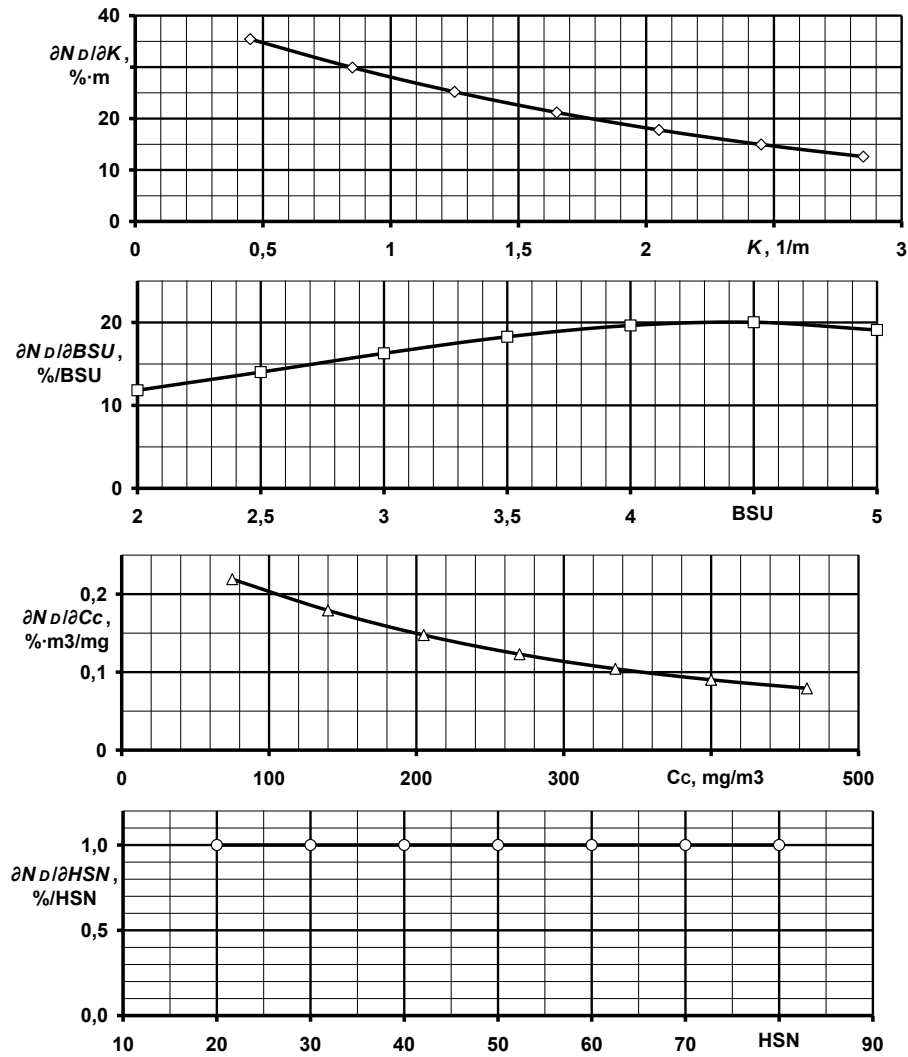


Рисунок 3.1 – Залежності значень частинних похідних основного показника димності ВГ N_D за альтернативними показниками димності ВГ (K , BSU , C_c та HSN) від їх абсолютних значень для всього діапазону зміни для автотракторного дизеля 2Ч10,5/12

