

О.В. Грицюк, Д.В. Левченко

## ОСОБЛИВОСТІ УЯВЛЕННЯ МОМЕНТУ ОПОРУ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ЯК НЕЗАЛЕЖНОГО ФАКТОРУ ВПЛИВУ НА ЙОГО ПУСКОВІ ЯКОСТІ

Представлена оригінальна методика дослідження пуску високообертового малолітражного дизеля (ВМД) з урахуванням зміни мінімальної температури холодного пуску без застосування кліматичної камери. В даній роботі розглядається момент опору прокручуванню колінчастого валу електростартером під час холодного пуску дизельного двигуна. Надана характеристика, числові значення та вплив на якість процесу пуску фактору середнього зведеного до колінчастого вала моменту опору прокручуванню колінчастого вала електростартером. Представлено опис лабораторного стенду для дослідження пускових якостей ВМД в умовах закладу вищої освіти. Наведено склад інформаційно-вимірювальної системи для визначення параметрів, що висвітлені в дослідженні. Практично показано, що фактор еквівалентної температури холодного пуску може бути представлений в якості відповідного моменту опору прокручуванню колінчастого вала при резульованому навантаженні на колінчастому валу дизеля під час холодного пуску. Визначені значення коефіцієнтів наведеної емпіричної залежності для досліджуваного ВМД серії 4ДТНА. Позначено, що для визначення моменту опору двигуна використана класична методика тарованого стартера, що полягає у визначенні моменту на валу електростартера під час прокручування колінчастого вала, який певним чином співвідноситься із моментом на колінчастому валу. Визначені регресійні залежності в'язкісно-температурних характеристик еталонних моторних масел в діапазоні пускових температур та емпірична залежність моменту опору досліджуваного двигуна від кінематичної в'язкості масла. В результаті створено таблицю еквівалентних температур холодного пуску при використанні змінних навантажень під час пуску ВМД. На основі результатів експерименту наведені теоретично розраховані значення еквівалентних температур холодного пуску для інших масел, які застосовуються при експлуатації ВМД. Уточнений діапазон варіювання фактору еквівалентної температури холодного пуску для подальшого багатофакторного дослідження процесу пуску ВМД, що прийматиме значення 0 °С, 5 °С і 10 °С.

**Ключові слова:** момент опору прокручуванню КВ; холодний пуск дизеля; еквівалентна температура холодного пуску; прокручування колінчастого вала; пуск навантаженого дизеля.

### Вступ

Постановка задачі дослідження пускових якостей автомобільного високообертового малолітражного дизеля (ВМД), як багатофакторного процесу, має відповідати на загальні питання, що висуває експлуатація автомобіля. Найбільш поширеним являється питання умов низькотемпературного холодного пуску дизеля. Яскравим показником покращення процесу холодного пуску може служити зниження мінімальної температури пуску.

В залежності від ступеня форсування, наявності штатних систем полегшення пуску (свічки розжарювання, пуск на легкозаймистих сумішах тощо), рівню зношеності і забрудненості деталей двигуна та його робочих рідин, стану елементів системи пуску проблеми пуску холодного двигуна можуть виникнути вже при 5 °С і навіть вище. Згідно [1] холодний пуск дизеля з нерозділеною камерою згоряння вважається надійним, якщо його температура становить мінус 10 °С. Дослідження холодного пуску при граничних температурах традиційно вимагає використання кліматичних камер, що фактично стає перешкодою для проведення багатофакторного експерименту, присвяченого дослідженню холодного пуску. Особливість такого дослідження полягає в забезпеченні однакових умов між експериментами, що потребує чималих часових затримок на відстоювання двигуна та зна-

чних фінансових затрат на здійснення процесу його охолодження.

Одним з основних негативних впливів зниження температури оточуючого середовища на пускову характеристику дизеля є ріст в'язкості моторного масла, внаслідок чого зростає момент опору прокручуванню колінчастого вала (КВ) двигуна і, відповідно, навантаження на електростартер. В цій роботі вперше запропонований метод, що покликаний представити керований фактор навантаження на колінчастому валу від стаціонарної балансірної машини та елементів трансмісії під час прокручування КВ стартером в значенні еквівалентної температури холодного пуску.

### Огляд тематичних досліджень

Дослідження з поліпшення процесу пуску являється невід'ємним етапом підвищення експлуатаційних показників будь-якого дизельного двигуна. Тематиці холодного пуску присвячено багато наукових робіт [2, 3, 4], самостійних видань та розділів в довідниках з експлуатації дизелів [5, 6]. Розробка нових і вдосконалення існуючих методів дослідження цього напрямку і на теперішній час продовжує залишатися актуальною задачею через складність процесу пуску і вимоги пошуку простіших і дешевших методів експериментального дослідження з метою його оптимізації. Також важливою являється якісна оцінка широкого спектру впливаючих факторів при створенні сучасних ре-

комендацій щодо проведення оптимізації процесу пуску без застосування допоміжних (окрім штатних) засобів його полегшення.

Особливу цікавість наразі складає пуск дизелів зі зниженим коефіцієнтом стиснення, а саме 14...17 од. [7, 2, 8, 3]. Це пов'язано переважно із двома причинами: по-перше, згідно дослідження [9], зберігається тенденція збільшення питомої потужності малолітражних дизельних двигунів за рахунок наддуву впускного повітря [7], по-друге, з питань екології і утворення шкідливих NOx і твердих часток (PM) у продуктах згоряння [2].

Розглядаючи існуючі складові процесу пуску ДВЗ, загально прийнятою фазою, що визначає здатність двигуна до пуску та якісно оцінює його характер, являється прокрутка КВ від стороннього джерела, з тією мінімальною частотою обертання, яка призводить до появи в циліндрі робочого процесу [5, 6]. Під час цієї фази найбільш вагомим комплексним фактором, що впливає на характеристики пуску являється момент опору прокручуванню колінчастого вала.

