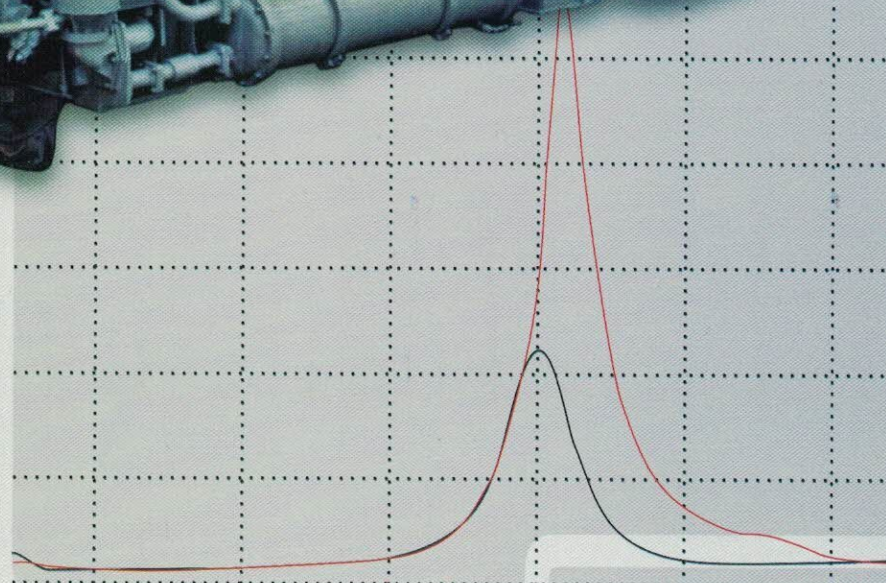
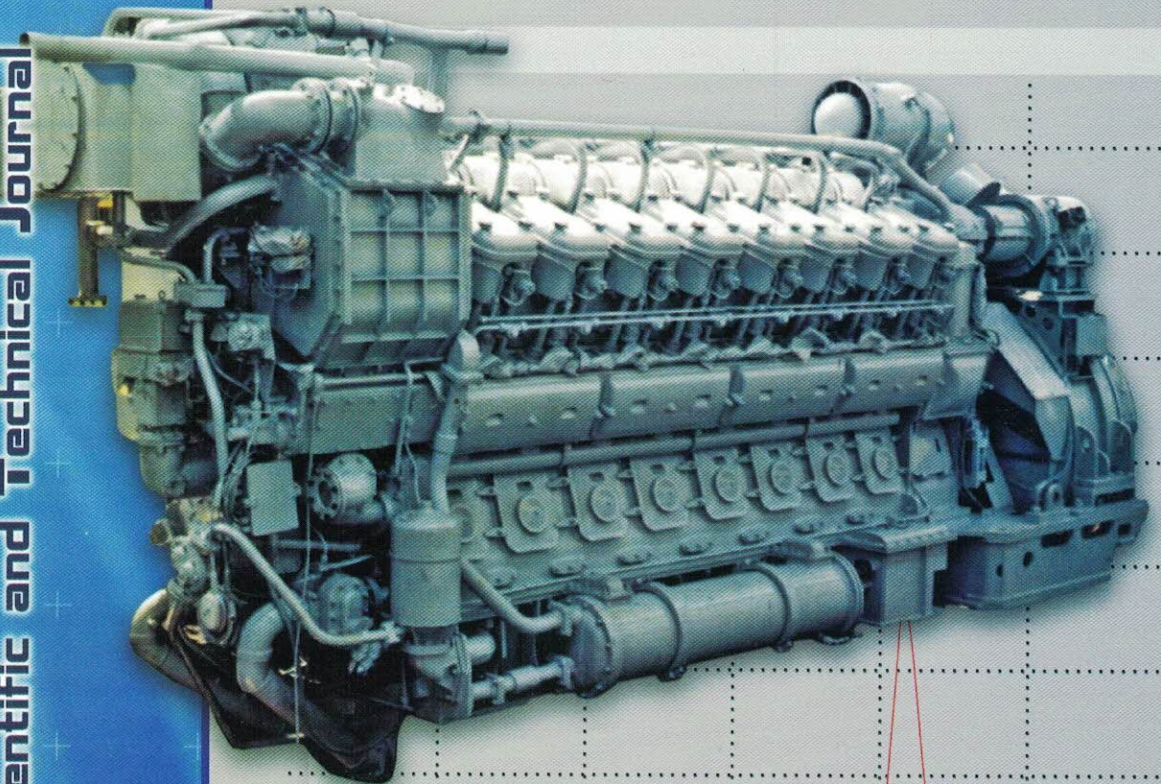


# ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Двигатели внутреннего сгорания  
*Internal Combustion Engines*

1 / 2023

Всеукраїнський науково-технічний журнал  
Всеукраинский научно-технический журнал  
All-Ukrainian Scientific and Technical Journal





# ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Всеукраїнський науково-технічний журнал

1'2023

Видання засновано Національним технічним університетом

"Харківський Політехнічний Інститут" у 2002 році

Держвидання

Свідоцтво Держкомітету інформаційної політики,

телебачення та радіомовлення України КВ №6393 от 29.07.2002 р.

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

### Головний редактор

*Марченко А.П.*, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, *д.т.н., проф.*

### Заступники головного редактора

*Єпіфанов С.В.*, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» Україна, *д.т.н., проф.*

*Парсаданов І.В.*, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, *д.т.н., проф.*

### Відповідальний секретар

*Рикова І.В.*, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, *к.т.н., с.н.с.*

*Білогуб О.В.*, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна, *д.т.н., проф.*

*Білоусов Є.В.*, Херсонська державна морська академія, Україна, *д.т.н., проф.*

*Варбанець Р.А.*, Одеський Національний Морський Університет, Україна, *д.т.н., проф.*

*Грицук І.В.*, Херсонська державна морська академія, Україна, *д.т.н., проф.*

*Грицюк О.В.*, Харківський національний автомобільний університет, Україна, *д.т.н., проф.*

*Гутаревич Ю.Ф.*, Національний транспортний університет, Україна, *д.т.н., проф.*

*Клименко Л.П.*, Чорноморський національний університет, Миколаїв, Україна, *д.т.н., проф.*

*Кравченко С.О.*, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, *д.т.н., с.н.с.*

*Пильов В.О.*, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, *д.т.н., проф.*

*Полив'ячук А.П.*, Харківський національний університет міського господарства, Україна, *д.т.н., проф.*

*Радковський С.*, Варшавська політехніка, Польща, *д.н., проф.*

*Самойленко Д.*, Варшавська політехніка, Польща, *д.н.*

*Сенчіла В.*, Литовська морська академія, Литва, *д.н., проф.*

*Тимошевський Б.Г.*, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна, *д.т.н., проф.*

*Ткач М.Р.*, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна, *д.т.н., проф.*

*Ткачук М.А.*, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, *д.т.н., проф.*

*Чо Х.М.*, Кунцзюйский національний університет, Південна Корея, *д.н., проф.*

## АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ», кафедра «Двигуни та гібридні енергетичні установки»

Тел. (057) 707-60-89, 707-68-48,

E-mail: rykova.inna@gmail.com, dvs@kpi.kharkov.ua

Офіційний сайт видання: <http://dvs.khpi.edu.ua/>

Двигуни внутрішнього згорання // Науково-технічний журнал. Харків: НТУ «ХПІ». – 2023. – №1. – 64 с.

Всеукраїнський науково-технічний журнал з питань теорії і практики, моделювання та експериментальних досліджень робочих процесів, конструкцій, інноваційних технологій, виготовлення і експлуатації двигунів внутрішнього згорання. Матеріали статей були рекомендовані Програмним комітетом XXVIII Міжнародного конгресу двигунобудівників до відкритої публікації в журналі і прийняті редакційною колегією.

З квітня 2013 р. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Двигуни внутрішнього згорання» включений в довідник періодичних видань бази даних *Ulrich's Periodicals Directory* (New Jersey, USA), науково-метричні системи *Google Scholar*; *WorldCat*; *DOAJ*; *DRIVER*; *BASE*, *BIHITI*. Журнал пройшов плану переатестацію та згідно з наказом МОН України № 409 від 17.03.2020 включений до списку друкованих періодичних видань, які входять до Переліку наукових фахових видань України та присвоєна категорія «Б».

Видається за рішенням Вченої ради НТУ «ХПІ» протокол № 6 від 07.07.2023 р.

© Національний технічний університет "Харківський Політехнічний Інститут", 2023.

# ЗМІСТ

## ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ДВИГУНОБУДУВАННЯ

*А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, І.В. Рикова*

**Еволюційний розвиток дизелів автотранспорту: екологічні та економічні показники. . . . . 3**

*А.А. Лісовал*

**Передумови використання водню в Україні в енергетичній та автомобільній галузях. . . . . 11**

## КОНСТРУКЦІЯ ДВЗ

*В.О. Пильов, О.Ю. Лінков, С.В. Ликов*

**Порівняння порогу повзучості поршневих алюмінієвих сплавів з урахуванням їх зміцнення в часі. . . . . 18**

## РОБОЧІ ПРОЦЕСИ ДВЗ

*О.М. Кондратенко, К.Р. Умеренкова, А.М. Левтеров, О.П. Строков, В.Ю. Колосков*

**Удосконалення математичного описання теплофізичних властивостей альтернативних моторних палив на основі модифікованої термодинамічної теорії збурень. Частина 1 . . . . . 25**

*М.Є. Рибальченко, Є.В. Білоусов, А.П. Марченко, В.П. Савчук, В.П. Будко*

**Обробка індикаторних діаграм у задачах побудови цифрових профілів робочого процесу судових двигунів. . . . . 33**

## ВИПРОБУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ДВЗ

*А.П. Полив'ячук, І.В. Грицюк, Д.С. Погорлецький, Н.М. Полив'ячук, О.С. Єфімов*

**Дослідження ефективності програмованого ізокінетичного пробовідбірника для систем екологічної діагностики теплових двигунів і котелень. . . . . 42**

## ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ДВЗ

*М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М. А. Ткачук, А.П. Марченко, С.О. Кравченко*

**Концептуальні основи дискретно-континуального зміцнення елементів двигунів та турбодетандерних установок. . . . . 49**

## МЕТОДОЛОГІЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ ДВЗ

*О.В. Грицюк, О.О. Сулима*

**Забезпечення та розвиток організації викладання дисципліни «Випробування ДВЗ» в умовах застосування дистанційного навчання. . . . . 55**

*А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, І.В. Рикова*

## ЕВОЛЮЦІЙНИЙ РОЗВИТОК ДИЗЕЛІВ АВТОТРАНСПОРТУ: ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

*На прикладі найбільш поширених у використанні дизельних двигунів вантажного автомобільного транспорту розглянуто вимоги, що ставляться до екологічних та економічних показників цих двигунів, еволюційний їх розвиток за останні десятиріччя та, відповідно, зміну впливу на навколишнє середовище і споживання природних ресурсів. Автомобільний транспорт за обсягом перевезень значно перевершує усі інші види транспорту та є основними споживачами дефіцитних вуглеводневих нафтових палив; і вважається найбільш суттєвими забруднювачем навколишньої атмосфери токсичними речовинами, що містяться у відпрацьованих газах двигунів.*

*За останні роки при розробці, впровадженні у виробництво та використанні в експлуатації впровадженні суттєві зміни, у конструкції, технології виготовлення, організації робочого процесу, вдосконалення систем дизельних двигунів, що забезпечують подачу палива і повітря, очистку відпрацьованих газів від шкідливих викидів в навколишнє середовище. Аналіз зміни вимог, досягнутого рівня економічних і екологічних показників дизельних двигунів вантажного автотранспорту проведено за допомогою паливно-екологічного критерію.*

*Наведені розрахунки і узагальнення отриманих результатів дослідження дають змогу визначити зміни у витратах на паливо та відшкодування екологічних збитків від шкідливої дії відпрацьованих газів двигунів на навколишнє середовище при вироблені одиниці потужності в експлуатації, коефіцієнт відносних експлуатаційних екологічних витрат, безпосередньо паливно-екологічного критерій та навести кількісну оцінку про еволюційний розвиток дизельних двигунів вантажних автомобілів. За результатами виконаного дослідження встановлено, що паливно-екологічна ефективність дизельних двигунів вантажних автомобілів за останні 30 років зросла у 4,17 рази, головним чином за рахунок зменшення викидів в навколишнє середовище шкідливих речовин відпрацьованих газів.*

**Ключові слова:** *двигуни внутрішнього згоряння; паливна економічність; токсичність відпрацьованих газів; середньо-експлуатаційний ефективний коефіцієнт корисної дії, паливно-екологічний критерій*

### Вступ

Двигунам внутрішнього згоряння, як одного з основних джерел негативного впливу на людину і забруднення навколишнього середовища в останній час приділяється значна увага. Дійсно, завдяки ряду переваг, пов'язаних з мобільністю, економічністю, надійністю, ресурсом в експлуатації в цей час ці двигуни знайшли широке розповсюдження і забезпечують основні потреби людства в механічній енергії [1, 2]. Найбільш широке застосування двигуни внутрішнього згоряння отримали на автомобільному транспорті, який за обсягом перевезень перевершує залізничний, морський і авіаційний транспорт. Нині на частку автомобільного транспорту, який включає вантажні, легкові, спеціальні автомобілі та автобуси припадає понад 80 % перевезень у світі. При цьому більшість вантажних перевезень, як і автобусних, здійснюється при використанні надійних дизельних двигунів, які серед усіх теплових двигунів ще тримають і першість за показниками паливної економічності.

В останні роки при розробці, впровадженні у виробництво та використанні в експлуатації цих двигунів внесені суттєві зміни, пов'язані з вдосконаленням конструкції, технології, виготовлення, організації робочого процесу, оптимізації систем, що забезпечують подачу палива і повітря, очистку відпрацьованих газів (ВГ) від шкідливих викидів в навколишнє середовище [1, 3].

Реалізації цих заходів сприяє не тільки технічний прогрес та конкуренція між виробниками, але і вимоги щодо підвищення показників двигунів, в першу чергу, екологічних, які висуваються міжнародними організаціями.

Особливо значні зміни за останні 30 років ці вимоги торкнулися дизельних двигунів вантажного автомобільного транспорту. Проведений аналіз зміни вимог, досягнутого рівня економічних і екологічних показників дизельних двигунів вантажного автотранспорту проведено за допомогою паливно-екологічного критерію, що надає змогу дати оцінку впровадженим заходам, з точки зору збереження дефіцитних паливних ресурсів, забруднення навколишнього середовища, а також визначити перспективи результатів подальших досліджень у цьому й напрямку.

**Метою роботи** є узагальнення даних про динаміку змін показників паливної економічності і токсичності відпрацьованих газів сучасних автотранспортних дизельних двигунів, визначення перспектив подальшого їх удосконалення для забезпечення зниження витрати пального в експлуатації та негативного впливу на людину та навколишнє середовище в експлуатації.

**Вимоги, що ставляться до автомобільних двигунів**

Автомобільний транспорт за обсягом перевезень значно перевершує усі інші види транспорту.



Головна частина транспортних перевезень припадає на вантажні автомобілі, для яких найбільш широкое застосування знайшли дизельні двигуни. Така тенденція, як об'єктивна складова технічного прогресу, має і негативні наслідки:

– по-перше, автомобільний транспорт є основними споживачами дефіцитних вуглеводневих нафтових палив;

–по-друге, саме автомобільний транспорт вважається найбільш суттєвими забруднювачами навколишньої атмосфери токсичними речовинами, що містяться у відпрацьованих газах (ВГ) двигунів.

Основними показниками для оцінки економічних показників автомобільних дизельних двигунів є годинна і питома витрати палива. Годинна витрата палива ( $G_n$ ) визначає кількість витраченого палива під час роботи двигуна на заданому режимі протягом однієї години у кг/год. Якщо годинну витрату палива віднести до значення потужності на заданому фіксованому режимі двигуна, то одержимо питому витрату палива ( $g_e$ ), яка визначається у (г/кВт·год).

Найбільш частіше для оцінки паливної економічності двигуна використовують значення питомої витрати палива при номінальній потужності ( $g_{ен}$ ). Значення питомої витрати палива при номінальній потужності дозволяє визначити ступінь доведеності робочого процесу і відносний рівень паливної ефективності двигуна в експлуатації. Проте це значення відрізняється від питомої експлуатаційної витрати палива, так як не враховує витрату палива на часткових навантаженнях. Але із врахуванням того, що сучасні автомобільні дизелі оснащені системами регулювання в залежності від режиму роботи (в першу чергу, систем паливоподачі і повітропостачання), цей показник надає достатньо достовірну інформацію про відносний рівень експлуатаційної паливної економічності автомобільного дизельного двигуна.

Паливно-екологічна ефективність автомобільного транспорту в експлуатації визначається також витратою палива (кг або літр на 100 км) та викида-

ми шкідливих речовин за циклом випробувань, який в достатній мірі відповідає умовам експлуатації.

Що стосується викидів шкідливих викидів, то необхідно відмітити, що до складу ВГ дизельних двигунів входить значна кількість шкідливих компонентів, найбільш суттєвими серед яких вважаються оксиди азоту ( $NO_x$ ), монооксид вуглецю (CO), вуглеводні ( $C_nH_m$ ), сполуки сірки ( $SO_x$ ), а також тверді частинки (ТЧ), які включають в себе канцерогенні речовини.

Законодавчі обмеження рівня екологічних показників двигунів встановлюються нормативною документацією, в якій наведені вимоги та положення щодо умов проведення випробувань, до галузі застосування і терміну дії стандарту, засобів вимірювань, правил обробки результатів випробувань та характеристики застосованого палива.

Серед шкідливих речовин відпрацьованих газів, які перелічені вище, не нормуються лише оксиди сірки ( $SO_x$ ). Утворення  $SO_x$  пов'язано з наявністю сірки у паливі, але наявність  $SO_x$  не відповідає вимогам до дизельного палива, яке призначено для двигунів автомобільного транспорту.

Необхідно додати, що двигуни автотранспорту, як і інші теплові енергетичні установки викидають до атмосфери значну кількість діоксиду вуглецю ( $CO_2$ ), який хоча і не вважається токсичною речовиною [4, 5, 6], але, як відомо, може впливати на підвищення температури атмосфери нашої планети і тому має вплив на формування парникового ефекту.

#### Аналіз рівня економічних і екологічних показників дизельних двигунів вантажного автотранспорту

Аналіз зміни рівня екологічних показників дизельних двигунів вантажного автотранспорту за останні 30 років проведемо за даними зміни вимог, а, відповідно, і рівня екологічних показників дизельних двигунів вантажного автотранспорту, згідно нормативів Правил ЕСК ООН (таблиця 1).

Таблиця 1. Вимоги до викиду шкідливих речовин з ВГ дизельних двигунів транспортних засобів серійного виробництва згідно нормативам, що діяли і діють в Європі.

Стандарти (АТЗ з повною масою понад 3,5 т)	Питомі викиди токсидів, (г/(кВт·год))			
	$NO_x$	CO	$C_nH_m$	PM (ТЧ)
Євро-0 (з 1990 р.)	14,4	11,2	2,4	0,7
Євро-I (до 01.10.1995 р.)	8,0	4,9	1,23	0,40
Євро-II (з 01.10.1995 р.)	7,0	4,0	1,10	0,25
Євро-III (з 01.10.2000 р.)	5,0	2,1	0,66	0,13
Євро-IV (з 2005 р.)	3,5	1,5	0,46	0,02
Євро-V (з 2008 р.)	2,0	1,5	0,25	0,02
Євро-VI (з 2015 р.)	0,4	1,5	0,13	0,01

Що стосується стандарту Євро-VII, то цей стандарт ще в стадії узгодження [7, 8]. Але і з наведених даних бачимо, що подальше посилювати вимоги, особливо щодо викидів твердих частинок, практично нікуди. Можна лише зазначити, що вказані норми відповідають рівню показників двигунів, що впроваджені (або готуються до впровадження провідними фірмами у виробництво, тобто з одного боку жорсткість норм – це реалізація напрямку з покращення стану навколишнього середовища, з другого має економічні цілі – тиск на конкурентів-виробників двигунів.

Відповідно до вимог Правил ЕСК ООН випробування автомобільних дизелів проводяться на

моторному стенді за циклом ESC – Європейський стаціонарний випробувальний цикл (European Steady State Cycle), який складається з 13 стаціонарних режимів, що враховують реальні умови експлуатації дизельних двигунів вантажних автомобілів. Згідно методики цього циклу випробування проводяться з навантаженням при трьох частотах обертання колінчастого валу, що зміщені у бік нижчих значень.

За даними, наведеними у таблиці 1 побудовано графік (рис.1), що надає наглядну динаміку зміни (поліпшення) екологічних якостей дизельного двигунів вантажних автомобілів з 1990 по 2020 роки.

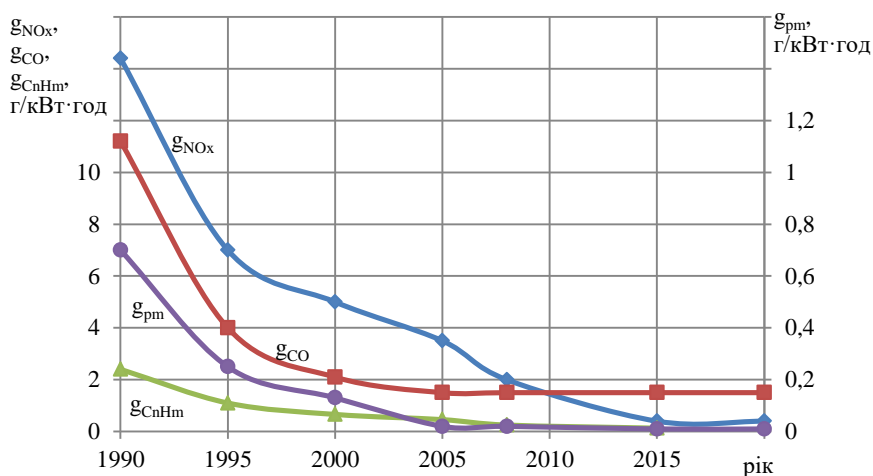


Рис. 1. Зміна вимог щодо викидів шкідливих речовин з ВГ дизельних двигунів транспортних засобів згідно нормативам, що діють в Європі

З графіку випливає, що за останні роки вимоги, а, відповідно, і екологічні показники дизельних двигунів автотранспорту значно змінилися – зменшилися у 3 – 5 разів для викидів з відпрацьованими газами  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $C_nH_m$  і у 40 разів (!) щодо викидів твердих частинок (ТЧ).

Аналіз і динаміку зміни економічних показників дизельних двигунів вантажних автомобілів проведено з узагальненням даних щодо витрати палива сучасних чотиритактних двигунів з об'ємом циліндрів 7,5–10 л. До таких двигунів відноситься і вітчизняний двигун 6ЧН12/14. Необхідно додати, що шестициліндрові рядні двигуни такої розмірності (або близькою до нього) достатньо широко представлені на ринку автомобільних двигунів.

У конструкціях сучасних автомобільних двигунів застосовані найпрогресивніші рішення. До таких рішень слід віднести, безпосереднє впорскування палива при підвищеному рівні тиску впорскування палива, впровадження газотурбінного наддуву, проміжного охолодження наддувального повіт-

ря, системи регулювання фаз газорозподілу та інші рішення, спрямовані на покращення робочого процесу і підвищення ефективності конструктивних елементів двигунів та високотехнологічних систем керування двигуном.

В результаті, якщо у 1990 році на режимі номінальної потужності дизельні двигуни вантажних автомобілів мали рівень ефективної витрати палива  $g_{ен} = 218 - 222$  г/(кВт·год), то подальше удосконалення цих двигунів забезпечило у 2000 році значення цього показника на рівні  $g_{ен} = 215 - 217$  г/(кВт·год) [1]. У 2020 цей показник дорівнював  $g_{ен} = 211 - 213$  г/(кВт·год).

Таким чином, динаміка підвищення паливної економічності двигунів автотранспорту за останні 30 років оцінюється у 4 – 6 %. Проте можна прогнозувати, що рівень еволюції показників паливної економічності автомобільних дизельних двигунів з підвищенням його ефективного ККД (зараз цей показник знаходиться на рівні близькому до  $\eta_{ен} = 0,4$ ) буде зменшуватися.



**Методика оцінки і результати визначення динаміки підвищення економічних і екологічних показників дизельних двигунів автотранспорту.** Для визначення рівня і динаміки підвищення економічних і екологічних показників дизельних двигунів автотранспорту використано методику комплексної паливно-екологічної оцінки, що викладено у роботах [1,2], а також наведені вище дані із законодавчого обмеження щодо рівня викиду шкідливих речовин з відпрацьованими газами і зміни рівня значення питомої витрати палива при номінальній потужності ( $g_{ен}$ ) за останні 30 років.

Відповідно до вказаної методики порівняльну оцінку рівня паливних і екологічних показників дизельних двигунів проводять при незмінних умовах експлуатації (моделі експлуатації), з урахуванням даних, що характеризують особливості території, розсіювання газів в атмосфері, характеристики та ціни дизельного пального. Останнє особливо важливо, тому що інакше на комплексну оцінку технічного рівня двигунів буде значною мірою впливати нетехнічні економічні аспекти.

Основним показником вказаної оцінки є паливно-екологічний критерій, який визначається за формулою:

$$K_{ПЕ} = \eta_{е.сер.експ} \cdot \beta.$$

В наведеній формулі  $\eta_{е.сер.експ}$  – середньо-експлуатаційний ефективний коефіцієнт корисної дії,  $\beta$  – коефіцієнт відносних експлуатаційних екологічних витрат, який враховує частку витрат на відшкодування екологічних збитків від шкідливого діяння на навколишнє середовище ВГ дизельного двигуна у сумарних витратах на паливо й відшкодування екологічних збитків.

Коефіцієнт  $\beta$  визначається за виразом:

$$\beta = B_{пал.} / B_{пал.екол.},$$

де  $B_{пал.}$  і  $B_{пал.екол.}$  – відповідно витрати на паливо і сумарні витрати на паливо і відшкодування екологічних збитків від шкідливої дії ВГ на навколишнє середовище при експлуатації автомобіля, віднесені до одиниці потужності.

Екологічні збитки – це збитки у грошовому еквіваленті, що безпосередньо пов'язані із негативним впливом на довкілля в експлуатації автотранспорту і які у проведених розрахунках визначаються на одиницю енергії виробленої двигуном.

Середньо-експлуатаційний ефективний коефіцієнт корисної дії визначається за залежністю

$$\eta_{е.сер.експ} = \frac{360}{H_u \cdot g_{е.сер.експ}},$$

де  $H_u$  – нижча теплота згоряння палива (для дизелів вантажних автомобілів в розрахунках вона приймається 42,7 мДж/кг), а  $g_{е.сер.експ}$  кг/(кВт·год) – питома

середньо-експлуатаційна витрата палива, яку можна визначити, наприклад, при стендових випробуваннях на представницьких режимах роботи двигуна, обраних відповідно до моделі його експлуатації. До таких моделей експлуатації можна віднести, як про це вже визначалося, цикли випробувань двигунів (наприклад цикл ESC).

За результатами проведених численних випробувань дизельного двигуна 6ЧН12/14 [1], призначеного для автомобілів КраЗ встановлено, що значення  $g_{е.сер.екс}$ , яке розраховується за моделлю експлуатації двигуна вантажного автомобіля, дорівнює (1,04 – 1,06) від  $g_{ен}$ . У виконаних розрахунках приймаємо:

$$g_{е.сер.екс} = 0,105 g_{ен}.$$

Якщо відомі паливна економічність двигуна в експлуатації  $g_{е.сер.екс}$  та ціна на паливо  $\Pi_{пал.}$ , то можна визначити витрати на паливо при виробництві одиниці енергії в експлуатації  $B_{пал.}$ :

$$B_{пал.} = g_{е.сер.екс} \Pi_{пал.}$$

Для скасування впливу на комплексну оцінку технічного рівня двигунів економічних аспектів, ціна на дизельне паливо при розрахунках приймалася незмінною (на середньому рівні цього року) –  $\Pi_{пал.} = 53,0$  грн/кг.

Враховуючі те, що також відомі значення, що обмежують масовий викид шкідливих речовин дизельних двигунів вантажних автомобілів в експлуатації за період з 1990 по 2020 роки (табл. 1 та рис.1), можемо визначити витрати на відшкодування збитків від впливу токсичних речовин ВГ двигуна на людину і навколишнє середовище по роках у цей період. При оцінці даної складової критерію виходимо з того, що основними шкідливими компонентами ВГ дизелів вантажного автотранспорту є  $NO_x$ ,  $C_nH_m$ , CO і ТЧ.

Агресивність кожної із шкідливих речовин ВГ залежить від гранично допустимої концентрації цієї речовини у атмосферному повітрі. Оцінка проведеної питомої маси викиду шкідливих речовин ВГ автомобільних дизелів проведена при наступних показниках відносної агресивності:  $A_{CO} = 1$ ;  $A_{C_nH_m} = 3,16$ ,  $A_{NO_x} = 41,1$ ;  $A_{ТЧ} = 200$  [2].

Показник відносної безпеки залежно від класифікації територій  $\sigma$  і може змінюватися від 0,25 (для богарних полів) до 10 (території курортів і санаторій). В наших розрахунках приймаємо  $\sigma = 2,5$ , як середнє значення між показниками для територій приміських зон ( $\sigma = 1,0$ ) і промислових підприємств ( $\sigma = 4,0$ ). Що стосується коефіцієнта, який враховує характер розсіювання ВГ в атмосфері, то відповідно рекомендацій [1, 2] приймаємо  $f = 1,0$ .

Витрати на відшкодування екологічних збит-

ків від шкідливої дії ВГ двигунів на навколишнє середовище при вироблені одиниці потужності визначаються за формулою

$$B_{\text{екол}} = \delta \cdot \sigma \cdot f \cdot g_{\text{шр.пр.}}, \text{ (грн/кВт-год)}.$$

Тут  $\delta$  – розмірний коефіцієнт для переведення бальной оцінки збитків у вартісну, що відповідає ціні дизельного пального, а  $g_{\text{шр.пр.}}$  – приведена питома маса викиду шкідливих речовин з урахуванням їх відносної агресивності у г/кВт, яка визначається залежністю

$$g_{\text{шр.пр.}} = g_{\text{CO}} A_{\text{CO}} + g_{\text{CnHm}} A_{\text{CnHm}} + g_{\text{NOx}} A_{\text{NOx}} + g_{\text{Tч}} A_{\text{Tч}},$$

де  $A_{\text{CO}}, A_{\text{CnHm}}, A_{\text{CnHm}}, A_{\text{Tч}}$  – показник відносної агресивності кожного з компонентів токсичних викидів з ВГ дизелів;  $g_{\text{CO}}, g_{\text{CnHm}}, g_{\text{NOx}}, g_{\text{Tч}}$  – питома маса викиду кожного компонента (г/кВт год), яка в розрахунках приймалася рівною значенням нормованих шкідливих речовин у відповідності до діючих по

роках нормам.

Оцінку зміни технічного рівня автомобільних дизельних двигунів як джерел, що споживають дизельне пальне і забруднюють навколишнє середовище за останні 30 років проведено розрахунково за методикою, викладеною у роботах [1,2] з урахуванням зміни експлуатаційної витрати палива, масового викиду токсичних компонентів ВГ, їх агресивності і нанесеного збитку.

Зміна рівня середньо-експлуатаційної витрати палива дизельного двигуна вантажного автомобіля за останні 30 років при розрахунках визначалася із графіка (рис 2.).

Показники паливної економічності дизельного двигуна вантажного автомобіля за останні 30 років, які були використані при розрахунках, наведені в таблиці 2.

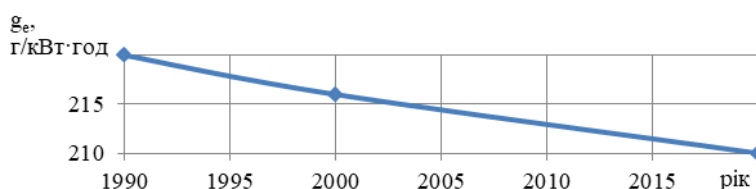


Рис. 2 Зміна середньо-експлуатаційної витрати палива дизельного двигуна вантажного автомобіля

Таблиця 2. Зміна показників паливної економічності дизельного двигуна вантажного автомобіля

Рік	$g_e$ , г/кВт год	$g_{e \text{ екс}}$ , г/кВт год	$\eta_{e \text{ екс}}$	$B_{\text{пал}}$ , грн/кВт год
1990	220	231	0,383	11,66
2000	216	226,8	0,390	11,45
2010	213	223,65	0,396	11,28
2020	211	221,55	0,399	11,18

Значення екологічних показників дизельного двигуна вантажного автомобіля за останні 30 років,

які були використані при розрахунках, наведені в таблиці 3 і на рис.1.

Таблиця 3. Зміна екологічних показників дизельного двигуна вантажного автомобіля

Рік	$g_{\text{NOx}}$ , г/кВт год	$g_{\text{CO}}$ , г/кВт год	$g_{\text{CnHm}}$ , г/кВт год	$g_{\text{Tч}}$ , грн/кВт год	$g_{\text{NOx}} A_{\text{NOx}}$	$g_{\text{CO}} A_{\text{CO}}$	$g_{\text{CnHm}} A_{\text{CnHm}}$	$g_{\text{PM}} A_{\text{PM}}$	$\Sigma gA$	$B_{\text{екол}}$ , грн/кВт год
1990	14,4	11,2	2,4	0,7	591,8	11,2	7,6	140	750,6	39,78
2000	5,0	2,1	0,66	0,13	205,5	2,1	2,1	26	235,7	12,49
2010	2,0	1,5	0,25	0,02	82,2	1,5	0,8	4	88,5	4,69
2020	0,4	1,5	0,13	0,01	16,4	1,5	0,4	2	20,3	1,08

Отримані розрахункові дані (таблиці 2 і 3) надають змогу визначити зміну коефіцієнту відносних експлуатаційних екологічних витрат ( $\beta$ ) і пали-

вно-екологічний критерій ( $K_{\text{ПЕ}}$ ). Результати розрахунків цих показників наведено в таблиці 4 і на рисунках 3 і 4.



Таблиця 4. Зміна коефіцієнту відносних експлуатаційних екологічних витрат і паливно-екологічного критерію дизельного двигуна вантажного автомобіля за останні 30 років

Рік	$\beta$	$K_{ПЕ}$
1990	0,227	0,087
2000	0,478	0,186
2010	0,706	0,280
2020	0,912	0,363

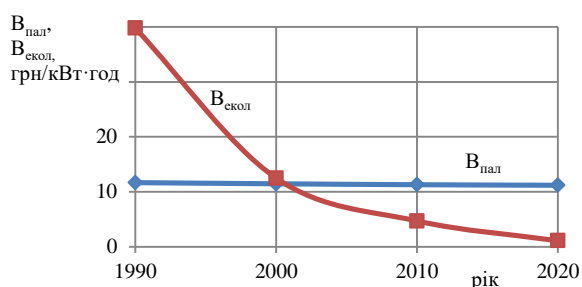


Рис. 3. Зміна витрат на паливо і витрат на відшкодування екологічних збитків дизельного двигуна вантажного автомобіля

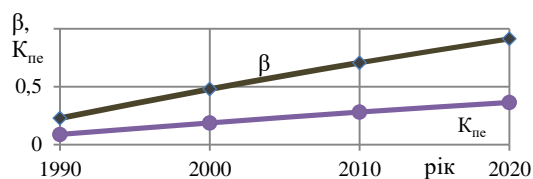


Рис. 4. Зміна коефіцієнту відносних експлуатаційних екологічних витрат і паливно-екологічного критерію дизельного двигуна вантажного автомобіля

Узагальнюючі отриманні розрахункові дані щодо визначення і змін витрат на паливо та відшкодування екологічних збитків від шкідливої дії ВГ двигунів на навколишнє середовище при виробленні одиниці потужності в експлуатації, коефіцієнта відносних експлуатаційних екологічних витрат і паливно-екологічного критерію дизельного двигуна вантажного автомобіля за останні 30 років можна констатувати наступне:

– питома середньо-експлуатаційна витрата палива при експлуатації дизельних двигунів вантажних автомобілів поступово знижувалися – на 2,5 – 4,0 грами за 5 років. При чому динаміка покращення паливної економічності зменшується, що є логічним фактором при зростанні експлуатаційного ККД дизельного двигуна та наближення його значення до максимально-можливого;

– екологічні показники дизельних двигунів вантажних автомобілів покращилися у значній мірі, особливо це стосується найбільш агресивних токсичних викидів – твердих частинок і оксидів азоту; рівень шкідливих викидів усіх нормованих токсичних речовин наближається до мінімуму, який можна забезпечити за рахунок удосконалення робочого процесу і систем очистки та нейтралізації відпрацьованих газів двигунів;

– зміна витрат на паливо в експлуатації, при умові незмінної ціни на паливо, зменшилася незначно у порівнянні із витратами на відшкодування екологічних збитків дизельних двигунів вантажних автомобілів;

– завдяки суттєвому зменшенню витрат на відшкодування екологічних збитків і незначного зменшення витрат на паливо в експлуатації дизельних двигунів вантажних автомобілів коефіцієнт відносних експлуатаційних екологічних витрат зростає.

– зростання коефіцієнту відносних експлуатаційних екологічних витрат, а також в деякій мірі середньо-експлуатаційного ефективного коефіцієнта корисної дії **приводить до** росту і паливно-екологічного критерію дизельних двигунів вантажних автомобілів; якщо у 1990 році його значення було 0,087, то у 2020 році – 0,363.

Тобто можна констатувати, що паливно-екологічна ефективність дизельних двигунів вантажних автомобілів за останні 30 років зросла у 4,17 рази.

Проте, як відомо, до двигунів внутрішнього згоряння в цей час висувуються значні претензії щодо викиду в навколишнє середовище при експлуатації значної кількості парникового газу –  $CO_2$ .  $CO_2$  не відноситься до токсичних речовин [4, 9, 10], але враховуючи стурбованість наукової і значною мірою ненаукової спільноти відносно цієї проблеми, автори вважають за необхідність проведення досліджень та запропонування методики, що буде давати об'єктивні дані щодо впливу на комплексний критерій і, відповідно, на людство та навколишнє середовище викиду діоксидів вуглецю.

Подальша еволюція паливно-екологічних показників дизельних двигунів значною мірою пов'язана як з підвищенням їх паливної економічності, так і з покращенням характеристик палив, включаючи використання альтернативних палив, якщо це паливо за ціною ці палива не буде значно відрізнятися (в сторону зростання) від нафтового палива.

Реалізації вказаних заходів щодо комплексного підвищення паливно-екологічних показників сприяє не тільки технічний прогрес та конкуренція

між виробниками, але і вимоги щодо показників двигунів, в першу чергу, екологічних, які ставляться до сучасних двигунів міжнародними організаціями.

Виходячи з цього, еволюційний розвиток дизельних двигунів пов'язаний з подальшим їх удосконаленням, яке забезпечується підвищенням економічних показників (зниження витрати пального), енергетичних показників (збільшення літрової потужності) та екологічними показниками (зниження негативного впливу на людуство, навколишнє середовище і глобальне потепління).

### Висновки

Еволюція сучасних дизельних двигунів, які розроблені, впроваджені у виробництво та використовуються в експлуатації, забезпечується за рахунок вдосконалення конструкції, технології виготовлення, організації робочого процесу, систем подачі палива і повітря, очистки відпрацьованих газів від шкідливих викидів в навколишнє середовище. За своїми паливно-екологічними показниками сучасні двигуни суттєво відрізняються від своїх попередників.