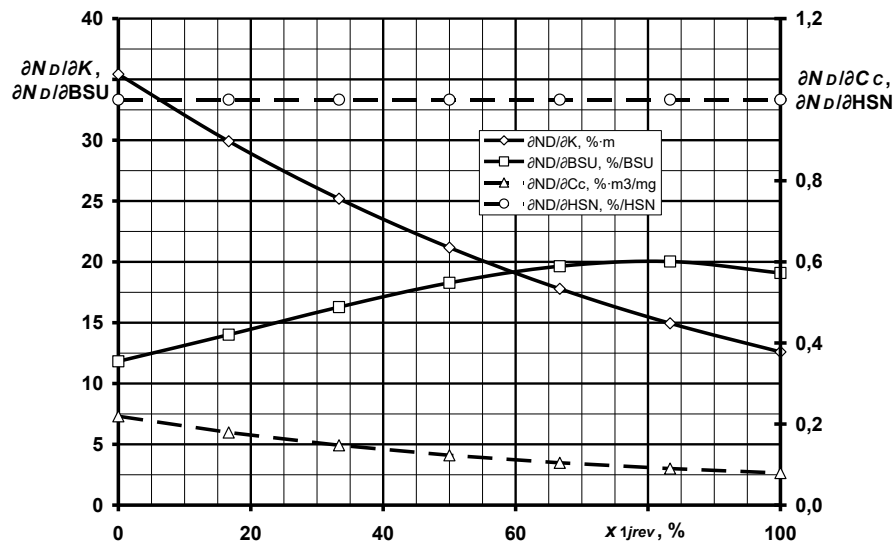


Рисунок 3.2 – Залежності значень частинних похідних основного показника димності ВГ N_D за альтернативними показниками димності ВГ (K , BSU , C_c та HSN) від їх відносних значень для всього діапазону зміни для автотракторного дизеля 2Ч10,5/12

4 Результати розрахункового дослідження та їх аналіз

4.1 Попередня оцінка (перше наближення)

У табл. 4.1 показано вихідні дані й результати розрахункового дослідження у першому наближенні співвідношень абсолютних значень, абсолютних і відносних похибок різних показників димності ВГ для обраних трьох особливих режимів роботи авто-тракторного дизеля 2Ч10,5/12:

- режим мінімального холостого ходу (Режим А),
- режим максимального крутного моменту (Режим В)
- режим номінальної потужності (Режим С).

У табл. 4.1 також наведено послідовність кроків алгоритму такого розрахункового дослідження. Залежності отриманих співвідношень проілюстровано на рис. 4.1–4.3, розподілені по теоретичному діапазону зміни основного показника димності ВГ – коефіцієнта N_D .

Вказаний алгоритм оцінювання величини похибки визначення показника димності у першому

наближенні для випадку використання альтернативних одиниць її вимірювання, полягає у такому.

Крок 1 – отримання абсолютних значень базового показника димності ВГ – величини N_D – за експериментальними даними; **Крок 2** – отримання абсолютних значень альтернативних показників димності за формулами (1.7)–(1.10) чи за отриманими поліномами (див. табл. 1.4); **Крок 3** – отримання паспортних значень відносної похибки ЗВТ для альтернативних показників димності з нормативно-технічної літератури, наприклад з джерел [7, 13]; **Крок 4** – отримання значень абсолютної похибки альтернативних показників димності за формулою (2.2); **Крок 5** – отримання абсолютної похибки базового показника димності ВГ за формулами, зворотними до формул (1.7)–(1.10) чи за отриманими поліномами (див. табл. 1.4); **Крок 6** – отримання відносної похибки базового показника димності ВГ за формулою, зворотною до формули (2.2); **Крок 7...9** – отримання значень співвідношень значень альтернативних і базового значень показників димності, а також значень їх абсолютних і відносних похибок.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахункового дослідження у першому наближенні. Параметри показників димності ВГ

Показник	K			N _D			K/N _D		
Познач.	x_{12}	δx_{12}	Δx_{12}	x_{11}	δx_{11}	Δx_{11}	x_{12}/x_{11}	$\delta x_{12}/\delta x_{11}$	$\Delta x_{12}/\Delta x_{11}$
Од. вим.	1/м	%	1/м	%	%	%	–	–	–
Режим		[7]		[2]					
Крок розрахунку	2	3	4	1	6	5	7	8	9
min х.х.	0,484	±2,5	±0,012	19,1	±2,7	±0,52	0,025	0,927	0,023
max M _{кр}	2,601	±2,5	±0,065	67,6	±4,1	±2,74	0,038	0,617	0,024
nom N _e	1,168	±2,5	±0,029	38,9	±3,2	±1,24	0,030	0,786	0,024
Показник	Bosch units			N _D			BSU/N _D		
Познач.	x_{13}	δx_{13}	Δx_{13}	x_{11}	δx_{11}	Δx_{11}	x_{13}/x_{11}	$\delta x_{13}/\delta x_{11}$	$\Delta x_{13}/\Delta x_{11}$
Од. вим.	BSU	%	BSU	%	%	%	–	–	–
Режим		[7]		[2]					
min х.х.	2,0	±2,5	±0,049	19,1	±2,7	±0,52	0,102	0,915	0,093
max M _{кр}	4,8	±2,5	±0,120	67,6	±1,9	±1,26	0,071	1,340	0,095
nom N _e	3,3	±2,5	±0,083	38,9	±2,3	±0,88	0,085	1,107	0,094
Показник	Harritage number			N _D			HSN/N _D		
Познач.	x_{14}	δx_{14}	Δx_{14}	x_{11}	δx_{11}	Δx_{11}	x_{14}/x_{11}	$\delta x_{14}/\delta x_{11}$	$\Delta x_{14}/\Delta x_{11}$
Од. вим.	HSN	%	HSN	%	%	%	–	–	–
Режим		[7]		[2]					
min х.х.	19,1	±2,5	±0,48	19,1	±2,5	±0,48	1,0	1,0	1,0
max M _{кр}	67,6	±2,5	±1,69	67,6	±2,5	±1,69	1,0	1,0	1,0
nom N _e	38,9	±2,5	±0,97	38,9	±2,5	±0,97	1,0	1,0	1,0
Показник	C _c			N _D			C _c /N _D		
Познач.	x_{15}	δx_{15}	Δx_{15}	x_{11}	δx_{11}	Δx_{11}	x_{15}/x_{11}	$\delta x_{15}/\delta x_{11}$	$\Delta x_{15}/\Delta x_{11}$
Од. вим.	мг/м ³	%	мг/м ³	%	%	%	–	–	–
Режим		[7]		[2]					
min х.х.	74,5	±2,5	±1,862	19,1	±2,7	±0,52	3,899	0,928	3,617
max M _{кр}	431,1	±2,5	±10,778	67,6	±4,3	±2,94	6,378	0,575	3,668
nom N _e	188,7	±2,5	±4,719	38,9	±3,3	±1,30	4,852	0,749	3,633