Згідно тематичного дослідження [10] момент опору прокручуванню КВ дизеля від електростартера складається із чотирьох доданків, з яких доля моменту рідинного тертя поверхонь циліндропоршневої групи, шийок колінчастого і газорозподільного валів, складають не менше 50% загального моменту опору. Їх доля може збільшуватись під час прокрутки холодного двигуна, коли моторне масло ще не встигло утворити достатній роздільний шар для якісного змащування поверхонь тертя.

Фаза пуску дизеля, що визначається моментом зрушення з місця і стрімкого зростання обертів КВ під дією зовнішнього зусилля, здебільшого характеризується параметрами моментів зрушення та опору прокручуванню КВ. Згідно [11] момент зрушення КВ з місця при дозволених температурах експлуатації моторного масла, що використовується, не залежить від завантаженості дизеля і в'язкості масла а повністю залежить від моменту інерції обертальних мас. А саме момент опору дизеля прокручуванню КВ, в умовах холодного пуску не завантаженого двигуна при різних температурах є значним і впливовим фактором навантаження на систему і може бути керованим фактором при дослідженні пускових якостей.

#### Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є виявлення кількісної відповідності між залежними параметрами – середнім зведеним моментом опору прокручуванню КВ та еквівалентною температурою навколишнього середовища при умові холодного пуску ВМД.

Задачею цієї роботи являється утворення таблиць відповідності параметрів середнього зведеного моменту опору прокручуванню КВ та еквівалентною температурою навколишнього середовища в умовах холодного пуску ВМД в межах можливостей, які дозволяє створити наявний стенд, для лінійки масел рекомендованих для експлуатації ВМД в залежності від температури навколишнього середовища.

#### Технологія проведення експериментального дослідження

В даній роботі вперше запропонований метод представлення параметру середнього зведеного моменту опору прокручуванню КВ (далі «момент опору двигуна»,  $M_{оп.ср.}$ ) в якості еквівалентного навантаження від впливу на моторне масло низької температури навколишнього середовища під час холодного пуску ВМД. Для проведення дослідження в лабораторії ХНАДУ створений стенд на базі наявного ВМД серії 4ДТНА (рис. 1). Дослідний дизель – чотирьохциліндровий ВМД з турбонаддувом розмірності 88/82 мм, що має двоклапаний механізм газорозподілу, розділену камеру згоряння з вихорокамерою в головці блоку і ступенем стиснення  $\epsilon = 17,5$  од.

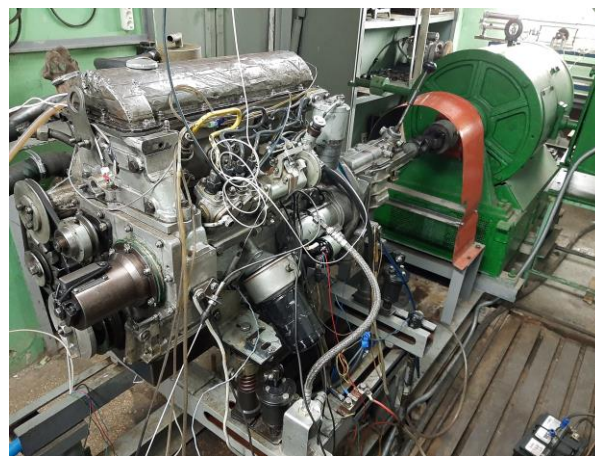


Рис. 1. Лабораторний стенд на базі ВМД серії 4ДТНА для дослідження пускових властивостей ВМД

Багатофакторне дослідження процесу холодного пуску, яке методично вже описане в [12], включає незалежний фактор моменту опору двигуна, що відтворюється зміною навантаження на КВ за рахунок кінематично з'єданого з КВ вала ротора балансирної машини через чотириступеневу коробку зміни передач (КЗП) з діапазоном передаточного відношення:

I	II	III	IV
3,5	2,26	1,45	1

Для проведення експерименту при варіюванні фактору на трьох рівнях були обрані I, II і IV передачі, що дозволяють отримати рівномірний діапазон зміни передаточного відношення.

Методика математичного планування експерименту, визначена в [12], вимагає оцінки моменту опору двигуна за рахунок проведення попереднього прокручування електростартером без подачі палива на протязі не менше 3-х секунд для досягнення необхідної для обробки рівномірності навантаження в існуючому діапазоні частот обертання. Цей параметр має за мету оцінити вплив додаткового навантаження на КВ під час холодного пуску. Однак сам процес виміру моменту опору двигуна призводить до зміни стану вузлів підвищеного тертя за рахунок прокачування масла і впливає на характер подальшого пуску. Таким чином було прийнято рішення про проведення попереднього експерименту, націленого на оцінку моментної характеристики в обраному діапазоні навантажень.

Виконуючи практичну задачу оптимізації холодного пуску для створення характеристичних таблиць щодо алгоритмів систем управління, важливо досліджувати процеси в залежності від факторів, що піддаються простому безпосередньому вимірюванню, а також використовувати для регулювання якомога менш інерційні та прості керовані фактори. Момент опору двигуна, як фактор впливу на пускові якості ВМД, являється дуже складним і знаходиться в функціональній залежності не тільки від властивостей моторного масла, а і від частоти обертання КВ та з цього погляду його використання не являється зручним. Проте, як сказано вище, він суттєво впливає на здатність ВМД до пуску, тому що визначає рівень навантаження на систему пуску двигуна.

Зниження температури навколишнього середовища нижче 5 °С призводить до різкого підвищення в'язкості моторного масла, особливо літнього та мінерального. Це призводить до підвищення енергетичних витрат на його прокачування та відносний зсув шарів масла при утворенні достатніх для цього умов. Підвищення в'язкості моторного масла являється найбільш впливовим фактором на зміну моменту опору двигуна та обмеження пускової частоти обертання.