Надана оцінка з використанням паливно-екологічного критерію показала, що цей показник для автомобільних дизельних двигунів останні 30 років збільшився у 4,17 рази, головним чином за рахунок зменшення викидів в навколишнє середовище шкідливих речовин з відпрацьованими газами. При чому рівень нормованих екологічних показників наближається до свого можливого мінімуму.

Водночас, покращуються, але з меншою інтенсивністю показники паливної економічності. Можна прогнозувати, що рівень підвищення паливно-економічної ефективності подальше буде спадати.

З урахуванням сучасних вимог до зменшення викидів в навколишнє середовище парникового газу (CO<sub>2</sub>) саме питанню декарбонізації в перспективі буде приділятися найбільша увага при розробці, виготовленні і експлуатації дизельних двигунів автотранспорту.

### Список літератури:

1. Двигуни внутрішнього згорання : серія підручників у 6 т. Т. 5: Екологізація ДВЗ: підручник / А. П. Марченко, Парсаданов І.В., Товажнянський Л.Л., Шеховцов А.Ф.; ред. А. П. Марченко; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – 2-ге вид. – Харків : НТУ "ХПІ", 2014. – 348 с. 2. Zhao F. *Challenges, Potential and Opportunities for Internal Combustion Engines in China* / Zhao F., Chen K. Hao H.; Liu Z. *Challenges* // *Sustainability*. – 2020. – 12: 4955. <https://doi.org/10.3390/su12124955>. 3. Парсаданов І.В. Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію:

Монографія / І.В. Парсаданов.– Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2003.–244 с. 4. Канило П.М. Глобальное потепление климата. Антропогенно-экологическая реальность: монография / П.М. Канило.– Х.: ХНАДУ, 2015.- 312 с. 5. Парсаданов І.В. Урахування шкідливої дії діоксиду вуглецю при комплексній оцінці витрати палива і токсичності відпрацьованих газів дизельних двигунів / Парсаданов І.В., Рикова І.В. // Двигуни внутрішнього згорання. – 2022. – №1. – С.35-40. 6. Serrano J.R. *Why the Development of Internal Combustion Engines Is Still Necessary to Fight against Global Climate Change from the Perspective of Transportation* / J.R. Serrano, R. Novella, P. Piqueras // *Appl. Sci.* – 2019. – 9(12): 4597. <https://doi.org/10.3390/app9214597>. 7. Проблеми низьких автомобільних стандартів в Україні // Еколого-транспортні проблеми сучасної України: Міжнародний Центр Перспективних Досліджень, Київ. – 2020 – С. 5 - 12. – Режим доступу: [https://icps.com.ua/assets/uploads/images/files/ecology\\_a4\\_u\\_kr.pdf](https://icps.com.ua/assets/uploads/images/files/ecology_a4_u_kr.pdf). 8. *Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality.* – available at: *An official website of the European Union* [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_6495](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495). 9. *The Cost of Air Pollution. Health Impacts of Road Transport.* *OECD Multilingual Summaries*, 2014. – available at: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/9789264210448-sum-en/index.html?itemId=/content/component/9789264210448-sum-en>. doi: 10.1787/9789264210448-en. 10. *Health impacts of air pollution in Europe, 2022.* – available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>.

### Bibliography (transliterated):

1. Marchenko, A.P., Parsadanov, I.V., Tovazhnyansky, L.L., Shekhovtsov, A.F. (2014), *Internal combustion engines: A series of textbooks in 6 volumes. V.5. The Environmentalization of ICE. 2nd ed.* Kharkov [Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia: Seriya pidruchnykiv u 6 tomakh, T. 5 Ekolohizatsiia DVZ – 2-e vydannia], NTU "KPI" publishing center, 348p. 2. Zhao, F.; Chen, K.; Hao, H.; Liu, Z. (2020), «Challenges, Potential and Opportunities for Internal Combustion Engines in China», *Sustainability*, 12, 4955. <https://doi.org/10.3390/su12124955>. 3. Parsadanov I.V. (2003), *Improving the quality and competitiveness of diesel engines based on an integrated fuel and environmental criterion: monograph* [Povysheniye kachestva i konkurentosposobnosti dizeley na osnove kompleksnogo toplivno-ekologicheskogo kriteriya: monohrafiya], NTU "KhPI", Kharkiv, 244 p. 4. Kaniilo, P.M. (2015), *Global climate warming. Anthropogenic - ecological reality: monograph* [Hlobalnoe potepleniye klymata. Antropohenno – ekolohycheskaia realnost: monohrafiya], Kh.: KhNADU, 312 p. 5. Parsadanov, I.V., Rykova, I.V. (2022), "Taking into account the harmful effect of carbon dioxide in the comprehensive assessment of fuel consumption and toxicity of exhaust gases of diesel engines" ["Urahuvannia shkidlyvoi dii dioksydu vuhletsiu pry kompleksnoi otsintsi vytraty palyva i toksychnosti vidpratsovanykh haziv dyzelnykh dvyhunyiv"], *Internal combustion engines*, No. 1, p.p.35-40. 6. Serrano, J.R.; Novella, R.; Piqueras, P. (2019), «Why the Development of Internal Combustion Engines Is Still Necessary to Fight against Global Climate Change from the Perspective of Transportation», *Appl. Sci.*, 9(12), 4597. <https://doi.org/10.3390/app9214597>. 7. (2020), *Problems of low automobile standards in Ukraine.* [Problemy nyzkykh avtomobilnykh standartiv v Ukraini], *Environmental and transport problems of modern Ukraine: International Center for Prospective Studies*, Kyiv,



p.p.5-12, available at: [https://icps.com.ua/assets/uploads/images/files/ecology\\_a4\\_ukr.pdf](https://icps.com.ua/assets/uploads/images/files/ecology_a4_ukr.pdf).  
8. «Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality», available at: An official website of the European Union [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_6495](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495).  
9. (2014), «The Cost of Air Pollution. Health Impacts of Road

Transport». OECD Multilingual Summaries, available at: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/9789264210448-sum-en/index.html?itemId=/content/component/9789264210448-sum-en>.  
10. (2022), «Health impacts of air pollution in Europe», available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>.

Надійшла до редакції 03.07.2023 р.

**Марченко Андрій Петрович** – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: [marchenkoandrey1951@gmail.com](mailto:marchenkoandrey1951@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9746-4634>.

**Парсаданов Ігор Володимирович** – доктор техн. наук, проф., головний наук. співр. кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: [igor.parsadanov@khp.edu.ua](mailto:igor.parsadanov@khp.edu.ua), <http://orcid.org/0000-0003-0587-4033>.

**Рикова Інна Віталіївна** – канд. техн. наук, с.н.с., старший наук. співр. кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: [inna.rykova@khp.edu.ua](mailto:inna.rykova@khp.edu.ua); <http://orcid.org/0000-0002-5348-8199>.

## EVOLUTIONARY DEVELOPMENT OF MOTOR TRANSPORT DIESELS: ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC INDICATORS

*A.P. Marchenko, I.V. Parsadanov, I.V. Rykova*

On the example of the most common in the use of diesel engines of commercial vehicles, the requirements for environmental and economic indicators, their evolutionary development over the past decades and, accordingly, changes in the impact on the environment and in the consumption of natural resources are considered. Road transport in terms of traffic significantly exceeds all other modes of transport, is the main consumer of scarce hydrocarbon oil fuels; and is considered the most significant pollutant of the surrounding atmosphere with toxic substances contained in the exhaust gases of engines.

In recent years, during the development, implementation in production and use in operation, there have been significant changes in the design, technology, manufacturing, organization of the workflow, improvement of diesel engine systems that provide fuel and air supply, purification of exhaust gases from harmful emissions into the environment. The analysis of changes in requirements, the level of achieved economic and environmental performance of diesel engines of trucks, was carried out using the fuel-environmental criterion. The calculation data and the generalization of the results of the study made it possible to determine changes in the cost of fuel and compensation for environmental damage from the harmful effects of engine exhaust gases on the environment, related to a unit of power in operation, the coefficient of relative operating environmental costs, directly fuel-environmental criterion and to give a quantitative assessment of the evolutionary development of diesel engines of trucks. It has been established that the fuel and environmental efficiency of diesel engines of trucks over the past 30 years has increased by 4.17 times, mainly due to the reduction of harmful emissions into the environment with exhaust gases.

**Key words:** internal combustion engines; fuel economy; toxicity of exhaust gases; fuel and ecological criterion

А.А. Лісовал

## ПЕРЕДУМОВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ В УКРАЇНІ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ ТА АВТОМОБІЛЬНІЙ ГАЛУЗЯХ

В статті на підставі світових тенденцій обґрунтовано місце водню і водневих технологій в подальших процесах декарбонізації енергетики і автомобільного транспорту України. Різноманітність способів виробництва, транспортування та зберігання, використання водню різної чистоти вимагають складних компромісних рішень між вартістю технології і кількістю можливих викидів шкідливих речовин у довкілля на всіх суттєвих етапах застосування цих технологій. Водневе паливо і водневі технології слід позиціонувати як один із напрямів енергетичного переходу галузей економіки на рейки декарбонізації, що приведе до створення кліматично нейтральних технологій. Традиційні поршневі двигуни внутрішнього згорання можна модернізувати для роботи на суто водневому паливі, але це потребує застосування нових матеріалів через високу питому енергоємність водню. На шляху спалювання водню в камерах згорання ДВЗ стоять обмеження на викиди оксидів азоту  $NO_x$ . Можливий варіант використання суміші водню з природним газом або модернізація двопаливних ДВЗ. Це найбільш реалістичний варіант на поточний час для України. В світлі процесів декарбонізації, головною перевагою паливних елементів (ПЕ) є відсутність згорання вуглеводнів і відповідно можливість зменшити забруднення атмосферного повітря парниковим газом  $CO_2$ . Існуючі ПЕ можуть працювати не лише на водні, а і на природному газі. В енергетиці водневі технології конкурують не з традиційними способами отримання тепла та електричної енергії, а з біоенергетикою, з тепловими насосами, з технологіями уловлювання та зберігання вуглецю та його оксидів. В автомобільній галузі водневі технології конкурують з рідкими і газоподібними біопаливами, електромобілями та гібридами з ДВЗ і акумуляторами. Потенціальні можливості застосування водневих технологій для процесів декарбонізації розкриються тільки після створення ринку продажу водню та відповідної інфраструктури. На сегмент і ціну застосування водневих технологій впливає спосіб вибраного процесу виробництва, складових інфраструктури, які включають зберігання, транспортування і заправні станції. Безпечна експлуатація і впровадження водневих технологій в Україні потребує кваліфікованих інженерних кадрів. Підготовку таких спеціалістів для енергетики і транспорту можуть взяти на себе університети за спеціальністю 142 – енергетичне машинобудування.

**Ключові слова:** водень; воднева технологія; паливний елемент; двигун внутрішнього згорання; енергетика; автомобіль; автобус.

### Вступ

Поштовхом для написання статті було повідомлення в 2022 р. про 90-річчя з початку робіт над створенням паливних елементів, які в іноземних літературних джерелах мають назву FuelCell. Паливні елементи (ПЕ) пройшли шлях від апробації у космічних технологіях до використання на підводних човнах, автомобілях, в електронній галузі у якості основних (портативна продукція електроніки) і резервних джерел живлення струмом і в енергетиці для вироблення електроенергії та тепла.

У більшості випадків ПЕ пов'язують з воднем, з водневою технологією, з одним із напрямів декарбонізації галузей економіки. Все це є пріоритетними напрямками досліджень для світового наукового співтовариства. Відповідно багато наукових лабораторій Академії наук України займаються дослідженнями за цією актуальною проблематикою [1, 2].

В світлі процесів декарбонізації, головною перевагою ПЕ є відсутність згорання вуглеводнів і, відповідно, можливість зменшити забруднення атмосферного повітря парниковим газом  $CO_2$ . Існуючі ПЕ можуть працювати не лише на водні, а і на природному газі.

Слід нагадати, що деякі конструкції ПЕ ефективно працюють лише за високих температур елек-

троліту (до  $1000^\circ C$ ), а це теплове забруднення довкілля.

Для отримання тепла і електроенергії водень можна спалювати безпосередньо в камерах згорання двигунів внутрішнього згорання і топках котлів і також будуть відсутні прямі викиди (у відпрацьованих газах)  $CO_2$ . Непрямі викиди  $CO_2$  залежать від технології отримання водню. Гібридне поєднання ДВЗ і ПЕ розширює можливості когенераційних технологій [2].

Водень широко використовується як сировина у нафтогазовій та хімічній промисловості при виробництві аміаку, добрив для сільськогосподарства, нафтопродуктів. Одночасно водень отримують як побічний продукт в деяких технологічних процесах, наприклад, при виробництві хлору.

Для обґрунтування місця водню і водневих технологій в світовому процесі декарбонізації галузей економіки і відповідно зменшенні викидів  $CO_2$  за даними роботи [3] складена табл. 1, де наведено частки річних викидів  $CO_2$  за галузями економік різних країн. Декарбонізації потребують сектори економік, які широко використовують викопне паливо – це індустріальні технологічні процеси, енергетична галузь з виробництвом електроенергії і тепла для опалення, транспорт.



В промисловості на шляху до декарбонізації стоїть дві проблеми. Перша – в розвинених країнах вже впроваджені передові енергозберігаючі технології, які максимально скоротили використання

викопного палива. Друга – ризики інвестування в новітнє технологічне обладнання, без гарантій його досконалості та довговічності.

Таблиця 1. Частки (у відсотках) річних викидів CO<sub>2</sub> за галузями економік різних країн

Країни	Промисловість	Сільське господарство	Електроенергія і тепло	Транспорт	Інше
Китай	40	10	37	7	6
США	38	9	12	29	12
Євросоюз	36	16	17	31	–
Індія	34	25	22	8	11
Бразилія	9	59	11	18	3
Індонезія	8	78	4	6	4
Японія	48	2	24	18	8
Середні значення у світі	32	19	19	18	12

Більш сприятлива ситуація до продовження процесів декарбонізації в енергетиці та на транспорті. На частку автомобілів у транспортній галузі припадає найбільша частка викидів парникових газів, бо половина попиту на енергію у світових перевезеннях припадає на легкові автомобілі. За даними роботи [4] кількість легкових автомобілів у 2050 р. зросте з 1 до 2,5 млрд. Країни Євросоюзу мають план до 2030 р. зменшити викиди CO<sub>2</sub> від транспорту на 50 %. Але дані роботи [5] свідчать про невиконання цільового показника (у 10 %) із залучення відновлювальних джерел енергії у транспортній галузі.

**Мета статті** – обґрунтування місця водню і водневих технологій в подальших процесах декарбонізації енергетики і автомобільного транспорту України. Різноманітність способів виробництва, транспортування та зберігання, використання водню різної чистоти вимагають складних компромісних рішень між вартістю технології і кількістю можливих викидів шкідливих речовин у довкілля на всіх супутніх етапах застосування цих технологій.

#### Технології виробництва, зберігання і транспортування водню

За даними роботи [6] за останні десять років у світі виробляється 45 – 65 Мт (за рік) водню для потреб хімічної і нафтохімічної галузей. Близько 50 % такого водню виробляють паровою конверсією (риформінг) природного газу, приблизно 30 % – способом окислення сирої нафти, 18 % – газифікацією вугілля, і лише 4 % – електролізом води. Ведуться розробки технологій виробництва водню з використанням високотемпературного парового електролізу, з використанням енергії сонця (штучний фотосинтез) для розщеплення води, виробництва із біологічної сировини [1].

Парова конверсія метану забезпечує виділення відносно чистого водню та оксиду вуглецю CO у співвідношенні масових часток 3 : 1. Але для ефективності хімічної реакції необхідне безперервне підведення теплоти. На відміну від цього способу, часткове окислення вуглеводнів, газифікації вугілля або біомаси потребують попередньої обробки відповідних палив і додаткової очистки водню.

За даними робіт [7, 8, 9] складена табл. 2, яка дає можливість порівняти ефективність способів виробництва і оцінити витрати енергії на технологічні процеси отримання водню.

Таблиця 2. Порівняння ефективності технологій отримання водню

Назва технології	ККД, %	Витрати енергії, кВт·год на 1 кг H <sub>2</sub>
Риформінг метану	72	44 – 51
Електроліз	61	50 – 65
Газифікація вугілля	56	51 – 74
Газифікація біомаси	46	69 – 76

Для отримання водню «електролізом води» застосовують лужні, твердо полімерні та твердо оксидні (керамічні) електролізери. Найбільш надійними і дешевими є лужні електролізери, їх блочні конструкції досягають потужності у декілька МВт. Лужний електроліт знаходиться між анодом і катодом, на які подається постійний струм. Твердо полімерні електролізери стали комерційно доступними з 2000-х років, швидко розвиваються, мають вихідний тиск водню до 8 МПа, але дорожчі за лужні. Твердо оксидні електролізери використовують керамічний електроліт, мають найвищий ККД, але працюють за високих

температур (700 – 900°C) і, відповідно, найменш довговічні.

Потужною перепоною на шляху розвитку і поширенню водню і водневих технологій в процесах декарбонізації галузей економік є рентабельність отримання водню при використанні «зелених» технологій, відновлювальних джерел енергії. На заохочення виробництва водню в країнах Євросоюзу вплинули внесені в 2022 р. зміни до Регламенту «зеленої» класифікації (GreenDeal). В Регламенті, на обмежений у часі перехідний період, була визнана чистою електроенергія, вироблена з ядерного палива і природного газу у існуючому виді [10]. Ця ситуація на користь нарощування виробництва водню у перспективі може бути використана і в Україні, яка планує за підтримки Євросоюзу у післявоєнний час відновити та модернізувати електростанції, газові транспортні мережі та збудувати нові блоки на атомних електростанціях (АЕС).

Найчастіше на промислових і хімічних підприємствах водень зберігають стисненим у резервуарах високого тиску (до 75 МПа). На автомобілях для зберігання стиснутого водню застосовують балони з тисками 35 МПа або 70 МПа. Для заправки воднем автомобілів на заправних станціях створюються тиски 50 МПа або 90 – 95 МПа відповідно.

Транспортування водню у газових балонах під тиском апробований спосіб і потребує менше витрат енергії на процес стискання, ніж процес зрідження. Однак при великих об'ємах продажу водню для транспортування його морським і наземним транспортом застосовують зріджений водень, який має більшу питому енергоємність. В США більше 90 % водню на продаж транспортують у зрідженому стані у спеціальних криогенних балонах. Як результат узагальнення літературних даних робіт [7, 9] наведена табл. 3, яка дає змогу оцінити енерговитрати для різних способів зберігання водню.

Таблиця 3. Порівняння енерговитрат для технологій зберігання водню

Технологія зберігання водню	Витрати енергії, кВт·год на 1 кг H <sub>2</sub>
Стискання до 50 МПа	до 2,6
Стискання до 90 МПа	до 3,5
Зрідження	11 – 13

Вважається, що на зрідження витрачається третина енергії від загальної кількості, вміщеної в 1 кг водню.

В Україні існує розвинена інфраструктура транспортування природного газу, яка включає

мережу трубопроводів. Відповідно в світі працюють над альтернативною технологією зберігання і транспортування водню – змішування водню з природним газом і транспортування суміші по існуючим трубопроводам. Дослідження [11, 12] засвідчили можливість такого способу сумішевого зберігання, якщо об'ємна частка водню у суміші буде обмежена 10 – 20 %.

За великих об'ємів виробництва водню деякі науковці пропонують зберігати і транспортувати його попередньо перетворивши в метан. Перетворення водню в метан – це зворотній цикл парової конверсії метану, який потребує дорогих каталізаторів або тривалих біологічних перетворень, необхідні джерела вуглецю. Це технологічно складний, дорогий і енерговитратний процес, але існування інфраструктури транспортування природного газу і можливість утилізації CO і CO<sub>2</sub> (як джерел вуглецю) робить ідею цікавою.

#### Застосування водню для виробництва тепла і електроенергії

Потреби в теплі для центральних і північних країн Європи змінюються цілодобово і сезонно, що вимагає гнучкого графіка поставок і можливості швидко збільшити подачу тепла при різкому падінні зовнішньої температури. Тобто сезонне регулювання і пікове регулювання поставок тепла більш складне, ніж регулювання виробництва і розподілення електроенергії. Це призвело до того, що багато країн взяли курс на генерацію тепла з природного газу. Низьковуглецеві палива не створюють конкуренцію викопному паливу за ціною, та їх використання може спричинити ризик не покриття пікових потреб як по теплу, так і по електроенергії.

Сучасні теплоізоляційні та енергозберігаючі технології, застосування теплових насосів і акумуляторів, перехід на електричне опалення (теплиці), подальше поліпшення перетворення хімічної енергії палива в теплову лише частково вирішують проблему декарбонізації енергетичної галузі та мають межу можливостей. Заміна природного газу на інше газоподібне паливо може значно зменшити викиди парникових газів. До таких альтернативних газів відносять біометан і водень, а також їх суміші та добавки до традиційних палив.

З огляду на вищезгадане зазначимо, що нарощування виробництва водню і подальше його впровадження в енергетиці забезпечать такі технології виробництва водню: парова конверсія з природного газу, біометану або з їх сумішей; електроліз із залученням електроенергії АЕС, газових ТЕС або від відновлювальних джерел.

В енергетиці для генерації тепла і електроенергії відомо два способи використання водню – це безпосереднє спалювання водневих сумішей в топках чи камерах згорання, або застосування водню як палива у ПЕ. Поширення ПЕ, як технології для процесів декарбонізації, почали реалізовуватися в розвинених країнах 5 – 10 років тому.

Існуючі газові котли для парових турбін можуть працювати на водневих сумішах при певній модернізації системи управління подачею водневих сумішей та заміні газового обладнання, в першу чергу, форсунок-горілок. Заміна газового обладнання пов'язана з особливостями зберігання водню і дуже високою швидкістю поширення полум'я при згоранні. Для індивідуального опалення будівель і офісів існують відносно малопотужні каталітичні котли, де досягається «регульоване» згорання водню з мінімально можливою кількістю оксидів азоту [13]. Але такі котли потребують водень високої чистоти.

В енергетичній галузі для скорочення використання природного газу і дизельного палива розробляються газові турбіни для роботи на водні та водневих сумішах. Проблеми при модернізації газових когенераційних установок залишаються такі ж як і при зовнішньому підведенні теплоти у котлах – відсутність інфраструктури з доставки та зберігання водню, висока швидкість водневого полум'я і відповідно розробка спеціальних камер згорання та газових форсунок, необхідність зменшення викидів оксидів азоту.

При використанні ПЕ можлива також комбінована генерація тепла та електроенергії з відносно високим ступенем ефективності.

За кордоном впровадження ПЕ успішно здійснюється на тепло-електричних станціях з централізованою (ТЕЦ) подачею гарячого носія для опалення будівель на відстань до 30 км. Це гібридні технології, які поєднують традиційні когенераційні установки на базі двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) або із зовнішнім підведенням теплоти (парові турбіни, двигуни Стірлінга) з ПЕ. Перевага такої гібридної технології в можливості утилізації викидів CO і CO<sub>2</sub>. В Україні подібні впровадження відсутні, але розрахункові дослідження виконано і описано в роботі [2].

Незважаючи на високу вартість ПЕ знаходять застосування в індивідуальних домогосподарствах у якості мікро-ТЕЦ. Для таких ПЕ застосовують твердо оксидні (керамічні) електроліти або твердо полімерні мембранного типу.

В комерційному і промисловому секторі США, Японії, Південної Кореї використовують ПЕ з більш дешевими каталізаторами та електролітами на основі фосфорних кислот або розплавлених карбонатів. Останні електроліти працюють за найвищих температур і відповідно такі ПЕ найменше довговічні, але вони невимогливі до палива. Зазначимо, що промислові ПЕ на розплавлених карбонатах використовують у якості палива природний газ або біометан.

За даними роботи [7] складена табл. 4, де наведено показники ефективності водневих ПЕ з твердо оксидним (керамічним) електролітом (SOFC за англійською аббревіатурою) та з твердо полімерним мембранного типу (PEMFC за англійською аббревіатурою).

Таблиця 4. Показники ефективності ПЕ з різними електролітами

Показники	Твердо оксидний ПЕ (SOFC)	Твердо полімерний ПЕ (PEMFC)
Електрична потужність, кВт	0,75 – 250	0,75 – 2
Електричний ККД, %	45 – 60	35 – 39
Теплова потужність, кВт	0,75 – 250	0,75 – 2
Тепловий ККД, %	30 – 45	55
Ресурс, роки	3 – 10	10

При генерації електроенергії ПЕ розміщують найближче до споживача, чим зменшують втрати енергії від передачі та розподілення. ПЕ мають мінімальний час перехідного режиму за зміни зовнішнього навантаження. Вважається, що незалежно від величини зовнішнього навантаження електричний ККД в ПЕ незмінний.

Застосовувати ПЕ у якості джерела суто електричного струму дуже дорого, але деякі міжнародні корпорації роблять так і презентують свій вклад у світові процеси екологізації та боротьби з глобаль-

ним потеплінням. Прикладом є використання з 2008 р. компанією Google електричних модулів на основі твердо оксидних ПЕ, які виробляє фірма Bloom Energy[14]. Модуль має електричну потужність 200 кВт, з відповідним ККД у 50 – 60 %. Паливом є природний газ або біометан.

Зазначимо, що відомості про прибутки від продажу стаціонарних модулів на базі ПЕ відсутні.

#### **Використання водню для автомобілів і автобусів**

Міжнародні експерти з глобальної декарбоні-



зації вважають, що в 2050 р. майже половина енергетичних витрат у світовому сегменті автотранспорту буде припадати на приватні легкові автомобілі [4]. Тому легкові автомобілі попали у перші рядки програм декарбонізації. Для гальмування росту парку індивідуальних легкових автомобілів розробляються заходи з розвитку громадського транспорту і відповідно міські автобуси і комунальні таксі займають наступний рядок у програмах декарбонізації.

Водневе паливо є одним із трьох напрямів у програмах декарбонізації транспортної галузі. Потужну конкуренцію водню складають два інших напрями. Перший – це застосування біопалив різних поколінь. Другий – це електромобілі та гібридні автомобілі, які використовують і ДВЗ, і акумуляторні батареї. Електромобілі кількісно випередили впровадження водневих технологій через більшу доступність до зарядних станцій та менші витрати на створення таких станцій.

Традиційні поршневі ДВЗ можна модернізувати для роботи на суто водневому паливі, але це потребує застосування нових матеріалів через високу питому енергоємність водню. Однак, така модернізація буде значно дешевшою, ніж використання водню в ПЕ. На шляху спалювання водню в камерах згорання ДВЗ є обмеження на викиди оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), які закріплені в регламентах Євросоюзу для здобуття кліматично нейтрального статусу щодо парникових газів. Можливий варіант використання суміші водню з природним газом або модернізація двопаливних ДВЗ. Це найбільш реалістичний варіант на поточний час для України. Він дає можливість використовувати існуючу інфраструктуру природного газу, але не вирішує проблему з обмеженнями на викиди  $\text{NO}_x$ .

Легкові автомобілі на ПЕ найчастіше використовують мембранні елементи з твердо полімерним електролітом (PEMFC). Середня потужність водневих ПЕ для таких транспортних засобів сягає 60 кВт. Лідерами у виробництві (і досвідом експлуатації) легкових автомобілів з водневими ПЕ є Toyota, Hyundai та Honda. В 2020 р. Audi і Mercedes-Benz презентували свої конструкції легкових автомобілів на водневому паливі.

Через відсутність водневих заправок в Україні продаж і експлуатація автомобілів на ПЕ немає сенсу. Крім великих капіталовкладень у водневу інфраструктуру, поширення автомобілів на ПЕ стримується високою ціною автомобіля. Електромобілі в 2 рази дешевші за автомобілі з ПЕ подібної потужності. На ціну ПЕ мембранного типу впливає використання у якості каталізаторів металів платинової групи. Одночасно провідні автомобільні фір-

ми (наприклад, Daimler, Toyota) рекламують програми та їх виконання з скорочення використання платини для традиційних систем нейтралізації ДВЗ, включаючи дизелі.

Загалом у світі в 2020 р. працювало 570 заправних водневих станцій, половина з яких розміщено в Японії та США. За державними програмами мережу заправних станцій розбудовує Великобританія, Франція, Німеччина та Скандинавські країни [15].

На автобусні і вантажні автомобільні перевезення припадає біля чверті енергії, витраченої у транспортній галузі. Зростаючі законодавчі вимоги до мінімізації викидів у атмосферне повітря і державні програми переходу у великих містах на транспорт з нульовими викидами є потужним рушієм до застосування водневих автобусів на ПЕ.

Під час чемпіонату світу з футболу в 2006 р. пасажирів у Берліні возили автобуси на ПЕ [16]. Водень у балонах під тиском 35 МПа був розміщений на даху автобусу. Кількість водню у балоні була 40 кг.

В 2020 р. у Токіо не відбулись Олімпійські та Параолімпійські ігри через пандемію короно вірусу. Незважаючи на це, в січні 2020 р. фірма Toyota представила державній комісії 150 автобусів на водневих ПЕ, було передбачено задіяти для них всю водневу інфраструктуру [17].

Маючи заправні станції, в країнах Скандинавії експлуатуються автобуси на водневих ПЕ. Досвід експлуатації автобусів у цих країнах буде корисним для України, яка має схожі зимові погодні умови. Міністерство енергетики США вважає, що строк служби ПЕ для автобусів повинен становити 25000 годин [18]. Для міжміських і вантажних перевезень цей строк повинен бути у 2 рази більший.

В Україні в 2021 р. на виставці City-Trans&Parking 2021 компанія «Політехносервіс» спільно з Ukrainian Hydrogen&Energy Storage Association презентували проект з майбутнього виробництва в Україні водневого автобуса. Презентація проекту отримала підтримку від асоціації Hydrogen Europe. Представник асоціації Hydrogen Europe зазначив, що Україна за фінансової підтримки може продавати водень у Європу і одночасно розвивати водневі технології у своїй країні.

### Висновки

Водневе паливо і водневі технології слід позиціонувати як один із напрямів енергетичного переходу галузей економіки на рейки декарбонізації, що приведе до створення кліматично нейтральних технологій.

В енергетиці водневі технології конкурують не з традиційними способами отримання тепла та електричної енергії, а з біоенергетикою, з тепловими насосами, з технологіями уловлювання та зберігання вуглецю та його оксидів.

В автомобільній галузі водневі технології конкурують з рідкими і газоподібними біопаливами, електромобілями та гібридами з ДВЗ і акумуляторами.

Потенціальні можливості застосування водневих технологій для процесів декарбонізації розкриваються тільки після створення ринку продажу водню та відповідної інфраструктури. На сегмент і ціну застосування водневих технологій впливає спосіб вибраного процесу виробництва, складових інфраструктури, які включають зберігання, транспортування і заправні станції.

Безпечна експлуатація і впровадження водневих технологій в Україні потребує кваліфікованих інженерних кадрів. Підготовку таких спеціалістів для енергетики і транспорту можуть взяти на себе університети за спеціальністю 142 – енергетичне машинобудування.

#### Список літератури:

1. *Фундаментальні аспекти відновлювально-водневої енергетики і паливно-комірчанних технологій / за загальної ред. Ю.М. Солоніна. – К.: «КІМ», 2018. – 260с.*
2. Бганцев В.М. Газові двигуни внутрішнього згорання в системах підвищення ефективності паливних елементів об'єктів великої енергетики / В.М. Бганцев, А.М. Левтеров // *Двигуни внутрішнього згорання. – 2022. – №2. – С. 20-24. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.03.*
3. *World Resources Institute / CAIT Climate Data Explorer. – March 10, 2015. – Режим доступу: <https://www.wri.org/data/cait-climate-data-explorer>.*
4. *Energy Information Administration / International Energy Outlook. – 2017. – Режим доступу: <http://www.eia.gov/ieo>.*
5. *Government to miss 2020 renewable energy targets / ECC Select Committee. – September 9, 2016. – Режим доступу: <https://www.parliament.uk/external/committees>.*
6. *Global Hydrogen Generation Market By Merchant & Captive Type, Distributed & Centralized Generation, Application & Technology - Trends & Forecasts (2011-2016) / Research and Markets. – December 16, 2011. – Режим доступу: <https://www.businesswire.com/news/home/20111216005337>.*
7. *Fuel Cells – Data, Facts and Figures / за ред. D. Stolten, R. C. Samsun and N. Garland. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany. – 2016. – ISBN: 978-3-527-33240-3.*
8. Schmidt O. *Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study / O. Schmidt, A. Gambhir, I. Staffell, A. Hawkes, J. Nelson and S. Few // Int. J. Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, Issue 52. – pp. 30470–30492. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045.*
9. *Lehner M. Power-to-Gas: Technology and Business Models / M. Lehner, R. Tichler, H. Steinmüller and M. Koppe. – Springer Briefs in Energy. – January, 2014. – 94p. – ISBN: 978-3-319-03994-7. DOI: 10.1007/978-3-319-03994-7.*
10. *Лісовал А.А. Використання біогазу як сировини і моторного палива в енергетиці і на транспорті / А.А. Лісовал //*

11. *Gotz M. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review / M. Gotz, J. Lefebvre, F. Mors, A. M. Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert and T. Kolb // Renewable Energy. – 2016. – Vol. 85. – pp. 1371–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>.*
12. *Zhang F. The survey of key technologies in hydrogen energy storage / F. Zhang, P. C. Zhao, M. Niu and J. Maddy // Int. J. Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41, Issue 33. – pp. 14535–14552. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.293>.*
13. *Desk study on the development of a hydrogen-fired appliance supply chain / [M. Dorrington, M. Lewitt, I. Summerfield, P. Robson and J. Howes]. – Kiwa & E4 Tech, UK. – 2016. – Report 30686. – 86p.*
14. *NASA™ Technology Comes to Earth / Bloom Energy. – 2017. – Режим доступу: <http://www.bloomenergy.com/about/company-history>.*
15. *Germany had the highest increase of hydrogen refuelling stations worldwide in 2017 / Ludwig-Bölkow-Systemtechnik and TÜV SÜD. – 2018. – Режим доступу: <https://www.tuvsud.com/en/press-and-media/2018/february>.*
16. *Urban buses: alternative power-trains for Europe / FCH-JU. – 2012. – 58p. – Режим доступу: <https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents>.*
17. *Toyota to Start Sales of Fuel Cell Buses under the Toyota Brand from Early 2017 / Toyota. – October 21, 2016. – Режим доступу: <https://global.toyota/en/detail/13965745>.*
18. *Marcinkoski J. Fuel Cell System Cost – 2015 / J. Marcinkoski, J. Spindelov, A. Wilson and D. Papageorgopoulos. – US Department of Energy. – 2016. – Режим доступу: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15015\\_fuel\\_cell\\_system\\_cost\\_2015.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15015_fuel_cell_system_cost_2015.pdf).*

#### Bibliography (transliterated):

1. Solonin, Y.M. (2018), "Fundamental aspects of renewable hydrogen energy and fuel cell technologies", ["Fundamental'ni aspekty vidnovlyuvail'no-vodnevoi enerhetyky i palyvno-komirchanykh tekhnolohiy"], Kiev, «KIM», 260p. 2. Bgantsev, V.M., Levterov, A.M. (2022), "Gas engines of internal combustion in systems for increasing the efficiency of fuel elements of large energy facilities", ["Hazovi dvyhny vnutrishn'oho zhorannya v systemakh pidvyshchennya efektyvnosti palyvnykh elementiv obyektiv velykoyi enerhetyky"], Internal combustion engines, Vol. 2, pp. 20-24. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.03. 3. World Resources Institute, CAIT Climate Data Explorer (2015), available at: <http://cait.wri.org>. 4. Energy Information Administration, International Energy Outlook (2017), available at: <http://www.eia.gov/ieo>. 5. "Government to miss 2020 renewable energy targets", ECC Select Committee (2016), available at: <https://www.parliament.uk/external/committees>. 6. "Global Hydrogen Generation Market By Merchant & Captive Type, Distributed & Centralized Generation, Application & Technology - Trends & Forecasts (2011-2016)", Research and Markets (2011), available at: <https://www.businesswire.com/news/home/20111216005337>. 7. Stolten, D., Samsun, R. C. and Garland, N. (2015), "Fuel Cells – Data, Facts and Figures", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, ISBN: 978-3-527-33240-3. 8. Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J. and Few, S. (2017), Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 42, Issue 52, pp. 30470–30492. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045. 9. Lehner, M., Tichler, R., Steinmüller, H. and Koppe, M. (2014), "Power-to-Gas: Technology and Business Models", Springer Briefs in Energy, 94p, ISBN: 978-3-319-03994-7. DOI: 10.1007/978-3-319-03994-7. 10. Lisoval, A.A. (2022), "Use of biogas as raw material and motor fuel in energy and transport", ["Vykorystannya biohazu yak syrovyny i motoroho palyva v enerhetytsi i na transporti"], Internal combustion engines, Vol. 2, pp. 13-19. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.02. 11. Gotz, M., Lefebvre, J., Mors, F., Koch, A. M., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R. and Kolb, T. (2016), "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review", Renewable Energy, Vol. 85, pp. 1371–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>. 12. Zhang, F., Zhao, P. C., Niu, M. and

- Maddy, (2016), "The survey of key technologies in hydrogen energy storage", *J. Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 41, pp. 14535–14552. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.293>. 13. Dorrington, M., Lewitt, M., Summerfield, I., Robson, P. and Howes, J. (2016), "Desk study on the development of a hydrogen-fired appliance supply chain", *Kiwa & E4 Tech, UK, Report 30686*, 86p. 14. "NASA™ Technology Comes to Earth", *Bloom Energy* (2017), available at: <http://www.bloomenergy.com/about/company-history/>. 15. "Germany had the highest increase of hydrogen refuelling stations worldwide in 2017", *Ludwig-Bölkow-Systemtechnik and TÜV SÜD* (2018), available at: <https://www.tuvsud.com/en/press-and-media/2018/february>. 16. "Urban buses: alternative powertrains for Europe", *FCH-JU* (2012), 58p, available at: <https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents>. 17. "Toyota to Start Sales of Fuel Cell Buses under the Toyota Brand from Early 2017", *Toyota* (2016), available at: <https://global.toyota/en/detail/13965745>. 18. Marcinkoski, J., Wilson, A. and Papageorgopoulos, D. (2016), "On-Road Fuel Cell Stack Durability", *US Department of Energy*, available at: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15015\\_fuel\\_cell\\_system\\_cost\\_2015.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15015_fuel_cell_system_cost_2015.pdf).

Надійшла до редакції 07.07.2023 р.

**Лісовал Анатолій Анатолійович** – доктор техн. наук, професор, професор кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail:li-dvz@bigmir.net <https://orcid.org/0000-0001-6168-4010>

## BACKGROUND FOR THE USE OF HYDROGEN IN UKRAINE IN THE ENERGY AND AUTOMOTIVE SECTORS

*A.A. Lisoval*

Based on the global trends, the article substantiates the place of hydrogen and hydrogen technologies in the further decarbonisation of the energy sector and road transport in Ukraine. The variety of methods of production, transportation and storage, and the use of hydrogen of different purity require complex trade-offs between the cost of the technology and the amount of possible emissions of harmful substances into the environment at all related stages of application of these technologies. Hydrogen fuels and hydrogen technologies should be positioned as one of the areas of energy transition of economic sectors to decarbonisation, which will lead to the development of climate-neutral technologies. Traditional reciprocating internal combustion engines (ICE) can be upgraded to run on purely hydrogen fuel, but this requires the use of new materials due to the high specific energy intensity of hydrogen. The combustion of hydrogen in ICE combustion chambers is hindered by nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) emission restrictions. A possible option is to use a mixture of hydrogen and natural gas or to upgrade dual-fuel internal combustion engines. This is the most realistic option for Ukraine at this point. In light of the decarbonisation process, the main advantage of fuel cells (FC) is the absence of hydrocarbon combustion and, accordingly, the ability to reduce air pollution with the greenhouse gas CO<sub>2</sub>. Existing FC can operate not only on hydrogen but also on natural gas. In the energy sector, hydrogen technologies compete not with traditional methods of generating heat and electricity, but with bioenergy, heat pumps, and technologies for capturing and storing carbon and its oxides. In the automotive sector, hydrogen technologies compete with liquid and gaseous biofuels, electric vehicles and hybrids with internal combustion engines and batteries. The potential application of hydrogen technologies for decarbonisation processes will only be unlocked once a hydrogen market and the relevant infrastructure are in place. The segment and price of hydrogen technologies depend on by the method of production process chosen, as well as the infrastructure components, including storage, transportation and fuelling stations. The safe operation and implementation of hydrogen technologies in Ukraine requires qualified engineering staff. The training of such specialists for the energy and transport sectors can be taken on by universities by universities in the speciality 142 – energy engineering.