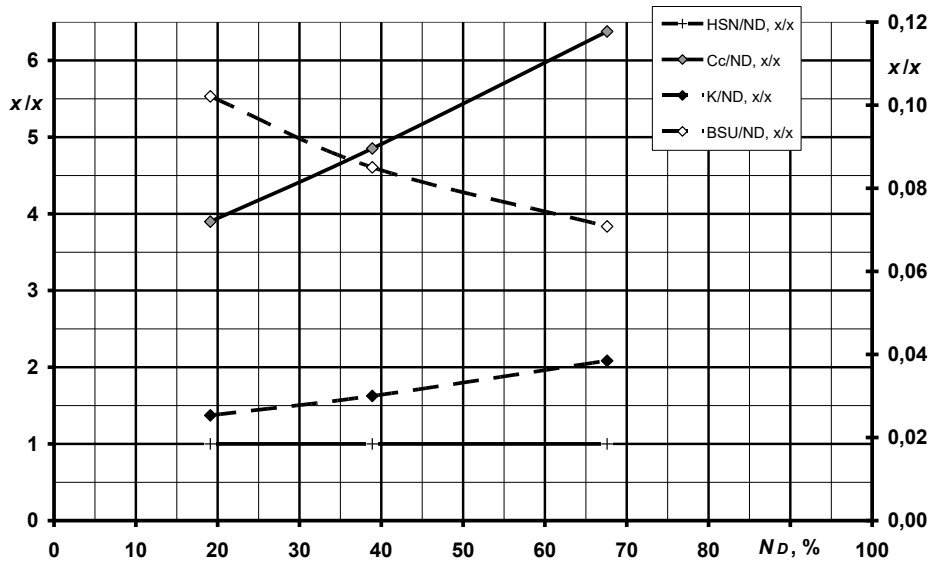


Рисунок 4.1 – Співвідношення між значеннями показників димності ВГ

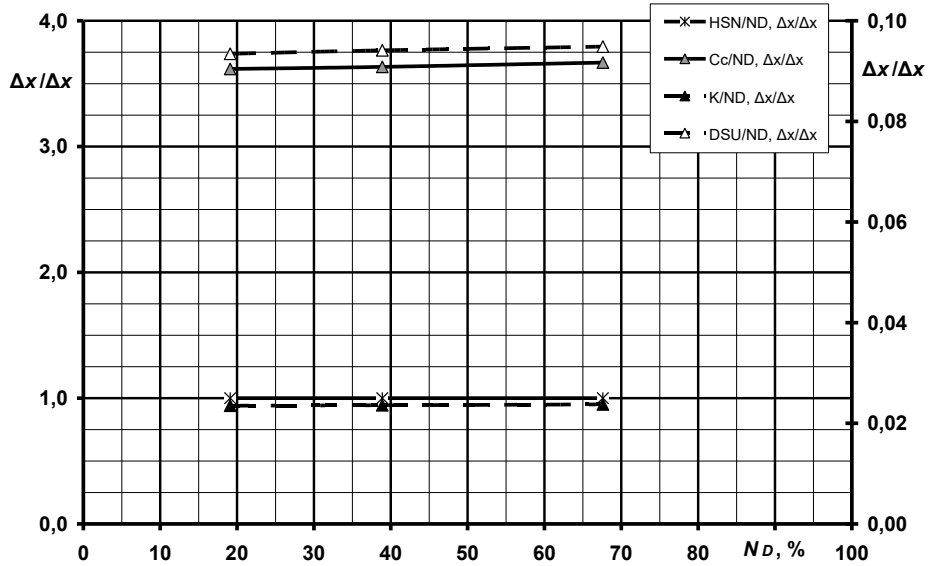


Рисунок 4.2 – Співвідношення між значеннями абсолютних похибок визначення показників димності ВГ у першому наближенні