При проведенні дослідження щодо якості пуску, інтервали між випробуваннями склали не менше 24 годин, в процесі яких дизель відстоювався при сталій температурі. Такі вимоги пов'язані з описаними вище факторами, що значним чином впливають на величину моменту опору прокручуванню КВ електростартером і далі визначають якість холодного пуску дизеля. Під час прокручуван-

ня КВ стартером, як методичного засобу оцінки моменту опору двигуна, подача палива була примусово вимкнена за допомогою важеля зупинки на регуляторі паливної апаратури.

Важливою характеристикою методики являється можливість кількісної оцінки мінімальної еквівалентної температури холодного пуску ВМД при використанні в експлуатації різних марок масел з відомими в'язкісно-температурними характеристиками (ВТХ). Таким чином, результати одного циклу випробувань щодо процесу пуску для певного конкретного моторного масла і в межах обраних параметрів, які дозволяють забезпечити лабораторний стенд, можуть бути відтворені при певних визначених температурах оточуючого середовища за рахунок заміни моторного масла.

Вибір ряду масел, рекомендованих для використання, зумовлений необхідними ВТХ за можливого діапазону роботи дизеля в діапазоні температур від мінус 15 до 100 °С. Серед сучасних напівсинтетичних та синтетичних масел за загально прийнятим маркуванням згідно класифікації стандартів SAE J300 та ГОСТ 25770-83 виділяємо 4 марки масел: 0W40, 5W40, 15W40 і M-16IXП-3, які перекривають можливий діапазон робочих температур. ВТХ обраних марок зображені на рис. 2. Масло марки 10W40, як видно з рис. 2 являється наближеним до марки 5W40 і не викликає цікавості для дослідження. Вибір конкретної марки в процесі експлуатації ВМД необхідно обґрунтовувати згідно передбачуваних умов його роботи.

Для проведення дослідження в двигун було заправлено напівсинтетичне масло марки 15W40, що являється найбільш наближеним за ВТХ до мінерального масла M-10Г<sub>2</sub>к, ГОСТ 8581-78, що зазначене в технічних умовах та керівництвах з експлуатації дизелів серії 4ДТНА. Значення високотемпературної в'язкості 40 для всіх марок масел було обрано так само як найближче до характеристики зазначеного рекомендованого масла.

Дані по в'язкісно-температурним характеристикам масла були отримані із даних випробувань хімотологічного підрозділу дослідницького центру ДП ХКБД [7], та знайдених в джерелах [14, 15] ВТХ.

При виборі нижньої температурної границі робочого діапазону використання для різних марок масел було прийнято обмеження за максимальною кінематичною в'язкістю, величина якої  $\nu \geq 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ . Це обмеження пов'язано з граничною в'язкістю масла, яка визначена для забезпечення холодного пуску ВМД [4].

Отримання експериментальних даних по в'язкості моторних масел при температурах нижче

0 °С являється дуже проблематичним. В джерелі [14] приведено такі залежності для еталонних вітчизняних масел М-8В<sub>2</sub> та М-8В<sub>2</sub>С (ТУ 38.401-58-37-92), що при температурі 0 °С мають майже ідентичні в'язкості із сучасними марками 5W та 0W. Це робить можливим отримати достовірні апроксимаційні моделі ВТХ для обраних марок масел.

Для проведення екстраполяції експериментальних характеристик ВТХ, приведених на рис. 2 масел та використання їх залежностей в подальших розрахунках із визначення еквівалентної температури холодного пуску, було проведено апроксимацію експериментальних даних. Найбільш простою залежністю із достатньою для практичного використання точністю в указаному проміжку температур

виявилася експоненціальна залежність вигляду:

$$v = B \cdot e^{C \cdot t}, \quad (1)$$

де  $B$  і  $C$  – коефіцієнти регресії;  $e$  – основа натуральних логарифмів;  $t$  – температура, °С.

Знайдені за методом найменших квадратів регресійні рівняння для відповідних масел та вигляд їх кривих зображені на рис. 2. Середні похибки апроксимації для моделей, діапазон експериментальних даних яких перекидає їх робочий діапазон в умовах холодного пуску, складають:  $\bar{A}(0W40)=6,5\%$ ,  $\bar{A}(5W40)=3,5\%$ ,  $\bar{A}(16-IXП-3)=0,7\%$ . Ця точність є достатньою, щоб провести достовірну екстраполяцію даних масла марки 15W40 за допомогою експоненціальної моделі.