**Key words:** hydrogen; hydrogen technology; fuel cell; internal combustion engine; energy; car; bus.



В. О. Пильов, О. Ю. Лінков, С. В. Ликов

## ПОРІВНЯННЯ ПОРОГУ ПОВЗУЧОСТІ ПОРШНЕВИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ЗМІЦНЕННЯ В ЧАСІ

Напрями робіт, що пов'язані з покращенням показників економічності та екологічності при збереженні тенденції збільшення питомої потужності двигунів внутрішнього згоряння, призводять до зростання теплової напруженості деталей камери згоряння і, зокрема, поршня. Це зумовлює випадки втрати параметричної надійності бічної поверхні поршнів як під час експериментальних досліджень, так і під час початкової експлуатації. Такі випадки характеризуються появою натирів в зоні бобишки пальцевого отвору. Вказані факти свідчать за високу актуальність додаткових досліджень властивостей алюмінієвих поршневих сплавів, особливо на початковому етапі термічних навантажень конструкції. Метою роботи є отримання порівняльних відомостей щодо порогу повзучості матеріалів, перевищення якого викликає деформування бічної поверхні поршня в часі та, відповідно, виникнення непрогнозованого зменшення зазору в парі тертя поршень – дзеркало циліндру. В роботі представлено принциповий підхід, за яким визначено поріг повзучості матеріалів в процесі їх зміцнення. Враховано процес повзучості матеріалу на перших двох її стадіях. Досліджено поріг повзучості сплавів АЛ25 та АК4 у їх початково незміцненому та зміцненому з часом стані. Встановлено залежності між рівнем температур і термічних напружень, що визначають пороги повзучості досліджуваних поршневих алюмінієвих сплавів. Показано, що зміцнення досліджуваних сплавів відбувається протягом перших 10 годин термонапруженого навантаження. Встановлено, що межа повзучості незміцнених сплавів АЛ25 та АК4 є меншою у 1,5–2 рази у порівнянні зі межею повзучості зміцнених матеріалів. Запропоновано підхід до забезпечення параметричної надійності бічної поверхні поршня, який полягає в унеможливленні термонавантаження матеріалу рівнем, що перевищує поріг повзучості незміцнених матеріалів. Представлений підхід рекомендується до використання з урахуванням концепції гарантованого забезпечення надійності конструкцій на початкових етапах їх проектування. Детальне викладення основного матеріалу дослідження подано на прикладі сплаву АК4. Наведений підхід щодо визначення змінного в часі порогу повзучості може бути використаний для довірливих матеріалів.

**Ключові слова:** поршень; бічна поверхня поршня; термічна навантаженість; поршневі алюмінієві сплави; повзучість матеріалів; межа повзучості

### Вступ

Вимоги постійного форсування дизелів, у тому ряду і вітчизняних двигунів спеціального призначення, привели до такого рівня теплонапруженості деталей камери згоряння, зокрема, і поршня, коли конструкційні матеріали вже працюють на межі міцності. Це призводить до зменшення, а інколи і до втрати як параметричної, так і фізичної надійності цих деталей [1-3]. Одна із критичних зон поршня, що сприймає термомеханічні навантаження, є бічна поверхня. При цьому для складених конструкцій поршнів його корпус, який виготовлено з алюмінієвого сплаву, може втрачати надійність навіть під жароміцною сталеву накладку [4]. Означені проблеми спостерігались навіть під час обкатувальних випробувань для корпусів поршнів, виготовлених з алюмінієвого поршневого сплаву сімейства АК4 [5]. Спроби перейти на більш досліджений сплав АЛ25 не мали успіху.

Практикою доведено, що коли під час обкатувально-здавальних випробувань корпус поршня не втрачає параметричної надійності, то під час подальшої експлуатації виходи з ладу трапляються дуже рідко і здебільшого з вини експлуатації. Таким чином актуальним є дослідження властивостей поршневих алюмінієвих сплавів в початковий період їх термічних навантажень.

Відомо, що вагомими чинниками, які визна-

чають надійність конструкції в процесі її тривалої експлуатації, є процеси утоми та повзучості матеріалу. Водночас швидкість деформації повзучості є змінною в часі та в початковий період термомеханічних навантажень може бути в рази більшою, ніж в подальшому. Це пов'язано з процесами зміцнення матеріалу, і для різних матеріалів проявляється в різному ступені [6-9].

Для форсованих двигунів процес повзучості матеріалу в зоні поверхні камери згоряння поршня практично завжди є присутнім. Це явище разом з іншими чинниками враховують в розрахунках часу експлуатації двигуна до розтріскування кромки камери згоряння поршня [6]. Але забезпечення потрібного рівня параметричної та фізичної надійності бічної поверхні поршнів потребує формулювання вимог неприпустимості прояву повзучості матеріалу, починаючи з перших годин навантаження двигуна.

Критерієм неприпустимості процесу повзучості є, так званий, її поріг, що визначається припустимими збігами температур і напружень. В [10] показана реальна можливість перевищення порогу повзучості матеріалу в зоні бічної поверхні поршня. Методику визначення порогу повзучості незміцненого та зміцненого в часі матеріалу нами наведено в [11].

**Метою даної роботи** є отримання порівняльних відомостей щодо порогу повзучості сплавів

АК4 та АЛ25, пов'язаного з процесами зміцнення матеріалу в часі. Це дозволить розширити сукупність методик та відповідних критеріїв оцінки параметричної і фізичної надійності поршнів від впливу надвисоких термонавантажень, практично застосовувати ці критерії при проектуванні поршнів нових форсованих двигунів.

**Аналіз публікацій та постановка задачі**

Проблеми працездатності бічної поверхні поршнів існують з моменту створення ДВЗ. На сьогодні існує значна кількість методик, які дозволяють з різною ефективністю та затратами вирішувати цю проблему, наприклад [12-14].

Під час створення нового двигуна проектування бічної поверхні поршня спирається на забезпечення гарантованого установчого зазору між поршнем і дзеркалом циліндру  $\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau)$ . Цей зазор визначається фактичним початковим профілем бічної поверхні корпусу поршня (юбки)  $R_{ю}(h_i, \theta_i, \tau)$  та розміром дзеркала циліндра  $R_r(h_i, \theta_i, \tau)$  як по висоті  $h_i$ , так і по кутовій координаті  $\theta_i$  для кожної точки  $i$  зовнішньої поверхні поршня в початковий момент часу  $\tau$ :

$$\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau) = R_r(h_i, \theta_i, \tau) - R_{ю}(h_i, \theta_i, \tau), \tau = 0. \quad (1)$$

За час роботи  $\tau$  процес збільшення зазору  $\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau)$  протікає під впливом зношення пари тертя поршень – дзеркало циліндру. Величина  $R_r(h_i, \theta_i, \tau)$  зростає, величина  $R_{ю}(h_i, \theta_i, \tau)$  зменшується. Це призводить до збільшення реального зазору  $\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau)$  до допустимого значення  $[R_{уст}]$ . Таким чином параметричну надійність від зношування пари тертя за час роботи двигуна  $\tau$  з призначеним ресурсом  $P$  можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} [\Delta R_{уст}] - \Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau) &\geq 0, \\ \Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau) &> 0, 0 \leq \tau \leq P. \end{aligned} \quad (2)$$

Критерій параметричної надійності вигляду (2) використовують, наприклад, у методиках [15-17].

Але трапляються випадки, коли при зростанні теплової напруженості поршня навіть на початку експлуатації (або під час обкатувальних випробувань нового дизеля) зазор  $\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau)$  для певного масиву точок  $i$  починає зменшуватися, що приводить спочатку до натиру, а далі й до задиру. Тобто з'являється випадок, коли

$$\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau) \leq 0, \tau \ll P. \quad (3)$$

В результаті має місце втрата параметричної, а з часом і фізичної надійності конструкції. Це можливо пояснити збільшенням радіального розміру бічної поверхні поршня внаслідок виникнення процесу повзучості в умовах роботи матеріалу на межі міцності,

$$\begin{aligned} R_{ю}(h_i, \theta_i, 0) &< R_{ю}(h_i, \theta_i, \tau), \\ R_r(h_i, \theta_i, 0) &\approx R_r(h_i, \theta_i, \tau), \tau \ll P. \end{aligned} \quad (4)$$

Критерій втрати параметричної та фізичної

надійності вигляду (3,4) запропоновано в [18].

Явище повзучості виникає під дією високих рівнів температур  $t$  і напружень  $\sigma$ . У загальному випадку розглядають 3 стадії деформування певного матеріалу в часі [6,7,19]. Стадія 1 характеризується зміцненням матеріалу в залежності від величини досягнутої на момент часу  $\tau$  деформації повзучості  $\varepsilon_s(\tau)$ . На цій стадії спостерігається зменшення швидкості повзучості. Стадія 2 відповідає ділянці сталої швидкості деформації повзучості. Стадія 3 визначає прискорення швидкості повзучості, що завершується руйнуванням матеріалу. В момент руйнування матеріалу на стадії 3 деформація повзучості  $\varepsilon$  на 1-2 порядки більшою, ніж на стадії 1 [6-8]. Тому при розгляді втрати надійності бічної поверхні поршня достатньо скористатись моделюванням швидкості повзучості для стадій 1 і 2 у вигляді [19]:

$$\varepsilon_s = A \cdot [1 + D \cdot \varepsilon_s(\tau)^{-\alpha}] \cdot [\sigma(\tau)]^n, \varepsilon_s(0) = 0, \quad (5)$$

де  $D, \alpha$  – константи матеріалу, що характеризують стадію 1;  $A, n$  – константи матеріалу, що характеризують стадію 2.

В загальному випадку означені коефіцієнти є залежними від матеріалу та температури. Коефіцієнти кривих повзучості для сплавів АЛ25 та АК4 нами визначено в [6,19]. Це дозволяє встановити і порівняти пороги повзучості  $\sigma_n \leq f(t, \tau)$  досліджуваних поршневих сплавів шляхом забезпечення умови:

$$\varepsilon_s(t, \sigma_n, \tau) = 0, \quad (6)$$

На даному етапі наукових досліджень пропонується унеможливлення ситуації (3,4) здійснювати з використанням умови

$$\varepsilon_s(t, \sigma_n, \tau) = 0. \quad (7)$$

У цьому випадку рівняння (7) відповідає гарантованому забезпеченню параметричної надійності конструкції в процесі її створення чи модернізації.

Практичне вирішення задачі, сформульованої у вигляді виразу (7), дозволяє визначити по-перше чисельні відмінності порогу повзучості (6) як на початку експлуатаційного навантаження поршня (при  $\tau \approx 0$ ), так і зі зміною часу навантаження. По-друге на наступному етапі досліджень це дозволить визначити можливі зони втрати параметричної та фізичної надійності бічної поверхні поршня через перевищення порогу повзучості.

Означені дослідження нами були розпочаті в [11] щодо поршневого сплаву АЛ25. На цій основі нами поставлені наступні задачі:

- дослідження змінного в часі порогу повзучості поршневого сплаву АК4 як наслідок термічного навантаження поршня в процесі експлуатації двигуна;

- здійснення порівняння порогу повзучості сплавів АК4 та АЛ25 в часі при різних рівнях тер-

монапруженості матеріалів;

- сформулювати загальні рекомендації щодо унеможливлення натирів і задирів на бічній поверхні поршнів форсованих двигунів.

**Теоретичні підходи до визначення змінного в часі порогу повзучості як властивості поршне-вих алюмінієвих сплавів**

В умовах обмежених деформацій повзучості, що є характерним явищем для деталей складної конфігурації та (або) при складному просторовому розподілі температур та термічних напружень, має місце релаксація напружень, процес якої можна представити виразом

$$\dot{\epsilon}_s = - (1/E) (d\sigma/dt), \quad (8)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу при температурі дослідження  $t$ .

Для можливості встановлення порогу повзучості  $\sigma_n$  розрахунковим методом необхідно взяти до уваги величину релаксації напружень матеріалу  $\Delta\sigma$  під впливом температури  $t$  впродовж дискретних проміжків часу  $\tau$  для кількох початкових напружень  $\sigma_0$  [11]:

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma(\tau) = f(t, \sigma_0, \tau), \quad t = \text{const}, \tau = \text{const}. \quad (9)$$

Отримані залежності у точках, де  $\Delta\sigma = 0$  дають шукане рішення згідно рівняння (6) як  $\sigma_n = \sigma_0$ .

Виходячи з (5), до певної величини деформації повзучості, що визначається множителем  $[1 + D \cdot \epsilon_s(\tau)^{-\alpha}]$ , поріг повзучості буде зростати факти-

чно до моменту  $D \cdot \epsilon_s(\tau)^{-\alpha} \approx 0$ . Тоді можна встановити змінний в часі поріг повзучості  $\sigma_n(\tau)$  для стадії 1. Очевидно, що на стадії 2 поріг повзучості буде незмінним. Також слід зауважити, що при фізичній появі стадії 3 поріг повзучості знову буде зменшуватись. Тоді для моменту часу, близького до 0, будемо мати початкову межу повзучості (незміщеного матеріалу). Відповідно, найбільший поріг повзучості назвемо межею повзучості зміщеного матеріалу.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Дослідження змінного в часі порогу повзучості  $\sigma_n(\tau)$  поршневих алюмінієвих сплавів АЛ25 та АК4 здійснено в діапазоні температур 250°C...350°C. Це дозволяє оцінити і порівняти пороги повзучості матеріалів в області високих температурних станів поршнів. Дані щодо фізичних властивостей матеріалів узято з [6,8,19,20].

Розглянемо за приклад отримання результатів для сплаву АК4 при температурі 250°C. Фізичні властивості сплаву, а також найближчі закордонні аналоги наведені в [20]. Коефіцієнти кривих повзучості використано з [16]. Отримані величини релаксації напружень  $\Delta\sigma$  в залежності від початкового рівня напруження  $\sigma_0$  та часу термонапруженого навантаження  $\tau$  наведені у табл. 1. Ці відомості утворюють масив даних, що відповідає залежності (9).

Таблиця 1. Величина релаксації напружень  $\Delta\sigma$  поршневого сплаву АК4 при температурі 250°C, МПа

Початкове напруження $\sigma_0$ , МПа	Час термонапруженого навантаження $\tau$							
	5 хв	10 хв	30 хв	40 хв	60 хв	10 год	50 год	100 год
50	0,68	0,97	1,74	2,03	2,53	8,7	19,1	24,8
60	0,89	1,28	2,31	2,71	3,38	11,9	25,5	32,6
70	1,12	1,62	2,95	3,46	4,33	15,6	32,6	40,9
80	1,37	1,99						
90	1,64	2,39						

Графічне відтворення даних, представлених в табл. 1, подано на рис. 1. Тут перетин кожної з залежностей (9) з віссю  $\Delta\sigma$  у точці 0 відповідає порогу повзучості відповідно до (6). Видно, що в результаті зміни властивостей матеріалу в часі під дією сукупності факторів (5), (8) поріг повзучості сплаву є змінною величиною. Так, наприклад, для моменту часу  $\tau = 5...10$  хв, поріг повзучості дорівнює  $\sigma_n = 7-8$  МПа, а для періоду часу  $\tau = 30...60$  хв, поріг повзучості зростає до  $\sigma_n = 19 - 22$  МПа, для моменту часу 10 годин поріг повзучості досягає величини  $\sigma_n = 24$  МПа, тобто відповідно до (6)  $\epsilon_s(t, \sigma_n, \tau) = \epsilon_s(250, 24, 10) = 0$ .

Характер зміни порогу повзучості сплаву АК4 в часі для температур 250°C та 350°C подано на

рис. 2. Видно, що зміцнення матеріалу АК4 відбувається протягом перших 10 годин термонапруженого навантаження.

Виходячи з отриманих результатів за початкову межу повзучості нами було обрано значення порогу повзучості для моменту часу 5 хвилин. Іншими словами це значення порогу незміщеного матеріалу. Дані порогу повзучості через 10 годин термонапруженого навантаження нами прийняті за межу повзучості зміщеного матеріалу.

При цьому повинно бути ясно, що нижче від кривих за рис. 2 повзучість матеріалу не відбувається, а вище – має місце. Наведений підхід щодо визначення змінного в часі порогу повзучості може бути використаний для довільних матеріалів.



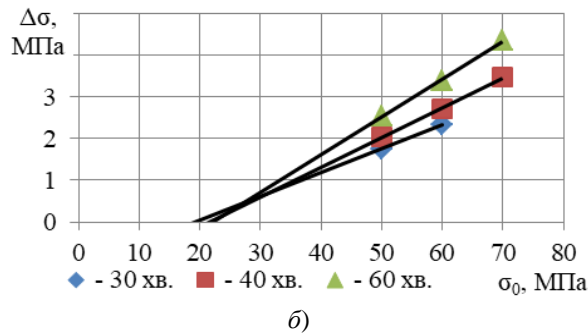
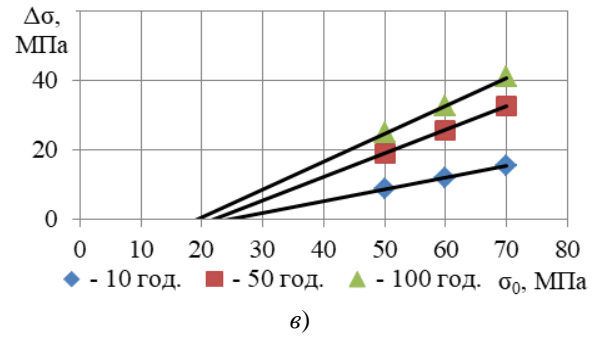
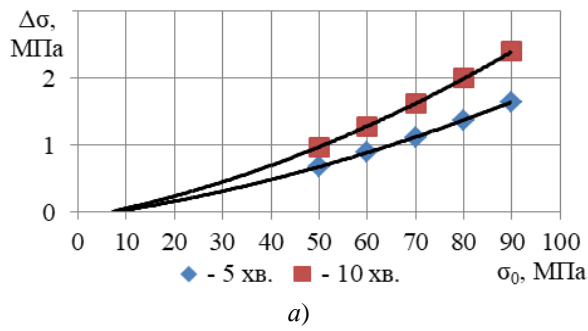


Рис. 1. Визначення порогу повзучості сплаву АК4 для різних моментів часу при 250°C

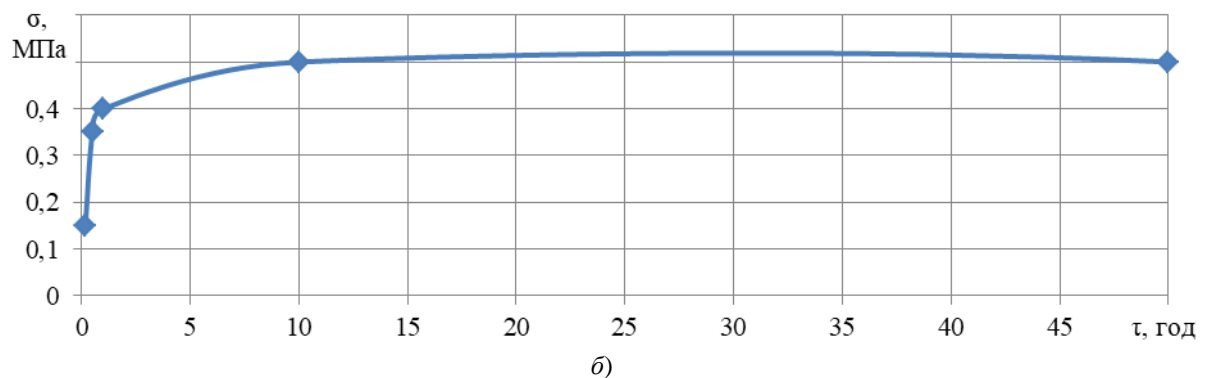
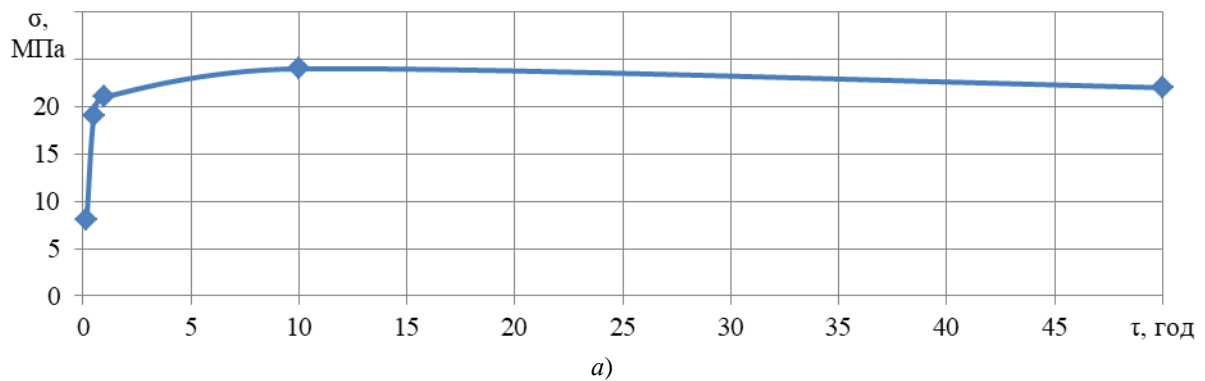


Рис. 2. Зміна порогу повзучості сплаву АК4 з часом термомеханічного навантаження:  
а – при  $t = 250^\circ\text{C}$ ; б – при  $t = 350^\circ\text{C}$

Встановлені дані щодо порогу повзучості незміцненого та зміцненого сплавів АЛ25 та АК4 подані рис. 3. Видно, що при гранично високих температурах, що дорівнюють 330–350°C, досліджувані матеріали практично не мають властивості зміцнення та мають суттєво малий поріг повзучості, значення якого наближається до 0. При віднос-

но менших температурах матеріалів, що є властивим для бічної поверхні поршня, початкова межа повзучості для розглянутих сплавів відрізняється несуттєво, але вона є меншою у 1,5–2 рази у порівнянні зі межею повзучості зміцнених матеріалів.

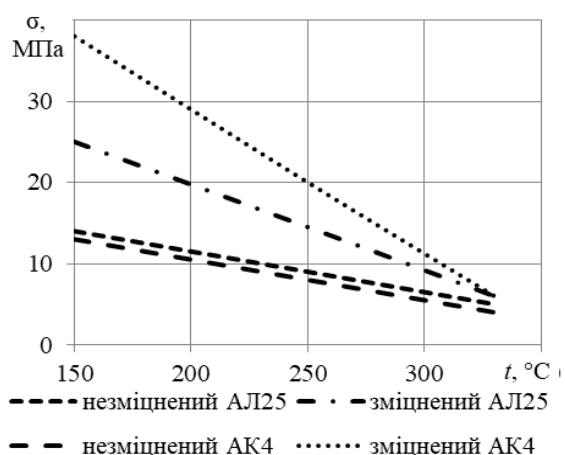


Рис. 3. Пороги повзучості незміцнених та зміцнених поршневих сплавів АЛ25 та АК4

Таким чином показана можлива суттєва зміна властивостей повзучості поршневих алюмінієвих сплавів в часі під дією температури і напруження, що необхідно враховувати при форсуванні двигунів.

На підставі отриманих даних відповідно до (6) нами встановлені залежності порогів повзучості від температури.

Вони мають вигляд:

– для незміцненого у часі матеріалу АЛ25  

$$\sigma_n = 21,5 - 0,05 \cdot t; \quad (10)$$

– для зміцненого у часі матеріалу АЛ25  

$$\sigma_n = 40,846 - 0,1055 \cdot t; \quad (11)$$

– для незміцненого у часі матеріалу АК4  

$$\sigma_n = 20,5 - 0,05 \cdot t; \quad (12)$$

– для зміцненого у часі матеріалу АК4  

$$\sigma_n = 64,615 - 0,1779 \cdot t. \quad (13)$$

Таким чином, на підставі поданих відмінностей порогу повзучості незміцненого та зміцненого матеріалів слід констатувати наступне. Для запобігання втрати надійності бічної поверхні поршня необхідно забезпечити в процесі проектування та форсування двигунів такий рівень температур і термічних напружень в означеній зоні, який не перевищує поріг повзучості незміцнених матеріалів (10), (12) в початковий період їх експлуатації.

В процесі подальшої експлуатації двигунів рівень температур і термічних напружень бічної поверхні поршня не повинен перевищувати поріг повзучості зміцненого матеріалу.

Таким чином, поставлені в роботі задачі вирішено. Подальший напрям робіт пов'язаний з визначенням рівнів навантаження бічної поверхні поршнів у порівнянні з даними щодо порогу повзучості їх матеріалів.

### Висновки

Під час розробки нових конструкцій або при модернізаціях, пов'язаних з форсуванням за потужністю існуючих конструкцій двигунів, можуть виникати випадки непрогнозованої втрати надійності бічної поверхні поршня. Це негативне явище характеризується зникненням зазору в частині парі тертя поршень – дзеркало циліндру. Важливо, що вказана критична ситуація може виникати за короткий термін навантаження двигуна і може мати місце навіть на перших годинах експериментальних випробувань перспективної конструкції.

Для поршневих алюмінієвих сплавів АК4 та АЛ25 встановлені відмінності порогу повзучості незміцненого та зміцненого в часі матеріалу, представлені відповідні залежності для розрахунку.

На прикладі аналізу зміни порогу повзучості в часі для поршневих алюмінієвих сплавів АК4 та АЛ25 запропоновано підхід до забезпечення надійності бічної поверхні поршня. Він полягає в обмеженні співвідношення рівнів температур і термічних напружень в означеній зоні, яке не перевищує поріг повзучості незміцнених матеріалів.

Запропонований підхід рекомендується до використання з урахуванням концепції гарантованого забезпечення надійності конструкцій.

Подальший напрям робіт пов'язаний з визначенням рівнів термічного навантаження бічної поверхні поршнів у порівнянні з даними щодо порогу повзучості їх матеріалів.

### Список літератури:

1. (2023) *Damage analysis of details of ICE, DFCDIESEL*. Available at: <http://www.dfcdiesel.com/warranty-info/failure-analysis>
2. *Piston damage – recognizing and rectifying*. MS Motorservice International GmbH –50 003 973-02 – EN –07/15 (012020), 92р.
3. Влияние химической неоднородности отливки поршня из сплава АК12М2МГН (АЛ25) на задиорообразование в цилиндропоршневой группе / Булгаков В. П., Чеботарев Ю. В., Рубан И. Н. // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. – 2016. – Вып. 5 (39). – с. 151-158 DOI:10.21821/2309-5180-2016-8-5-151-158.
4. Шатунно-поршневая группа двигателей для бронетанковой техники / С.В. Лыков // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2006. – №1. – С. 17-23.
5. Алехин С.А. Анализ температурного состояния корпусов составных поршней двухтактных дизелей специального назначения / С.А. Алехин, С.В. Лыков, В.А. Пылёв // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2013. – №1. – С. 33-36.
6. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалості міцності: монографія / В.О.Пильов. – Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ». – 2001. – 332 с.
7. *Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности*. Под ред. А. Ф. Шеховцова / Ф. И. Абрамчук, А. П. Марченко, Н. Ф. Разлейцев, Е. И. Третьяк, А. Ф. Шеховцов, Н. К. Шокотов. – Київ: Техніка, – 1992. – 272 с.
8. *Процессы в перспективных дизелях* / А.Ф. Ше-

ховцов, Ф.И. Абрамчук, В.И. Крутов, А.П. Марченко и др. / Под ред. А.Ф. Шеховцова. – Харьков: Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1992. – 352 с. 9. Creep behavior of in situ TiCP/2618 aluminum matrix composite / F. Ji, M.Z. Ma, A.J. Song, W.G. Zhang, H.T. Zong, S.X. Liang, Y. Osamu, R.P. Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009, – Volume 506, Issues 1–2, – P. 58-62. Doi: 10.1016/j.msea.2008.11.010 10. Марченко А.П. Аналіз причин задиру поршнів транспортних двотактних дизелів і можливі шляхи вирішення цієї проблеми / А.П. Марченко, В.О. Пильов, О.Ю. Лінков, С.В. Ликов // *Marine power plants and operation 2021 (MPP&O-2021): Матеріали 3-ї Міжнар. наук.-практ. мор. конф. каф. СЕУ і ТЕ навч.-наук. ін-ту мор. флоту Одес. нац. мор. ун-ту, квітень 2021 р., м. Одеса. – Харків. – 2021. – С. 202-206. 11. Лінков О.Ю. Методика визначення порогу повзучості матеріалу поршня для оцінки параметричної надійності його бічної поверхні / О.Ю. Лінков, В.В. Пильов, С.В. Ликов, В.О. Пильов // *Двигуни внутрішнього згорання*. – 2022. – № 2. – С. 56-61. Doi: 10.20998/0419-8719.2022.2.10. 12. Доценко В. Н. Методика проектування профіля поршня ДВС / В.Н. Доценко, А.В. Белозуб, И.Н. Москаленко // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – № 1. – С. 74-80. 13. Mechanical properties and microstructure of aluminum alloy 2618 with Al3(Sc, Zr) phases/ Kun Yu, Wenxian Li, Songrui Li, Jun Zhao // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – Volume 368, Issues 1–2, – P. 88-93. Doi: 10.1016/j.msea.2003.09.092. 14. Шпаковский В. В. Влияние корундовой поверхности поршней дизеля тепловоза ЧМЭ-3 на эксплуатационные характеристики цилиндра-поршневого группы / В. В. Шпаковский, В. В. Осейчук // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2007. – № 2. – С. 101-105. 15. Goritskiy Y.A. Numerical model of mechanical interaction between rough surfaces of tribosystem of the high forced diesel engine / Y.A. Goritskiy, K.V. Gavrilo, Y.V. Rozhdestvenskii, A.A. Doikin // *Procedia Engineering*. – 2015. – № 129. P. 518 – 525. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.052. 16. Zabala B. Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre / B. Zabala, A. Igartua, X. Fernández, C. Priestner et al. // *Experimental study and modelling, Tribology International*, – 2017.– №106. – P. 23-33. doi: 10.1016/j.triboint.2016.10.005. 17. Ma Z. A Model for Wear and Friction in Cylinder Liners and Piston Rings / Z. Ma, N.A. Henein, W. Bryzik / *Tribology Transactions*. – 2006. – №49(3). – P. 315-327. doi:10.1080/05698190600678630. 18. Марченко А.П. Концептуальні положення щодо забезпечення надійності поршнів форсованих дизелів протягом заданого ресурсу / А.П. Марченко, О.Ю. Лінков, В.В. Пильов, С.В. Ликов, Р. Ариан, В.О. Пильов // *Двигуни внутрішнього згорання*. – 2022. – №1. – С. 3–12. Doi: 10.20998/0419-8719.2022.1.01. 19. Марченко А.П. Порівняльна оцінка повзучості поршневих алюмінієвих сплавів / А.П. Марченко, В.О. Пильов, О.Ю. Лінков, С.В. Ликов // *Двигуни внутрішнього згорання*. – 2021. – № 2. – С. 43-49. doi: 10.20998/0419-8719.2021.2.06. 20. (2023) Database of Steel and Alloy. Available at: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=1407](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1407).*

#### **Bibliography (transliterated):**

1. (2023) Damage analysis of details of ICE, DFCDIESEL. Available at: <http://www.dfcdiesel.com/warranty-info/failure-analysis> 2. (2020) Piston damage – recognizing and rectifying. MS Motorservice International GmbH –50 003 973-02 – EN –07/15 (012020), 92p. 3. Bulgakov V.P., Chebotarev U.V., Ruban I.N. (2016) Influence of chemical inhomogeneity of piston casting from alloy AK12M2MGN

(AL25) on scuffing in the cylinder-piston group [Vliyanye khymycheskoi neodnorodnosti otlyvki porshnia yz splava AK12M2MHN (AL25) na zadyroobrazovanye v tsylyndroporshnevoi hruppe] *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov. No.5 (39)*. pp. 151-158 DOI:10.21821/2309-5180-2016-8-5-151-158 4. Lykov S.V. (2006) Connecting rod-piston engine group for armored vehicles [Shtatunno-porshnevaia hruppa dvyhatelei dlia bronetankovoi tekhniki] *Internal combustion engines. No. 1*, Pp. 17-23. 5. Alekhin S.A., Lykov S.V., Pylov V.O. (2013) Analysis of the thermal state of housings of composite pistons of two-stroke diesel engines for special purposes [Analiz temperaturnoho sostoiannya korpusov sostavnykh porshnei dvykhaktykh dyzelei spetsyalnoho naznacheniya] *Internal combustion engines. No. 1*, Pp. 33-36. 6. Pylov V.O. (2001) Automated design of pistons of high-speed diesels with the set level of duration of durability: the monograph [Avtomatyzovane proektuvannya porshniv shvydkokhidnykh dyzeliv iz zadanyim rivnem tryvalosti mitsnosti: monohrafiia] Kharkiv: NTU "KhPI" Publishing Center. 332p. 7. Shekhovtsov A.F. (1992) Modern diesels: improving fuel economy and long-term durability [Sovremennye dyzeli: povyshenye toplivnoi ekonomichnosti y dlytelnoi prochnosti] - Kiev: Technique. - 272 p. 8. Shekhovtsov A.F. (1992) Processes in perspective diesel engines [Protssy v perspektivnykh dyzeliakh] Kharkiv: Osнова. 352 p. 9. Ji F. (2009) Creep behavior of in situ TiCP/2618 aluminum matrix composite. F. Ji, M.Z. Ma, A.J. Song, W.G. Zhang, H.T. Zong, S.X. Liang, Y. Osamu, R.P. Liu. *Materials Science and Engineering: A. Volume 506, Issues 1–2*, – P. 58-62. Doi: 10.1016/j.msea.2008.11.010 10. Marchenko A.P., Pylyov V.O., Linkov O.U., Lykov S.V. (2021) Analysis of the causes of scuffing of pistons of transport two-stroke diesel engines and possible solutions to this problem [Analiz prychny zadyru porshniv transportnykh dvotaktykh dyzeliv i mozhyvi shliakhy vyrisheniya tsiiiey problemy] *Marine power plants and operation 2021 (MPP&O-2021)*. Pp. 202-206. 11. Linkov O.U., Pylyov V.V., Lykov S.V., Pylyov V.O. (2022) A method for determining the creep threshold of a piston material to evaluate the parametric reliability of its side surface [Metodyka vyznachenniya poruhu povzuchosti materialu porshnia dlia otsinky parametrychnoi nadiiosti yoho bichnoi povzkhni] *Internal combustion engines № 2*, pp 56-61. Doi: 10.20998/0419-8719.2022.2.10 12. Dotsenko V.N., Belogub A.V., Moskalenko I.N. (2015) Methodology for designing the profile of the piston of the internal combustion engine [Metodyka proektuvannya profilya porshnya DVS] *Vestnik dvigatelestroeniya. No. 1*, Pp. 74-80. 13. Kun Yu, Wenxian Li, Songrui Li, Jun Zhao (2004) Mechanical properties and microstructure of aluminum alloy 2618 with Al3(Sc, Zr) phases. *Materials Science and Engineering: A. Volume 368, Issues 1–2*, pp. 88-93. Doi: 10.1016/j.msea.2003.09.092 14. Shpakovsky V.V., Oseychuk V.V. (2007) Influence of the corundum surface of diesel locomotive pistons ChME-3 on the operational characteristics of the cylinder-piston group [Vliyanye korundovoi poverkhnosti porshnei dyzelia teplovoza ChME-3 na ekspluatatsyonnye kharakterystyky tsylyndro-porshnevoi hruppy] *Internal combustion engines. No. 2*. pp. 101-105. 15. Goritskiy Y., Gavrilo K.V., Rozhdestvenskii Y.V., Doikin A.A. (2015) "A numerical model of mechanical interaction between rough surfaces of tribosystem of the high forced diesel engine", *Procedia Engineering. № 129*. Pp. 518 – 525. Doi:10.1016/j.proeng.2015.12.052. 16. Zabala B., Igartua A., Fernández X., Priestner C. et al. (2017) "Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre" *Experimental study and modelling, Tribology International, No.106*. pp. 23-33. doi: 10.1016/j.triboint.2016.10.005 17. Z. Ma, N.A. Henein, W. Bryzik (2006) "A Model for Wear and Friction in Cylinder Liners and Piston Rings", *Tribology Transactions. №49(3)*. – Pp. 315-327. Doi:10.1080/05698190600678630. 18. Marchenko A.P., Linkov O.U., Pylyov V.V., Lykov S.V., Aryan R., Pylyov V.O. (2022) Conceptual issues on ensuring the reliability of a forced diesel piston during a given resource [Kontseptualni polozhennya shchodo zabezpechennya nadiynosti porshniv forsovanih dizeliv protyagom zadanogo resursu] *Internal combustion engines. No. 1*, Pp. 3-12. Doi: 10.20998/0419-8719.2022.1.01. 19. Marchenko A.P., Pylyov V.O., Linkov O.U., Lykov S.V. (2021) Ensuring reliable operation of the forced internal combustion engine piston [Porivnyalna otsinka povzuchosti porshnevih alyuminievih splaviv] *Internal combustion engines. No. 2*, pp. 43–49. Doi: 10.20998/0419-8719.2021.2.06. 20. (2023) Database of Steel and Alloy. Available at: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=1407](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1407)

Надійшла до редакції 28.06.2023 р.

**Пильов Володимир Олександрович** – доктор техн. наук, професор, професор кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «ХПІ», Харків, Україна, e-mail: volodymyr.pylov@khpі.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3185-1604.

**Ліньков Олег Юрійович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Oleh.Linkov@khpі.edu.ua, orcid.org/0000-0002-2780-2412.

**Ликов Сергій Валентинович** – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: sergsowar@gmail.com, orcid.org/0000-0003-3234-5970.

## COMPARISON OF THE CREEP THRESHOLD OF PISTON ALUMINUM ALLOYS WITH TIME

*V. O. Pylyov, O. U. Linkov, S. V. Lykov*

The direction of work associated with the increase and improvement of efficiency and environmental performance while maintaining the trend of increasing specific power, leads to an increase in the thermal stress of the combustion chamber parts. This leads to cases of loss of parametric reliability of the side surface of the pistons both during experimental studies and during initial operation. Such cases are characterized by the appearance of rubbing in the area of the finger hole. These facts indicate the high relevance of additional studies of the properties of aluminum piston alloys, especially at the initial stage of thermal loads of structures. The aim of the work is to obtain comparative information about the creep threshold of materials, the excess of which causes deformation of the piston side surface in time and, accordingly, the occurrence of an unpredictable decrease in the gap in the friction pair piston-cylinder. This work presents a fundamental approach, in accordance with which the creep threshold of materials in the process of their hardening is determined. The creep process of the material at the first two stages is taken into account. The creep threshold of AL25 and AK4 alloys in their initially non-hardened and hardened with time state has been studied. Dependences between the level of temperatures and thermal stresses, which determine the creep thresholds of the studied piston aluminum alloys, are established. It is shown that the hardening of the studied alloys occurs during the first 10 hours of thermal loading. It has been established that the creep limit of non-hardened AL25 and AK4 alloys is 1.5-2 times less than the creep limit of hardened materials. An approach is proposed to ensure the parametric reliability of the piston side surface, which consists in the impossibility of thermal loading of the material by a level exceeding the creep threshold of unhardened materials. The presented approach is recommended to be used taking into account the concept of guaranteed reliability of structures at the initial stages of their design. A detailed presentation of the main material of the study is presented on the example of the AK4 alloy. The presented approach to the determination of the time-varying creep threshold can be used for arbitrary materials.