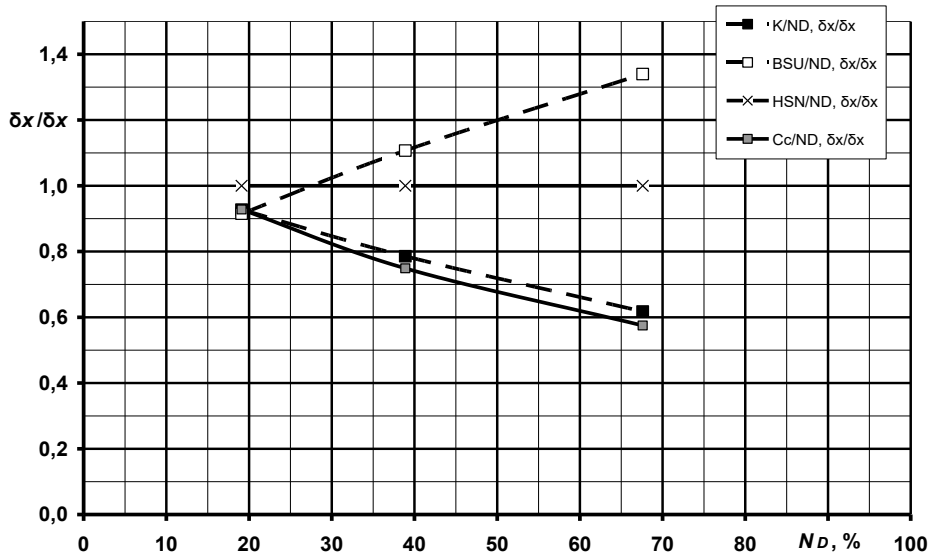


Рисунок 4.3 – Співвідношення між значеннями відносних похибок визначення показників димності ВГ у першому наближенні

З аналізу даних, зведених до табл. 4.1, випливає, що при застосуванні запропонованого алгоритму попереднього оцінювання отримуються такі значення альтернативних показників димності ВГ та значення їх абсолютної і відносної похибки їх визначення, що однаково співвідносяться з такими ж величинами для базового показника димності ВГ. Розподіл значень таких співвідношень по шкалі вимірювань базового показника димності ВГ, наведений на рис. 4.1–4.3, показує, що такі розподіли є лінійними, а деякі з них – рівномірними (тобто не залежать від значення базового показника димності).

При цьому значення співвідношення x_{1j}/x_{11} та $\delta x_{1j}/\delta x_{11}$ для показників K і BSU значно менші за 1,0, для HSN – рівні 1,0, а для C_c – кратно більші. Значення співвідношення $\Delta x_{1j}/\Delta x_{11}$ для K , BSU і C_c лежать в межах 0,5...1,2, а для HSN рівні 1,0. З формул (2.5)–(2.8) видно, що значення частинних похідних формули (1.1) залежать від трьох ($\partial G_{PM}/\partial N_D$, $\partial G_{PM}/\partial C_{CH}$

чи усіх чотирьох ($\partial G_{PM}/\partial G_{fuel}$, $\partial G_{PM}/\partial G_{air}$) не залежних змінних у формулі (1.1), а з рис. 2.1–2.2 видно, що такі залежності носять лінійний характер.

З формул (1.7)–(1.10) та їх альтернатив (табл. 1.4) видно, що їх частинні похідні по величині базового показника димності ВГ залежать від значень альтернативних показників димності ВГ, а з рис. 3.1–3.2 видно, що такі залежності носять нелінійний характер (окрім HSN), відмінний одне від одного як за формою залежності, так і за діапазоном значень самих частинних похідних.

4.2 Уточнена оцінка (друге наближення)

У табл. 4.2 зведено результати уточненого розрахункового дослідження (у другому наближенні), у тому числі й усереднені за трьома обраними особливими режимами з використанням формул (2.3)–(2.8) та даних рис. 1.7, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2.