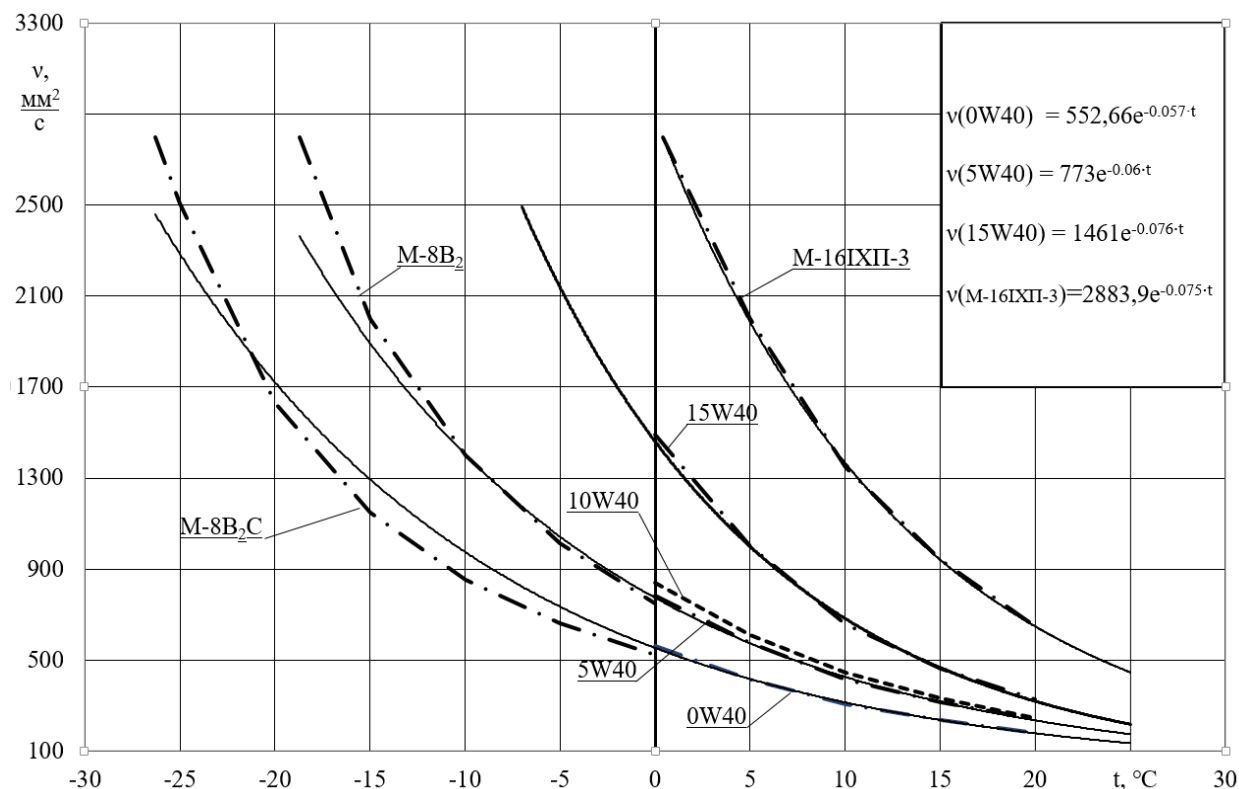


Рис. 2. В'язкісно-температурні характеристики відібраних моторних масел у порівнянні з еталонними низькотемпературними маслами М-8В<sub>2</sub> та М-8В<sub>2</sub>С [15]

Для визначення моменту опору прокручуванню КВ електростартером використовувалася класична методика тарованого стартера, детально описана в [9]. Ядром методики є визначення моменту на валу електростартера під час прокручування КВ, що співвідноситься із моментом на КВ наступним чином:

$$M_{\text{оп.сер.}} = M_{\text{СТД}} = M_{\text{СТ}_2} \cdot \eta_{\text{СТ}} \cdot i_{\text{СТД}}, \quad (2)$$

де  $M_{\text{СТ}_2}$  – момент на вихідному валу стартера;  $\eta_{\text{СТ}}$  – ККД приводу стартера;  $i_{\text{СТД}}$  – передаточне

відношення від стартера до колінчастого валу дизеля.

Момент на вихідному валу стартера знаходиться в лінійній залежності від величини струму стартера:

$$M_{\text{СТ}_2} = a \cdot I_{\text{СТ}_2} - b, \quad (3)$$

де  $a$  і  $b$  – постійні для стартера коефіцієнти. Для стартера Ст.515.3708;  $I_{\text{СТ}_2}$  – середнє значення струму за два оберти КВ.

$$I_{\text{ст}\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^m \int_0^{360} (I_{\text{ст}})_i d\phi}{360 \cdot m}, \quad (4)$$

де  $m$  – кількість обертів двигуна, за якими проводиться усереднення.

На дизелі лабораторного стенду використаний електростартер Ст.515.3708, розроблений і виготовлений у відповідності до вимог даного дизеля. Його потужність складає 2,2 кВт, передаточне відношення на КВ  $i_{\text{стД}} = 9,58$ , а ККД приводу стартера  $\eta_{\text{ст}} \approx 0,85$ . Для визначення  $M_{\text{ст}\Sigma}$  стартера Ст.515.3708 використана його моментна характеристика, зазначена на рис. 3.

Характеристика моменту опору прокручуванню КВ відтворена у вигляді графіку залежності  $M_{\text{оп.ср}} = f(n)$ , де  $n$  – частота обертання КВ. Досягнення змінних швидкісних режимів прокручування КВ дизеля забезпечується різною пусковою потужністю системи електростартерного пуску, яка, в свою чергу визначається вольт-амперною характеристикою джерела електричної енергії. Різні вольт-амперні характеристики були реалізовані різним набором банок стартерної свинцево-кислотної акумуляторної батареї (АКБ) 12СТ-85 Р з пусковим струмом 400 А, яка відповідає ГОСТ 959 2002 при ступені її зарядженості не нижче 75 %.

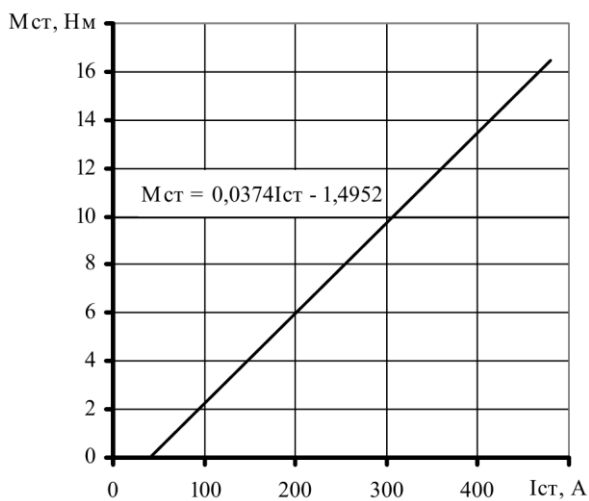


Рис. 3. Тарувальна характеристика стартера Ст.515.3708 [9]

При електричних вимірюваннях фізичних величин та подальшому оцифруванні даних зведена похибка кожної окремої ланки вимірювальної системи не перебільшувала 0,5%, що відповідає класу лабораторних приладів. Зведена похибка вимірювальної лінії не перевищувала 1%.