**Keywords:** piston; side surface of the piston; thermal load; piston aluminum alloys; creep of the material; creep limit



*О. М. Кондратенко, К. Р. Умеренкова, А. М. Левтеров, О. П. Строков, В. Ю. Колосков*

## УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛЬТЕРНАТИВНИХ МОТОРНИХ ПАЛИВ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОЇ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ТЕОРІЇ ЗБУРЕНЬ. ЧАСТИНА 1

У дослідженні, метою якого було вдосконалення математичного апарату на основі модифікованої термодинамічної теорії збурень для описання теплофізичних характеристик альтернативних моторних палив зі сферичною конфігурацією взаємодіючих структурних елементів та довільного агрегатного стану, послідовно виконано побудову формальної схеми модифікованої теорії збурень, надано описання основних характеристик модельної системи, описано параметри потенціалів взаємодії компонентів альтернативного палива, отримано розрахунком теплофізичні властивості компонентів альтернативного палива, здійснено розрахунок термодинамічних властивостей компонентів альтернативного палива, проаналізовано та проілюстровано у виді ізотерм діаграм фазової рівноваги та таблиць даних із результатами розрахунку термодинамічних характеристик альтернативного палива та їх аналіз. Об'єктом дослідження є теплофізичні характеристики традиційних, альтернативних та сумішевих моторних палив, що перебувають у рідинному чи газоподібному агрегатному стані. Предметом дослідження є математичний апарат на основі модифікованої теорії збурень для описання теплофізичних характеристик моторних палив. Наукова новизна результатів дослідження полягає в тому, що вдосконалено математичний апарат на основі модифікованої термодинамічної теорії збурень для вичерпного описання всіх теплофізичних характеристик моторних палив будь-якого генезису, тобто традиційних, альтернативних та сумішевих, які перебувають як у рідинному, так і в газоподібному агрегатному стані, у частині зменшення часу розрахунку та зниження похибки отримання теплофізичних характеристик порівняно з довідниковими та експериментальними даними. Практичне значення результатів дослідження, полягає у тому, що вдосконалений математичний апарат придатний для надання точної інформації до складу набору вихідних даних у дослідженнях щодо виробництва, зберігання, перевезення, дистрибуції, використання моторних палив будь-якого генезису, які перебувають у різних агрегатних станах, а також прогнозування перебігу та результатів процесів забруднення атмосфери газоподібними продуктами повного й неповного горіння компонентів палив у камерах згорання теплових машин різного типу.

**Ключові слова:** теплофізичні властивості; традиційні моторні палива; альтернативні моторні палива; математична модель; технології захисту навколишнього середовища; екологічна безпека; енергоустановки; поршневі двигуни внутрішнього згорання.

### Актуальність та постановка проблеми дослідження

У сучасному світі наявні декілька екологічних проблем, першоджерелами яких є енергоустановки (ЕУ) з поршневими двигунами внутрішнього згорання (ПДВЗ), серед яких особливого значення з огляду на тренди розвитку ринку енергоносіїв набуває вичерпання природних ресурсів – сировини для продукування моторних палив [1]. Ця проблема призводить до активного розвитку альтернативної енергетики, у тому числі й продукування альтернативних видів моторного палива [2], що тягне за собою цілий комплекс супутніх задач науково-технічного плану, зокрема щодо критеріального оцінювання паливно-екологічної ефективності такої конвертації [3–6], адаптації ПДВЗ до конвертації його на споживання альтернативного чи сумішевого моторного палива та дослідження показників роботи ПДВЗ на таких паливах [7] тощо. Окремим самостійним напрямом досліджень і невід'ємною складовою зазначених науково-дослідних робіт є визначення властивостей різного виду моторних палив, зокрема теплофізичних [8–11]. Результати визначення таких характеристик придатні також і для використання в дослідженнях

щодо забезпечення екологічної, пожежної та вибухової безпеки процесів переробки сировини на моторне паливо та його зберігання [12–14]. Такий напрям досліджень дозволяє відкласти запланований у країнах Європейського Союзу перехід на повне заміщення ЕУ з ПДВЗ на автотранспортні засоби з гібридним приводом рушія чи електромобілі [15].

З огляду на вищенаведені міркування можна зробити однозначний висновок про те, що обрана тема дослідження, результати якого викладені у статті, є актуальною, особливо з погляду перспективи розв'язання задач повоєнного відновлення економіки нашої країни.

**Метою дослідження** є вдосконалення математичного апарату на основі модифікованої теорії збурень для описання теплофізичних характеристик альтернативних моторних палив зі сферичною конфігурацією взаємодіючих структурних елементів та довільного агрегатного стану.

**Проблемою дослідження** є скорочення часу та підвищення точності отримання теплофізичних характеристик моторних палив у порівнянні з довідниковими та експериментальними даними.

**Об'єктом дослідження** є теплофізичні харак-

теристики альтернативних моторних палив зі сферичною конфігурацією взаємодіючих структурних елементів, що перебувають у рідинному чи газоподібному агрегатному стані.

**Предметом дослідження** є математичний апарат на основі модифікованої теорії збурень для описання теплофізичних характеристик моторних палив.

**Методи дослідження.** Аналіз науково-технічної, довідникової, нормативної, патентної літератури, модифікована схема термодинамічної теорії збурень, аналіз експериментальних даних, метод найменших квадратів.

**Задачами дослідження** є такі:

1. Побудова формальної схеми модифікованої теорії збурень.
2. Визначення основних характеристик моделі системи.
3. Визначення параметрів потенціалів взаємодії компонентів альтернативного палива.
4. Визначення теплофізичних властивостей компонентів альтернативного палива.
5. Визначення методики розрахунку термодинамічних властивостей компонентів альтернативного палива.
6. Отримання результатів розрахунку термодинамічних характеристик альтернативного палива та їх аналіз.

У цій, першій, частині дослідження наведено результати розв'язання задач №№ 1–3. Результати розв'язання задач №№ 4–6 виведені у наступній, другій, частині дослідження.

### **Побудова формальної схеми модифікованої теорії збурень**

Експериментальні методи дослідження термодинаміки фазових переходів є найбільш достовірними джерелами інформації. Однак економічний чинник, пов'язаний з неспівставними матеріальними витратами й витратами часу на експериментальні та теоретичні дослідження теплофізичних процесів, посилює вагу методів і засобів математичного моделювання. У статті описано розроблену методику визначення параметрів рівноважного термодинамічного процесу – фазових рівноваг (ФР) та теплофізичних властивостей альтернативних палив (АП).

Для дослідження ФР у робочих тілах вуглеводневого типу застосований метод статистичної термодинаміки. Теплофізичні властивості визначені з застосуванням методів термодинамічної теорії збурень (ТЗ). Багатоконпонентні вуглеводневі суміші розглядаються як сукупність часток різних розмірів, взаємодія між якими описується стандартним потенціалом Леннарда-Джонса (ЛД-потенціал).

Для опису фазових рівноваг створена математична модель, формалізована у вигляді сукупності алгебраїчних рівнянь, що описують рівновагу рідкої й парової фаз. У класичній термодинаміці стан системи описується за допомогою невеликої кількості параметрів, доступних безпосередньому вимірюванню. Між термодинамічними параметрами системи існує зв'язок, що встановлюється рівняннями стану, які виводяться емпірично. Макроопис стану, що застосовується в класичній термодинаміці, залишає поза розглядом молекулярну будову системи [9].

Реальне існування атомів і молекул, з яких побудовані докільні тіла, дозволяє застосовувати, поряд з макроописом стану, мікроскопічний опис, що характеризує систему за допомогою величин, що визначають стан кожної частинки. У випадку термодинамічної рівноваги властивості досліджуваних систем із часом мають невеликі коливання довкола середніх значень – флуктуації. При цьому параметри системи обчислюються як середні за часом. Статистико-механічний підхід полягає в заміні обчислення середніх за часом величин для реальної системи обчисленнями статистичних середніх за мікростанами всіх частинок. Постулат про рівність часових та статистичних середніх величин розглядається як основний постулат статистичної фізики. Моделювання фазових рівноваг у багатоконпонентних молекулярних сумішах, стан яких визначається заданими значеннями температури, об'єму і складу, засновано на визначенні термодинамічного потенціалу – вільної енергії Гельмгольца  $F$  [9–11].

Величина вільної енергії  $F$  може бути записана у вигляді такого фундаментального виразу  $F = -kT \ln z$ . Статистична сума  $z = \sum_n e^{-E_n/kT}$ , де

$e^{-E_n/kT}$  – розподіл Гіббса у квантовій статистиці, що у класичній статистиці записується у вигляді інтеграла за фазовим простором  $z = \int e^{-H(p,q)/kT} dH$ .

Поводження термодинамічної системи описується гамільтоніаном  $H(p,q)$ , що являє собою суму кінетичної та потенційної енергії всіх частинок системи, де  $p_k$  – імпульс частинки;  $m$  – маса частинки;  $q$  – координати:

$$H(p, q) = \sum_{k=1}^N \frac{p_k^2}{2m_k} + U_N(q_1, q_2, \dots, q_n).$$

Інтеграл за всім фазовим простором може бути поділений на два інтеграли за імпульсами і координатами. Інтегрування по імпульсах дає відому з кінетичної теорії газів середню кінетичну енергію поступального руху ідеального газу  $E = 3/2RT$ . Основні труднощі статистичної механіки полягають у знаходженні конфігураційного інтеграла

$$z_Q = \frac{1}{N!} \int e^{-U N(q)/kT} dq. \text{ Щоб записати класичний}$$

розподіл Гіббса, необхідно знати залежність потенційної енергії взаємодії частинок від відстаней.

Фундаментальне значення при моделюванні фазових станів як моноречовин, так і сумішей має визначення природи й характеру міжмолекулярної взаємодії. Вона визначає відмінності реальної системи від ідеального газу. Один із головних внесків у сумарну взаємодію між молекулами дає дисперсійна взаємодія, що пояснює кореляцію в миттєвих розподілах електронної щільності молекул. Наближена теорія Лондона [16] пропонує для потенціалу дисперсійних сил притягання вираз, що пов'язує його поляризування  $\alpha$  з частотами коливань молекул  $\nu$

$$u_{\alpha\beta} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{h\nu_{\alpha}\nu_{\beta}}{\nu_{\alpha} + \nu_{\beta}} \cdot \frac{\alpha_{\alpha}\alpha_{\beta}}{r_{\alpha\beta}^6}, \quad (1)$$

або для однорідних молекул

$$u = -\frac{3}{4} \cdot h\nu_{\alpha} \cdot \frac{\alpha^2}{r^6}. \quad (2)$$

Більш строга теорія, що використовує метод збурень, надає можливість отримати якісно аналогічний вираз, де  $E$  – емпіричні постійні, що наближено дорівнюють енергії іонізації:

$$u_{\alpha\beta} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{E_{\alpha}E_{\beta}}{E_{\alpha} + E_{\beta}} \cdot \frac{\alpha_{\alpha}\alpha_{\beta}}{r_{\alpha\beta}^6}, \quad (3)$$

Вирази (1–3) враховують взаємодії тільки миттєвих диполів, або, що те ж саме, тільки перші члени розкладання в методі збурень. З урахуванням членів більш високих порядків енергію дисперсійних взаємодій подають у вигляді ряду

$$u_{\text{дисп}} = -C_6 r^{-6} - C_8 r^{-8} - C_{10} r^{-10} + \dots, \quad (4)$$

де перший член пов'язують із взаємодіями миттєвих диполів, другий – із взаємодіями миттєвих диполя та квадрупольного й т.д. Коефіцієнти ряду (4) називають дисперсійними постійними.

Потенційна енергія міжмолекулярної взаємодії  $u$  залежить від конфігурації системи, тобто від дислокації молекул у просторі. При вивченні щільних систем постає питання про вид цієї функції для сукупності великої кількості частинок, однак основні відомості про міжмолекулярні взаємодії стосуються ізольованих пар частинок.

Молекулярно-статистична теорія зазвичай оперує модельними потенціалами, що містять невелику кількість параметрів. Розповсюдженими потенціалами в молекулярній теорії газових і рідких сумішей є:

1) моделі, у яких молекули виглядають як тверді тіла, найпростіша з них – потенціал твердих

сфер (ТС), де  $d_{\alpha\beta} = 0,5(d_{\alpha\alpha} + d_{\beta\beta})$ ;  $d_{\alpha\alpha}$  – діаметр ТС  $\alpha$ -го компонента суміші:

$$u_{\alpha\beta}^{(0)}(r) = \begin{cases} \infty, & r < d_{\alpha\beta}; \\ 0, & r > d_{\alpha\beta}, \end{cases} \quad (5)$$

2) потенціали для частинок з «м'якою серцевиною», більш реалістично відбивають залежність енергії відштовхування від відстані, чим моделі ТС. До них належить ступеневий потенціал ( $n$ - $m$ ), а саме  $u = ar^{-n} - br^{-m}$ . Тут перший член означає відштовхування, другий притягування. Найпоширенішим видом ступеневого потенціалу є (12–6) або традиційний потенціал Леннарда-Джонса, що відноситься до числа кращих ефективних модельних потенціалів. Різні форми запису його:

$$u = ar^{-12} - br^{-6}; \quad (6)$$

$$u = \varepsilon[(r_0/r)^{12} - 2(r_0/r)^6]; \quad (7)$$

$$u_{\alpha\beta}(r) = \varepsilon_{\alpha\beta} \varphi(r/\sigma_{\alpha\beta}) = 4\varepsilon_{\alpha\beta} \left[ \left( \frac{\sigma_{\alpha\beta}}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma_{\alpha\beta}}{r} \right)^6 \right], \quad (8)$$

де  $u_{\alpha\beta}(\sigma_{\alpha\beta}) = 0$ ;  $\varepsilon_{\alpha\beta}$  – глибина потенційної ями

взаємодії молекул  $\alpha$ -го й  $\beta$ -го компонентів.

У дипольному наближенні параметр  $b$  потенціалу (6) збігається з дисперсійною константою  $C_6$  (4).

При розв'язанні задач у статистичній термодинаміці одним із найбільш ефективних є метод теорії збурень. Формальна математична схема цього методу представляє термодинамічні характеристики досліджуваних систем у вигляді рядів за параметрами, що характеризують відмінності реального (вихідного) потенціалу  $u(r)$  від потенціалу  $u_0(r)$  системи нульового наближення. У якості останнього звичайно використовується модель ТС. У цьому випадку метод має потужне підґрунтя у вигляді чисельних експериментів і точних аналітичних виразів для властивостей флюїду ТС.

Дослідження властивостей систем зі стандартними модельними потенціалами міжчастинкової взаємодії [17,18] стимулюється декількома обставинами. По-перше, перспективні моделі опису теплофізичних характеристик речовин апробуються спочатку, як правило, на таких модельних системах. Джерелом «експериментальних» даних при цьому є результати, одержані чисельними (комп'ютерними) методами – Монте-Карло й молекулярної динаміки. Перевага такої апробації полягає в тому, що вона визначає дійсні похибки теорії, тобто похибки, не пов'язані з довільним вибором потенціалів взаємодії (що має місце надалі при теоретичному описі властивостей реальних газів і рідин). По-друге, наявність результатів з властивостей модельних систем дозволяє використати такі системи як нульове наближення для реальних рідин (методи ТЗ).

Значні успіхи в розвитку статистичної механі-

ки модельної системи ТС обумовили виникнення методів ТЗ, що стали надійним інструментом теоретичного дослідження структури й термодинамічних властивостей газів, рідин і їхніх сумішей (розчинів). Аналітичні вираження для властивостей базисних систем, застосовуваних як нульові наближення для різних речовин і їхніх різних станів, забезпечують ефективний пошук фізично обґрунтованих залежностей для реальних молекулярних систем. Важливо й те, що застосування методу ТЗ має потужний фундамент у вигляді чисельних експериментів для базисних систем.

Основою методу ТЗ у статистичній термодинаміці щільних молекулярних систем є той факт, що їхні структурні властивості визначаються, головним чином, відштовхувальною взаємодією [17,18]. Таким чином є можливим урахувати термодинамічні ефекти сил притягання шляхом статистичного усереднення енергії притягання  $u_1(r)$ , розглянутої як збурення, по станах базисної системи з відштовхувальною взаємодією.

Обмежимося розглядом ізотропних вихідних потенціалів  $u(r)$  та введемо функцію  $u(r;\lambda) = u_0(r) + \lambda u_1(r)$ , де  $u_0(r)$  – базисний потенціал,  $u_1(r)$  – збурення. Вільна енергія вихідної системи може бути представлена у вигляді  $\lambda$ -розкладання [19]. При використанні ТС-потенціала в якості  $u_0(r)$  необхідно додатково врахувати його відмінності від вихідного потенціалу у відштовхувальній області в рамках схеми ТЗ і тим самим вирішити питання про величину основного параметра  $d$ . Оберемо  $u_1(r)$  у вигляді

$$u_1(r) = \varepsilon \varphi_1(r) = \begin{cases} 0, & r < a(T^*); \\ u(r), & r > a(T^*), \end{cases} \quad (9)$$

за передумови, що розбивка вихідного потенціалу  $u(r)$  на базисний (з м'яким відштовхуванням) і збурювання відбувається в «плаваючій» точці  $a(T^*)$  [4]. Вибір (9) у такій схемі модифікованої теорії збурень (МТЗ) покликаний забезпечити температурну незалежність діаметра ТС  $d$  і тим самим потенціалу  $u_0(r/d)$ . У якості вихідного потенціалу використаємо реалістичний потенціал Леннард-Джонса  $u(r) = \varepsilon \varphi(r) = 4 \varepsilon [(\sigma/r)^{12} + (\sigma/r)^6]$ .

Завдання полягає в переході від базисного потенціалу до потенціалу ТС як нульового наближення. Уведемо функцію  $u(r; a, d, \alpha, \gamma)$ , що переходить при  $\alpha = \gamma = 0$  в потенціал ТС діаметра  $d$  і при  $\alpha = \gamma = 1$  – у вихідний ЛД-потенціал  $u(r)$ . Розкладаючи вільну енергію системи  $f_{\alpha, \gamma}$  з потенціалом

$u(r; a, d, \alpha, \gamma)$  у ряд за ступенями  $\alpha$  (параметру зворотного нахилу) і  $\gamma$  (параметру глибини потенціалу), отримаємо формулу (10), де  $f_0$  та  $g_0(r)$  – вільна енергія й радіальна функція розподілу (РФР) системи ТС:

$$\beta f_{\alpha, \gamma} = \beta f_0 + (1/2)\gamma\beta\rho \int u_1(r)g_0(r)dr - 2\pi\alpha\rho d^2 g_0(d) \left[ d - \int_0^{a(T^*)} [1 - e^{-\beta u(r)}] dr \right] + \dots, \quad (10)$$

Схема МТЗ при обиранні діаметра (11) що анулює член першого порядку за  $\alpha$ , забезпечує швидку збіжність ряду (10) у широких інтервалах  $\rho^*$  та  $T^*$ . Другий і наступні порядки за  $\alpha$  можна знехтувати, зберігаючи лише розкладання за  $\gamma$ .

$$d = \xi\sigma = \int_0^{a(T^*)} [1 - e^{-\varphi(r)/T^*}] dr, \quad (11)$$

Подання  $u_1(r)$  у вигляді (9) з «плаваючою» точкою  $a$  [20] дозволяє використати систему ТС постійного діаметра  $d = \xi\sigma$  як нульове наближення. Розглядаючи (11) як рівняння, що визначає залежність  $a(T^*)$ , уявімо  $a(T_\sigma^*) = \sigma$  для деякої температури  $T_\sigma^*$ . Для визначеності будемо спочатку розглядати область  $T^* < 5$  ( $T_\sigma^* = 5$  дає  $\xi = 0,9274$ ), власне кажучи обмежену зверху температурами термічного розкладання (піролізу) граничних вуглеводнів, що входять до складу АП.

Питома (що припадає на одну частинку) вільна енергія вихідної системи  $f \equiv f_{1,1}$  в термодинамічному стані  $(\rho^*, T^*)$  з урахуванням членів другого порядку (МТЗ-2) має вигляд [5]:

$$\beta f = \beta f_0 + \rho^* I_1 / T^* + \rho^* I_2 / T^{*2}, \quad (12)$$

де  $\beta = 1/k$ ;  $f_0$  – вільна енергія системи ТС;  $\rho^* = \rho\sigma^3$ ; – зведена щільність числа часток.

Груповий інтеграл першого порядку

$$I_1 = (1/2) \int \varphi_1(x) g_0(x) dx = 2\pi \int_a^* \varphi(x) g_0(x) x^2 dx, x = r/\sigma. \quad (13)$$

Груповий інтеграл другого порядку виражається через групові інтеграли  $J_n$  від багаточасткових функцій розподілу системи нульового наближення [5]:

$$I_2 = -(1/4)J_1 - (1/2)\rho^* J_2 - (1/8)\rho^{*2} J_3. \quad (14)$$

**Визначення основних характеристик модельної системи**



Для опису рівняння стану (РС) і фазових рівноваг рідина-пара ЛД-системи, що моделює реальні системи – компоненти АП, обмежимося першим порядком теорії збурень (МТЗ-1), що забезпечує достатню точність для похідних енергії (12) за об'ємом (щільністю). Рівняння (11) для  $a(T^*)$  розв'язано чисельними методами, на підставі чого протабульовані інтеграли  $I_1$  та  $J_n$  у широких інтервалах станів – для щільності  $0 \leq \rho^* \leq 1$ , а для температури  $0,3 \leq T^* \leq 5$ . Для практичних розрахунків інтеграл  $I_1$  може бути апроксимований виразом (15). Значення коефіцієнтів  $a_{ik}$ , отримані методом найменших квадратів, наведені в табл. 1 (максимальна похибка опису  $I_1$  поліномом (15) – 0,05 %).

$$I_1 = I_1(\rho^*, T^*) = \sum_{i=0}^3 \sum_{k=0}^3 a_{ik} \rho^{*i} / T^*. \quad (15)$$

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів  $a_{ik}$  у виразі (15)

$T^*$	$i$	$a_{ik}$			
		$k=0$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
0,3...0,696	0	-0,8498	-9,2400	3,5832	-0,4612
	1	2,1493	3,5820	1,1501	0,1560
	2	-8,5320	-0,4782	-1,0255	0,0972
	3	6,5743	-0,2250	0,7208	-0,0659
0,696...5,0	0	-5,5896	-0,2681	-1,4458	0,2115
	1	-2,7573	8,9226	-6,2375	2,7819
	2	0,8321	-7,5416	2,1787	-1,3682
	3	1,5895	3,0889	-0,2246	0,2152

Для вільної енергії системи ТС, що входить до (12), можна застосувати рівняння Карнахана-Старлінга, що є одним із найкращих простих аналітичних виразів для  $f_0$

$$\beta f_0 = (4 - 3\eta)\eta(1 - \eta)^{-2} + \beta f^{id}, \quad (16)$$

де  $\eta = (\pi/6)\rho d^3 = (\pi/6)\xi^3 \rho^*$  – параметр упакування;  $\beta f^{id} = \psi(T^*) + \ln \rho^*$  – ідеально-газова частина.

У загальному випадку  $\psi = \beta h_0 - s_0 - 1$ , функції  $h_0(T)$ ,  $s_0(T)$  для конкретних речовин наведені в літературі [21–28]; тут індекс «0» означає застосування ідеально-газових функцій (що дорівнюють ентальпії  $h$  й ентропії  $s$  однієї молекули).

Згідно з (12)–(16) вільну енергію в рамках МТЗ-1 наведемо у вигляді, зручному для розрахунків рівняння стану й рівноваги фаз рідина-пара

$$\beta f = \psi(T^*) + \ln \rho^* + \eta \frac{4 - 3\eta}{(1 - \eta)^2} + \frac{\rho^*}{T^*} (A_0 + A_1 \rho^* + A_2 \rho^{*2} + A_3 \rho^{*3}), \quad (17)$$

де  $A_i(T^*) = a_{i0} + a_{i1}/T^* + a_{i2}/T^{*2} + a_{i3}/T^{*3}$ .

Застосуємо схему МТЗ-1 для опису рівноваги фаз рідина-пара чистих компонентів. Ізотерми  $f(v)$  (17) за низьких температур мають характерний ван-

дер-ваальсівський (S-подібний) вигляд, що свідчить про наявність фазового переходу. Рівновага фаз забезпечується рівністю тисків  $p$  та хімічних потенціалів  $\mu$  співіснуючих фаз

$$\begin{cases} p(\rho_L^*, T^*) = p(\rho_V^*, T^*); \\ \beta \mu(\rho_L^*, T^*) = \beta \mu(\rho_V^*, T^*), \end{cases} \quad (18)$$

де  $\rho_L^*$  й  $\rho_V^*$  – зведені щільності L- і V-фаз;  $\beta \mu = G/NkT$ ;  $G$  – енергія Гібса.

Детальні розрахунки виконані шляхом чисельного розв'язання системи рівнянь. При цьому хімічний потенціал обрано у вигляді, визначеному в задачі 1. Отримані згідно (18) значення щільності  $\rho_L^*$  рідкої фази ЛД-системи апроксимовані поліномом з середньою похибкою менш 0,02 %:

$$\bar{\delta} = \sum_{i=1}^N |\delta(T_i)| / N. \quad (19)$$

Значення коефіцієнтів  $\rho_n$  наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів рівняння (19)

$T^*$	$\rho_0$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$
0,3...0,7	1,15649	-0,60220	0,62217	-0,79500	0,33333
0,7...1,1	0,27876	3,18016	-5,58546	3,88417	-1,05417

### Визначення параметрів потенціалів взаємодії компонентів альтернативного палива

Моделльні парні потенціали, що мають просту аналітичну форму й відбивають основні особливості міжмолекулярної взаємодії для широкого класу речовин, відіграють основну роль при статистико-механічному описі молекулярних систем. Велике поширення наразі одержав застосований нами ЛД-потенціал, що враховує за допомогою ефективних значень параметрів внески в макроскопічні властивості, обумовлені багаточастковими взаємодіями, неізотропністю силових полів, квантовими й іншими ефектами. Параметри потенціалів визначаються за різними експериментальними даними – про другий віріальний коефіцієнт, в'язкість, рівноважні термодинамічні властивості (щільність, внутрішня енергія). При описі теплофізичних характеристик компонентів АП та їх сумішей у рідкому й щільно-газовому станах необхідна наявність погоджених експериментальних даних про опорні властивості як для чистих компонентів (у тому числі для маловивчених рідких важких вуглеводнів), так і для їх сумішей у якнайбільш широких температурних інтервалах. Такі дані є для щільності рідини  $D_L(T)$  на лінії рівноваги рідина-пара [19,20]. На підставі отриманої залежності (19) ортобаричної щільності рідкої фази ЛД-системи параметри  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  компонентів АП можуть бути визначені стандартним методом найменших квадратів – мінімізацією величини

$S$  за параметрами  $E, \tilde{D}$

$$S(E, \tilde{D}) = \sum_{i=1}^{ND} \left[ D_L(T_i) / \tilde{D} - \sum_{k=0}^4 \rho_k \cdot (T_i/E)^k \right]^2, \quad (20)$$

де  $E, \tilde{D}, \tilde{P}$  – параметри приведення для температури, масової щільності й тиску, пов'язані з  $\varepsilon, \sigma$  за допомогою виразів

$$E = \varepsilon/k, \quad \tilde{D} = M/(N_A \sigma^3), \quad \tilde{P} = RE\tilde{D}, \quad (21)$$

де  $N_D$  – кількість опорних точок (температур);  $\rho_k$  – коефіцієнти рівняння (19);  $N_A = n_A \cdot 10^{27}$  – число Авогадро ( $n_A = 0,6022045$ ), 1/кмоль;  $\sigma = \sigma_A \cdot 10^{-10}$ , м;  $R = R_0/M$ , кДж/(кг·К);  $R_0 = 8,31441$  – універсальна газова константа, кДж/(кмоль·К);  $M$  – молярна маса компонента, кг/кмоль.

Для параметрів  $\tilde{D}$  і  $\tilde{P}$  маємо:

$$\tilde{D} = 10^3/Q; \tilde{P} = RE/Q, \quad (22)$$

де  $Q = n_A \sigma_A^3/M$ .

Отримані згідно (20) значення  $\varepsilon, \sigma$  та інших параметрів компонентів АП наведені в табл. 3. При цьому використані дані про  $D_L$ : [19,20] для вуглеводнів  $C_i$  та  $N_2$  ( $C_i \equiv C_{iH_{2i+2}}$ ), [23] для  $CO_2$ , [30] для  $H_2S, H_2O$  та  $C_6H_6$ , [24,31] для  $O_2$ , [31] для  $CO$  [29]. Величина  $N_D$  при цьому коливається від 6 до 8 в інтервалах від потрійної до критичної точок.

Таблиця 3. Параметри компонентів АП

Речовина	$M$ , кг/кмоль	$E=\varepsilon/k$ , К	$\sigma \cdot 10^{10}$ , м	$\tilde{D}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\tilde{P}$ , МПа
CH <sub>4</sub>	16,0430	150,86	3,7424	508,27	39,739
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,0701	244,32	4,2263	661,47	44,685
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,0972	288,35	4,6623	722,55	39,283
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,1243	327,98	5,0281	759,28	35,622
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,1243	318,84	5,0538	747,76	34,104
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,151	362,01	5,3535	780,88	32,576
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,151	347,12	5,3457	784,30	31,373
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86,172	398,23	5,6503	793,24	30,479
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100,198	416,85	5,9059	807,72	27,939
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,224	433,61	6,1407	819,14	25,854
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128,25	449,34	6,3642	826,20	24,068
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142,276	465,52	6,5749	831,22	22,613
N <sub>2</sub>	28,0134	97,55	3,5996	997,38	28,877
CO <sub>2</sub>	44,011	228,36	3,5641	1614,24	69,640
H <sub>2</sub> S	34,08	318,62	3,7581	1066,20	82,878
O <sub>2</sub>	31,9988	120,84	3,3806	1375,33	43,183
H <sub>2</sub>	2,016	37,00	2,9280	133,36	20,351
H <sub>2</sub> O	18,015	547,62	3,3467	798,07	201,705
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,114	426,26	4,9963	1040,39	47,203

### Висновки

Висновки за результатами дослідження, а також їх наукову новизну та практичне значення буде наведено у другій, завершальній, частині.

### References:

1. Кондратенко О.М. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці

критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія / О.М. Кондратенко, В.Ю. Колосков, Ю.Ф. Деркач, С.А. Коваленко. – Х.: Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2020. – 522 с. 2. Парсаданов І.В. Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію: монографія. – Х.: Центр НТУ «ХПІ», 2003. – 244 с. 3. Kondratenko O.M. Determination of reference values of complex fuel and ecological criterion as the separate independent factor of ecological safety / O.M. Kondratenko, V.A. Andronov, V.Yu. Koloskov, O.O. Tkachenko, Ye.V. Kapinos // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. – № 1. – pp. 75–85. – DOI: 10.20998/0419-8719.2021.1.10. 4. Kondratenko O. Development and Use of the Index of Particulate Matter Filter Efficiency in Environmental Protection Technology for Diesel-Generator with Consumption of Biofuels / O. Kondratenko, V. Andronov, V. Koloskov, O. Stokov // 2021 IEEE KhPI Week on Advanced Technology: Conference Proceedings (13–17 September 2021, NTU «KhPI», Kharkiv). – Kharkiv: NTU «KhPI», 2021. – pp. 239–244. – DOI: 10.1109/KhPI Week53812.2021.9570034. 5. Kondratenko O. Criteria based assessment of efficiency of conversion of reciprocating ICE of hybrid vehicle on consumption of biofuels / O. Kondratenko, V. Koloskov, S. Kovalenko, Y. Derkach, O. Stokov // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020: Conference Proceedings (05–10 October 2020, NTU «KhPI», Kharkiv). – Kharkiv: NTU «KhPI», 2020. – pp. 177–182. – DOI: 10.1109/KhPIWeek 51551.2020.9250118. 6. Kondratenko O. Criteria based assessment of the level of ecological safety of exploitation of electric generating power plant that consumes biofuels / O. Kondratenko, I. Mishchenko, G. Chernobay, Yu. Derkach, Ya. Suchikova // 2018 IEEE 3rd International International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS–2018): Book of Papers (10–14 September, 2018, NTU «KhPI», Kharkiv). – Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. – pp. 57–1–57-6. – DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559570. 7. Marchenko A. Research of energy effectiveness and exhaust emissions of direct injection diesel engine running on RME and its blends with DO / A. Marchenko, I. Parsadanov, A. Prokhorenko et al. // Proceedings of the 12th International Conference Transport Means. – 2008. – pp. 312–319. 8. Levterov A. Thermodynamic properties of fatty acid esters in some biodiesel fuels / A. Levterov, A. Levterov. Functional Materials. – 2018. – Vol. 25, No. 2. – pp. 308–312. 9. Умеренкова К.Р. Перспективи використання альтернативних палив і методика визначення їх теплофізичних характеристик: монографія / К.Р. Умеренкова, В.Г. Борисенко // – Х.: НУЦЗУ, 2022. – 92 с. 10. Умеренкова К.Р. Визначення теплофізичних властивостей альтернативних моторних палив як аспект екологізації двигунів внутрішнього згоряння / К.Р. Умеренкова, А.М. Левтеров, О.М. Кондратенко // Проблеми техногенно-екологічної безпеки в сфері цивільного захисту: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (08–09 грудня 2022 р., НУЦЗУ, Харків). – Х.: НУЦЗУ, 2022. – С. 162–165. 11. Umerenkova K.R., Borysenko V.G., Kondratenko O.M., Lievtierov A.M. Determination of thermophysical properties of alternative motor fuels as an aspect of environmental aspect of internal combustion engines / Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (19 травня 2023 р., НУЦЗУ, Харків). – Х.: НУЦЗУ, 2023. с. 450–451. 12. Ablieieva I. Scientific and methodological approaches to assessing the safety of oil production complexes as potentially dangerous objects / I.