Таблиця 4.2 – Результати уточненого розрахункового дослідження (у другому наближенні)

Режим			min idle	max M_T	nom N_e	Сер.
Показник	Од. вим.	$\times 10^x$	Значення			
n_{ke}	rpm		800	1200	1800	
$M_{кр}$	Н·м		0	110	95	
N_e	кВт		0	13,8	17,9	
G_{fuel}	кг/год		0,439	3,593	4,321	
G_{air}	кг/год		48,8	72,3	109,1	
N_D	%		19,1	67,6	38,9	
C_{CH}	ppm		210	105	72	
$G_{TЧ}$	кг/год	10^{-3}	2,6	22,7	14,7	
δG_{fuel}	%		1,0	1,0	1,0	
δG_{air}	%		5,0	5,0	5,0	
δN_D	%		2,5	2,5	2,5	
δC_{CH}	%		5,0	5,0	5,0	
$\partial G_{TЧ}/\partial N_D$	кг/(год·%)	10^{-4}	1,602	5,302	5,417	
$\partial G_{TЧ}/\partial C_{CH}$	кг/(год·ppm)	10^{-7}	3,412	5,259	7,860	
$\partial G_{TЧ}/\partial G_{fuel}$	–	10^{-5}	4,646	27,87	12,00	
$\partial G_{TЧ}/\partial G_{air}$	–	10^{-5}	4,954	29,77	12,82	
W	кг/год	10^{-4}	1,247	10,89	7,074	
$\Delta G_{TЧ}(N_D)$	кг/год	10^{-4}	2,016	19,85	12,33	11,40
$\delta G_{TЧ}(N_D)$	%		7,754	8,744	8,387	8,295
$K \rightarrow N_D$						
K	1/м		0,484	2,601	1,168	
$\partial N_D/\partial K$	%·м	10^1	3,493	1,401	2,610	
δK	%		2,5	2,5	2,5	
$\Delta G_{TЧ}(K)$	кг/год	10^{-4}	1,918	15,72	11,17	
$\delta G_{TЧ}(N_D)$	%		7,378	6,924	7,601	7,301
$\Delta G_{TЧ}(N_D)/\Delta G_{TЧ}(K)$	–		1,051	1,263	1,103	1,139
$BSU \rightarrow N_D$						
BSU	BSU		2,0	4,8	3,3	
$\partial N_D/\partial BSU$	%/BSU	10^1	1,182	1,964	1,753	
δBSU	%		2,5	2,5	2,5	
$\Delta G_{TЧ}(BSU)$	кг/год	10^{-4}	2,175	23,39	14,96	
$\delta G_{TЧ}(N_D)$	%		8,366	10,302	10,174	9,614
$\Delta G_{TЧ}(N_D)/\Delta G_{TЧ}(BSU)$	–		1,079	1,178	1,213	1,157
$C_c \rightarrow N_D$						
C_c	мг/м ³		74,5	431,1	188,7	
$\partial N_D/\partial C_c$	%·м ³ /мг	10^{-2}	21,95	8,459	15,47	
δC_c	%		2,5	2,5	2,5	
$\Delta G_{TЧ}(C_c)$	кг/год	10^{-4}	1,902	15,72	11,03	
$\delta G_{TЧ}(N_D)$	%		7,314	6,926	7,503	7,248
$\Delta G_{TЧ}(N_D)/\Delta G_{TЧ}(C_c)$	–		0,943	0,792	0,895	0,877

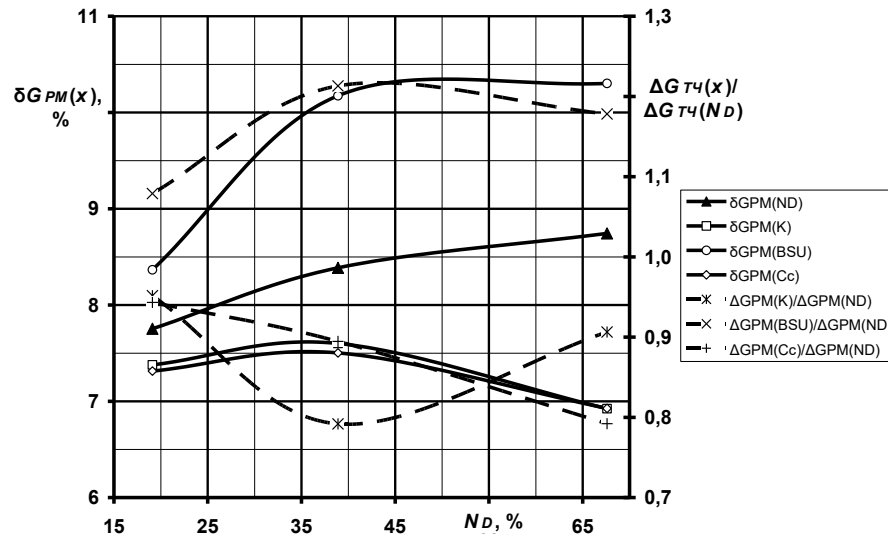


Рисунок 4.4 – Графіки залежностей значень відносної похибки та співвідношення абсолютних похибок величин викиду ТЧ G_{PM} для різних показників димності ВГ від значення показника N_D