Реєстрація електричних сигналів датчиків виконувалась багатоканальним аналого-цифровим

перетворювачем L-Card L-783. Ці сигнали оброблялись та відтворювались персональним комп'ютером із програмним забезпеченням PowerGraph® 3.3. Для подальшої обробки паралельно записувались попередньо тарованими вимірювальними каналами току в колі обмотки стартера, напруга на її виводах, частота обертання КВ. Стабілізація навантаження контролювалась виміром тиску у двох циліндрах. Робоче вікно PowerGraph представлено на рис. 4.

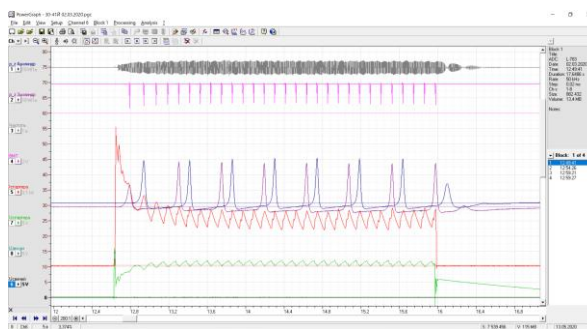


Рис 4. Робоче вікно PowerGraph® 3.3

Повний об'єм дослідження складався з чотирьох груп прокруток для передач I, II, IV та на нейтральній передачі. Всередині групи для прокручування КВ з різною частотою обертання на обмотку стартера з акумулятора 12СТ-85 Р подаються 12, 14, 16 та 18 В, що відтворюють діапазон частоти прокручування КВ в межах 170...300 хв<sup>-1</sup>. Діапазон частот прокручування двигуна на нейтральній передачі було розширено з метою отримання однозначності характеристики моменту опору прокручуванню КВ у всьому діапазоні дослідження і уточнення апроксимаційної моделі. За методикою тарованого стартера для розрахунку  $M_{\text{оп.ср}}$  за формулою (3) необхідно попередньо усереднити експериментальні дані на рівномірній ділянці за формулою (4).

Щоб перейти від моменту опору двигуна до значень еквівалентної температури холодного пуску, достатньо представити момент опору як функцію кінематичної в'язкості масла і скористатися попередньо відомими ВТХ визначених масел. З [9] відома необхідна емпірична залежність моменту опору прокручуванню КВ від частоти обертання КВ та в'язкості моторного масла:

$$M_{\text{оп.ср}} = A \cdot \nu^m \cdot n^k, \quad (5)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість масла, м<sup>2</sup>/с;  $n$  – частота обертів КВ, хв<sup>-1</sup>;  $A, m, k$  – емпіричні коефіцієнти.

Таким чином, з рівнянь (1) і (5) отримуємо залежність еквівалентної температури холодного пуску від моменту опору прокручуванню КВ та



частоти обертання КВ. Вигляд залежності  $t_{екв} = f(M_{оп.сер}, n)$  в °С наведений в формулі (6).

$$t_{екв} = \ln \left( C \cdot m \sqrt{\frac{M_{оп.сер}}{A \cdot n^k}} \cdot \frac{1}{\sqrt{B \cdot 10^{-6}}} \right). \quad (6)$$

Коефіцієнти  $A, m$  і  $k$  в рівнянні (5) і (6) характеризують склад, природу і стан системи, що утворює момент опору двигуна і залишаються незмінними при перемінних умовах навколишнього середовища. Це дозволяє завдяки рівнянню (5) зробити прогноз щодо моментної характеристики при застосуванні масел в'язкості, відмінної від використаного для експерименту. Масла нижчої низькотемпературної в'язкості дозволяють прогнозувати поведінку дизеля при пуску при більш низьких температурах навколишнього середовища. Так само, при використанні масла більшої в'язкості, наприклад М-16ІХП-3, можна виконувати зворотну задачу й імітувати пуск при вищих значеннях еквівалентної температури холодного пуску.

В результаті, отримавши в попередньому випробуванні значення необхідних емпіричних коефіцієнтів, можна побудувати моментні характеристики в залежності від температури холодного пуску. Це дозволить по-перше, мати уявлення про величину навантаження на систему пуску дизеля, і по-друге, дати рекомендації щодо використання моторного масла для певних умов експлуатації.

Важливо зауважити, що електрична балансирна машина має більш круту моментну характеристику за ДВЗ, від чого градієнт суми їх моментів із ростом частоти обертання буде більший за момент опору двигуна відповідно навантаженого від внутрішніх сил тертя, причому моментна характеристика конкретної балансирної машини зазвичай невідома. Цей фактор призводить до росту похибки із збільшенням долі моменту від балансирної машини в загальному моменті приведеному до колінчастого вала ДВЗ. Але такий характер навантаження в умовах експерименту діє навпроти як додаткове невраховане навантаження, і ще більше протидіє прокручуванню КВ. Здебільшого експериментальні дані прокруток за визначених умов випробування не виявили значного впливу цього явища на фоні природніх коливань температури навколишнього середовища та точності вимірювального обладнання.

#### Основні результати дослідження

В результаті проведених експериментів з частотою реєстрації 20 МГц були синхронно отримані дані струму в колі обмотки стартера, напруги на кінцях обмотки стартера і частоти обертання КВ. Достатню стабільність усереднення результатів прокручування КВ дала обробка даних за два робо-

чих цикли двигуна (чотири оберти) починаючи з третього оберту від початку прокручування КВ (рис. 5). Таким чином були отримані експериментальні дані  $M_{оп.сер}$  для двигуна без навантаження та для кожної з визначених передач КЗП із під'єднаним валом ротора балансирної машини.