- Ablieieva, L. Plyatsuk, I. Trunova, O. Burla, B. Krasulia // *Technogenic and ecological safety*. – 2022. – 11(1/2022) – pp. 8–17. – DOI: 10.52363/2522-1892.2022.1.2.
13. Суханов В.П. *Переработка нефти*. 2-е изд. перераб. и доп. / В.П. Суханов. – М.: Высшая школа, 1979. – 335 с.
14. Kondratenko O. Determination of emissions of vapour of flammable technical liquids from enterprise for their storing and distribution and rational adjustments of their breathing valves / O. Kondratenko, V. Koloskov, S. Kovalenko, Yu. Derkach, O. Botsmanovska, N. Podolyako // *Technogenic and ecological safety* – 2020. – № 8(2/2020). – pp. 17–31. – DOI: 10.5281/zenodo.4300753.
15. Марченко А.П. *Движуні внутрішнього згоряння та навколишнє середовище* / А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, О.П. Строчков // *Движуні внутрішнього згоряння*. – 2022. – № 2. – С. 3–12. – DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.01.
16. Гирифельдер Дж. *Молекулярная теория газов и жидкостей* / Дж. Гирифельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд // – М.: Изд-во иностр. л-ры, 1961. – 930 с.
17. Barker J.A. *What is liquid? Understanding the states of matter* / J.A. Barker, D. Henderson // *Rev. Mod. Phys.* – 1976. – Vol. 48, N 4. – P. 587–671.
18. Крокстон К. *Физика жидкого состояния* / К. Крокстон // – М.: Мир, 1978. – 400 с.
19. Маринин В.С. *Теплофизика альтернативных энергоносителей* / В.С. Маринин. – Х.: Форт, 1999. – 212 с.
20. Маринин В.С. *О возможной модификации метода теории возмущений в статистической физике жидкостей* / В.С. Маринин, В.В. Паишков // *Укр. физ. журн.* – 1976. – Т. 21, № 10. – С. 1695–1700.
21. Гуревич Г.Р. *Справочная помощь по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей* / Г.Р. Гуревич, А.И. Брусиловский. – М.: Надра, 1984. – 264 с.
22. Рид Р. *Свойства газов и жидкостей* / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
23. Алтунин В.В. *Теплофизические свойства двуокиси углерода* / В.В. Алтунин. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 546 с.
24. Сычев В.В. *Термодинамические свойства кислорода* / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 306 с.
25. Сычев В.В. *Термодинамические свойства азота* / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 352 с.
26. Сычев В.В. *Термодинамические свойства метана* / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, В.А. Загорученко и др. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 348 с.
27. Сычев В.В. *Термодинамические свойства этана* / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, В.А. Загорученко и др. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 304 с.
28. Сычев В.В. *Термодинамические свойства пропана* / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 268 с.
29. Orrit J.E., Laupretre J.M. *Calculational method for the density of LNG* / J.E. Orrit, J.M. Laupretre // *Adv. Cry. Eng.* – 1978. – Vol.23. – P. 566–579.
30. Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей* / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
31. Малков М.П. *Справочник по физико-техническим основам криогеники* / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
- monografiya], Publ. Style-Izdat (FOP Brovin O.V.), Kharkiv, 522 p.
2. Parsadanov, I.V. (2003), *Improving the quality and competitive-ness of diesel engines based on complex fuel and ecological criteria: monograph* [Pidvishchennya yakosti i konkurentospromozhnosti dizeliv na osnovi kompleksnogo palivno-ekologichnogo kriteriyu: monografiya], Publ. NTU «KhPI», Kharkiv, 244 p.
3. Kondratenko, O.M., Andronov, V.A., Koloskov, V.Yu., Tkachenko, O.O., Kapinos, Ye.V. (2021), «Determination of reference values of complex fuel and ecological criterion as the separate independent factor of ecological safety». *Internal combustion engines*, 2021, № 1, pp. 75–85, DOI: 10.20998/0419-8719.2021.1.10.
4. Kondratenko, O., Andronov, V., Koloskov, V., Strokov, O. (2021), «Development and Use of the Index of Particulate Matter Filter Efficiency in Environmental Protection Technology for Diesel-Generator with Consumption of Biofuels», 2021 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (13–17 September 2021): Conference Proceedings, Publ. NTU «KhPI», Kharkiv, 2021, pp. 239–244, DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570034.
5. Kondratenko, O., Mishchenko, I., Chernobay, G., Derkach, Yu., Suchikova, Ya. (2018), «Criteria based assessment of the level of ecological safety of exploitation of electric generating power plant that consumes biofuels», 2018 IEEE 3rd International International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS–2018) (10–14 September 2018): Book of Papers, Publ. NTU «KhPI», Kharkiv, pp. 185–189, DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559570.
6. Kondratenko, O., Koloskov, V., Strokov, O., Kovalenko, S., Derkach, Yu. (2020), «Criteria based assessment of efficiency of conversion of reciprocating ICE of hybrid vehicle on consumption of biofuels», 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (05 – 10 October 2020): Conference Proceedings, Publ. NTU «KhPI», Kharkiv, pp. 177–182, DOI: 10.1109/KhPI Week51551. 2020.9250118.
7. Marchenko, A., Parsadanov, I., Prokhorenko, A. et al. (2008), «Research of energy effectiveness and exhaust emissions of direct injection diesel engine running on RME and its blends with DO», *Proceedings of the 12th International Conference Transport Means*, pp. 312–319.
8. Levterov, A., Levterov, A. (2018), «Thermodynamic properties of fatty acid esters in some biodiesel fuels», *Functional Materials*, Vol. 25, No. 2, pp. 308–312.
9. Umerenkova K.R., Borysenko V.G. (2022) *Prospects for the use of alternative fuels and methods of determining their thermophysical characteristics: monograph* [Perspektyvy vykorystannia alternatyvnykh palyv i metodyka vyznachennia yikh teplofizychnykh kharakterystyk: monografija]. Kharkiv, NUCDU, 92 p.
10. Umerenkova K.R., Lievtierov A.M., Kondratenko O.M. (2022) «Determination of thermophysical properties of alternative motor fuels as an aspect of greening of internal combustion engines» [Vyznachennia teplofizychnykh vlastyvostei alternatyvnykh motornykh palyv yak aspekt ekolohizatsii dvyhunyv vnutrishnoho zghoriannia], *Problems of technogenic and ecological safety in the field of civil protection: Materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference* (December 08–09, 2022, NUCDU, Kharkiv) Kharkiv, NUCDU, pp. 162–165.
11. Umerenkova K.R., Borysenko V.G., Kondratenko O.M., Lievtierov A.M. (2023) «Determination of thermophysical properties of alternative motor fuels as an aspect of environmental aspect of internal combustion engines», *Problems of Emergency Situations: Materials of the International Scientific and Practical Conference*, (19 May 2023, NUCDU, Kharkiv), Kharkiv, NUCDU, pp. 450–451.
12. Ablieieva, I., Plyatsuk, L., Trunova, I., Burla, O., Krasulia, B. (2022), «Scientific and methodological approaches to assessing the safety of oil production complexes as potentially dangerous objects», *Technogenic and ecological safety*, 2022, 11 (1/2022), pp. 8–17, DOI: 10.52363/2522-1892.2022.1.2.
13. Surhanov, V.P. (1979), *Oil refining*. 2nd ed. revised and added. [Pererabotka nefi. 2 izd. ispr. i dop.], Publ. Vysshaya shkola, Moscow. 335 p.
14. Kondratenko, O., Koloskov, V., Kovalenko, S., Derkach, Yu., Botsmanovska, O., Podolyako, N. (2020), *Determination of emissions of vapour of flammable technical liquids from enterprise for their storing and distribution and rational adjustments of their breathing valves*, *Technogenic and ecological safety*, 8(2/2020), pp. 17–31, DOI: 10.5281/zenodo.4300753.
15. Marchenko A.P., Parsadanov I.V., Strokov O.P. (2022) «Internal combustion engines and the environment» [Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia ta navkolyshnie seredovyshe], *Internal Combustion Engines*, № 2, pp. 3–12, DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.01.
16. Girshpelder J., Kertiss Ch.,

### **Bibliography (translated):**

1. Kondratenko, O.M., Koloskov, V.Yu., Derkach, Yu.F., Kovalenko, S.A. (2020), *Physical and mathematical modeling of processes in particulate filters in the practice of criteria for assessing the level of environmental safety: monograph* [Fizichne i matematichne modelyuvannya procesiv u fil'trah tverdih chastinok u praktici kriterial'nogo ocinyuvannya rivnya ekologichnoї bezpeki :

Bird R. (1961) *Molecular theory of gases and liquids* [Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey], Moscow, Publ. Izd-vo Inostr. Lit., 930 p. 17. Barker J.A., Henderson D. (1976) «What is liquid? Understanding the states of matter», *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 48, N 4, pp 587–671. 18. Krockstone K. (1978) *Physics of the liquid state* [Fizika zhidkogo sostoyaniya], Moscow, Mir, 400 p. 19. Marinin V.S. (1999) *Thermophysics of alternative energy carriers* [Teplofizika alternativnykh energonositeley], Kharkiv, Fort, 212 p. 20. Marinin V.S., Pashkov V.V. (1976) «On a possible modification of the perturbation theory method in the statistical physics of fluids» [O vozmozhnoy modifikatsii metoda teorii vozmuscheniy v statisticheskoy fizike zhidkostey], *Ukr. Phys. Journal*, Vol. 21, № 10, pp. 1695–1700. 21. Gurevich G.R., Brusilovskii A.I. (1984) *Reference help for calculating the phase state and properties of gas-condensate mixtures* [Spravochnaya pomoshch po raschetu fazovogo sostoyaniya i svoystv gazokondensatnykh smesey], Moscow, Nedra, 264 p. 22. Rid R., Prausnitz J., Sherwood T. (1982) *Properties of gases and liquids* [Svoystva gazov i zhidkostey], Leningrad, Khimia, 592 c. 23. Altunin V.V. (1975) *Thermophysical properties of carbon dioxide* [Teplofizicheskie svoystva dyuokisi ugleroda], Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 546 p. 24. Sychev V.V., Wasserman A.A., Kozlov A.D. and etc. (1981) *Thermodynamic properties of oxygen*

[Termodinamicheskie svoystva kisloroda] Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 306 p. 25. Sychev V.V., Wasserman A.A., Kozlov A.D. and etc. (1977) *Thermodynamic properties of nitrogen* [Termodinamicheskie svoystva azota] Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 352 p. 26. Sychev V.V., Wasserman A.A., Zagoruchenko V.A. and etc. (1979) *Thermodynamic properties of methane* [Termodinamicheskie svoystva metana] Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 348 p. 27. Sychev V.V., Wasserman A.A., Zagoruchenko V.A. and etc. (1982) *Thermodynamic properties of ethane* [Termodinamicheskie svoystva etana] Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 304 p. 28. Sychev V.V., Wasserman A.A., Kozlov A.D. and etc. (1989) *Thermodynamic properties of propane* [Termodinamicheskie svoystva propana] Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 268 p. 29. Orrit J.E., Laupretre J.M. (1978) «Calculational method for the density of LNG», *Adv. Cry. Eng.*, Vol.23, pp. 566–579. 30. Vargaftik N.B. (1972) *Handbook on thermophysical properties of gases and liquids* [Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey], Moscow, Nauka, 720 p. 31. Malkov M.P., Danilov I.B., Zeldovich A.G., Fradkov A.B. (1985) *Handbook of physical and technical foundations of cryogenics* [Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki], Moscow, Energoatomizdat, 432 p.

Received to the editorial office 25.05.2023

**Kondratenko Olexandr Mykolayovych** – D.Sc.(Eng.), Associate Professor, Professor of Department of Applied Mechanics and Environment Protection Technologies of Faculty of Technogenic and Ecological Safety, National University of Civil Protection of Ukraine of SES of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kongratenkoom2016@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9687-0454, Scopus ID: 57144373800, ResearcherID: D-7346-2018, Google Scholar ID: 0iIbJMcAAAAJ.

**Umerenkova Ksenia Rostyslavivna** – Cand.Sc.(Eng.), Associate Professor, Lecturer of Department of Physical and Mathematical Disciplines of Faculty of Technogenic and Ecological Safety, National University of Civil Protection of Ukraine of SES of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kruukr1946@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3654-4814, Scopus ID: 16318085300, Google Scholar ID: 0JdUAAAAJ.

**Liev tierov Anton Mykhailivych** – Cand.Sc.(Eng.), Senior Researcher, Senior Researcher of Department of Hydrogen Energetics of A.M. Pidgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: antmix1947@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5308-1375, Scopus ID: 55795527600, Google Scholar ID: 7tyvcX0AAAAJ.

**Strokov Olexandr Petrovych** – D.Sc.(Eng.), Professor, Professor of Department of Automobile Transport and Transport Technologies of the Kremenchuk Branch of the Classical Private University, Kremenchuk, Ukraine, Full Member of the Engineering Academy of Ukraine, Member of the National Union of Journalists of Ukraine, e-mail: ataman1946@ukr.net, Scopus ID: 57144561500.

**Koloskov Volodymyr Yuriyovych** – Cand.Sc.(Eng.), Associate Professor, Head of Department of Applied Mechanics and Environment Protection Technologies of Faculty of Technogenic and Ecological Safety, National University of Civil Protection of Ukraine of SES of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: koloskov\_v@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9844-1845, Scopus ID: 57203686820, Google Scholar ID: gP6w7a8AAAAJ

## IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ALTERNATIVE MOTOR FUELS BASED ON THE MODIFIED THERMODYNAMIC THEORY OF DISTURBANCE. PART 1

*Kondratenko O. M., Umerenkova K. R., Liev tierov A. M., Strokov O. P., Koloskov V. Yu.*

In the study, the purpose of which was to improve the mathematical apparatus based on the modified thermodynamic perturbation theory for describing the thermophysical characteristics of alternative motor fuels with a spherical configuration of interacting structural elements and an arbitrary aggregate state, the formal scheme of the modified perturbation theory was consistently constructed, the main characteristics of the model system were described, the parameters of the interaction potentials of the alternative fuel components were described, the thermophysical properties of the alternative fuel components were obtained by calculation, the thermodynamic properties of the alternative fuel components were calculated, the results of the calculation of the thermodynamic characteristics of the alternative fuel were analyzed and illustrated in the form of isotherm of phase equilibrium diagrams and data tables. The object of the study is the thermophysical characteristics of traditional, alternative and mixed motor fuels in a liquid or gaseous aggregate state. The subject of the study is a mathematical apparatus based on the modified thermodynamic perturbation theory for describing the thermophysical characteristics of motor fuels. The scientific novelty of the study results lies in the fact that a mathematical apparatus based on a modified perturbation theory has been improved for a comprehensive description of all thermophysical characteristics of motor fuels of any genesis, i.e. traditional, alternative and mixed, which are in both liquid and gaseous aggregate states in terms of reducing the calculation time and reducing the error of obtaining thermophysical characteristics in comparison with reference and experimental data. The practical significance of the research results is that the improved mathematical apparatus is marketable for providing accurate information to the composition of the initial data set in research on the production, storage, transportation, distribution, use of motor fuels of any genesis, which are in different states, as well as forecasting the course and results of processes of atmospheric pollution by gaseous products of complete and incomplete combustion of fuel components in combustion chambers of various types of heat engines.

**Key words:** thermophysical properties; traditional motor fuels; alternative motor fuels; mathematical model; environmental protection technologies; ecological safety; power plants; reciprocating internal combustion engines

*М.Є. Рибальченко, Є.В. Білоусов, А.П. Марченко, В.П. Савчук, В.П. Будко*

## ОБРОБКА ІНДИКАТОРНИХ ДІАГРАМ У ЗАДАЧАХ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ПРОФІЛІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

*При експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння широко застосовується процедура індиціювання робочого процесу на визначених режимах експлуатації з подальшим аналізом індикаторних діаграм та порівнянням отриманих результатів з еталонними, отриманими під час заводських випробувань двигуна. Однак загальна тенденція на світовому флоті до зменшення комерційних швидкостей суден з одного боку та використання жорстких графіків руху з іншого боку призвели до того, що в більшості випадків неможливо провести індиціювання за процедурами, прописаними в правилах технічної експлуатації двигунів. Таким чином, обслуговуючим персоналом втрачається можливість об'єктивно оцінювати поточний технічний стан двигуна та визначити необхідний перелік профілактичних заходів з технічного обслуговування та ремонту, що, безумовно, впливає на ефективність роботи двигунів та безпеку судноплавства загалом. Одним з ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування цифрових профілів робочих процесів двигуна, які характеризують їх перебіг у всьому діапазоні робочих режимів. За допомогою цифрового профілю можливо отримати розрахункову еталонну індикаторну діаграму, яка може бути використана для порівняння з отриманою під час планового індиціювання двигуна на будь-якому режимі його роботи. Основою для побудови цифрових профілів можуть слугувати результати приймально-здавальних стендових випробувань двигуна заводом-виробником. Однак враховуючи досить тривалий термін експлуатації суднових двигунів, протоколи випробувань зазвичай існують тільки в растровому форматі, що значно ускладнює обробку наведених у них результатів індиціювання, яке, частіш за все, виконувалося з застосуванням механічних індикаторів. Для використання цієї інформації для побудови цифрових профілів авторами була запропонована методика обробки таких індикаторних діаграм, викладена в попередніх статтях. Однак, ефективність формування цифрових профілів суттєво залежить від якості базових діаграм, по яких ці профілі будуються. Процедурі обробки таких діаграм присвячена дана стаття.*

**Ключові слова:** суднові малообертові двигуни; індикаторна діаграма; режим роботи; монотонна апроксимація.

### Вступ

Обробка індикаторних діаграм та визначення за її результатами основних показників робочого процесу суднового двигуна внутрішнього згоряння є стандартною процедурою, яка відповідно до правил технічної експлуатації виконується машинним персоналом не рідше одного разу на місяць [1, 2]. Ця інформація переважно використовується для визначення поточного технічного стану двигуна, його енергетичних показників та правильності налаштувань основних механізмів та агрегатів [3]. Зазвичай для аналізу характеру перебігу робочого процесу отримані під час експлуатації індикаторні діаграми та результати їх обробки порівнюють з еталонними діаграмами, знятими під час випробувань двигуна на стенді заводу-виробника [1, 3].

Однак сучасні тенденції до зменшення комерційних швидкостей суден з метою економії палива та запровадження судноплавними компаніями жорстких графіків руху суттєво зменшують ефективність контролю за технічним станом двигунів шляхом їх індиціювання [4]. Це пов'язано з тим, що оцінка технічного стану двигунів ґрунтується на порівнянні отриманих під час експлуатації індикаторних діаграм з еталонними, отриманими під час стендових випробувань на фіксованих режимах їх роботи, які зазвичай відповідають максимальній експлуатаційній потужності (Maximal Continuous Rating – MCR) [2]. Але в реальних умовах індицію-

вання вимушено проводять на режимах, відмінних від MCR.

Розв'язання задачі отримання еталонних індикаторних діаграм для всього діапазону режимів роботи може бути здійснено шляхом застосування цифрових профілів робочих процесів, оснований на обробці результатів стендових випробувань [5]. Побудовані по базовим кривим цифрові профілі дозволяють отримати розрахункову еталонну індикаторну діаграму для будь-якого режиму [6]. Однак процедура відтворення базових кривих за результатами стендових випробувань потребує розв'язання декількох проміжних задач [7], одна з яких – обробка результатів цифрових масивів, отриманих шляхом оцифрування растрових зображень індикаторних діаграм, наведених у протоколах стендових випробувань [8].

### Актуальність дослідження

Життєвий цикл суднових двигунів, зазвичай становить 25...40 років [9]. Стрімкий розвиток технічних засобів контролю робочого процесу протягом цього періоду призводить до того, що засоби індиціювання та методи обробки індикаторних діаграм зазнають суттєвих змін. Наприклад, на рис. 1 наведено результати індиціювання робочого процесу головного малообертового двигуна 8K90MC-C, стендові випробування якого відбулися 21.03.2008 року [8]. Індиціювання виконувалося за допомогою механічного індикатору типу Maihak



[10] (рис. 2 а), а його результати в протоколі випробувань (Shop Test Report) подані в растровому форматі, що ускладнює їх використання як еталонних. У теперішній час двигун знаходиться в експлуатації [11], а планові індиціювання виконуються за допомогою електронного переносного діагностичного комплексу періодичної дії типу DPI (рис. 2 б), який формує електронний протокол випробувань [12].

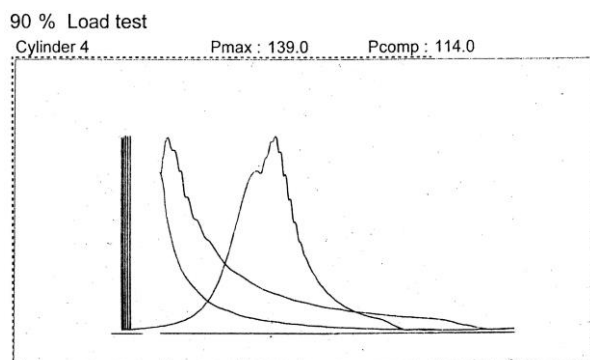


Рис. 1. Приклад растрового зображення індикаторних діаграм з протоколу стендових випробувань дизеля MAN 8K90MC-C (ML2046), побудованого концерном DOOSAN (стендові випробування якого відбулися 21.03.2008 року [8])

Таким чином, для використання результатів стендових випробувань як еталонних необхідна ефективна методика переведення інформації з растрового в цифровий формат.



Рис. 2. Механічний (а) індикатор робочого процесу малооборотних дизелів (Type 50) та електронний індикатор типу DPI (б) виробництва фірми Friedrich Leutert GmbH & Co. KG [10, 12]

На сучасному ринку програмних продуктів представлено значну кількість програм, призначених для формування числових масивів за графічними зображеннями різних залежностей. До таких програмних продуктів відносяться: Get Data Graph Digitizer, Chart Reader, Graph, Post Graph Editor та інші, багато з яких знаходяться у вільному корис-

туванні. Авторами при розв'язанні задач переведення індикаторних діаграм з растрового в цифровий формат використовувалася програма Graph 2 Digit, яка належить до free software [13].

Враховуючи низьку якість самих растрових зображень (рис. 1), сформований по них числовий масив відрізняється суттєвою неоднорідністю, яка ускладнює подальший аналіз, особливо у випадку необхідності визначення динамічних показників (рис. 3, 4, 5).

Притаманна значна неоднорідність даних і системам електронного контролю за параметрами робочого процесу, що добре видно на рис. 4, де наведено результати індиціювання двигуна за допомогою електронної системи РМІ фірми MAN.

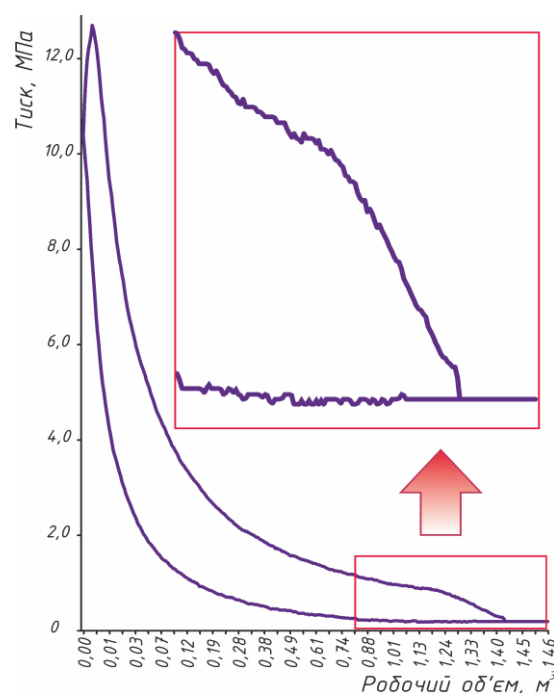


Рис. 3. Індикаторна діаграма робочого процесу в  $pV$ -координатах, побудована за результатами оцифрування растрового зображення

Саме така задача виникає при необхідності аналізу динамічності робочого процесу. Особливо це актуально для газодизельних малооборотних двотактних двигунів низького тиску [14, 15], робочий процес яких відбувається майже на межі детонації. Ці двигуни останнім часом отримують поширення на торговельному флоті, а особливості організації робочого процесу в них можуть призводити до значного «зашумлення» індикаторних діаграм, навіть отриманих електронними засобами моніторингу. Остання обставина суттєво ускладнює роботу вбудованих систем контролю за параметрами роботи та технічним станом елементів циліндропоршневої групи двигуна [16, 17]. Таким чином, ме-

тоди усунення неоднорідності сигналу в подальшому можуть знайти застосування в системах управління такими двигунами [18].

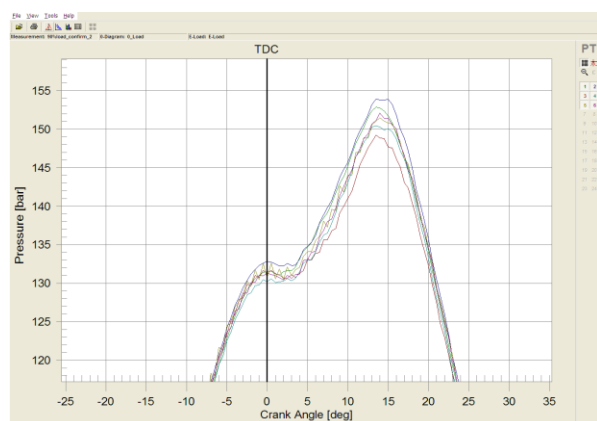


Рис. 4. Верхні частини індикаторних діаграм робочих процесів у рф-координатах, побудовані за результатами індичіювання з використанням електронної системи РМІ фірми MAN

Для усунення неоднорідності експериментальних даних при розв'язанні задач побудови цифрових профілів робочого процесу авторами було застосовано попередню обробку отриманих цифрових масивів з використанням методу монотонної апроксимації експериментальної залежності.

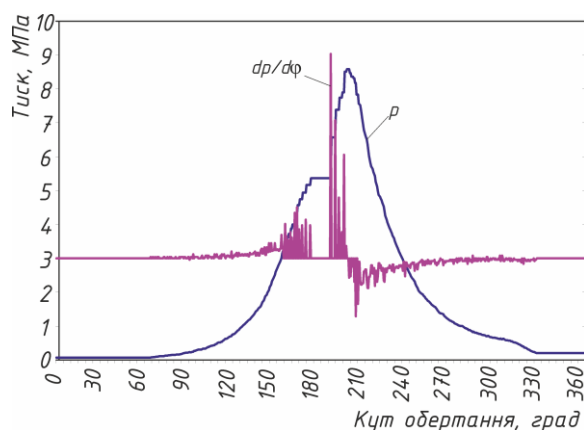


Рис. 5. Необроблена індикаторна діаграма, перебувана у рф-координати, та побудована по ній діаграма швидкості зростання тиску

### Шляхи розв'язання проблеми

Під терміном «монотонна апроксимація» звичай розуміють два різних види апроксимації.

У першому випадку розглядається задача побудови апроксимуючої функції, яка зберігає проміжки монотонності експериментальної залежності. В другому випадку апроксимуюча функція повинна зберігати заданий характер монотонності, незважаючи на його можливі порушення в експериментальній залежності.

В подальшому під «монотонною апроксимацією» буде розумітися саме другий випадок.

Теоретичні моделі процесів, які відбуваються в циліндрах ДВЗ свідчать про те, що залежність тиску в робочому циліндрі від кута повороту колінчастого валу:

- на лінії стискування є зростаючою (неспадною) залежністю;
- на лінії розширення є спадною (незростаючою) залежністю.

Більш «м'які» визначення (неспадна та незростаюча залежності) означають можливу наявність горизонтальних ділянок графіку тиску.

Проте експериментальні індикаторні діаграми можуть містити локальні ділянки, на яких відповідна монотонність порушується. Тому при аналітичному описі таких діаграм необхідно розв'язувати задачу монотонної апроксимації в її другому розумінні. Для її розв'язання авторами використовується метод, запропонований у роботі [19].

Розробники методу відзначають п'ять його ключових особливостей, які відрізняють його від інших методів розв'язання вказаної задачі апроксимації.

Виділимо з них тільки ті, які мають безпосереднє значення для досліджуваної задачі.

Метод дозволяє будувати апроксимуючу функцію, яка зберігає вказаний характер монотонності, а також характер опуклості графіка функції на заданому проміжку.

Метод забезпечує перетворення обмежень для першої та другої похідної апроксимуючої функції у прості обмеження в просторі параметрів цієї функції. Оцінка похибки апроксимації може здійснюватися за допомогою обраного дослідником критерію. Метод однаково добре зарекомендував себе як при обробці вибірок великих об'ємів, так і при обробці розріджених експериментальних даних.

До апроксимуючої функції  $f(x)$  висувається вимога неперервної диференційованості  $r$  разів на відрізку  $[a; b]$ , тобто  $f(x) \in C^r [a; b]$ , де  $r \geq 1$ .

В роботі [19] формулюються такі два обмеження щодо монотонності апроксимуючої функції та її опуклості (монотонності першого та другого порядку).

**H<sub>1</sub>.** Апроксимуюча функція  $f(x)$  задовольняє обмеженню монотонності першого порядку, якщо:

$$\gamma_1 f'(x) \geq 0, \quad x \in X, \quad (1)$$

де  $\gamma_1 \in \mathbb{R}$ .

**H<sub>2</sub>.** Апроксимуюча функція  $f(x)$  задовольняє обмеженню монотонності другого порядку, якщо:

$$\gamma_2 f''(x) \geq 0, \quad x \in X, \quad (2)$$

де  $\gamma_2 \in \mathbb{R}$ .

Апроксимуюча функція  $f(x)$  одночасно задово-

льняє обмеженням монотонності  $H_1$  і  $H_2$ , якщо:

$$\min(\gamma_1 f'(x); \gamma_2 f''(x)) \geq 0, \quad x \in X, \quad (3)$$

для заданих  $\gamma = (\gamma_1; \gamma_2)$ .

Якщо параметри  $\gamma_1$  або  $\gamma_2$  (або обидва одночасно) дорівнюють нулю, відповідна вимога до монотонності апроксимуючої функції не висувається.

Не втрачаючи загальності, можна вважати, що  $\gamma_1$  та  $\gamma_2$  набувають значень  $\{-1, 0, 1\}$ .

У розглянутій задачі експериментальні дані доступні у вигляді  $n$  спостережень, що містять шум:

$$\begin{aligned} z &= \{(x_j; y_j)\}_{j=1}^n; \\ z_j &= (x_j; y_j); \\ y_j &= f(x_j) + \epsilon_j; \end{aligned}$$

де  $\epsilon_j$  – реалізації нормально розподіленої випадкової величини з нульовим математичним сподіванням, яка моделює шум.

Якщо  $s(x; \theta)$  – сім'я функцій, які використовуються для апроксимації, кожна з яких має свій індексований вектор параметрів  $\theta$  зі скінченно вимірного простору параметрів  $\Theta$ .

Похибка апроксимації оцінюється за нормою:

$$e(\theta|z) = \max_{j=1:n} |\omega_j (s(x_j; \theta) - y_j)|, \quad (4)$$

де  $\omega_j$  – задані додатні ваги.

Оцінка похибки апроксимації (4) представляє собою максимальне абсолютне зважене відхилення апроксимуючої функції  $s(x; \theta)$  від спостережених значень  $y_j$  в точках  $x_j$ .

Множина  $\Theta_\gamma \subset \Theta$ , яка містить параметри для функцій  $s(x; \theta)$ , які задовольняють умовам монотонності  $H_1$  і  $H_2$  при заданих значеннях  $\gamma = (\gamma_1; \gamma_2)$ , визначає область монотонності.

За вибіркою  $z$  при будь-якій похибці апроксимації  $\epsilon \geq 0$  можна визначити множину  $\hat{\Theta}_{\gamma, \epsilon} \subset \Theta_\gamma$ , яка містить всі вектори параметрів  $\theta$ , для яких максимальне абсолютне відхилення задовольняє:

$$e(\theta|z) \leq \epsilon.$$

Нижня границя  $\epsilon$  не може бути меншою, ніж мінімум похибки, який досягається, тобто не може бути меншою, ніж значення, при якому множина  $\hat{\Theta}_{\gamma, \epsilon}$  є не пустою. Верхня границя  $\epsilon$  задається дослідником.

Ключова ідея методу з роботи [19] полягає в тому, щоб вибрати таку сім'ю апроксимуючих функцій  $s(x; \theta)$ , щоб обмеження (3) можна було перетворити в еквівалентні обмеження параметрів таким чином, щоб:

$$\min(\gamma_1 f'(x); \gamma_2 f''(x)) \geq 0 \Leftrightarrow \theta \in \Theta_\gamma \quad (5)$$

Такою властивістю володіє множина апроксимуючих функцій, яка є лінійним простором поліноміальних сплайнів степеня  $k \geq 1$ , заданих на відрі-

зку  $[a; b]$  з упорядкованим вектором вузлів  $(v_0; v_1; \dots; v_{k+1})$ , де  $a=v_0 < v_1 < \dots < v_{k+1}=b$ .

Для довільного індексу  $i \in \{-k; \dots; k\}$  позначимо за  $N_{i, k+1}; [a; b] \Rightarrow R$  нормалізований В-сплайн степеня  $k$  з вузлами  $(v_i; v_{i+1}; \dots; v_{i+k+1})$ , при чому будемо вважати, що:

$$\begin{aligned} v_{-k} &= v_{-k+1} = \dots = v_{-1} = v_0 = a; \\ b &= v_{k+1} = v_{k+2} = \dots = v_{k+k} = v_{k+k+1}. \end{aligned}$$

Кожний сплайн  $s$  із вказаного вище простору може бути єдиним чином поданий у вигляді лінійної комбінації В-сплайнів:

$$s(x; \theta) = N_{k+1}(x) \cdot \theta \quad (6)$$

для всіх  $x \in [a; b]$ , де  $\theta = (\theta_{-k}; \theta_{-k+1}; \dots; \theta_k)^T \in R^{k+k+1}$  – вектор коефіцієнтів В-сплайна;  $N_{k+1} = (N_{-k, k+1}; N_{-k+1, k+1}; \dots; N_{k, k+1})$  – вектор-рядок, який складається з  $k+k+1$  В-сплайнів, які є базисом вказаного простору сплайнів.

У роботі [19] за результатами досліджень сформульовано такий наслідок.

Нехай  $k \in \{1; 2\}$ ,  $v$  – заданий вектор вузлів;  $s$  – сплайн, заданий у вигляді (6). Для будь-якого вектора  $\gamma = (\gamma_1; \gamma_2)$  існує:

$$\begin{aligned} \min(\gamma_1 s^{(1)}(x); \gamma_2 s^{(2)}(x)) \geq 0 &\Leftrightarrow \\ \theta \in \Theta_\gamma &= \{\theta \in R^{k+k+1} : M_\gamma \theta \geq 0\}, \quad (7) \end{aligned}$$

де  $M_\gamma = \begin{pmatrix} 0 & \gamma_1 I_k \\ 0 & \gamma_2 I_{k,0} \Delta'_k \end{pmatrix} \cdot L_{k+1}^{-1} \in R^{2(k+k) \times (k+k+1)}$ ;  $I_k$  – одинич-

на матриця розмірності  $(k+k) \times (k+k)$ ;  $I_{k,0}$  – одинична матриця розмірності  $(k+k) \times (k+k)$ , перший елемент якої дорівнює нулю;  $L_{k+1}$  – нижня трикутна матриця розмірності  $(k+k+1) \times (k+k+1)$  з одиницями на місцях ненульових елементів;

$$\Delta'_k = (\text{diag}(v_1 - v_{-k+1}; \dots; v_{k+k} - v_k) \cdot L_k)^{-1}.$$

Цей наслідок визначає область монотонності  $\Theta_\gamma$ . В ньому сформульовані необхідні та достатні умови обмеження параметрів для відповідних апроксимуючих функцій з тим, щоб задовольнити вимоги монотонності  $H_1$  та  $H_2$ .

Критерії перевірки можна сформулювати наступним чином: чи задовольняє експериментальна послідовність вимогам монотонності першого та другого порядку, які аналогічні вимогам  $H_1$  та  $H_2$ . Для цього замінимо вирази похідних в формулах (1) та (2) їх дискретними аналогами.

**$\hat{H}_1$ .** Для обраної константи  $\gamma_1$  вибірка  $z$  задовольняє умові монотонності розподіленої різниці першого порядку, якщо:

$$\gamma_1 \delta_j(z) \equiv \gamma_1 \cdot \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} \geq 0, \quad (8)$$

де  $j \in \{1; \dots; n-1\}$ .

**$\hat{H}_2$ .** Для обраної константи  $\gamma_1$  вибірка  $z$  задовольняє умові монотонності розподіленої різниці другого порядку, якщо:

$$\gamma_2 \delta_j^2(z) \equiv \gamma_2 \cdot \left( \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{y_j - y_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \right) \geq 0, \quad (9)$$

де  $j \in (2; \dots; n-1)$ .

В загальному випадку немає підстав вважати, що експериментальні дані вибірки  $z$ , завжди задовольняють вимогам монотонності (8) та (9).

При додатній похибці апроксимації неов'язково строго задовольняти вимоги  $\hat{H}_1$  та  $\hat{H}_2$ .

Визначимо  $\varepsilon$ -послаблення вимог  $\hat{H}_1$  та  $\hat{H}_2$ , які позначимо  $\hat{H}_{1\varepsilon}$  та  $\hat{H}_{2\varepsilon}$ .

Ці послаблені вимоги визначають, чи можна задану вибірку  $z$  перетворити на вибірку  $\hat{z} = \{(x_j; \hat{y}_j)\}_{j=1}^n$  так, щоб нова вибірка  $\hat{z}$  задовольняла послабленим вимогам  $\hat{H}_{1\varepsilon}$  та  $\hat{H}_{2\varepsilon}$  і в той же час відстань між точками вибірок  $z$  та  $\hat{z}$  по верхній нормі не перевищувала  $\varepsilon$ .

У послаблених вимогах  $\hat{H}_{1\varepsilon}$  та  $\hat{H}_{2\varepsilon}$  розглядаються дві задачі лінійного програмування і вимагається, щоб їх розв'язки дорівнювали нулю.

$\hat{H}_{1\varepsilon}$ . Вибірка  $z$  задовольняє  $\varepsilon$ -послабленню вимоги  $\hat{H}_1$ , якщо розв'язок задачі лінійного програмування:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min_{t, \hat{y}} \sum_{i=1}^n t_i & \text{s.t.} \quad -\gamma_1 (\hat{y}_{j+1} - \hat{y}_j) \leq t_j \\ (1 \leq i \leq n) & 0 \leq t_i \\ (1 \leq j \leq n-1) & -\varepsilon \leq \omega_i (\hat{y}_i - y_i) \leq \varepsilon \end{array} \right\}$$

дорівнює нулю, для заданих  $\varepsilon \geq 0$ ;  $\gamma_1 = \{-1; 0; 1\}$ .

$\hat{H}_{2\varepsilon}$ . Вибірка  $z$  задовольняє  $\varepsilon$ -послабленню вимоги  $\hat{H}_2$ , якщо розв'язок задачі лінійного програмування:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min_{t, \hat{y}} \sum_{i=1}^n t_i & \text{s.t.} \quad -\gamma_2 \left( \frac{\hat{y}_{j+1} - \hat{y}_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{\hat{y}_j - \hat{y}_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \right) \leq t_j \\ (1 \leq i \leq n) & 0 \leq t_i \\ (2 \leq j \leq n-1) & -\varepsilon \leq \omega_i (\hat{y}_i - y_i) \leq \varepsilon \end{array} \right\}$$

дорівнює нулю, для заданих;  $\varepsilon \geq 0$ ;  $\gamma_2 = \{-1; 0; 1\}$ .

Вибірка  $z$  задовольняє  $\varepsilon$ -послабленням вимог  $\hat{H}_1$  та  $\hat{H}_2$  одночасно, якщо задачі лінійного програмування у вимогах  $\hat{H}_{1\varepsilon}$  та  $\hat{H}_{2\varepsilon}$  допускають спільний розв'язок  $(t; \hat{y}) = (t_1; \dots; t_n; \hat{y}_1; \dots; \hat{y}_n)$  і їх відповідні оптимальні значення дорівнюють нулю.

Ці умови можна використовувати для того, щоб гарантувати існування непустої множини  $\hat{\Theta}_{\gamma;\varepsilon}$ .

Нехай задані  $\varepsilon \geq 0$ ;  $\gamma_1 = \{-1; 0; 1\}$ . Якщо вибірка  $z$  задовольняє послабленій вимозі  $\hat{H}_{1\varepsilon}$ , тоді існує такий набір вузлів  $v$ , що множина  $\hat{\Theta}_{\gamma;\varepsilon}$  є не пустою для  $\gamma = (\gamma_1; 0)$ .

Аналогічно формулюються твердження для послабленої вимоги  $\hat{H}_{2\varepsilon}$  та для одночасного виконання послаблених вимог  $\hat{H}_{1\varepsilon}$  та  $\hat{H}_{2\varepsilon}$ .

Останні твердження конструктивно доводяться

в додатках до статті [19], тобто ці доведення містять алгоритми побудови згадуваних вище векторів вузлів  $v$ .

### Застосування методу монотонної апроксимації до обробки індикаторних діаграм

Як вже відзначалося, теоретичні моделі процесів, які відбуваються в циліндрах ДВЗ, свідчать про те, що залежність тиску в циліндрі від кута повороту колінчастого валу на лінії стискування є зростаючою залежністю, а на лінії розширення є спадною залежністю.

Однак це не виключає можливості наявності горизонтальних ділянок графіку тиску. Відповідно на лінії стискування можемо спостерігати неспадну залежність, а на лінії розширення – незростаючу.

Крім того, експериментальні індикаторні діаграми можуть містити локальні ділянки, на яких відповідна монотонність порушується. Причини порушення можуть мати як випадковий характер, так і свідчити про порушення в роботі двигуна. Тому при обробці експериментальних залежностей ці два випадки повинні бути відокремлені на початку досліджень.

Алгоритм побудови апроксимуючого монотонного сплайна може бути застосований як при обробці індикаторних діаграм у  $pV$ -координатах, так і в  $p\phi$ -координатах. Тому при його викладенні будемо вважати, що на вертикальній осі  $Oy$  відкладається тиск, а на горизонтальній осі  $Ox$  – об'єм робочого тіла  $V$  або кут повороту колінчастого валу  $\phi$  (в залежності від виду діаграми, що обробляється). Тому надалі викладення основних кроків алгоритму здійснюється при позначенні досліджуваних залежностей як  $y=f(x)$ .

Експериментальні дані з лінії стискування та розширення обробляються окремо. Для спрощення викладення матеріалу надалі мова йде про ділянки ліній стискування та розширення, на яких зберігається характер монотонності обох порядків.

На першому кроці здійснюється оцінка відповідності отриманої експериментальної залежності:

$$z = \{(x_j; y_j)\}_{j=1}^n,$$

де  $n$  – об'єм експериментальної вибірки, умовам монотонності першого та другого порядків.

Для цього розв'язується задача оптимізації

$$\sum_{i=1}^{n-1} t_i + \sum_{j=2}^{n-1} t_j \rightarrow \min, \quad (10)$$

за функціональних обмежень:

$$\left\{ \begin{array}{ll} -\gamma_1 \cdot (\hat{y}_{j+1} - \hat{y}_j) \leq t_j, & i = 1 \dots (n-1); \\ -\gamma_2 \cdot \left( \frac{\hat{y}_{j+1} - \hat{y}_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{\hat{y}_j - \hat{y}_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \right) \leq t_j, & j = 2 \dots (n-1); \end{array} \right.$$

та параметричних обмежень:

$$\begin{cases} t_i \geq 0, & i = 1 \dots (n-1); \\ \gamma_j \geq 0, & j = 2 \dots (n-1); \\ \omega_k \cdot |\hat{y}_k - y_k| \leq \varepsilon, & k = 1 \dots n; \end{cases}$$

де  $\omega_k$  – задані додатні ваги;  $\hat{y}_k$  – ординати точок нової (згладженої) вибірки, яка задовольняє висунутим вимогам до монотонності;  $\varepsilon$  – припустиме відхилення між ординатами точок початкової залежності та згладженої.

Об'єктивно вектор ваг може бути визначений на підставі закону великих чисел, тобто при наявності достатньої кількості вибірок, отриманих в однакових умовах проведення експериментальних досліджень. В даному дослідженні всі ваги приймалися рівними одиниці.