Отримані дані уточненого розрахункового дослідження щодо значень відносної похибки отримання величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ дизельного ПДВЗ, отриманого за формулою перерахунку (1.1), для базового варіанту одиниць вимірювання димності ВГ та усіх досліджуваних випадків застосування альтернативних одиниць, проілюстровано на рис. 4.4. На цих рисунках подано графіки залежності відносної похибки визначення величини G_{PM} та співвідношення абсолютних похибок визначення величини G_{PM} для всіх досліджуваних одиниць вимірювання димності ВГ та базової одиниці вимірювання димності ВГ від значення величини базового показника димності ВГ N_D як основного впливаючого фактора у формулі перерахунку (1.1).

З табл. 4.2 і на рис. 4.4 видно, що значення відносної похибки отримання значення величини G_{PM} за формулою перерахунку (1.1) і відношення значень абсолютних похибок визначення цієї величини для базового і альтернативних показників димності ВГ (і рівного йому відношення значень відносних похибок) залежать від значення усіх чотирьох впливаючих факторів у цій формулі. Такі залежності носять нелінійний характер, мають максимуми та мінімуми (здебільшого з перегином) у межах діапазонів зміни значень впливаючих факторів на різних обраних особливих режимах.

З даних табл. 4.2 видно, що значення відносної інструментальної похибки визначення значення величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ двигуна 2Ч10,5/12, отримане за обраною формулою перерахунку та усереднене за трьома особливими режимами роботи цього двигуна, складає у випадку використання базового показника димності ВГ $\pm 8,3\%$. У разі використання альтернативних показників димності значення такої похибки складає відповідно $\pm 7,3\%$ для коефіцієнта K , $\pm 9,6\%$ для числа BSU та $\pm 7,2\%$ для величини C_c .

Тому досліджені показники димності ВГ можна ранжувати за значенням вказаної похибки наступним чином:

$$C_c \rightarrow K \rightarrow N_D \text{ і } HSN \rightarrow BSU.$$

Висновки

Таким чином, за результатами проведення дослідження, відображеним у розділах даної роботи, можна зробити наступні загальні висновки.

1. Здійснено аналіз математичних апаратів відомих формул перерахунку та номенклатури найуживаніших показників димності ВГ ПДВЗ. За результатами такого аналізу для подальших розрахункових досліджень обрано формулу перерахунку проф. Ігоря Парсаданова як таку, що враховує не лише показники димності, а й показники токсичності ВГ. Здійснено аналіз формули перерахунку проф. Ігоря Парсаданова, виявлено особливості впливу на значення отриманої за нею фізичної величини незалежних змінних. Перетворено формулу до виду, адаптованого до виконання дослідження.

2. Розроблено методику розрахункового оцінювання інструментальної точності отримання величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ за досліджуваною формулою перерахунку на основі положень наукової дисципліни «Метрологія» у двох послідовних наближеннях. Розрахунково оцінено значення інструментальної точності отримання величини такого викиду ТЧ за досліджуваною формулою перерахунку для базового показника димності ВГ та актуального значення паспортної точності ЗВТ, усереднене по особливим режимам роботи ПДВЗ, воно складало $\pm 8,3\%$.

3. Виявлено і проаналізовано вплив виду показника димності ВГ з відповідними йому одиницями вимірювання на інструментальну точність досліджуваної формули перерахунку. За ознакою величини такої точності для актуального значення паспортної точності ЗВТ відомі показники димності ВГ ранжовано наступним чином (у порядку погіршення точності):