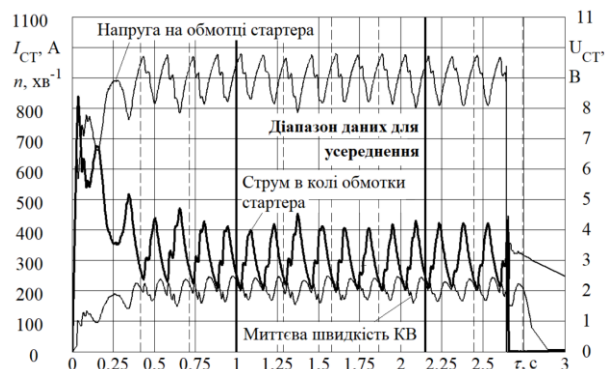


Рис. 5. Результати прокручування КВ холодного дизеля при електроживленні стартера від АКБ 12 В, 60 А · год

Отримані експериментальні дані прокруток двигуна без навантаження при середній для експериментів температурі  $\approx 14$  °С наведені на рис. 6. Для пошуку коефіцієнтів рівняння (5) для експериментального двигуна за даними прокручування КВ дизеля на нейтральній передачі методом найменших квадратів побудована апроксимаційна крива вигляду:

$$M_{оп.сер} = 6,8965 \cdot n^{0,4299}. \quad (7)$$

Знайдені відповідні коефіцієнти залежності (5) мають значення:  $A = 226, m = 0,46, k = 0,43$ . За двадцятьма контрольними точками, рівномірно розташованими в діапазоні 150...300 хв<sup>-1</sup>, відносна похибка описання моментної характеристики дизеля серії 4ДТНА рівнянням (5) склала менше 0,03%. Результати апроксимації зазначені на рис. 6. При цьому розподілені за групами навантаження моментні характеристики змодельовані в еквіваленті температурам холодного пуску.

В результаті оцінки експериментальних даних для використаного в описаному дослідженні масла 15W40 за рівнянням (6) отримані значення еквівалентної температури холодного пуску: 1 °С, 6 °С і 10 °С відповідно для ІV, ІІ і І передач. Таким чином, уточнено діапазон варіювання фактору еквівалентної температури для підготовки багатфакторного експерименту по дослідженню пускових якостей ВМД, де фактор еквівалентної температури холодного пуску буде варіюватися на трьох рівнях і прийматиме значення 0 °С, 5 °С і 10 °С, відповід-

но, для нормованих значень фактору мінус 1, 0, 1 при формуванні плану експерименту [12].

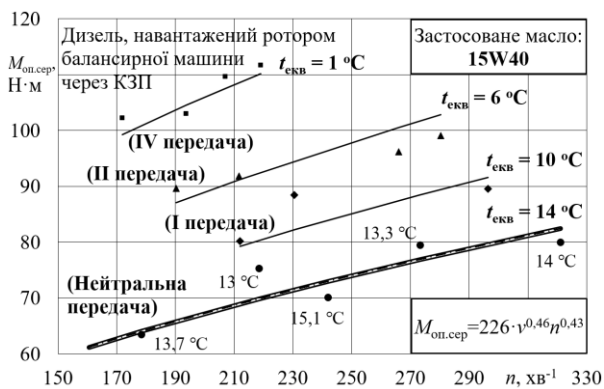


Рис. 6. Результати апроксимації моментної характеристики ВМД

Наступним етапом за допомогою апроксимаційних залежностей ВТХ (рис. 2) знаходимо таким самим методом значення еквівалентних температур для інших визначених масел. Значення коефіцієнтів

*B* і *C* відповідних масел, отриманих в результаті розрахунків при вже зазначених коефіцієнтах залежності (5), для досліджуваного ВМД, зведені в таблицю 1.

Таблиця 1. Величини коефіцієнтів *B* і *C* в моделях апроксимації відповідно до використаних масел

	М-16 ІХП-3	15W40	5W40	0W40
<i>B</i>	2883,9	1461	773	552,66
<i>C</i>	-0,075	-0,076	-0,06	-0,057

Основним результатом розрахунку служить таблиця значень еквівалентних температур холодного пуску при використаних в дослідженні видах навантаження під час пуску ВМД та розрахункові значення еквівалентних температур холодного пуску при аналогічних випробуваннях із використанням інших приведених на рис. 2, моторних масел. Результати занесені в таблицю 2.

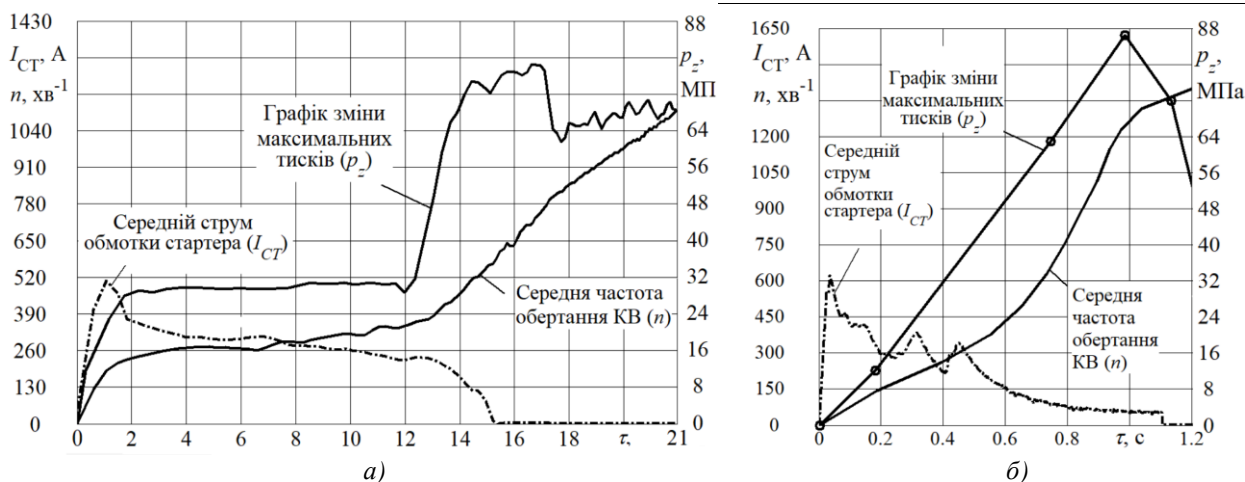


Рис. 7. Експериментальні пуски дизеля 4ДТНА в умовах лабораторного стенду із застосуванням 4-ї (а) та нейтральної (б) передачі