Вектор параметрів  $\{\gamma_1; \gamma_2\}$  відповідно до розв'язуваних задач може мати координати:

$\{-1; 1\}$  – для задачі згладжування експериментальної індикаторної діаграми в  $pV$ -координатах як

на лінії стискування, так і на лінії розширення (оскільки в обох випадках залежність є спадною і має увігнутий графік);

$\{1; 0\}$  – для задачі згладжування експериментальної індикаторної діаграми в  $p\phi$ -координатах на лінії стискування (залежність є неспадною, а її характер увігнутості змінюється);

$\{-1; 0\}$  – для задачі згладжування експериментальної індикаторної діаграми в  $p\phi$ -координатах на лінії розширення (залежність є незростаючою зі змінним характером увігнутості).

За твердженнями, доведеними в роботі [19], згладжена залежність задовольняє висунутим вимогам до монотонності першого та другого порядків і відхиляється від експериментальної залежності не більше, ніж на вказане число  $\varepsilon$ , коли мінімальне значення функції цілі (10) дорівнює нулю.

Ненульове мінімальне значення функції цілі (10) означає, що початкова експериментальна залежність має суттєві відхилення від очікуваних характеристик. В цьому випадку потрібен фаховий аналіз можливих причин таких відхилень або збільшення припустимої величини відхилень  $\varepsilon$ .

Для подальших досліджень використовується згладжена вибірка  $\hat{z} = \{(x_j; \hat{y}_j)\}_{j=1}^n$ , яку отримують за результатами розв'язання задачі оптимізації (1). Оскільки згладжена вибірка задовольняє вимогам монотонності на відповідних ділянках, тому на її основі можна будувати інтерполяційний сплайн, що зберігає форму дискретної залежності.

Даний алгоритм було реалізовано авторами в програмному середовищі СКМ Maple.

На рис. 6 наведено приклад монотонного згладжування індикаторної діаграми у  $pV$ -координатах за розглянутим алгоритмом.

Після отримання аналітичного опису індикаторних діаграм у вигляді вказаних сплайнів (зі збереженням характеру монотонності) прямий та обернений перерахунок між  $pV$  та  $p\phi$  координатами здійснюється на їх основі.

Оброблена за допомогою описаного вище алгоритму аналітична залежність тиску від об'єму робочого циліндра дозволяє визначити значення тиску для всіх значень об'ємів, які відповідають кутам повороту колінчатого валу, відтворивши індикаторну діаграму в  $p\phi$ -координатах.

Оброблена таким чином індикаторна діаграма цілком придатна для подальшого аналізу з використанням стандартних методик визначення основних показників та залежностей робочого процесу.

На рис. 7 наведена діаграма в  $p\phi$ -координатах, перебудована з обробленої за розглянутою методикою діаграми в  $pV$ -координатах, що відповідає випадку наведеному на рис. 5.

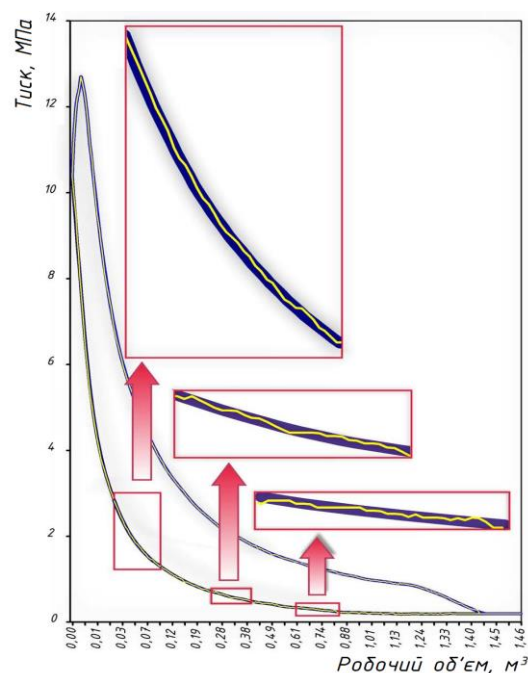


Рис. 6. Індикаторна діаграма в  $pV$ -координатах до монотонного згладжування (жовта лінія) та після монотонного згладжування (синя лінія) (за результатами випробувань двигуна 8K90MC-C, No D?-MLI-2046, побудованого в 2008 році корпорацією DOOSAN-MAN Diesel, на навантаженні 75% від MCR)

Можна бачити, що монотонне згладжування дозволяє усунути недоліки, які виникають під час отримання та попередньої обробки експериментальних даних.

Якщо на рис. 5, аналіз динамічності робочого процесу зробити практично неможливо, то після обробки, побудована по лінії зміни тиску крива



швидкості, має чітко визначені ділянки, які відповідають окремим стадіям робочого процесу.

Відповідним чином оброблені результати оцифровки растрових зображень індикаторних діаграм, отриманих під час стендових випробувань двигунів, були використані авторами для побудови цифрових профілів робочого процесу, що дозволяє контролювати технічний стан двигуна шляхом його індичіювання незалежно від режиму роботи.

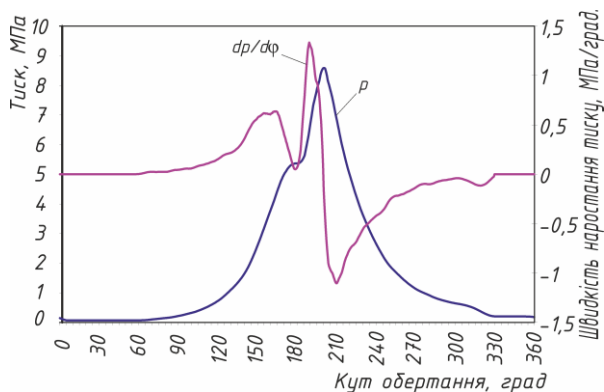


Рис. 7. Оброблена за запропонованою методикою індикаторна діаграма, перебудована в рф-координати, та побудована по ній діаграма швидкості зростання тиску

### Висновки

Одним із шляхів розв'язання науково-практичної задачі оцінки технічного стану суднових малооборотних двигунів за параметрами робочого процесу є розробка методики побудови цифрових профілів, які описують залежність характеру перебігу робочого процесу від навантаження двигуна. Основним джерелом інформації для побудови таких профілів є індикаторні діаграми, отримані під час стендових випробувань двигуна заводом-виробником. Така інформація в більшості випадків існує тільки в растровому форматі, а її переведення в цифровий формат призводить до значної неоднорідності отриманих числових масивів, що ускладнює, а в деяких випадках унеможливує, подальше використання даної інформації. У зв'язку з цим важливою складовою задачі створення цифрового профілю є попередня обробка експериментальних даних. Для усунення зазначеної неоднорідності при розв'язанні задач побудови цифрових профілів робочого процесу авторами було застосовано попередню обробку отриманих цифрових масивів з використанням методу монотонної апроксимації експериментальної залежності.

В роботі викладені основні теоретичні положення щодо застосування даної методики. Показано, що після монотонного згладжування отримані індикаторні діаграми можна обробляти з застосу-

ванням стандартних методик, що використовуються для аналізу робочого процесу. Також вони можуть бути використані як базові криві для побудови цифрових профілів.

### Список літератури:

1. Правила технічної експлуатації морських і річкових суден. Дизелі. Нормативний документ морського транспорту України. Дата введення: 01.02.1997. – 63 с. 2. Суворов П. С. Судовые двигатели внутреннего сгорания и их техническая эксплуатация. – Одесса: ОНМА, 2017. – 473 с. 3. Варбанец Р.А. Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации: дисс. докт. техн. наук / Р.А. Варбанец – Одесса: Одесская национальная морская академия, 2010. – 314 с. 4. Sartini N. More haste, less speed / N. Sartini // Container ship focus. – 2008. – Issue 5. – P. 3. 5. Білоусов С. В. Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індичіювання робочого процесу на режимах відмінних від номінальних / С. В. Білоусов, А. П. Марченко, М. С. Рибальченко, В. П. Савчук, Г. Я. Тулущенко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – № 1. – С 51–59, doi: 10.20998/0419-8719.2022.1.07 6. Рибальченко М. С. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малооборотного двигуна на режимах часткових навантажень / С. В. Білоусов, М. С. Рибальченко // Розвиток транспорту. 2022. – № 3(14). – С. 97–100, doi.org/10.33082/td.2022.3-14.08 7. Belousov E. Digital Profiles of Work Processes of a Marine Engine for Calculated Indicator Diagrams in Operating Modes Other than Maximum Continuous Rating / E. Belousov, A. Marchenko, M. Rybalchenko, G. Tuluchenko et al // SAE Technical Paper. – 2023-01-5008, doi:10.4271/2023-01-5008. 8. Shop Test Report of Marine Low Speed Diesel Engine Type: Doosan Man B&W 8K90MC-C, Project name DANA 1671, test date 21.03.2008. – 68 p. 9. Bilousov I. Modern Marine Internal Combustion Engines / I. Bilousov, M. Bulgakov, V. Savchuk. – Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, Springer, Cham., 2020, doi.org/10.1007/978-3-030-49749-1. 10. Engine Indicators Type 50 and Type 30 – Operating Instructions. Part-No. 4651.98.00020. – Friedrich Leutert GmbH & Co., Germany, Adendorf, 2017. 11. Рибальченко М. С. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малооборотного двигуна в умовах сучасної тенденції щодо зниження експлуатаційної швидкості суден / С. В. Білоусов, М. С. Рибальченко // Водний транспорт. – 2022. – Випуск 2(36). – С. 71–83, doi: 10.33298/2226-8553.2022.2.36.06 12. DPI-2 Digital Pressure Indicator Operating Instructions. DPI hand-held unit, version 2.04. – Friedrich Leutert GmbH & Co. KG, Germany, Adendorf, 2014. 13. Plisko V. Graph2Digit [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://plsoft.narod.ru/digitizer>. – Дата перегляду : 01.10.2022. 14. Belousov E. Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low-Speed Gas-Diesel Engines / E. Belousov, A. Marchenko, I. Gritsuk, V. Savchuk // SAE Technical Paper 2020-01-2107. – 2020, doi:10.4271/2020-01-2107. 15. Білоусов Е. В. Организация внутреннего смесеобразования в судовых малооборотных газодизельных двигателях / Е. В. Белоусов, В. П. Савчук, И. В. Грицук, Т. П. Белоусова // Двигатели внутреннего сгорания. – 2017. – № 2. – С. 13–16. 16. Saraiev O.

*Automated Diagnostic System for Engine Cylinder-Piston Group* / O. Saraiev, I. Saraieva, I. Gritsuk, V. Volkov, et al. // *SAE Technical Paper 2020-01-2022*, doi:10.4271/2020-01-2022. 17. Pawletko R. *Evaluation of Current Developments and Trends in the Diagnosis of Marine Diesel Engines Based on the Indicator Diagrams Analysis* / R. Pawletko, S. Polanowski // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2014. – V. 21. – № 4. – P. 389–396, doi: 10.5604/12314005.1130492 18. Белоусов Е. В. *Исследование процессов топливоподачи в газодизельных малооборотных двухтактных двигателях низкого давления* / Е. В. Белоусов, Р. А. Варбанец, В. П. Савчук., И. В. Гришук, В. С. Вербовский // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2019. – № 1. – С 27–33, doi: 10.20998/0419-8719.2019.1.05. 19. Chehrizi N., Weber T. A. *Monotone Approximation of Decision Problems* / N. Chehrizi, T. A. Weber // *Operations Research*. – 2010. – V. 58. – I. 4. – Part 2. – P. 1158–1177, doi: 10.2139/ssrn.1324024

### **Bibliography (transliterated):**

1. *Rules for the technical operation of sea and river vessels. Diesels. Normative document of maritime transport of Ukraine. Date of introduction: 01.02.1997. [Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii morskyykh i richkovyykh suden. Dyzeli. Normatyvnyi dokument morskoho transportu Ukrainy. Data vvedennia: 01.02.1997.]* 2. Suvorov, P. S. (2017), 'Marine Internal Combustion Engines and Their Technical Operation' [Sudovyye dvigateli vnutrennego sgoraniya i ih tekhnicheskaya ekspluatatsiya], Odessa: ONMA. 3. Varbanets, R. A. (2010), 'Diagnostic Control of the Working Process of Marine Diesel Engines in Operation' [Diagnosticheskiy kontrol rabocheho protsessa sudovyykh dizeley v ekspluatatsii]. Thesis of Dr. tech. Sciences, Odessa National Maritime Academy, Odessa. 4. Sartini N. (2008), 'More haste, less speed'. *Container ship focus*, 5, pp. 3. 5. Bilousov Ye. V., Marchenko A. P., Rybalchenko M. Ye., Savchuk V. P., Tuluchenko H. Ya. (2022), 'Development of Methods for Evaluation of Technical Condition of Engines According to the Results of Indication of Working Process on Modes Different from Nominal' [Rozrobka metodiv otsinky tekhnichnoho stanu dyvuhuniv za rezul'tatamy indytsiuivannia robochoho protsesu na rezhymakh vidminnykh vid nominalnykh]. *Internal Combustion Engines*, 1, pp. 51–59, doi: 10.20998/0419-8719.2022.1.07 6. Rybalchenko M. Ye., Bilousov Ye. V. (2022), 'Usage of Numerical Profiles of the Work Process to Analyze the Efficiency of the Ship's Low-Speed Engine at Partial Loads' [Vykorystannia chyslovykh profiliv robochoho protsesu dlia analizu efektyvnosti roboty sudnovoho maloobertovoho dyvuhuna na rezhymakh chastkovykh navantazhen]. *Transport Development*, 3(14), pp. 97–100, doi.org/10.33082/td.2022.3-14.08 7. Bilousov E., Marchenko A., Rybalchenko M., Tuluchenko G. et al.

(2023), 'Digital Profiles of Work Processes of a Marine Engine for Calculated Indicator Diagrams in Operating Modes Other than Maximum Continuous Rating'. *SAE Technical Paper*, 2023-01-5008, doi:10.4271/2023-01-5008. 8. *Shop Test Report of Marine Low Speed Diesel Engine Type: Doosan Man B&W 8K90MC-C, Project name DANA 1671, test date 21.03.2008*, 68 p. 9. Bilousov I., Bulgakov M., Savchuk V. (2020), *Modern Marine Internal Combustion Engines*. Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, Springer, Cham., doi.org/10.1007/978-3-030-49749-1. 10. *Engine Indicators Type 50 and Type 30 – Operating Instructions. Part-No. 4651.98.00020*. – Friedrich Leutert GmbH & Co., Germany, Adendorf, 2017. 11. Rybalchenko M. Ye., Bilousov Ye. V. (2022), 'Use of Numerical Profiles of the Working Process for the Analysis of the Efficiency of Work of a Ship's Low-Speed Engine Under the Conditions of the Current Tendencies to Reduce the Operating Speed of Vessels' [Vykorystannia chyslovykh profiliv robochoho protsesu dlia analizu efektyvnosti roboty sudnovoho maloobertovoho dyvuhuna v umovakh suchasnoi tendentsii shchodo znyzhennia ekspluatatsiinoi shvydkosti suden]. *Water Transport*, 2(36), pp. 71–83, doi: 10.33298/2226-8553.2022.2.36.06 12. *DPI-2 Digital Pressure Indicator Operating Instructions. DPI hand-held unit, version 2.04*. – Friedrich Leutert GmbH & Co. KG, Germany, Adendorf, 2014. 13. Plisko V. *Graph2Digit*. Available at : <http://plsoft.narod.ru/digitizer> (Accessed : October 1, 2022). Bilousov E., Marchenko A., Gritsuk I., Savchuk V. et al. (2020), 'Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low-Speed Gas-Diesel Engines'. *SAE Technical Paper 2020-01-2107*, doi:10.4271/2020-01-2107. Bilousov E. V., Savchuk V. P., Gritsuk I. V., Belousova T. P. (2017), 'Organization of Internal Mixing in Marine Low-Revving Gas-Diesel Engines' [Organizatsiya vnutrennego smeseobrazovaniya v sudovyykh maloobortnykh gazodizelnykh dvigatelyakh]. *Internal Combustion Engines*, 2, pp. 13–16. Saraiev O., Saraieva I., Gritsuk I., Volkov V. et al. (2020), 'Automated Diagnostic System for Engine Cylinder-Piston Group'. *SAE Technical Paper 2020-01-2022*, doi:10.4271/2020-01-2022. 17. Pawletko R., Polanowski S. (2014), 'Evaluation of Current Developments and Trends in the Diagnosis of Marine Diesel Engines Based on the Indicator Diagrams Analysis'. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 21, 4, pp. 389–396, doi: 10.5604/12314005.1130492 Bilousov E. V., Varbanets R. A., Savchuk V. P., Gritsuk I. V., Verbovskiy V.S. (2019), 'Investigation of Fuel Supply Processes in Gas-Diesel Low-Revving Two-Stroke Engines' [Issledovanie protsessov toplivopodachi v gazodizelnykh maloobortnykh dyvuhunakh nizkogo davleniya]. *Internal Combustion Engines*, 1, pp. 27–33, doi: 10.20998/0419-8719.2019.1.05. 19. Chehrizi N., Weber T. A. (2010), 'Monotone Approximation of Decision Problems'. *Operations Research*, 58, 4, Part 2, pp. 1158–1177, doi: 10.2139/ssrn.1324024

Надійшла до редакції 08.06.2023 р.

**Рибальченко Микола Євгенович** – аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Україна, kolryb73@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3533-3967>.

**Білоусов Євген Вікторович** – доктор техн. наук, професор, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Україна, ewbelousov67@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8185-8209>.

**Марченко Андрій Петрович** – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи НТУ (ХП), Національний технічний університет (ХП), Україна, andreymarchenko51@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9746-4634>.

**Савчук Володимир Петрович** – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Україна, postsavchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5266-850X>.

**Бутко Вадим Петрович** – аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Україна, vadim27101964@gmail.com.

**PROCESSING OF INDICATOR DIAGRAM IN THE TASKS OF CONSTRUCTING DIGITAL PROFILES OF THE WORKING PROCESS OF SHIP ENGINES**

*M.Ie. Rybalchenko, E.V. Bilousov, A.P. Marchenko, V.P. Savchuk, V.P. Budko*

During the operation of marine internal combustion engines, the procedure for indicating the working process in certain operating modes is widely used, followed by an analysis of indicator diagrams and a comparison of the results obtained with the reference ones obtained during engine factory tests. However, the general trend in the world fleet towards a decrease in the commercial speeds of ships, on the one hand, and the use of tight traffic schedules, on the other hand, have led to the fact that in most cases it is impossible to carry out indexing according to the procedures prescribed in the rules for the technical operation of engines. Thus, the ability of maintenance personnel to objectively assess the current technical condition of the engine is lost, and to determine the necessary list of preventive measures for maintenance and repair, which, of course, affects the efficiency of engines and the safety of navigation in general. One of the effective ways to solve this problem is the use of digital profiles of engine work processes, which characterize their work in the entire range of operating modes. With the help of a digital profile, it is possible to obtain a calculated reference indicator diagram, which can be used for comparison with the one obtained during the planned indication of the engine in any mode of its operation. As a basis for building digital profiles, it is appropriate to use the results of acceptance test bench tests of the engine by the manufacturer. However, taking into account the rather long service life of marine engines, test reports usually exist only in a raster format, which greatly complicates the processing of the indication results given in them, which, most often, was performed using mechanical indicators. To use this information to build digital profiles, the authors proposed a method for processing such indicator diagrams, described in previous articles. However, the efficiency of generating digital profiles significantly depends on the quality of the basic diagrams on which these profiles are built. This article is devoted to the processing of such diagrams.

Keywords: marine low-speed engines; indicator diagram; operating mode; monotonic approximation.

*А.П. Полив'ячук, І.В. Грицук, Д.С. Погорлецький, Н.М. Полив'ячук, О.С. Єфімов*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГРАМОВАНОГО ІЗОКІНЕТИЧНОГО ПРОБОВІДБІРНИКА ДЛЯ СИСТЕМ ЕКОЛОГІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ І КОТЕЛЕНЬ

Роботу присвячено вирішенню актуальної науково-практичної задачі створення універсального пробовідбір-ного пристрою для систем екологічного діагностування теплових двигунів і котельних установок різного призначення. Забезпечення ізокінетичного режиму відбору проби з вихлопної труби (ВТ) двигуна є більш складним завданням ніж проведення аналогічного пробовідбірної процесу в димовій трубі котельні, оскільки, відпрацьовані гази двигунів характеризуються коливаннями статичних тисків у ВТ з амплітудою до  $\pm 500$  Па., що потрібно враховувати в роботі пробовідбірної обладнання. В ході досліджень на основі аналізу світового та вітчизняного досвіду виробництва і використання обладнання для екологічної сертифікації ДВЗ і котельні створено програмований ізокінетичний пробовідбірник (ІКП), який дозволяє відбирати пропорційну частину газової проби з повного потоку відпрацьованих газів у ВТ енергетичної установки з точністю  $\pm 3\%$ . Розроблено безмоторний і моторний випробувальні стенди для моделювання та досліджень газодинамічних процесів у випускних системах двигунів і котельних установок, які забезпечують можливість варіювання параметрів газових потоків - масової витрати, швидкості, температури, статичного тиску, швидкісного напору в діапазонах: 15 - 55 г/с; 5...30 м/с, 20...180 °С, 0...2,5 кПа, 10 - 550 Па, відповідно. На базі створених випробувальних стендів встановлено емпіричні залежності для визначення перепадів статичних тисків між трубопроводами ІКП і ВТ, при яких забезпечується ізокінетичний режим відбору проби, від динамічного напору газового потоку у ВТ. За допомогою даних залежностей здійснюється SMART-управління програмованим ІКП. Проведено експериментальне відпрацювання програмованого ІКП у складі мінітунелю МТ-1 в ході екологічних випробувань дизеля 1СН12/14 на окремих режимах та за циклом ESC, встановленого Правилами ЄЕК ООН R-49. Результати досліджень підтвердили відповідність створеного пробовідбірної пристрою нормативним вимогам до його конструкції та точності визначення коефіцієнту відбору проби.

**Ключові слова:** теплові двигуни; котельні установки; екологічна діагностика; ізокінетичний пробовідбірник; мікротунель.

### Вступ

Важливим етапом процесу екологічної діагностики теплових двигунів і котельних установок є відбір та транспортування газової проби з випускної системи енергетичної установки до засобів газоаналітичного контролю. Пристрої, які використовуються на цьому етапі, відносяться до одних з найбільш технологічних та вартісних вузлів діагностичного обладнання. Серед різних регламентованих екологічними стандартами пристроїв відбору газових проб виділяють пробовідбірну систему з ізокінетичним пробовідбірником (ІКП), яка має суттєві переваги над системами інших типів [1-4]. До таких переваг відносяться: мінімізація впливу процесу відбору проби на її газодинамічні параметри та внутрішню структуру, забезпечення пропорційності частки відібраної проби відношенню діаметрів трубопроводів ІКП і вихлопної труби (ВТ), газодинамічна подібність потоків відпрацьованих газів (ВГ) двигунів і котельні, що протікають в пробовідбірній системі та ВТ.

Забезпечення ізокінетичного режиму відбору газової проби з вихлопної труби (ВТ) теплового двигуна є більш складним завданням ніж проведення аналогічного пробовідбірної процесу в димовій трубі котельної установки, оскільки, на відміну від стаціонарних потоків димових газів

котельні, які підпорядковуються закону Бернуллі і достатньо ефективно контролюються, відпрацьовані гази двигунів супроводжуються коливаннями статичних тисків у ВТ, що потрібно враховувати в роботі пробовідбірної обладнання.

Науково-практичною базою для створення сучасних пробовідбірних систем з використанням ІКП є результати теоретичних і прикладних досліджень та розробок закордонних і вітчизняних організацій-виробників обладнання для екологічної сертифікації ДВЗ, таких як AVL List GmbH, Mitsubishi Motors, Perkins Engines Co. Ltd., Pierburg AG, ДП «ДержавтотрансНДІпроект», КЗ «Аналітприлад» та ін. [2-6]. На основі аналізу досвіду цих організацій та власних напрацювань авторами даної роботи створено програмований ІКП для систем екологічної діагностики теплових двигунів і котельні та проведено комплекс досліджень із забезпечення його ефективності у відповідності до вимог нормативних документів.

### Мета і завдання дослідження

Мета досліджень полягала у створенні універсальної пробовідбірної пристрою з програмованим ІКП для використання в системах екологічної діагностики теплових двигунів і котельні та забезпечення його ефективності відповідно до встановлених вимог. Для досягнення цієї мети виріше-

но наступні завдання: 1) створення програмованого ІКП; 2) монтаж випробувальних стендів для проведення безмоторних та моторних випробувань ІКП; 3) проведення досліджень із забезпечення ефективності створеного пробовідбірного пристрою.

**Аналіз літературних джерел за темою досліджень**

Серед відомих пробовідбірних систем з використанням ІКТ можна виділити вимірювальні комплекси для екологічної сертифікації дизелів - частковопотоківі системи розбавлення ВГ повітрям, які називають мінітунелями. Нижче розглянуті принципи дії найбільш експериментально досліджених мінітунелей, використання яких регламентовано Правилами ЄЕК ООН R-49 [7-9].

Мінітунель з ІКП та вимірювачем концентрації CO<sub>2</sub> або NO<sub>x</sub> (Mitsubishi Motors) працює наступним чином (рис. 1).

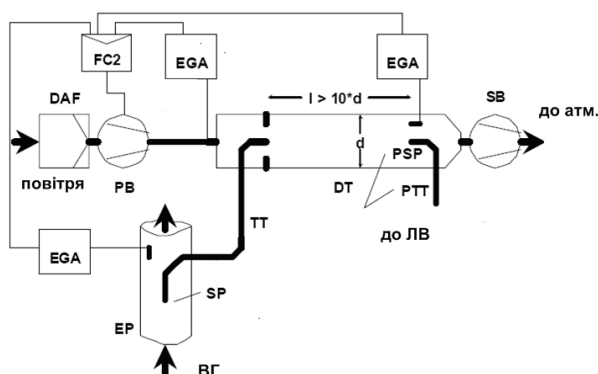


Рис. 1. Принципова схема мінітунелю з ІКП та вимірювачем концентрації CO<sub>2</sub> або NO<sub>x</sub>

Пропорційна частка проби ВГ направляються з вихлопної труби EP в змішувальний канал DT через пробовідбірник SP і відповідний патрубок TT. Концентрації індикаторного газу (CO<sub>2</sub> або NO<sub>x</sub>) вимірюють у первинних і розбавлених ВГ, а також у повітрі за допомогою газоаналізатора EGA. Ці дані передаються на регулятор витрати FC2, який керує роботою нагнітаючого - PB або витяжного - SB насоса і забезпечує належне змішування проби ВГ з повітрям і відповідного коефіцієнту розбавлення її у тунелі DT. Коефіцієнт розбавлення розраховується за концентраціями індикаторних газів у первинних і розбавлених ВГ та у повітрі.

Мінітунель з ІКП керованого нагнітаючим компресором (AVL List GmbH) працює наступним чином. (рис. 2).

Пропорційна частка проби ВГ направляються з вихлопної труби EP до тунелю DT по трубопроводу транспортування TT через ІКП - ISP. Різниця тисків ВГ у ВТ і на вході в ІКП вимірюється за допомогою

диференційного датчика тиску DPT. Сигнал від датчика передається на регулятор витрати FC1, який управляє роботою нагнітаючого насоса PB, який забезпечує потрібний рівень перепаду тиску на вході у ІКП. Це досягається відбором невеликої частини потоку повітря, витрату якого вже було визначено витратоміром FM1, і спрямуванням його у TT через сопло.

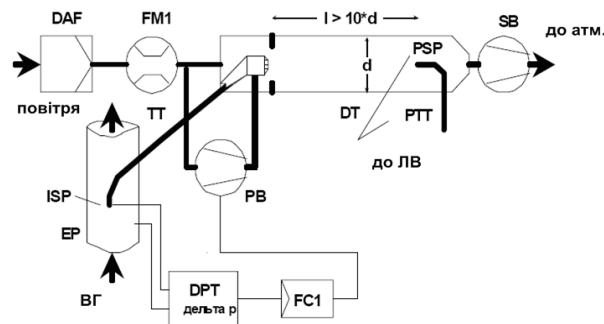


Рис. 2. Принципова схема мінітунелю з ІКП керованого нагнітаючим компресором

Коефіцієнт відбору ВГ визначається по відношенню поперечних перетинів EP і ISP. Коефіцієнт розбавлення розраховують на основі масової витрати повітря та коефіцієнта відбору ВГ.

Мінітунель багатотрубного типу (Mitsubishi Motors) працює наступним чином (рис. 3).

Проба ВГ направляються з вихлопної труби EP в змішувальний канал DT по відводному патрубку TT через розподільвач потоку FD3, який складається з кількох трубок однакового розміру, встановлених в EP. Через одну з цих трубок ВГ направляються в DT, а через інші надходять у демпферну камеру DC. Таким чином, значення коефіцієнта відбору потоку ВГ залежить від загального числа трубок.

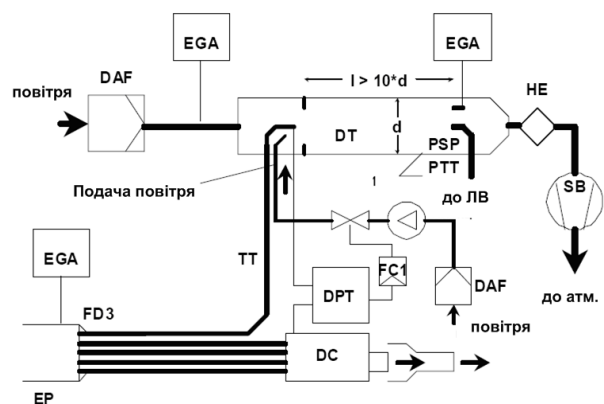


Рис. 3. Принципова схема мінітунелю багатотрубного типу

Підтримання коефіцієнта відбору на потрібному рівні забезпечується встановленням різниці між тисками в *DC* і на виході з *TT* на нульовому рівні, що контролюється диференціальним датчиком тиску *DPT*. Нульова різниця тиску забезпечується подачею свіжого повітря в *DT* на виході з *TT*. Концентрації індикаторних газів ( $CO_2$  або  $NO_x$ ) вимірюють у первинних ВГ, розбавлених ВГ і у повітрі за допомогою газоаналізатора *EGA*. Коефіцієнт розбавлення розраховується на основі концентрацій індикаторних газів.

#### Викладання основного матеріалу

Створення програмованого *ІКП* здійснено відповідно до нормативних вимог [1]. *ІКП* являє собою автоматизований пристрій у складі вимірювального комплексу з мінітунелем *MT-1* [10], який призначений для відбору пропорційної частки ВГ з випускної системи двигуна або котельні та подальшого транспортування її по трубопроводу перенесення проби (ТП) до системи розбавлення ВГ повітрям у мінітунелі. (рис. 4). Забезпечення ізокінетичного режиму відбору проби досягається шляхом підтримки перепаду статичних тисків між трубопроводами ВТ та *ІКП* –  $\Delta P_{IK}$  на заданому рівні, який встановлюється автоматизованим регулятором потоку проби дросельного типу *AP*.

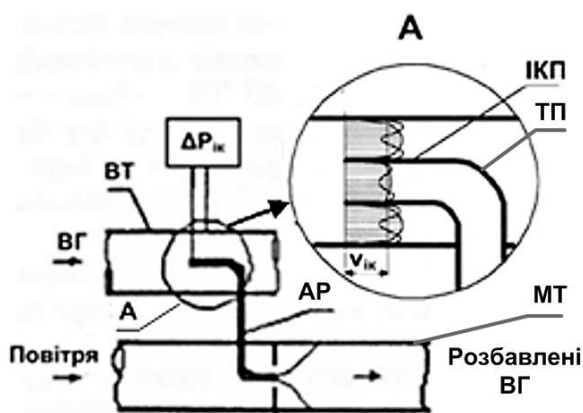


Рис. 4. Принципова схема пробовідбірної пристрою з програмованим *ІКП*:

*ВГ* – відпрацьовані гази; *ВТ* – вихлопна труба; *ІКП* – ізокінетичний пробовідбірник; *ТП* – трубопровід перенесення проби; *АР* – автоматизований регулятор потоку проби; *МТ* – мінітунель;  $\Delta P_{IK}$  – перепад статичних тисків між *ППО* та *ВТ*;  $v_c$  – середня швидкість потоку *ВГ*

*SMART*-управління регулятором *АР* здійснюється за допомогою мікропроцесорного блоку, в якому обробляється інформація, що надходить з датчиків контролю параметрів газового потоку у *ВТ* – масової витрати –  $G_{BT}$ , температури –  $t_{BT}$ , ста-

тичного тиску –  $P_{BT}$ , а також диференційного датчику тиску, що контролює величину  $\Delta P_{IK}$ . При цьому потрібне значення параметра  $\Delta P_{IK}$ , яке забезпечується регулятором *АР*, визначається за допомогою емпіричної залежності:

$$\Delta P_{IK} = f(q_{BT}), \quad (1)$$

де  $q_{BT}$  – швидкісний напір газового потоку у *ВТ* у *Па*, який розраховується за значеннями параметрів  $G_{BT}$ ,  $t_{BT}$ ,  $P_{BT}$ .

Вибір залежності (1) для управління процесом пробовідбору обумовлений тим, що ця залежність є слідством рівняння Бернуллі для стаціонарних газових потоків:

$$\Delta P_{IK} = P_{BT} - P_{IKP} = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot q_{BT}, \quad (2)$$

де  $P_{BT}$  і  $P_{IKP}$  – статичні тиски газових потоків у *ВТ* і *ІКП*, *Па*;

$\alpha_{BT}$  і  $\alpha_{IKP}$  – безрозмірні коефіцієнти, що враховують нерівномірності розподілу швидкостей газових потоків у поперечних перетинах *ВТ* і *ІКП*, які залежать від геометричних і газодинамічних властивостей пробовідбірної системи та відрізняються один від одного.

Випробувальні стенди для досліджень ефективності програмованого *ІКП*

В якості експериментальної бази для встановлення емпіричної залежності (1) використовувався безмоторний випробувальний стенд для досліджень газодинамічних процесів у випускних системах двигунів і котельні (рис. 5, 6).

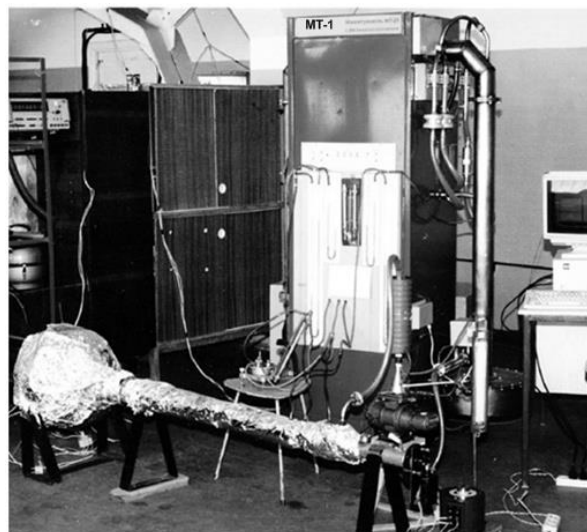


Рис. 5. Загальний вигляд експериментальної установки для досліджень газодинамічних процесів

Ця установка дозволяє моделювати процеси відбору газових проб з *ВТ* з використанням в якості робочого тіла нагрітого повітря, газодинамічні па-



параметри якого можуть варіюватися в таких діапазонах: масова витрата – 15...55 г/с, швидкість – 5...30 м/с, температура – 20...180 °С, статичний тиск – 0...2,5 кПа, швидкісний напір – 10...550 Па.

В якості експериментальної бази для дослідження ефективності програмованого ІКП в складі вимірювальної системи – мінітунелю МТ-1 в ході моторних випробувань використовувався гальмівний стенд дизеля ІЧ12/14. (рис. 7). Цей стенд дозволяє реалізувати нормовані процедури екологічних випробувань ДВЗ та досліджувати газодинамічні параметри ВГ на сталих режимах роботи двигуна.

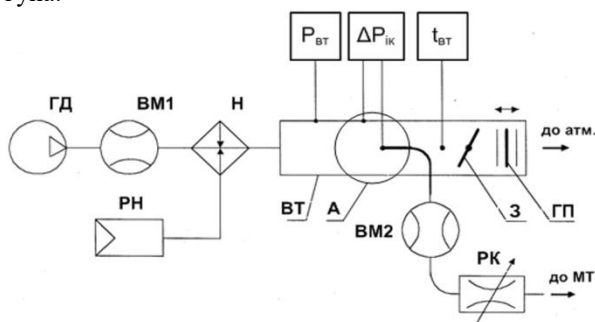


Рис. 6. Принципова схема експериментальної установки для досліджень газодинамічних процесів: ГД - газодувка; ВМ1, ВМ2 - витратоміри; Н - нагрівач; РН - регулятор напруги; ВТ - вихлопна труба; РК - регулюючий клапан; З - заслінка; ГП - генератор пульсацій тиску у ВТ; Р<sub>ВТ</sub>, t<sub>ВТ</sub> і f<sub>ВТ</sub> - датчики контролю статичного тиску, температури і частоти коливань тиску у ВТ, відповідно; ΔР<sub>ІК</sub> - датчик контролю перепаду статичних тисків між ІКП і ВТ

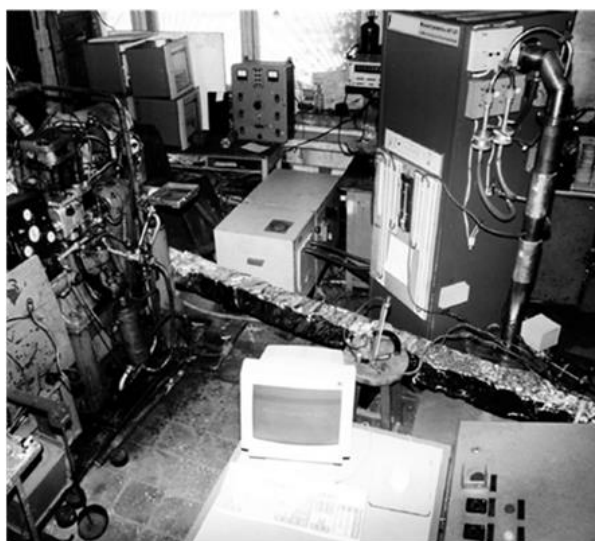


Рис. 7. Загальний вигляд гальмівного стенду дизеля ІЧ12/14 з мінітунелем МТ-1

### Результати досліджень та їх аналіз

Визначення залежності величини ΔР<sub>ІК</sub> від параметрів газового потоку у ВТ.

Дослідження по встановленню емпіричної залежності (1) проводились на безмоторному стенді і складались з 3-х серій дослідів, в ході яких визначалась величина ΔР<sub>ІК</sub> при фіксованих значеннях параметрів газового потоку у ВТ – G<sub>ВТ</sub>, t<sub>ВТ</sub>, P<sub>ВТ</sub> і q<sub>ВТ</sub> які варіювались у діапазонах: 20,...54,2 г/с, 20...155 °С та 0,4...2,2 кПа та 40...300 Па, відповідно.