$$C_c \rightarrow K \rightarrow N_D \text{ і } HSN \rightarrow BSU.$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Сучасні способи підвищення екологічної безпеки експлуатації енергетичних установок : монографія / Вамболь С. О., Стрков О. П., Вамболь В. В., Кондратенко О. М. Харків, ФОП Бровін О.В., 2015. 212 с.
2. Критеріальне оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергетичних установок: монографія / Вамболь С. О., Вамболь В. В., Кондратенко О. М., Міщенко І. В. Харків, ФОП Бровін О.В. 2018. 320 с.
3. Парсаданов І. В. Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію: монографія. Харків, Центр НТУ «ХПІ», 2003. 244 с.
4. Кондратенко О. М. Метрологічні аспекти комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки експлуатації поршневих двигунів енергетичних установок : монографія. Харків, Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2019. 532 с.
5. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія / Кондратенко О. М., Колосков В. Ю., Деркач Ю. Ф., Коваленко С. А. Харків, Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2020. 522 с.
6. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with the regard to the emissions of pollutants by the engine: Regulation № 96, Revision 2, 26 July 2012 [Electronic recourse]. Geneva: UNECE, 2012. 370 p. URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R096r2e.pdf>.
7. ДСТУ 4276:2004. Норми і методи вимірювань димності відпрацьованих газів автомобілів з дизелями або газодизелями. Київ, Держкомітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2004. 10 с.
8. Метрологія і стандартизація : конспект лекцій / Прокопов О. В., Вамболь С. О., Міщенко І. В., Колосков В. Ю. Харків, НУЦЗ України, 2018. 271 с.
9. Бондаренко С. Г., Брановицька С. В., Сангінова О. В. Обчислювальна математика та програмування : методичні вказівки і завдання до виконання розрахунково-графічної роботи та самостійної роботи для студентів напряму підготовки 6.051301 «Хімічна технологія» : навчальне електронне видання. Київ, НТУУ «КПІ», 2013. 67 с.
10. Дацюк Л. М., Вржещ М. В. Трактори і автомобілі : Навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050503 «Машинобудування» денної та заочної форм навчання. Луцьк, Луцький НТУ, 2017. 236 с.
11. Математична модель ефективності роботи фільтра твердих частинок дизеля / Кондратенко О. М., Стрков О. П., Вамболь С. О., Авраменко А. М. *Науковий вісник НГУ*. 2015. № 6 (150). С. 55–61.
12. Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arrangement of pollutants neutralization system / Vambol S. et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 3/10 (87). 2017. pp. 63–73.
13. Димомір ІНФРАКАР Д. Паспорт ВЕКМ.41531.007ПС. 8 с.
14. Газоаналізатор п'ятикомпонентний Автотест-02.03П. Інструкція з експлуатації М 057.000.000РЭ. 12 с.
15. Diesel engine reference book. Second edition. Ed. by B. Challen, R. Baranescu. Butterworth Heinemann, 1999. 675 p.

Kondratenko O., Andronov V., Stokov O., Babakin V., Krasnov V.**THE INSTRUMENTAL ACCURACY OF KNOWN FORMULAS FOR THE CONVERSION OF OPACITY INDICATORS INTO INDICATORS OF TOXICITY OF EXHAUST GASES OF RECIPROCATING ICE**

The article analyzes the nomenclature of the most widely used indicators of opacity of exhaust gases of reciprocating internal combustion engines and mathematical apparatuses of known formulas for conversion of indicators of opacity and toxicity of exhaust gases, from which the conversion formula of Prof. Igor Parsadanov as such, which takes into account not only the opacity indicators, but also the indicators of the toxicity of exhaust gases was selected. The analysis and transformation of the selected conversion formula was carried out, and the peculiarities of the influence on the magnitude of the physical value of the independent variables obtained by it were revealed. A method of calculating the instrumental accuracy of obtaining the mass hourly emission of particulate matters with the flow of exhaust gases according to the researched conversion formula in two successive approximations has been developed. According to the results of the calculated study according to the developed methodology for the basic indicator of the opacity of the exhaust gases and the passport accuracy of the measuring equipment, it was established that the average value of such accuracy was $\pm 8.3\%$ for the special regimes of operation of the reciprocating internal combustion engine. The influence of the type of exhaust gas opacity indexes with its corresponding measurement units on the instrumental accuracy of the studied conversion formula was identified and analyzed. According to the sign of the value of such accuracy for the passport accuracy of the measuring equipment, the known indicators of opacity of exhaust gases are ranked.

Key words: opacity, toxicity, conversion formula, reciprocating internal combustion engine, exhaust gases, environmental protection technologies, ecological safety.