Таблиця 2. Значення еквівалентної температури при використанні різних типів масел та змінному навантаженні, °С

Марка масла \ Передача	М-16 ІХП-3	15W40	5W40	0W40
Дизель на нейтральній перед.	24	14	9	3
I	19	10	3	-3
II	15	6	-3	-9
IV	10	1	-9	-15

Прикладом щодо практичного використання описаного підходу при проведенні багатофакторного експерименту з дослідженням пуску ВМД є представлення на рис. 7 характеристик холодних пусків дизеля 4ДТНА в умовах лабораторного стенду з крайніми видами його навантаження. Саме результат експериментального здійснення цих двох пусків показує практичну придатність відпрацьованої технології щодо уявлення моменту опору дизельного двигуна як незалежного фактору впливу на його пускові якості через еквівалентну температуру холодного пуску та демонструє зручність і гнучкість підходу з моделювання суттєво різної температури навколишнього середовища у простих

умовах лабораторного стенду закладу вищої освіти (ЗВО)

### Висновки

1. Завдяки уявленню моменту опору дизельного двигуна як незалежного фактору впливу на його пускові якості через еквівалентну температуру холодного пуску обґрунтована можливість підготовки шестифакторного експериментально-розрахункового дослідження пускових якостей ВМД з моделюванням температур навколишнього середовища від 20 до мінус 15 °С в умовах лабораторного стенду ЗВО.

2. Виявлена кількісна відповідність між залежними параметрами – середнім зведеним моментом опору прокручуванню КВ та еквівалентною температурою навколишнього середовища при умові холодного пуску ВМД. Отримана залежність

має вигляд:  $t_{\text{екв}} = \ln \left( C \cdot m \sqrt{\frac{M_{\text{оп.сеп}}}{A \cdot n^k}} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{B \cdot 10^{-6}}} \right)$ . Значення

сталих для кожного двигуна і моторного масла коефіцієнтів  $A$ ,  $m$ ,  $k$ ,  $B$  і  $C$  визначено для ВМД базової серії 4ДТНА та моторних масел М-16 ІХП-3, 15W-40, 5W-40, 0W-40.

3. Проведено контрольні пуски з варіюванням виключно тільки еквівалентної температури холодного пуску, результатами яких підтверджено дієздатність запропонованого підходу до планування багатфакторного експерименту з дослідження пуску ВМД.

### Список літератури:

1. ГОСТ Р 54120-2010. Двигатели автомобильные. Пусковые качества. Технические требования ; введ. 21.12.2010. – М. : Стандартинформ, 2011. – 11 с. 2. Pasaud P. Cold Start on Diesel Engine: Is Low Compression Ratio Compatible with Cold Start Requirements? / P. Pasaud, H. Perrin, O. Laget // SAE International Journal of Engines. – 2009. – Vol. 1, № 1. – С. 831-849. 3. MacMillan D. J. Influences on the Cold Start Behaviour of a Diesel Engine at Reduced Compression Ratio : дис. ... PhD : утв. 05.2009 / David James MacMillan : University of Nottingham. – Nottingham, 2009. – 243 с. 4. Казаков А. В. Методика оценки эффективности устройств облегчения пуска холодного двигателя автомобиля : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.10 / Казаков Александр Владимирович. – Оренбург, 2018. – 18 с. 5. Микулин Ю.В. Пуск холодных двигателей при низкой температуре / Ю.В. Микулин, В.В. Карницкий, Б.А. Энглин. – М.: Машиностроение, 1971. – 216 с. 6. Костин А.К. Работа дизелей в условиях эксплуатации : справочник / А. К. Костин, Б. П. Пугачев, Ю. Ю. Кочинев ; под общ. ред. А. К. Костина. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 284 с. 7. Рыжков В. А. Совершенствование характеристик форсированных среднеоборотных двигателей двойного назначения средствами топливopодачи и воздухоcнабжения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.04.02 / Рыжков Валерий Александрович; Москва.

Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2018. – 32 с. 8. Бондарь В. Н. Улучшение пусковых качеств дизеля с пониженной степенью сжатия путем использования электрических подогревателей воздуха на впуске / В. Н. Бондарь, А. А. Малоземов, В. С. Кукиc // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 7. – С. 22-26. 9. Грицюк А.В. Теоретичні основи та практичні методи створення високооборотного малолітражного дизеля багатопільового призначення малолітражного дизеля : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.05.03 / Грицюк Александр Васильевич ; Харків. НТУ «ХПІ». – Харків, 2010. – 47 с. 10. Выявление критических узлов трения, влияющих на момент сопротивления автотракторного дизеля при его пуске / Ю.С. Бородин, А.В. Грицюк, Д.В. Демиденко, В.Г. Кондратенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2002. – № 1. – С. 60-63. 11. Бондарь, В.Н. Метод имитации нагружения форсированного дизеля на режимах пуска в условиях низких температур окружающего воздуха / В.Н. Бондарь, В.С. Кукиc, А.А. Малозёмов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2016. – Том 2 (28). – С. 2-7. 12. Левченко Д.В. Обґрунтування необхідності наступного кроку щодо застосування методу математичного планування експерименту у дослідженні ДВЗ / Д. В. Левченко, О.В. Грицюк, А.П. Кузьменко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2019. – № 2. – С. 66-72. 13. 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. Альохін, М.Л. Белов [та ін.] ; монографія за ред. Ф. І. Абрамчука, О. В. Грицюка та І. А. Дмитрієва. – Х. : ХНАДУ, 2012. – 164 с. 14. Anton Paar : Wiki : Engine Oil : “Viscosity of Engine Oil” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://wiki.antonpaar.com/en/engine-oil>. 15. Марченко А. П. Двигуни внутрішнього згорання : серія підручників у 6 т. Т. 1. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин / А. П. Марченко, М. К. Рязанцев, А.Ф. Шеховцов ; за ред. А. П. Марченка, А. Ф. Шеховцова. – Х. : Прапор, 2004. – 384 с. – ISBN 966-7880-93-1.