За результатами цих досліджень встановлено експериментальну залежність потрібного для забезпечення ізокінетичного режиму відбору проби значення величини ΔР<sub>ІК</sub> від швидкісного напору потоку у ВТ (рис. 8):

$$\Delta P_{IK} = 0,161 \cdot \frac{\rho v^2}{2} - 4,7, \text{ Па.} \quad (3)$$

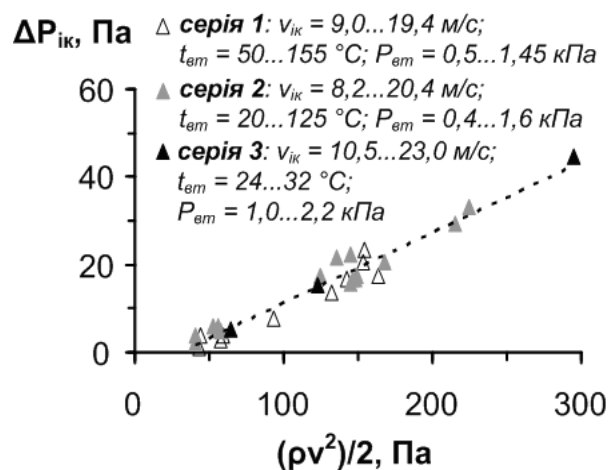


Рис. 8. Регресійна залежність ΔР<sub>ік</sub> = f(q<sub>ВТ</sub>) для визначення потрібних значень ΔР<sub>ік</sub> у ІКП

Аналіз залежності (3) показує:

- при варіюванні параметрів газового потоку у вказаних діапазонах величина ΔР<sub>ік</sub> лінійно залежить від швидкісного напору потоку газу у ВТ;
- різниця коефіцієнтів α<sub>ВТ</sub> і α<sub>ІКП</sub> у формулі (2) має позитивне значення; це свідчить про те, що α<sub>1</sub> > α<sub>2</sub> і у перетині ІКП нерівномірність розподілу швидкостей більш суттєва, ніж у перетині ВТ;
- СКВ розрахункових значень ΔР<sub>ІК</sub> від експериментальних даних складає ±2,2 Па, що має один порядок з похибкою дослідів – ±2 Па і свідчить про адекватність та високу точність регресійної залежності (3);
- практичне використання даної залежності в управлінні ІКП можливо при швидкостях газового потоку у ВТ більших, ніж 8 м/с, швидкісний напір при цьому перевищує 40 Па.

Оцінка похибок коефіцієнту відбору проби  $r_{exh}$  викликаних відхиленнями параметру  $\Delta P_{ik}$  від потрібних значень

Коефіцієнт відбору проби  $r_{exh}$ , який визначає частку відібраної проби з ВТ, при ізокінетичному режимі дорівнює відношенню площин внутрішніх перетинів трубопроводів ІКП та ВТ. Відхилення фактичного перепаду статичних тисків між цими трубопроводами від  $\Delta P_{ik} - \Delta P_r$ , приводить до виникнення похибки визначення коефіцієнту  $r_{exh} - \delta r_{exh}$ , яка не повинна перевищувати допустимого значення  $-\delta r_{exh(доп)} = 3\%$ .

В результаті проведення на безмоторному випробувальному стенді 3-х серій дослідів з варіюванням швидкості і швидкісного напору потоку у ВТ та відхилень  $\Delta P_r$  у діапазонах 10,5...22,5 м/с, 64...295 Па та - 20...20 Па, відповідно, було визначено експериментальні залежності  $\delta r_{exh} = f(\Delta P_r)$  та  $\Delta P_r = f(\delta r_{exh})$  для стаціонарного газового потоку (рис. 9):

$$\delta r_{exh} = -0,473 \cdot \frac{\Delta P_r}{q_{BT}}, \quad (4)$$

$$\Delta P_r = -2,11 \cdot q_{BT} \cdot \delta r_{exh}. \quad (5)$$

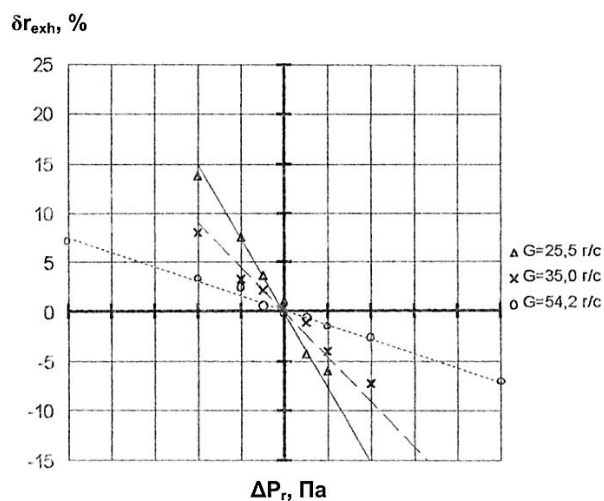


Рис. 9. Результати досліджень впливу відхилень  $\Delta P_r$  на похибку коефіцієнту відбору проби  $r_{exh}$

Аналіз отриманих залежностей показує:

- величина  $\delta r_{exh}$  пропорційна відхиленню  $\Delta P_r$  з коефіцієнтом пропорційності - 0,473;
- при постійному  $\delta r_{exh}$  зі зростанням швидкісного напору у ВТ відповідне значення  $\Delta P_r$  пропорційно збільшується.

Встановлення допустимих відхилень параметру  $\Delta P_{ik}$  від потрібних значень  $-\Delta P_{r(доп)}$

В результаті підстановки  $\delta r_{exh(доп)}$  у формулу (5) отримано залежність для визначення відхи-

лень  $\Delta P_{r(доп)}$ , при яких забезпечується потрібна точність визначення коефіцієнту відбору  $r_{exh}$  у вигляді пропорційної функції:

$$\Delta P_{r(доп)} = -2,11 \cdot q_{BT} \cdot (\pm 0,03) = \pm 0,063 \cdot q_{BT}. \quad (6)$$

За допомогою цієї залежності встановлено значення  $\Delta P_{r(доп)}$  для стаціонарних газових потоків, які імітують потоки ВГ на експлуатаційних режимах роботи дизеля 1Ч12/14. Ці значення варіюються в діапазоні від 2 Па (на режимі холостого ходу при  $q_{BT} = 30$  Па) до 6 Па (на режимі номінальної потужності при  $q_{BT} = 150$  Па). Збільшення коефіцієнту  $r_{exh}$  у  $n$  разів, наприклад, за рахунок зменшення діаметру ВТ, дозволяє підвищити  $\Delta P_{r(доп)}$  у  $n^2$  разів.

Відпрацювання програмованого ІКП на гальмівному стенді дизеля 1Ч12/14 з мінітунелем МТ-1 дозволило встановити експериментальну залежність для визначення потрібного значення фактичного перепаду тисків між ІКП та ВТ в ході випробувань ДВЗ  $-\Delta P_{ik}^{real}$ . Ця залежність враховує реальні умови роботи дизеля (рис. 10):

$$\Delta P_{IK}^{real} = \Delta P_{IK} + \Delta_{IK}(n_n, L_n), \quad (7)$$

$$\Delta_{IK}(n_n, L_n) = 3,0 + 0,5 \cdot n_n - 2,3 \cdot n_n \cdot L_n, \quad (8)$$

де  $\Delta_{IK}$  - поправка, яка враховує режим роботи двигуна;

$n_n$  і  $L_n$  - нормовані значення числа обертів колінчастого валу та навантаження для дизеля 1Ч12/14.

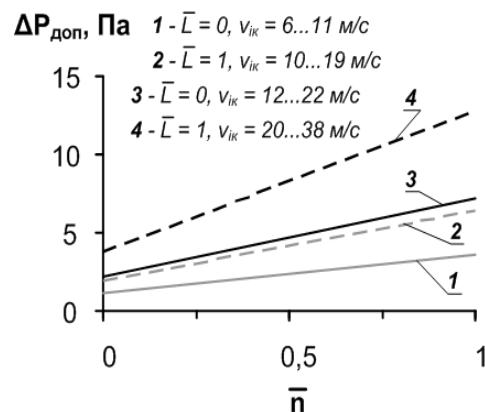


Рис. 10. Залежності допустимих відхилень  $\Delta P_{доп}$  від потрібних значень  $\Delta P_{ik}^{real}$ :

- 1, 2 - при  $q_{BT} = 35-240$  Па;
- 3, 4 - при збільшенні  $q_{BT}$  у 4 рази

Для практичного використання формули (8) додатково були визначені допустимі відхилення  $-\Delta P_{доп}$  від потрібних значень  $\Delta P_{ik}^{real}$ . На рис. 10 показані залежності  $\Delta P_{доп}$  від параметрів,  $n_n$ ,  $L_n$  при  $r_{exh} = 5,5\%$ .

Представлені результати досліджень дозволили забезпечити потрібну точність програмованого

ІКП при проведенні відпрацювання його роботи у складі МТ-1 в ході випробувань дизеля 1ЧН12/14 за нормованим циклом ESC, встановленого Правилами ЄЕК ООН R-49 [10, 11].

### Висновки

Створено програмований ізокінетичний пробовідбірник (ІКТ), який може використовуватись в системах екологічної діагностики теплових двигунів і котелень і який дозволяє відбирати пропорційну частину газової проби з вихлопної труби (ВТ) енергетичної установки з точністю  $\pm 3\%$ .

Розроблено безмоторний і моторний випробувальні стенди для моделювання та досліджень газодинамічних процесів у випускних системах двигунів і котельних установок, які забезпечують можливість варіювання параметрів газових потоків - масової витрати, швидкості, температури, статичного тиску, швидкісного напору в діапазонах: 15 - 55 г/с; 5...30 м/с, 20...180 °С, 0...2,5 кПа, 10 - 550 Па, відповідно.

На базі створених випробувальних стендів встановлено емпіричні залежності для визначення перепадів статичних тисків між трубопроводами ІКП і ВТ, при яких забезпечується ізокінетичний режим відбору проб, від динамічного напору газового потоку у ВТ. За допомогою даних залежності здійснюється SMART-управління програмованим ІКП.

Проведено експериментальне відпрацювання програмованого ІКП у складі мінітунеля МТ-1 в ході екологічних випробувань дизеля 1ЧН12/14 на окремих режимах та за циклом ESC, встановленого Правилами ЄЕК ООН R-49. Результати досліджень підтвердили відповідність створеного пробовідбірного пристрою нормативним вимогам до його конструкції та точності визначення коефіцієнту відбору проби.

### Список літератури:

1. Regulation № 49-06. Uniform Provisions Concerning the Measures to be Taken Against the Emission of Gaseous and Particulate Pollutants from Compression-ignition Engines and Positive-ignition Engines for Use in Vehicles. E/ECE/TRANS/505, 2013. – 541 p. 2. Lianga Z. Investigation of SVOC nanoparticle emission from light duty diesel engine using GC×GC-ToF-MS / Z. Lianga, J. Tiana, S. Zeraati Rezaeia, Y. Zhang et al. // School of Mechanical Engineering, University of Birmingham, UK, 2015. – 31 p. 3. Foote E. Evaluation of Partial Flow Dilution Methodology for Light Duty Particulate Mass Measurement / E. Foote, M. Maricq, M. Sherman, D. Carpenter et al. // SAE Technical Paper № 2013-01-1567, 2013. – 10 p. 4. Клименко О.А. Дослідження та створення перспективної системи для визначення масових викидів забруднюючих речовин у відпрацьованих газах двигунів / О.А. Клименко, А.М. Редзюк, О.В. Кудренко, С.О. Ричок // Автошляховик України, 2012. – № 5 (229) – С. 2–8. 5. Polivyanchuk A.P. Improving the accuracy of the gravimetric method for control particulate matter in diesel exhaust / A.P. Polivyanchuk, I.V. Gritsuk, E.A. Skuridina // New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph / Riga, Latvia: "Baltija Publishing", 2019. – P. 269-301. 6. Редзюк А.М. Щодо визначення масових викидів забруднюючих речовин двигунами колісних транспортних засобів / А.М. Редзюк, О.А. Клименко, О.В. Кудренко // Автошляховик України, 2012. – № 4 (228) – С. 2–7. 7. Alozie, N. Influence of Dilution Conditions on Diesel Exhaust Particle Measurement Using a Mixing Tube Diluter / N. Alozie, D. Peirce, A. Lindner, W. Winklmayr et al. // SAE Technical Paper № 2014-01-1568, 2014. – 14 p. 8. Smart Sampler PC SPC 472. PC program for SPC 472 control. – AVL, List GmbH Graz, Austria, 1993. – 76 p. 9. Russel R. Development of a Miniaturized, Dilution-Based Diesel Engine Particulate Sampling System for Gravimetric Measurement of Particulates / R. Russel // SAE Techn. Pap. Ser. №931190, 1993. – 12 p. 10. Полів'ячук А.П. Підвищення ефективності систем контролю викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизелів: монографія / А.П. Полів'ячук. – Х.: ХНАДУ, 2015. – 224 с. 11. Polivyanchuk A.P. Features of Environmental Diagnostics of Heat Motors and Boiler Plants by Information Methods / A. Polivyanchuk, M. Ahieiev, A. Kagramanian, A. Baranovskis, O. Samarin // ICTE in Transportation and Logistics 2019. Series: Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham, 2020. – P. 360-367.

### Bibliography (transliterated):

1. Regulation № 49-06. (2013). Uniform Provisions Concerning the Measures to be Taken Against the Emission of Gaseous and Particulate Pollutants from Compression-ignition Engines and Positive-ignition Engines for Use in Vehicles. E/ECE/TRANS/505, 541 p. 2. Lianga, Z., Tiana, J., Rezaeia, S., Zhang, Y. (2015). Investigation of SVOC nanoparticle emission from light duty diesel engine using GC×GC-ToF-MS. School of Mechanical Engineering, University of Birmingham, 31 p. [in English]. 3. Foote, E., Maricq, M., Sherman, M., Carpenter, D. et al. (2013). Evaluation of Partial Flow Dilution Methodology for Light Duty Particulate Mass Measurement. SAE Technical Paper № 2013-01-1567, 10 p. [in English]. 4. Klymenko, O.A., Redzyuk, A.M., Kudrenko, O.V., River .S.O. (2012). Research and creation of a promising system for determining mass emissions of pollutants in engine exhaust gases [Doslidzhennia ta stvorennia perspektyvnoi systemy dlia vyznachennia masovykh vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn u vidpratsovanykh hazakh dyvuhniv]. Autoroadster of Ukraine, 5 (229), pp. 2-8. [in Ukrainian]. 5. Polivyanchuk, A., Gritsuk, I., Skuridina, E. (2019). Improving the accuracy of the gravimetric method for control particulate matter in diesel exhaust. New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph. "Baltija Publishing", pp. 223-244. [in English]. 6. Redzyuk, A.M., Klymenko, O.A., Kudrenko, O.V. (2012). Regarding the determination of mass emissions of pollutants by engines of wheeled vehicles. [Shchodo vyznachennia masovykh vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn dyvuhnamy kolisnykh transportnykh zasobiv]. Autoroadster of Ukraine, 4 (228), pp. 2-7. [in Ukrainian]. 7. Alozie, N. Peirce, D., Lindner, A., Winklmayr, W. et al. (2014). Influence of Dilution Conditions on Diesel Exhaust Particle Measurement Using a Mixing Tube Diluter. SAE Technical Paper 2014-01-1568, 14 p. [in English]. 8. Smart Sampler PC SPC 472. (1993). PC program for SPC 472 control. AVL, List GmbH Graz, Austria, 76 p. 9. Russel, R. (1993). Development of a Miniaturized, Dilution-Based Diesel Engine Particulate Sampling System for Gravimetric Measurement of Particulates. SAE Techn. Pap. Ser. №931190, 12 p. [in English]. 10. Polyvianchuk, A. (2015). Increasing the efficiency of particulate emission control systems with diesel exhaust gases: monograph [Pidvyshchennia efektyvnosti system kontroliu vykydiv tverdyykh chastynek z vidpratsovanymy hazamy dyzeliv: monohrafiia]. KhAHU, 224 p. [in Ukrainian]. 11. Polivyanchuk A.P. Features of Environmental Diagnostics of Heat Motors and Boiler Plants by Information Methods / A. Polivyanchuk, M. Ahieiev, A. Kagramanian, A. Baranovskis, O. Samarin // ICTE in Transportation and Logistics 2019. Series: Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham, 2020. – P. 360-367.

chuk, A., Ahieiev, M., Kagramanian, A., Baranovskis, A., Samarin, O. (2020). *Features of Environmental Diagnostics of Heat Motors and Boiler Plants by Information Methods. ICTE in Transportation*

and Logistics 2019. Series: *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer, pp. 360-367. [in English].

Надійшла до редакції 15.08.2023 р.

**Полив'ячук Андрій Павлович** – доктор техн. наук, проф., професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна; e-mail – polyvianchuk\_a@vntu.edu.ua; <http://orcid.org/0000-0002-9966-1938>.

**Грицук Ігор Валерійович** - доктор техн. наук, проф., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, Херсон, Україна, e-mail: [griksuk\\_iv@ukr.net](mailto:griksuk_iv@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0001-7065-6820>.

**Погорлецький Дмитро Сергійович** - канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, Херсон, Україна, e-mail: [dimon150582@gmail.com](mailto:dimon150582@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1256-8053>.

**Полив'ячук Наталія Миколаївна** – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна; e-mail – polyvianchuk\_n@vntu.edu.ua.

**Ефімов Олексій Сергійович** – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна; e-mail – [efimov\\_o@vntu.edu.ua](mailto:efimov_o@vntu.edu.ua).

### STUDY OF THE PROGRAMMABLE ISOKINETIC SAMPLER EFFICIENCY FOR OF ECOLOGICAL DIAGNOSTICS SYSTEMS OF HEAT ENGINES AND BOILER PLANTS

*A. Polyvianchuk, I. Gritsuk, D. Pohorletskyi, N. Polyvianchuk, O. Efimov*

The work is devoted to the solution of the actual scientific and practical task of creating a universal sampling device for systems of environmental diagnostics of heat engines and boiler plants of various purposes. Ensuring the isokinetic mode of sampling from the exhaust pipe (EP) of the engine is a more difficult task than carrying out a similar sampling process in the chimney of the boiler plant, since the exhaust gases of the engines are characterized by fluctuations of static pressures in the HT with an amplitude of up to  $\pm 500$  Pa, which must be taken into account in the operation of the sampling equipment. In the course of research, based on the analysis of global and domestic experience in the production and use of equipment for environmental certification of internal combustion engines and boiler houses, a programmable isokinetic sampler (ICT) was created, which allows you to take a proportional part of the gas sample from the full flow of exhaust gases in the EP of the power plant with accuracy  $\pm 3\%$ . Motorless and motorized test stands have been developed for modeling and research of gas-dynamic processes in the exhaust systems of engines and boiler plants, which provide the possibility of varying the parameters of gas flows - mass flow rate, speed, temperature, static pressure, velocity pressure in the ranges: 15 - 55 g/s; 5...30 m/s, 20...180 °C, 0...2.5 kPa, 10 - 550 Pa, respectively. On the basis of the created test stands, empirical dependences were established to determine the static pressure differences between the ICP and EP pipelines, in which the isokinetic mode of sampling is ensured, from the dynamic pressure of the gas flow in the EP. With the help of these dependencies, SMART control of the programmable ICP is carried out. An experimental development of the programmable ICP was carried out as part of the MT-1 minitunnel during environmental tests of the 1CH12/14 diesel engine in separate modes and according to the ESC cycle established by the UNECE Regulations R-49. The research results confirmed the compliance of the created sampling device with regulatory requirements for its design and the accuracy of determining the sampling coefficient.

**Key words:** heat engines; boiler plants; ecological diagnostics; exhaust gases; solid particles; isokinetic sampler; microtunnel.

М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М. А. Ткачук, А.П. Марченко, С.О. Кравченко

## КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОГО ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНІВ ТА ТУРБОДЕТАНДЕРНИХ УСТАНОВОК

Основна увага у статті приділяється проєктно-технологічним заходам, які спрямовані на забезпечення підвищених технологічних характеристик двигунів та турбодетандерних установок. Зокрема, розроблена удосконалена концепція технології дискретно-континуального зміцнення елементів конструкції. Ця концепція полягає у поєднанні проєктних та технологічних заходів у єдиному технічному рішенні. Завдяки такому розширеному простору параметрів забезпечується більша результативність кінцевого синтезованого рішення. Так, на прикладі аналізу напружено-деформованого стану представницького фрагменту контактуючих деталей конструкцій визначено закономірності впливу проєктних і технологічних параметрів на характеристики міцності: обґрунтовані такі набори параметрів, які забезпечують підвищену міцність контактуючих деталей та їх довговічність. Також знижується тертя у спряженні деталей. Крім того, підвищується ККД механізму, у який входять контактуючі деталі, піддані зміцненню. Як результат – підвищення технологічних характеристик двигунів, турбодетандерних установок та інших машин, деталі яких піддані дискретно-континуальному зміцненню. У цілому розроблена концепція спрямована на різке підвищення службових характеристик елементів конструкції. Для цього формуються цільові функції. Ці цільові функції мінімізуються або максимізуються у розширеному параметричному просторі. Для цього створюється параметрична модель напружено-деформованого стану фрагмента дискретно-континуально зміцнених тіл. Ця модель дає можливість досліджувати вплив проєктних та технологічних параметрів та трибомеханічні властивості контактуючих тіл. Шляхом цілеспрямованого варіювання властивостей матеріалів, форми та розмірів зон дискретно-го та континуального зміцнення можливо досягти підвищених трибомеханічних характеристик пари контактуючих тіл.

**Ключові слова:** двигун; турбодетандерна установка; дискретно-континуальне зміцнення; напружено-деформований стан; метод скінченних елементів; контактний тиск

### Вступ

До сучасних виробів машинобудівних галузей промисловості ставляться усе зростаючі вимоги до техніко-економічних їх характеристик. Зокрема, це стосується двигунів і енергетичних установок. Зважаючи на особливий акцент на характеристики довговічності, ККД і енергоефективності цих машин, необхідно здійснювати заходи із їх забезпечення на конкурентному рівні. Відповідно, слід відшукувати нові, нетрадиційні шляхи досягнення цієї мети, оскільки традиційні себе значною мірою вичерпали.

Яскравими прикладами об'єктів, на які варто звернути першочергову увагу, є двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) та турбодетандерні установки (ТДУ). Саме для цих виробів актуальними є проблеми підвищення міцності, довговічності та ККД їхніх вузлів, у складі яких – контактуючі під інтенсивним навантаженням деталі.

На вирішення зазначеної актуальної та важливої проблеми у частині проєктно-технологічного забезпечення підвищеної міцності, довговічності та ККД елементів двигунів та турбодетандерних установок спрямована ця стаття.

### Аналіз існуючих методів зміцнення елементів машинобудівних конструкцій

Для забезпечення високих експлуатаційних характеристик елементів машинобудівних конструкцій застосовуються різноманітні методи їх зміцнення [1–3]. Так, привертають увагу застосування високоентропійних та наноструктурованих металів і сплавів [4–7], поверхневого модифікування [8, 9], нанесення

різного типу покриттів [10–13]. При цьому досягається задоволення тим чи іншим критеріям (міцність, зношуваність, корозійна стійкість, витривалість, антифрикційні властивості тощо).

Важливо зазначити, що у багатьох випадках поліпшуються тільки певні із значущих службових характеристик, а інші – або залишаються на тому ж рівні, або ж – погіршуються [1]. Тому із метою усунення цього протиріччя був розроблений метод дискретно-континуального зміцнення деталей машин [1, 14, 15]. Якраз його застосування дає потенційну можливість уникнути ситуації із конфліктом протиборчих тенденцій при зміцненні деталей конструкцій. Разом із тим із урахуванням розширення множини варійованих параметрів виникає інша проблема: ускладнена процедура пошуку прогресивних технічних рішень у такому розширеному параметричному просторі. Тому зусилля, спрямовані на створення методу обґрунтування таких рішень, а також його апробація складає актуальну науково-прикладну задачу. На її вирішення спрямована ця робота.

*Мета роботи* – формування узагальненої параметричної моделі дискретно-континуального зміцнення елементів конструкцій двигунів та турбодетандерних установок та дослідження напружено-деформованого стану цих контактуючих деталей.

### Концепція обґрунтування прогресивних проєктно-технологічних рішень елементів двигунів, турбодетандерних установок та інших машинобудівних конструкцій

Основою створеної концепції обґрунтування

прогресивних проектно-технологічних рішень елементів двигунів, турбодетандерних установок та інших машинобудівних конструкцій є розвиток підходів, описаних у [1, 14, 15]. Зокрема, простір узагальнених варійованих параметрів  $V = \bigcup_i p_i$  складається із двох напівпросторів:

$$V = V_{\Pi} \cup V_T, \quad (1)$$

де  $V_{\Pi}$  та  $V_T$  – множини проектних та технологічних параметрів.

Мається на увазі, що для тієї чи іншої пари деталей, які передають потужність шляхом контактної взаємодії, технологічні режими зміцнення обирають не ізольовано, а узгоджено із проектними рішеннями ( $i$  – навпаки). Наприклад, у парі «шийка колінчастого вала – вкладиш опори» важливу роль при визначенні технологічного зміцнення відіграє форма контактуючих поверхонь деталей, властивості матеріалів, із яких вони виготовлені. Те ж – і для деталей підшипникових вузлів турбодетандерних установок тощо.

Наступним кроком при здійсненні досліджень зміцнених деталей конструкцій є установлення закономірностей впливу проектних  $p_j^{\Pi}$  та технологічних  $p_k^T$  параметрів, а також експлуатаційних навантажень  $f$  на характеристики міцності, тертя, зношування тощо. Наприклад, напружено-деформований стан контактуючих деталей конструкції описується системою рівнянь теорії пружності [16]:

$$L = (u, p^{\Pi}, p^T, f, t) = 0, \quad (2)$$

де  $u$  – масив змінних стану (для прикладу – пружних переміщень);  $p^{\Pi} = \bigcup p_j^{\Pi}$ ,  $p^T = \bigcup p_k^T$  – масиви проектних та технологічних параметрів відповідно,  $f$  – навантаження;  $t$  – час.

Співвідношення (2) можуть набувати вигляду системи диференціальних рівнянь або варіаційних принципів. При застосуванні для розв’язання (2) чисельних методів (наприклад, методів скінченних елементів [17]) отримаємо залежності розподілів вектору переміщень  $u$ , тензорів деформацій  $\varepsilon$  та напружень  $\sigma$ :

$$u_i = (u_i, p^{\Pi}, p^T, f, t), \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (5)$$

де  $r$  – радіус-вектор поточної точки простору у системі координат  $Ox_1x_2x_3$ ;  $C_{ijkl}$  – компоненти тензора

пружних модулів матеріалу деталі.

Зважаючи на те, що (3) містить, крім функціональних, ще й параметричні залежності для  $u$ , а  $\varepsilon$  та  $\sigma$  виражаються через  $u$  за (4), (5), то відповідно співвідношення (3) – (5) становлять також і параметричні залежності цих величин від  $p^{\Pi}$ ,  $p^T$ .

Відповідно, якщо сформовані певні критерії

$$I(u, \varepsilon, \sigma, p^{\Pi}, p^T) \rightarrow \text{extr} \quad (6)$$

або обмеження на характеристики

$$H(u, \varepsilon, \sigma, p^{\Pi}, p^T) \geq [H], \quad (7)$$

то маємо задачу синтезу (2), (6), (7), яку сформовано в узагальненому параметричному просторі  $V$ . Тут у (7)  $[H]$  – обмежувальні значення характеристик  $H$ .

Під критеріями  $I$  та характеристиками  $H$  можуть матися на увазі маса, габарити, допустимі напруження тощо.

Сукупність задач (2), (6), (7) формально мають своїми розв’язками оптимальні технічні рішення у просторі варійованих проектно-технологічних параметрів  $V$ .

Описана загальна канва у кожному конкретному випадку набуває того чи іншого частинного вигляду. Тоді загальна задача конкретизується (див. далі).

#### Дослідження напружено-деформованого стану контактуючих зміцнених тіл

Ілюстрацію запропонованого у роботі підходу здійснено на прикладі дискретно-континуального зміцнення у парі деталей «чавун – алюміній». На рис. 1 – представницький фрагмент такої пари деталей. У цій композиції матеріали мають різні та варійовані модулі пружності  $e$  та коефіцієнт Пуассона  $\nu$ .

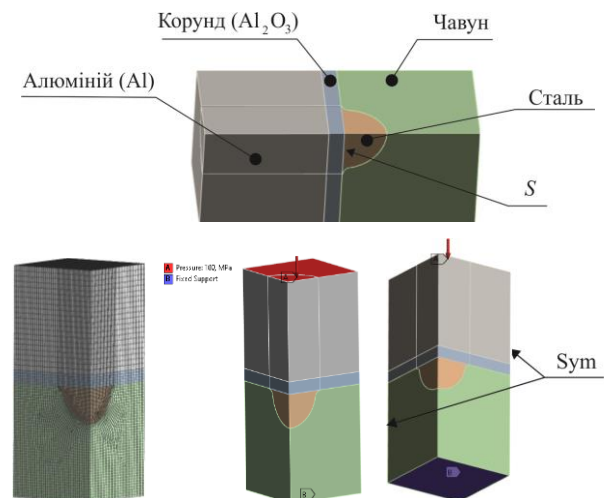


Рис. 1. Представницький фрагмент дискретно-континуально зміцнених деталей



Тут деталь із алюмінію (Al) континуально покривається за технологією MAO [10, 11] шаром корунду  $Al_2O_3$ . Чавунна деталь Iron покривається системою зон дискретного зміцнення зі сталі (Steel). Як навантаження  $f$  – тиск  $p = 100$  МПа. Фрагмент деталей входить у контакт уздовж поверхні  $S$  (див. рис. 1). У силу періодичності зон розташування дискретного зміцнення вводяться умови симетрії (Sym) – див. рис. 1 – та розглядається  $1/4$  фрагмента із тими ж умовами Sym.

У просторі параметрів як варійований обрано відношення модулів пружності матеріалу зони дискретного зміцнення  $E_{Steel}$  та чавуну  $E_{Iron}$ :

$$p = E_{Steel} / E_{Iron}, p_0 = 1. \quad (8)$$

Базові властивості: для чавуна  $E = 110,0$  ГПа,  $\nu = 0,25$ , для алюмінію  $E = 70,0$  ГПа,  $\nu = 0,35$ , для корунду  $E = 370,0$  ГПа,  $\nu = 0,23$ , для сталі  $E = 220,0$  ГПа,  $\nu = 0,28$ . Варіюється  $E = [1,1, 1,65, 2,2, 2,75, 3,3] \cdot 10^{11}$  Па. Для формування критеріальних та обмежувальних величин до розгляду вводиться номінальний варіант ( $H_0 = 4,37$  мм,  $h_0 = 4$  мм,  $a = 1,58$  мм,

$d = 7,14$  мм).

До розгляду вводяться також контрольовані величини, що віддзеркалюють рівень контактного тиску  $q$  та еквівалентних напружень  $\sigma$  за Мізесом у системі тіл:

$$q = q(p), \quad \tilde{q} = q(p) / q(p_0), \quad (9)$$

$$\sigma = \sigma(p), \quad \tilde{\sigma} = \sigma(p) / \sigma(p_0). \quad (10)$$

Ставиться задача установлення залежностей (9), (10).

**Результати дослідження напружено-деформованого стану фрагмента системи контактуючих дискретно-континуально зміцнених тіл**

У табл. 1 наведено характерні розподіли компонент напружено-деформованого стану фрагмента системи контактуючих дискретно-континуально зміцнених тіл, визначених у ході дослідження. Видно, що зі зміною  $p$  відбувається зміна характеру розподілу контактного тиску  $q$ , переміщень  $u$  та еквівалентних за Мізесом напружень  $\sigma$  [16].

Шукані залежності (8), (9) наведено на рис. 2–5.

Таблиця 1. Розподіли компонент напружено-деформованого стану дослідженого фрагмента за різних значень параметра  $p$

Параметр $p$	Розподіли компонент напружено-деформованого стану		
	контактний тиск, МПа	еквівалентні напруження, МПа	повні переміщення, $10^{-3}$ м
$p_0 = 1$			
1,5			
2			

Закінчення таблиці 1

Параметр $p$	Розподіли компонент напружено-деформованого стану		
	контактний тиск, МПа	еквівалентні напруження, МПа	повні переміщення, $10^{-3}$ м
2,5			
3			

Із їх аналізу випливає, що характеристики міцності залежать від  $p$  за монотонною залежністю. Можна констатувати, що установлені залежності недоцільно розглядати окремо, тобто у розрізі цільових функцій однієї змінної, а варто зосередитися на аналізі деякої цільової функції багатьох змінних (проектних та технологічних параметрів).

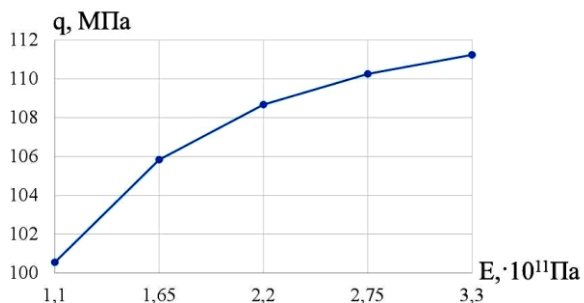


Рис. 2. Залежність максимуму контактного тиску від модуля пружності зміцненого матеріалу

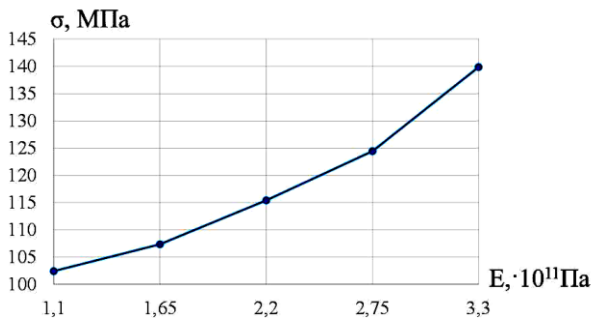


Рис. 3. Залежність максимуму еквівалентних напружень від модуля пружності зміцненого матеріалу

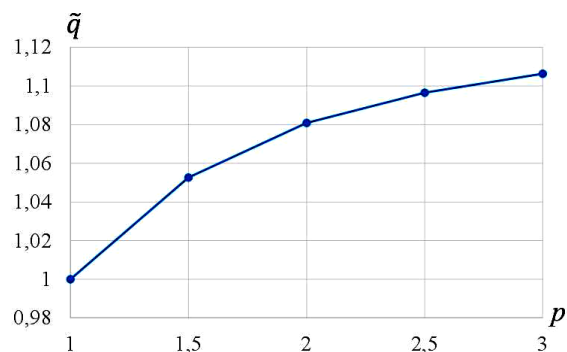


Рис. 4. Залежність відносного максимуму контактного тиску від відносного модуля пружності зміцненого матеріалу

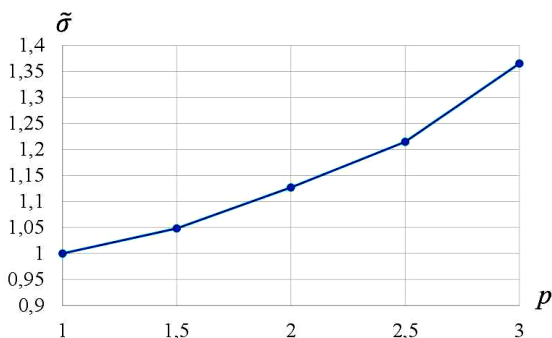


Рис. 5. Залежність відносного максимуму еквівалентних напружень від відносного модуля пружності зміцненого матеріалу

Аналіз наведених результатів дослідження напружено-деформованого стану фрагмента дискретно-континуально зміцнених тіл

1. Аналіз результатів дослідження напружено-

деформованого стану фрагмента дискретно-континуально зміцнених тіл свідчить про те, що контактний тиск та напруження розподіляються тим нерівномірніше, чим вищий модуль пружності матеріалу зони дискретного зміцнення, тобто зі зростанням параметра  $p$  (див. рис. 2–5).

2. При  $p > 1$  відбувається перерозподіл контактного тиску у зону спряження «шар  $Al_2O_3$  – Steel» (див. табл. 1). Цей ефект є позитивним із точки зору міцності, антифрикційних властивостей та зношування.

3. Задля підвищення трибомеханічних властивостей системи дискретно-континуально зміцнених тіл бажано підвищувати модуль пружності матеріалу зони дискретного зміцнення. Разом із тим обмежувальним чинником при цьому слугує небезпека різкої концентрації напружень у підповерхневому шарі у сполученні цієї зони із основним матеріалом.

### Висновки

1. У роботі описана параметрична модель напружено-деформованого стану фрагмента дискретно-континуально зміцнених тіл. Ця модель дає можливість досліджувати вплив проектних та технологічних параметрів та трибомеханічні властивості контактуючих тіл.

2. Шляхом цілеспрямованого варіювання властивостей матеріалів, форми та розмірів зон дискретного та континуального зміцнення можливо досягти підвищення трибомеханічних характеристик пари контактуючих тіл.

3. Для пошуку ефективних технічних рішень контактуючих елементів конструкцій доцільно будувати спеціалізовану базу даних, у якій варто зосереджувати результати багатоваріантних досліджень напружено-деформованого стану, тертя та зношування дискретно-континуально зміцнених деталей.

### Список літератури:

1. Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография / Ткачук Н.А., С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко, С.А. Кравченко и др. – Харьков: Планета-Принт, 2018. – 259 с. 2. Інженерія поверхні / Юценко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. – К.: Наук. думка, 2007. – 558 с. 3. Канарчук В.Є. Інженерія поверхні деталей транспортних засобів / В.Є. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Л.А. Лопата. – К.: Вісник НТУ, 2000. – Вип.4. – С. 3–14. 4. Firstov S.A. Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening) / Firstov S.A., Rogul T.G., Shut O.A. // *Powd. Met. and Met.Ceram.* – 2018. – No. 3-4. – Pp. 161-174. DOI:10.1007/s11106-018-9964-2. 5. Sathiyamoorthi Praveen High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview. / Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim // *Advanced Engineering Materials.* – 2017. – No. 20(1). <https://doi.org/10.1002/adem.201700645> 6. Ovid'ko, I.A. Review on superior strength and enhanced

ductility of metallic nanomaterials / Ovid'ko, I.A., Valiev, R.Z., Zhu., Y.T. // *Progress in Materials Science.* – 2018. – No. 94. – Pp. 462-540 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.002> 7. Ming, K. Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures / Ming, K., Bi, X., Wang, J. // *International Journal of Plasticity.* – 2019. – Pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.10.005> 8. D'yachenko S.S. Effect of the origin of the modified surface layer on the structural strength of workpieces / D'yachenko S.S., Ponomarenko I.V. // *The Phys. of Met. and Metallography.* – 2017. – T. 118. – No. 6. – Pp. 608-620. DOI:10.1134/s0031918x17060035 9. Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching. / Nemyrovskiy, Ya., Posvyatenko, E., et. al. // *DSMIE.* – 2019. – Pp. 238-247. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-22365-6\\_24](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-22365-6_24) 10. Subbotina, V. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy / Subbotina, V., Sobol, O. // *Machines. Technologies. Materials.* – 2020. – Vol. 14. – No. 6. – Pp. 247-250. 247. [full.pdf \(stumejournals.com\)](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_47) 11. A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types / Subbotina, V., Sobol, O., Belozero, V., et. al. // *Eastern-european journal of enterprise technologies.* – 2020. – Vol. 4. – No. 12 (106) – Pp. 14–23. <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/209722/210868> 12. The Effect of Deposition Conditions and Irradiation on the Structure, Substructure, Stress-Strain State, and Mechanical Properties of TiN Coatings. / N. Pinchuk, M. Tkachuk, M. Zhadko, et. al. // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V: Proceedings of the 5th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2022, June 7–10, 2022, Poznan, Poland – Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering.* 2022. – Pp. 475-484 [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_47). 13. Pinchuk N. Nanostructured coatings ZnN, obtained by vacuum-arc deposition method / N. Pinchuk, Terletskiy O.S. // *Modernization of research area: national prospects and European practices: Scientific monograph.* – Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. – Pp. 1–18. 14. Дискретно-континуальное упрочнение контактирующих элементов конструкций: концепция, математическое и численное моделирование / Ткачук, Н. А., Кравченко, С. А., Пылев, В. А. и др. // *Наука и техника.* – 2019. – № 18 (3). – С. 240–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-240-347> 15. Багатокристаліна оцінка контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених деталей / М.М. Ткачук, А.П. Марченко, С.О. Кравченко та інш. // *Двигуни внутрішнього згорання.* – 2022. – № 1. – С. 65-77. <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/264371>. 16. Вацидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / Вацидзу К.; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 542 с. 17. Zienkiewicz O. C. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. / Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor, J. Z. Zhu.; 7th ed. – Oxford: ButterworthHeinemann, 2013. – 756 p.