REFERENCES

1. Vambol, S. O., Stokov, O. P., Vambol, V. V., & Kondratenko, O. M. (2015). *Suchasni sposoby pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky ekspluatatsii enerhetychnykh ustanovok : monohrafiia* [Modern ways of increasing the ecological safety of operation of power plants: monograph]. Kharkiv, Styl-Izdat. 212 p. [in Ukrainian].
2. Vambol, S. O., Vambol, V. V., Kondratenko, O. M., & Mishchenko, I. V. (2018). *Kryterialne otsiniuvannia rivnia ekolohichnoi bezpeky protsesu ekspluatatsii enerhetychnykh ustanovok: monohrafiia* [Criteria-based assessment of the ecological safety level of the exploitation process of power plants: monograph] Kharkiv, Styl-Izdat. 320 p. [in Ukrainian].
3. Parsadanov, I. V. (2003). *Pidvyshchennia yakosti i konkurentospromozhnosti dyzeliv na osnovi kompleksnoho palyvno-ekolohichnoho kryteriiu: monohrafiia* [Improving the quality and competitiveness of diesels based on a complex fuel-ecological criterion: monograph]. Kharkiv, NTU «KhPI». 244 p. [in Russian].

4. Kondratenko, O. M. (2019). *Metrolohichni aspekty kompleksnoho kryterialnoho otsiniuvannya rivnia ekolohichnoi bezpeky ekspluatatsii porshnevyykh dvyhuviv enerhetychnykh ustanovok : monohrafiia* [Metrological aspects of complex criteria-based assessment of the ecological safety level of exploitation of reciprocating engines of power plants: monograph]. Kharkiv, Styl-Izdat. 532 p. [in Ukrainian].
5. Kondratenko, O. M., Koloskov, V. Yu., Derkach, Yu. F., & Kovalenko, S. A. (2020). *Fizychni i matematychni modeliuvannya protsesiv u filtrakh tverdykh chastynok u praktytsi kryterialnoho otsiniuvannya rivnia ekolohichnoi bezpeky : monohrafiia* [Physical and mathematical modeling of processes in particulate matter filters in the practice of criteria-based assessment of the ecological safety level: monograph]. Kharkiv, Styl-Izdat. 522 p. [in Ukrainian].
6. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with the regard to the emissions of pollutants by the engine: Regulation № 96, Revision 2, 26 July 2012 [Electronic recourse]. Geneva: UNECE, 2012. 370 p. URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R096r2e.pdf>.
7. DSTU 4276:2004 *Normy i metody vymiryuvan dymnosti vidpratsovanykh haziv avtomobiliv z dyzeliamy abo hazodyzeliamy* [Norms and methods of measuring the opacity of exhaust gases of cars with diesel engines or gas-diesel engines]. Kyiv, State Committee of Ukraine on Technical Regulation and Consumer Policy, 2004. 10 p. [in Ukrainian].
8. Prokopov, O. V., Vambol, S. O., Mishchenko, I. V., & Koloskov, V. Yu. (2018). *Metrolohii i standartyzatsiia : konspekt leksii* [Metrology and standardization: lecture notes]. Kharkiv, NUCDU. 271 p. [in Ukrainian].
9. Bondarenko, S. G., Branovytska, S. V., & Sanginova, O. V. (2013). *Obchysliwalna matematyka ta prohramuvannya : metodychni vказivky i zavdannya do vykonannya rozrakhunkovo-hrafichnoi roboty ta samostiinoi roboty dlia studentiv napriamu pidhotovky 6.051301 «Khimichna tekhnolohiia» : navchalne elektronne vydannia* [Computational mathematics and programming: methodological instructions and tasks for performing calculation and graphic work and independent work for students of the training direction 6.051301 "Chemical technology": educational electronic edition]. Kyiv, NTUU «KPI». 67 p. [in Ukrainian].
10. Datsiuk, L. M., & Vrzhes, M. V. (2017). *Traktory i avtomobili : Navchalnyi posibnyk dlia studentiv napriamu pidhotovky 6.050503 "Mashynobuduvannya" dennoi ta zaochnoi form navchannia* [Tractors and cars: Study guide for students of the 6.050503 "Mechanical Engineering" course of full-time and part-time study]. Lutsk, LNTU. 236 p. [in Ukrainian].
11. Kondratenko, O. M., Stokov, O. P., Vambol, S. O., & Avramenko, A. M. (2015). Matematychna model efektyvnosti roboty filtra tverdykh chastynok dyzelia [Mathematical model of diesel particulate filter efficiency]. *Scientific Bulletin of NMU*, 6 (150), 55–61.
12. Vambol, S., Vambol, V., Kondratenko, O., Suchikova, Y., & Hurenko, O. (2017). Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arrangement of pollutants neutralization system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/10 (87), 63–73.
13. Opacymeter INFRAKAR D. Passport VEKM.41531.007ПС. 8 p. [in Russian].
14. Five-component gas analyzer Autotest-02.03P. Operating Instructions M 057.000.000RE. 12 p. [in Russian].
15. *Diesel engine reference book. Second edition* (1999). Ed. by B. Challen, R. Baranescu. Butterworth Heinemann, 675 p.