### Bibliography (transliterated):

1. Tkachuk, N.A., D'yachenko, S.S., Posvyatenko, Je. K., Kravchenko, S.A. et. al. (2018), "Continuous and discrete-continuous modification of surfaces of parts": monograph ["Kontinual'naja i diskretno-kontinual'naja modifikacija poverhnostej detalej: monografija"], Planeta-Print, Kharkiv, 259 p. 2. Yushchenko, K.A., Borysov, Yu.S., Kuznetsov, V.D., Korzh, V.M. (2007), "Surface engineering" ["Inzheneria poverkhni"], K.: Nauk. dumka, 558 p. 3. Kanarchuk, V. I., Posvyatenko, E. K., Lopata, L. A. (2000), "Surface engineering of transport vehicles components" ["Inzheneriia poverkhni detalei transportnykh zasobiv"], Visnyk NTU, K., No. 4, pp. 3–14. 4. Firstov, S.A., Rogul, T.G., Shut, O.A. (2018), "Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening)". *Powd. Met. and Met. Ceram.*, No. 3-4, pp. 161-174.

DOI:10.1007/s11106-018-9964-2 5. Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim (2017), "High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview". *Advanced Engineering Materials*, No. 20(1) <https://doi.org/10.1002/adem.201700645> 6. Ovid'ko, I.A., Valiev, R.Z., Zhu, Y.T. (2018), "Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials", *Progress in Materials Science*, No. 94, pp. 462-540 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.002> 7. Ming, K., Bi, X., Wang, J. (2019), "Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures", *International Journal of Plasticity*, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.10.005> 8. D'yachenko S.S., Ponomarenko I.V. (2017), "Effect of the origin of the modified surface layer on the structural strength of workpieces", *The Phys. of Met. and Metallography*, T. 118, No. 6, pp. 608-620. DOI:10.1134/s0031918x17060035 9. Nemyrovskiy, Ya., Posvyatenko, E., et. al. (2019), "Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching", *DSMIE*, pp. 238-247. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-22365-6\\_24](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-22365-6_24) 10. Subbotina, V., Sobol, O. (2020), "Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy", *Machines. Technologies. Materials*, Vol. 14, No. 6, pp. 247-250. [247.full.pdf \(stumejournals.com\)](https://full.pdf.stumejournals.com) 11. Subbotina, V., Sobol, O., Belozherov, V. et. al. (2020), "A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types", *Eastern-european journal of enterprise technologies*, Vol. 4, No. 12 (106), pp. 14–23. <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/209722/210868> 12. Pinchuk, N., Tkachuk, M., Zhadko, M., et. al. (2022), "The Effect of

*Deposition Conditions and Irradiation on the Structure, Substructure, Stress-Strain State, and Mechanical Properties of TiN Coatings*", *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V : Proceedings of the 5th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2022, June 7–10, 2022, Poznan, Poland – Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering*, Pp. 475-484 [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_47) 13. Pinchuk, N., Terlets'kyi, O.S. (2022), "Nanostructured coatings ZrN, obtained by vacuum-arc deposition method, Modernization of research area: national prospects and European practices": *Scientific monograph*. – Riga, Latvia: Baltija Publishing, – Pp. 1–18. 14. Tkachuk, N. A., Kravchenko, S. A., Pyilev, V. A., et. al. (2019), "Discrete-Continuum Hardening of Contacting Structural Elements: Concept, Mathematical and Numerical Modeling" [*"Diskretno-kontinualnoe uprochnenie kontaktiruyuschih elementov konstruktsiy: kontseptsiya, matematicheskoe i chislennoe modelirovanie"*], *Nauka i tehnika*, No. 18 (3), – pp. 240–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-240-347> 15. Tkachuk, M. M., Marchenko, A. P., Kravchenko, S. O., Tkachuk, M. A. et. al. (2022), "Multi-criteria evaluation of the contact interaction of discrete-continuous reinforced parts" [*"Bahatokryterialna otsinka kontaknoi vziaemodii dyskretno-kontynualno zmitsnykh detalei"*], *Dvyhuny vnutrishnoho zgoriannia*, No. 1, pp. 65-77. <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/264371> 16. Vasil'z, K. (1987), "Variational methods in the theory of elasticity and plasticity: Per. from English" [*"Variatsionny'e metody v teorii uprugosti i plastichnosti: Per. s angl."*], *Mir*, M., 542 p. 17. Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor, J. Z. Zhu. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford: ButterworthHeinemann. 2013. 756 p.

Надійшла до редакції 20.08.2023 р.

**Ткачук Микола Миколайович / Tkachuk Mykola M.** – доктор технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин ім. О.О.Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; тел.: (057)7076902, e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org.

**Грабовський Андрій Володимирович / Grabovskiy Andrey** – доктор техн. наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

**Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A.** – доктор техн. наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

**Марченко Андрій Петрович** – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9746-4634>

**Кравченко Сергій Олександрович** – доктор техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: dvskhpi2016@gmail.com.

## CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF DISCRETE-CONTINUOUS STRENGTHENING OF ENGINE AND TURBO-EXPANDER COMPONENTS

*M. M. Tkachuk, A. Grabovskiy, M. A. Tkachuk, A. Marchenko, S. Kravchenko*

The article focuses on design and technological measures aimed at ensuring improved technological characteristics of engines and turboexpander units. In particular, an improved concept of the technology of discrete-continuous strengthening of structural elements has been developed. This concept combines design and technological measures in a single technical solution. This expanded parameter space ensures greater efficiency of the final synthesised solution. For example, by analysing the stress-strain state of a representative fragment of contacting structural parts, the regularities of the influence of design and technological parameters on strength characteristics are determined: sets of parameters that provide increased strength of contacting parts and their durability are substantiated. Friction in the mating of parts is also reduced. In addition, the efficiency of the mechanism, which includes the contacting parts subjected to hardening, increases. The result is an increase in the technological characteristics of engines, turbo-expander units and other machines whose parts are subjected to discrete-continuous hardening. In general, the developed concept is aimed at a major enhancement of the service characteristics of structural elements. This is stated in the objective functions. These objective functions are minimized or maximized in the extended parametric space. A parametric model of the stress-strain state of a fragment of discrete-continuous reinforced bodies is created. This model makes it possible to study the impact of project and technological parameters and tribomechanical properties of contacting bodies. By purposefully varying the properties of materials, the shape and size of the zones of discrete and continuous strengthening, it is possible to achieve increased tribomechanical characteristics of a pair of contacting bodies.

**Keywords:** engine; turboexpander unit; discrete-continuous hardening; stress-strain state; finite element method; contact pressure.



О.В. Грицюк, О.О. Сулима

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА РОЗВИТОК ОРГАНІЗАЦІЇ ВИКЛАДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ «ВИПРОБУВАННЯ ДВЗ» В УМОВАХ ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

*Продовжено ознайомлення фахівців двигунобудівної галузі, науковців, викладачів, докторантів, аспірантів і студентів навчальних закладів з майже 100-річною історією викладання дисципліни «Випробування ДВЗ». Описані реалії викладання цієї дисципліни в умовах воєнного стану науково-педагогічними працівниками, які виїхали в інші регіони країни з місця постійного проживання і продовжують працювати у дистанційному режимі. Зроблено поділ досвідом організації он-лайн занять у синхронному режимі щодо курсу-ресурсу «Випробування ДВЗ» на навчальному сайті ХНАДУ. Показано, що основним критерієм оцінки любых розробок з ДВЗ, спрямованих на підвищення економічності, енергетичних або екологічних якостей двигунів – є випробування. При цьому велике значення має організація навчального процесу у ЗВО за дистанційною формою, і особливо на період воєнного стану, з визначенням платформи для проведення занять і забезпечення комплексного використання наявних технічних засобів комунікації, сайтів мережі Інтернет, месенджерів та існуючих додатків до операційних систем. Продемонстровано, що при будь-яких несподіванках з відключенням електроенергії гарантоване забезпечення безперервного дистанційного навчання здійснюється при раціональному застосуванні резервного автономного генератора, портативної зарядної станції та повербанка. При цьому особливу увагу треба приділяти вибору та налагодженню ланцюгів під'єднання складових елементів до створеної системи електроживлення.*

**Ключові слова:** навчальна дисципліна; дистанційне навчання; курс-ресурс; випробування ДВЗ; засоби комунікації; інтернет провайдер; бензиновий генератор; зарядна станція.

**Вступ.** При аналізі [1] основних віх історії викладання дисципліни «Випробування ДВЗ» у вищих навчальних закладах від зародження цього курсу до 2020 року було зроблено прогноз щодо перспективи сучасної розробки цього курсу з використанням Інтернет – технологій. Тобто не тільки три роки тому, а і значно раніше [2] були зрозумілі ті зміни у суспільстві, які відбулись внаслідок появи Інтернет, і що традиційне навчання буде мати серйозного опонента в особі не менш ефективного дистанційного навчання. Проте прогресивна педагогічна технологія ХХІ століття могла б і не знайти настільки швидке втілення у електронному курсі-ресурсі «Випробування ДВЗ», якби не вимушений загальний перехід на дистанційне навчання у зв'язку з пандемією COVID –19. Тому сталося те, що сталося, і до 100-річчя появи першого відомого навчального посібника англієця А. Джоджа [3] вже існує вітчизняний електронний спадкоємець, а саме акредитований у травні 2023 року дистанційний курс-ресурс «Випробування ДВЗ» на навчальному сайті Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ).

На жаль, життя не дало спокійно дочекатись до цієї події. Найбільший виклик сьогодення, а саме бойові дії на території України, вимусила авторів статті до подальшого вдосконалення методології викладання дисципліни «Випробування ДВЗ», а саме вибору форм і методів викладання цієї дисципліни в умовах дистанційного навчання.

**Мета роботи.** Розкрити особливості комплексного використання наявних технічних засобів ко-

мунікації, сайтів мережі Інтернет, месенджерів та існуючих додатків до операційних систем у навчальному процесі ЗВО в надзвичайних умовах дистанційного навчання.

**Організація робочого місця.** Важливою задачею задоволення дистанційної взаємодії між учасниками освітнього процесу є забезпечення доступу до мережі Інтернет (рис.1).



Рис. 1. Комплект для кабельного підключення до 4 мережі Інтернету за межами міста

Отже, як показав власний досвід і особиста практика спілкування з вимушеними переселенцями, зазвичай забирає із собою окрім будь-яких грошових заощаджень і наявні девайси, а саме ноутбуки і мобільні телефони. Тому і постає першим питання необхідності їх підключення до мережі Інтернет, оскільки така послуга у пакет допомоги переселенцю ніде не входить. Саме приклад організації власної домашньої мережі для переселеної родини і показано на рис.1. При цьому на вибір роутера вплинула необхідність підключення до мережі частини пристроїв як через бездротові інтерфейси технології Wi-Fi, так і других шляхом з'єднання з тим же маршрутизатором за допомогою кабелів.

Не менш відповідальним кроком першого етапу організації робочого місця викладача ЗВО є і вибір провайдера з забезпеченням кабельного підключення до модему (рис.1). Таким було вибрано потужного інтернет провайдера Укртелеком.

І нарешті, наступною задачею є оснащення мобільного телефону широким спектром месенджерів і додатків до операційної системи (word, pdf, docx reader та інші).

**Комунікаційні канали організації викладання дисципліни.** Вже починаючи з 28 березня 2022 року в ХНАДУ було визначено платформу для проведення занять у дистанційному режимі на період воєнного стану в Україні. Для комунікації зі студентами в режимі он-лайн було задіяно резервну версію навчального сайту ХНАДУ.

Структурування та наповнення 16-ті тем курсу «Випробування ДВЗ» здійснено засобами платформи Moodle (рис.2). При цьому для розміщення та

оприлюднення відеоматеріалів використані суттєві можливості сайту You Tube, а презентаційних матеріалів – сайту SlideShare (рис.3). Наявність цих додаткових баз навчання на загальних сайтах мережі Інтернет значно розширює можливості комунікації викладача і студентів в режимі он-лайн. Іншим поширенням таких можливостей є використання додаткового зв'язку за допомогою електронної пошти та месенджерів і додатків існуючих операційних систем мобільних смартфонів.

Основним інструментом для проведення занять у синхронному режимі обрано BigBlueButton, а резервним – Zoom (рис.4).

Природним для авторів є власне запитання – як у курсі-ресурсі «Випробування ДВЗ» досягається якість дистанційного навчання? Відповідь дуже проста. Основу відео- і презентаційних матеріалів курсу становить орієнтація як на матеріально-технічні та навчально-методичні ресурси ХНАДУ, так і на найбагатший досвід проведення будь-яких видів агрегатних і моторних випробувань в Харківському конструкторському бюро з двигунобудування (ДП «ХКБД») й на флагмані двигунобудівної галузі України – ДП «Завод імені В.О. Малишева» [4,5]. Слід зазначити, що навіть стежити за появою нової технічної інформації у конструкторських бюро і на заводах виробників двигунів дуже важко. Але ще важче зробити цю інформацію доступною до студентської аудиторії. І тільки офіційно одержаний дозвіл на фотографування і знімання випробувальних ділянок вищезазначених підприємств дав можливість суттєво підвищити ефективність щодо отримання результатів навчання за дисципліною, що описується [6].

## База дистанційного навчання MOODLE (навчальний сайт ХНАДУ. Приклад структури однієї теми)

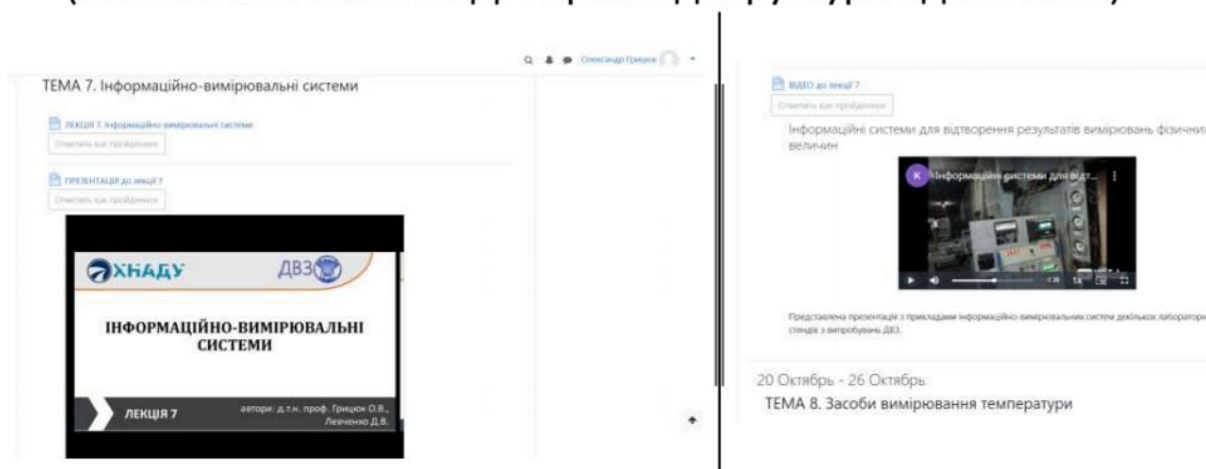


Рис. 2. Приклад структури теми 7 (лекція, презентація, відеоматеріали до практичних занять та інше) на платформі системи Moodle ХНАДУ



## Додаткові бази дистанційного навчання

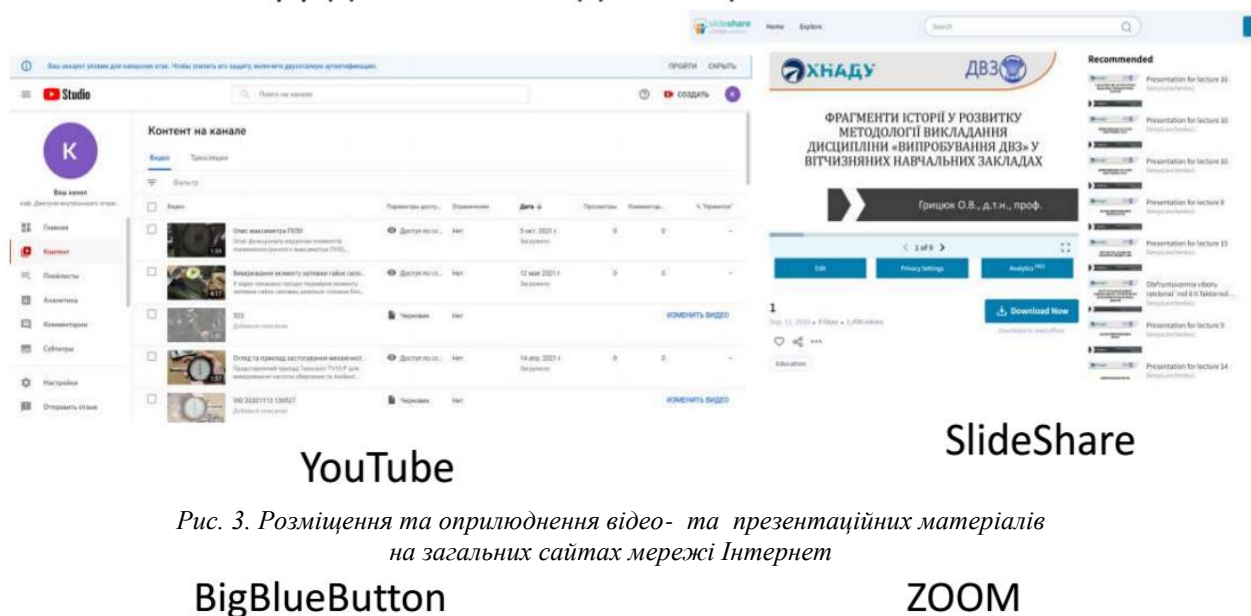


Рис. 3. Розміщення та оприлюднення відео- та презентаційних матеріалів на загальних сайтах мережі Інтернет

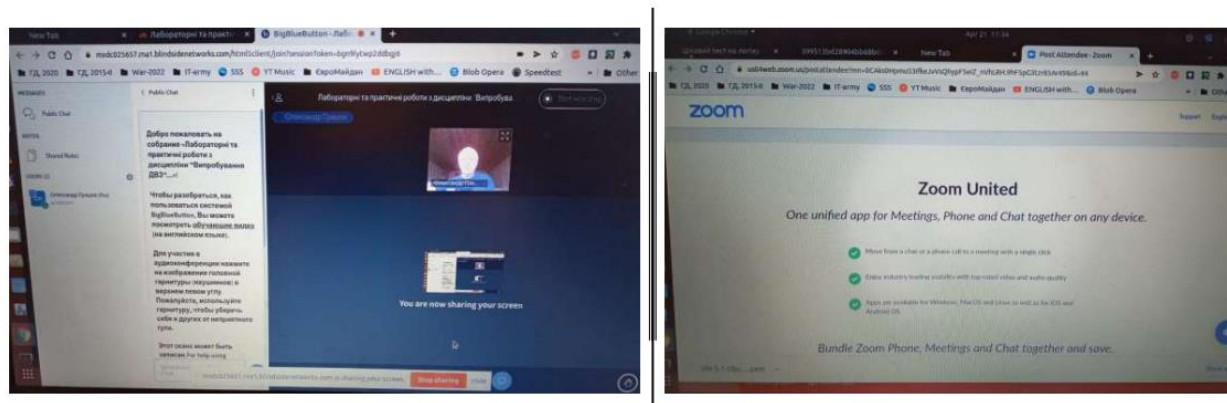


Рис. 4. Наявне використання доступних інструментів для проведення занять у синхронному режимі

Гарним прикладом дотримання принципів ефективної практики дистанційного навчання є і виконання студентами курсової роботи. Дуже значним мотивом саме цієї дії є одночасне надання доступу до авторської методики обробки результатів повного факторного експерименту, що втілена у програмний продукт «Approximation-LMS», який захищений авторським правом на твір №94461 від 04.12.2019 р.

Наступному підвищенню освітнього рівня студентів сприяє впровадження у навчальний процес методики обробки експериментальних індикаторних діаграм та програмного продукту “Analiz\_LabWork”, який також захищений авторським правом на твір №112587 від 05.04.2022.

І нарешті, останнім гаслом джерела [1] був наголос про розвиток інформаційно-вимірjuвальних систем, який знайшов своє впровадження у схемі на рис. 5. Ця, дуже проста на перший погляд, схема своїм внутрішнім наповненням

дозволяє надати студенту той набір компетентностей, який передбачено робочою програмою навчальної дисципліни «Випробування ДВЗ». В першу чергу це спеціальна компетенція СК03 – здатність аналізувати та комплексно інтегрувати сучасні знання з природничих, інженерних, суспільно-економічних та інших наук для розв’язання складних задач і проблем, пов’язаних з проектуванням та експлуатацією енергетичного і теплотехнологічного обладнання. Бо саме інтеграція всіх ланок перетворення і подальшого формування вже електричного сигналу дозволяє отримати закінчений інформативний ланцюг вимірювання будь-якого параметру, а значить розв’язати і абияку іншу складну задачу на прикладі наступного підрозділу цієї статті.

**Проведення он-лайн заняття в умовах відключення електромережі.** Налагоджене вищезазначеним чином дистанційне викладання дисципліни «Випробування ДВЗ» з використанням сучас-

ного інформаційно-навчального матеріалу та інформаційних технологій звісно потребує електроживлення всього комплексу засобів комунікації. І якщо провайдер самостійно вирішує питання надання доступу к Інтернет в існуючій ситуації локального відключення електромережі, то живлення модему, роутера, ноутбука, персонального комп'ютера,

смартфону та іншого власного обладнання є проблемою викладача. Розповсюдженою практикою вирішення такої задачі є застосування резервних автономних генераторів. Тому, насамперед, житловий комплекс для переселеної родини був обладнаний бензиновим генератором (рис.6, 7).



Рис. 5. Схема інформаційно-вимірювальної системи:

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння; Д – датчик; ПЛВС – проміжна ланка вимірювальної системи; ВПВС – вихідний пристрій вимірювальної системи



Рис. 6. Бензиновий генератор автономного електроживлення потужністю 6 кВт

Здавалося б питання викладання дисципліни при будь-яких умовах електроживлення вирішено. Переваги наявності резервного електроживлення очевидні. Але наявність переваг не прибирає і існуючі недоліки. Відключення електроенергії бувають трьох типів, а саме: екстрені, стабілізаційні та локальні. Коли застосовують стабілізаційне відключення, то на сайті оператора розміщують графіки і більш-менш однозначно визначено час зникнення електроживлення споживачів – орієнтовно 4 години. У цьому випадку цілком зрозуміло безальтернативне використання бензинового генератора, яким обладнана конкретна база. Але зовсім інша картина, коли щось раптово виходить з ладу (лока-

льне відключення), або стрімко зростає споживання електрики, та приймається рішення екстреного відключення, а за розкладом вже йде заняття в режимі он-лайн. І такі ситуації на цей час відносно часто.

Досвід показує, що при локальному, або екстреному відключенні електроенергії перші навіть години, а не то що хвилини, не виникає більш негайної потреби ніж закінчення проведення відповідальної відео конференції або он-лайн заняття для учнів чи студентів. Але пояснити необхідність швидкого запуску генератора для задоволення потреби у 100-150 Вт для такого процесу – майже нерозв'язне завдання. А що таке швидкий пуск генератора і



переключення електромережі? Це саме той час, за який у випадку зі студентами може просто закінчитись академічна година викладання.



Рис.7. Підключення бензинового генератора до локальної електромережі 380 В

Вихід з такої ситуації наглядно продемонстровано на фото рис. 8-11.



Рис.8. Підключення комплекта модем-роутера до повербанка



Рис.9. Кабелі-перехідники з вбудованими модулями підвищення напруги до 9 та 12 В

Для умов локального та екстреного відключення електроенергії обрано найпростіший (під час проведення заняття в режимі онлайн) спосіб забезпечення мобільного зв'язку, тобто залишення в мережі Інтернет – підключення комплексу модем-роутер до повербанка (рис.8).

Які проблеми виникають при реалізації цього варіанту вирішення задачі? Це узгодження наявних і потрібних напруг. Оскільки ж у переважній більшості випадків стандартні моделі повербанків мають вихідну напругу 5 В, а дві самостійних структурних одиниці комплексу модем-роутер потребують напруги 9 та 12 В, для успішного під'єднання їх до повербанка прийшлося придбати спеціальні кабелі-перехідники з USB роз'ємами на одному кінці та штекерами живлення 5,5/2,5 мм на другому і вбудованими модулями підвищення напруги до 9 та 12 В відповідно (рис. 8, 9).

А що ж робити з персональним компютером, або застарілим ноутбуком, акумулятор якого вже не тримає заряд? Їх працю в автономному режимі в умовах локального та екстреного відключення електроенергії забезпечила придбана портативна зарядна станція Esoflow для пристроїв потужністю до 600 Вт (рис.10). При підключенні тільки одного ноутбуку (рис.11) ця станція забезпечує всі умови для роботи у закладі вищої освіти повний робочий день.

Таким чином при будь-яких відключеннях електроенергії був забезпечений он-лайн процес безперебійного дистанційного навчання.

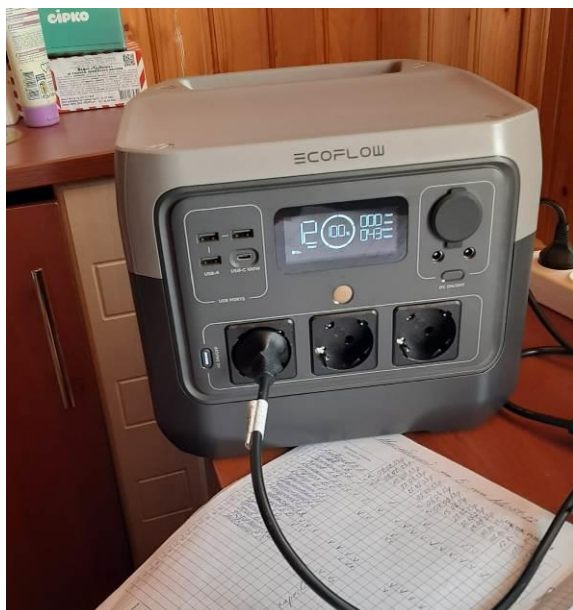


Рис. 10. Портативна зарядна станція Ecoflow для пристроїв потужністю 600 Вт

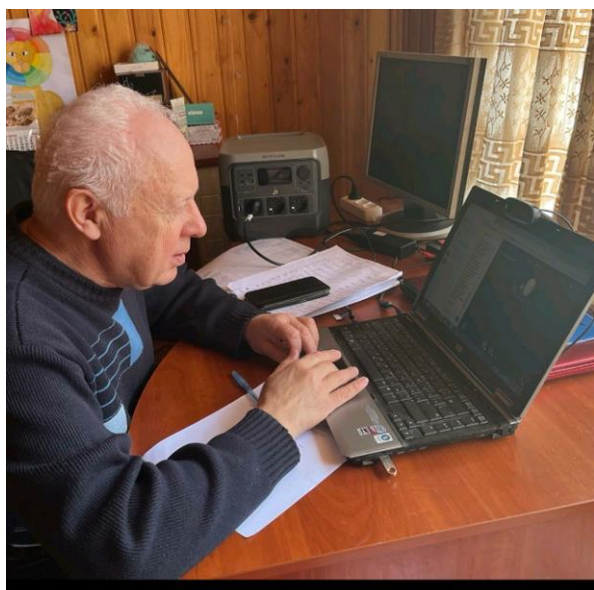


Рис. 11. Викладання дисципліни «Випробування ДВЗ» в умовах використання портативної зарядної станції

#### Висновки

1. На прикладі викладання дисципліни, а саме «Випробування ДВЗ», показаний реальний факт вирішення проблеми дистанційного навчання студентів колишніх ЗВО в умовах вимушеного переселення на період воєнного стану.

2. Визначено, що першочерговими задачами задоволення дистанційної взаємодії між учасниками освітнього процесу є забезпечення доступу до мережі Інтернет, визначення платформи для прове-

дення занять на навчальному сайті закладу вищої освіти і організація комплексного використання наявних технічних засобів комунікації, сайтів мережі Інтернет, месенджерів та існуючих додатків до операційних систем.

3. Продемонстровано, що при будь-яких несподіванках з відключенням електроенергії гарантоване забезпечення безперебійного дистанційного навчання здійснюється при раціональному застосуванні резервного автономного генератора, портативної зарядної станції та повербанку. При цьому особливу увагу треба приділяти вибору та налагодженню ланцюгів під'єднання складових елементів до створеної системи електроживлення.

#### Список літератури:

1. Грицюк А.В. Фрагменты истории в развитии методологии преподавания дисциплины «Испытания ДВС» в отечественных учебных заведениях / А.В. Грицюк // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2020– №1. – С.73-83. – DOI: 10.20998/0419-8719.2020.1.10. ISSN 0419-8719
2. Кухаренко В.М. Дистанційне навчання: Умови застосування. Дистанційний курс: Навчальний посібник. 2-е вид., доп. / В.М. Кухаренко, О.В.Рибалко, Н.Г.Сиротенко; за ред. В.М.Кухаренка. – Харків: НТУ «ХПИ», «Торсінг», 2001. – 320 с.
3. Judge Arthur W. The testing of high speed internal combustion engines. Second edition / Arthur W. Judge. — London: Chapman & Hall, LTD, 1932. – 396 p.
4. Грицюк А.В. Создание экспериментальной базы Харьковского конструкторского бюро по двигателестроению /А.В. Грицюк // Двигатели внутреннего сгорания.– Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. - №1. – С. 89-93, DOI: 10.20998/0419-8719.2016.1.16. ISSN 0419-8719.
5. Техніко-економічне обґрунтування необхідності державної підтримки у виконанні інноваційно-інвестиційного проекту «Розроблення та впровадження у виробництво малолітражного автомобільного дизеля потужністю 100-175 к.с. подвійного призначення (Слобожанський дизель)» / Ф.І. Абрамчук, С.О. Алюхін, М.Л. Белов та ін. – Харків: ХНАДУ, 2012. – 164 с. 6. Навчальний сайт ХНАДУ. Курс «Випробування ДВЗ». [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: <https://dl2022.khadi-kh.com/course/view.php?id=1287>.

#### Bibliography (transliterated):

1. Grytsyuk, O.V. (2020), "Fragments of history in the development of the methodology of teaching the discipline "Testing of internal combustion engines" in domestic educational institutions" [Fragments of history in the development of the methodology of teaching the discipline "Testing of internal combustion engines" in domestic educational institutions] [Fragmenty istorii v razvitii metodologii prepodavaniya discipliny «Ispytaniya DVS» v otechestvennykh uchebnykh zavedeniyah], *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, №1, p.p. 73-83.
2. Kuharenko V.M., Ribalko O.V., Sirotenko N.G. (2001), "Distance learning: Wash away the congestion. Distance course: Heading guide. 2nd view., add." [Dystantsiine navchannia: Umovy zastosuvannia. Dystantsiinyi kurs: Navchalnyi posibnyk. 2-e vyd., dop.], «Torsinh», NTU «KhPI», Kharkiv, 320 p.
3. Judge Arthur W. (1932), "The testing of high speed internal combustion engines. Second edition", *Chapman & Hall, LTD, London, 396 p.*
4. Grytsyuk, O.V. (2016), "Creation of the experimental base of the Kharkov design bureau for engine building" [Sozdanie eksperimental'noy bazy Har'kovskogo konstruktorskogo byuro po dvigatelestroeniyu], *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, №1, p.p. 89-93.
5. Abramchuk F.I., Alukhin S.O.,

*Bielov M.L. & others (2012), "Technical and economic support of the need for state support for the implementation of the innovative and investment project «Expanding and promoting the development of a small-capacity automobile diesel engine with a pressure of 100-175 k.s. undersigned recognition (Slobozhansky diesel [Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannya neobkhidnosti derzhavnoi pidtrymky u vykonanni innovatsiino-investytsiinoho proektu «Rozroblennia ta*

*vprovadzhennia u vyrobnytstvo malolitrazhnoho avtomobilnoho dyzelia potuzhnistiu 100-175 k.s. podviinoho pryznachennia (Slobozhanskyi dyzel)»] KhNADU, Kharkiv, 164 p. 6. External link on Learning course "Testing ICE" [Vyprobuvanya DVZ] Online learning platform of KhNADU (2022), <https://dl2022.khadi-kh.com/course/view.php?id=1287..>*

Надійшла до редакції 17.05.2023 р

**Грицюк Олександр Васильович** – доктор техн. наук, проф., професор кафедри ДВЗ Харківського національного автомобільно-дорожного університету, Харків, Україна, e-mail: [dthkbd@ukr.net](mailto:dthkbd@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0002-5596-6254>.

**Сулима Оксана Олександрівна** – магістр за спеціальністю «Системний аналіз і управління» НТУ «ХПІ», Senoir Software Engineer at TapClicks, Харків, Україна.

#### **PROVIDING AND DEVELOPMENT OF THE ORGANIZATION FOR TEACHING THE DISCIPLINE OF "DVZ TESTING" IN THE CONDITIONS OF APPLICATION OF DISTANCE EDUCATION**

*O.V. Grytsyuk, O.O. Sulyma*

Acquaintance of specialists in the engine-building industry, scientists, teachers, doctoral students, graduate students and students of educational institutions with the almost 100-year history of teaching the discipline "Testing of internal combustion engines" was continued. The realities of the current years of teaching this discipline in the conditions of a full-scale military invasion of the Russian Federation into Ukraine by scientific and pedagogical workers who moved to another region of the country from their place of permanent residence and continue to work in the former institution of higher education are described. The experience of organizing online classes in synchronous mode regarding the distance course-resource "DVZ Testing" on the educational website of the National Academy of Sciences was shared. It is shown that the main criterion for evaluating any internal combustion engine development aimed at increasing the efficiency, energy or environmental qualities of engines is testing. At the same time, it is of great importance to organize the educational process in higher education in a distance form, and especially during the period of martial law, with the definition of a platform for conducting classes and ensuring the comprehensive use of available technical means of communication, Internet sites, messengers and existing applications to operating systems. It has been demonstrated that in case of any unexpected power outages, uninterrupted distance learning is guaranteed with the rational use of a backup autonomous generator, a portable charging station, and a power bank. At the same time, special attention should be paid to the selection and adjustment of the connection chains of the component elements to the created power supply system.

**Key words:** academic discipline; Distance Learning; resource course; tests of internal combustion engines; forced reset element; means of communication; internet provider; gasoline generator; charging station



## ПАМ'ЯТІ П.М. КАНІЛО



В перший день березня цього року, в наступний день після свого 86 – річчя, пішов з життя видатний вчений, відомий фахівець в галузі теплоенергетики, теорії і екології теплових двигунів наш колега і чудова людина – **Павло Макарович Каніло**.

Павло Макарович народився 28 лютого 1937 року у м. Синельникове Дніпропетровської області, проте основна частина його життя і наукова діяльність пов'язана з Харковом.

У 1963 році П.М. Каніло закінчив Харківський інститут інженерів залізничного транспорту.

Після закінчення інституту працював на заводі ім. В.О. Малишева (1963–75), де одержав практичні навички і досвід для подальшої наукової діяльності.

У 1970 році захистив кандидатську дисертацію.

З 1975 року працював в Інституті проблем машинобудування провідним науковим співробітником, завідувачем відділу газотурбінних двигунів.

Докторську дисертацію захистив у 1988 році. Науково-практичну діяльність поєднував з викладацькою. З 1993 року він водночас професор кафедри екології Харківського автомобільно-дорожнього технічного університету.

Напрямки його наукових інтересів були пов'язані із дослідженнями процесів згоряння в теплових енергетичних установках (термогазодинаміка, хімічна кінетика, екологія), з удосконаленням систем дизель-генераторів тепловозів, дослідженнями енергетичних і екологічних характеристик ГТД при використанні вуглеводневих палив і водню, напрямків вирішення екологічних проблем автомобільного транспорту та проблем, пов'язаних із глобальним потеплінням клімату.

Павло Макарович – лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (2012), автор багатьох фундаментальних праць, серед яких особливо треба відзначити підручник «Глобальні енерго-еколого-кліматичні проблеми та невідкладність їх вирішення».



Науково-технічний журнал "Двигуни внутрішнього згорання" випускається 2 рази в рік. Основна мета видання – надати можливість опублікувати результати наукових праць і статті науковим співробітникам, викладачам, аспірантам і здобувачам наукових ступенів, а також розширити можливості для обміну науково-технічною інформацією в Україні та за її межами.

До опублікування приймаються статті українською, російською, англійською, німецькою мовами за наступними науковими напрямками:

- Загальні проблеми двигунобудування;
- Конструкція ДВЗ;
- Робочі процеси ДВЗ;
- Екологізація ДВЗ;
- Випробування та експлуатація ДВЗ;
- Технологія виробництва ДВЗ;
- Гібридні силові установки;
- Історія двигунобудування, особистості, ювілей;
- Методологія вищої освіти зі спеціальності ДВЗ.

Матеріал (стаття) подається редколегії в 2-х примірниках. До матеріалів повинен додаватися електронний варіант статті, набраної в текстовому редакторі MS Word.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ можна завантажити на офіційному сайті журналу <http://dvs.khpi.edu.ua/>, а також на сайті кафедри "Двигуни та гібридні енергетичні установки" за посиланням <http://web.kpi.kharkov.ua/diesel/nauka/zhurnal-dvz/> в розділі «Наука», «Журнал ДВЗ».

#### СТРУКТУРА СТАТТІ:

– УДК; І.Б.Ф. Заголовок статті. Анотація мовою тексту статті. Текст статті. Список літератури. Список літератури, оформлений транслітерацією. Відомості про авторів. Анотації українською (російською), англійською мовами.

*Стаття повинна мати такі необхідні елементи:*

- постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливим науковим чи практичними задачами;
- аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор,
- виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття;
- формулювання цілей статті (постановка завдання);
- виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.

До статті додаються:

- рецензія,
- акт експертизи про можливість опублікування.

СТАТТІ, ОФОРМЛЕННЯ ЯКИХ НЕ ВІДПОВІДАЄ ВИМОГАМ, РЕДКОЛЕГІЄЮ НЕ РОЗГЛЯДАЮТЬСЯ

#### УМОВИ ОПУБЛІКУВАННЯ:

Оформлена відповідно до вимог, стаття направляється авторами в редколегію за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2. НТУ "ХПІ". Кафедра "Двигуни та гібридні енергетичні установки". Редакційна колегія журналу "Двигуни внутрішнього згорання". Відповідальному секретарю редколегії. Тел. (057) 707-60-89, E-mail: rykova.inna@gmail.com.

Після прийняття рішення про опублікування автор інформується про це редколегією.

Наукове видання

**Двигуни внутрішнього згорання**  
Всеукраїнський науково-технічний журнал

Відповідальна за випуск І.В. Рикова

Формат 60x84 <sup>1/8</sup>. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Ум. друк. арк. 7,4. Наклад 100 прим.  
Замовлення 29-08. Ціна договірна.

---

**Друк**

**ФОП Іванченко І. С.**

пр. Тракторобудівників, 89-а/62, м.Харків, 61135.

Тел.: +38 (050/093) 40-243-50.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до державного реєстру видавців, виготівників та розповсюджувачів  
видавничої продукції серія ДК №4388 від 15.08.2012 р.

**[www.monograf.com.ua](http://www.monograf.com.ua)**