### Bibliography (transliterated):

1. GOST R 54120-2010 Car engines. Starting qualities. Technical requirements : dated 12.21.2010 [GOST R 54120-2010. Dvigateli avtomobil'nye. Puskovye kachestva. Tehnicheskie trebovaniya : vved. 12.21.2010], Moscow, 11 p. 2. Pasaud, P., Perrin, H., Laget, O. “Cold Start on Diesel Engine: Is Low Compression Ratio Compatible with Cold Start Requirements?”, SAE International Journal of Engines, Vol. 1, No 1. pp. 831-849 3. MacMillan, D. J. (2009) Influences on the Cold Start Behaviour of a Diesel Engine at Reduced Compression Ratio : dissertation PhD, Nottingham, 243 p. 4. Kazakov, A. V. (2018) Methodology for assessing the effectiveness of devices to facilitate starting a cold engine of a car : Author's thesis [Metodika ocenki jeffektivnosti ustrojstv oblegchenija puska holodnogo dvigatelja avtomobilja : avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk], Orenburg, 18 p. 5. Mikulin Ju.V., Karnickij V.V., Jenglin B.A. (1971) Starting cold engines at low temperatures [Pusk holodnyh dvigatelej pri nizkoj temperature], Moscow, 216 p. 6. Kostin, A. K., Pugachev, B. P., Kochinev, Ju. Ju. (1989) Diesel Engine Operation: handbook [Rabota dizelja v uslovijah jekspluatacii : spravocchnik], St. Petersburg, 284 p. 7. Ryzhkov, V. A. Improving the characteristics of boosted mediumspeed dual-purpose engines by means of fuel supply and air supply : Author's thesis [Sovershenstvovanie harakteristik forsirovannyh sredneoborotnyh dvigatelej dvojnogo naznachenija sredstvami toplivopodacii i vozduhosnabzhenija : avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk], Moscow, 32 p. 8. Bondar', V. N., Malozemov, A. A., Kukis, V. S. (2016) “Improving the starting performance of a diesel



engine with a reduced compression ratio by using electric inlet air heaters" [Uluchshenie puskovykh kachestv dizelja s ponizhennoj stepenju szhatija putem ispol'zovanija jelektriche-skih podogrevatelej vozduha na vpuske], No 7, pp. 22-26. 9. Gricjuk A.V. (2010) *Theoretical Foundations and Practical Methods of Targeting a High-Visage Light-Duty Small-Bagato Diesel Engine : Author's thesis [Teoretichni osnovi ta praktichni metodi stvorennja visokoobertovogo malolitrazhnogo dizelja bagatocil'ovogo priznachennja malolitrazhnogo dizelja : avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk]*, Kharkiv, pp. 47. 10. Borodin, Yu.S., Gritsyuk, A.V., Demidenko, D.V., Kondratenko, V.G. (2002) "Identification of critical friction nodes affecting the moment of resistance of a tractor when it starts" [Vyjavlenie kriticheskikh uzlov trenija, vlijajushhih na moment soprotivlenija avtotraktorno-go dizelja pri ego puske], *Dvigateli vnutrennego sgoranija*, №1, p.p. 60-63. 11. Bondar', V.N., Kukis, V.S., Malozjmov, A.A. (2016) "A method for simulating the loading of a forced diesel engine under starting conditions at low ambient temperatures" [Metod imitacii nagruzenija forsirovannogo dizelja na rezhimah puska v uslovijah nizkih temperatur okružhajushhego vozduha], *Izvestija MGТУ «MAMI» Vol 2(28)*, pp. 2-7. 12. Levchenko, D.V., Gricjuk, A.V. (2019) "Oboruntuvannya offensivno kroku

shodo zasosuvannya method of mathematical planning experiment experiment dloshenni DVZ" [Oboruntuvannya neobhidnosti nastupnogo kroku shodo zastosuvannya metodu matematichnogo planuvannya eksperimentu u doslidzhenni DVZ], *Dvigateli vnutrennego sgoranija*, №2, p.p. 66-72. 13. Abramchuk, F.I., Al'oxin, S.O., Byelov, M.L. ta in. (2012) *Feasibility study of the need for state support in the implementation of innovation and investment project "Development and implementation in the production of small car diesel with a capacity of 100-175 hp dual-use (Slobozhansky diesel)" [Texniko-ekonomichne obg`runtuvannya neobhidnosti der-zhavnoy pidtry`mky` u vy`konanni innovacijno-investy`cijnogo projektu «Rozroblennya ta vprovadzhennya u vy`robnju`ctvo malolitrazhnogo avtomobil'nogo dy`zelya potuzhnisty 100-175 k.s. podvijnogo pry`znachennya (Slobozhans'ky` dy`zel')»]*, Kharkiv, 164 p. 14. Anton Paar : Wiki : Engine Oil : "Viscosity of Engine Oil", available at: <https://wiki.anton-paar.com/en/engine-oil>. 15. Marchenko, A. P., Ryazantsev, M. K., Shekhovtsov, A.F. (2004) *Development of designs of the forced engines of ground transport cars [Rozrobka konstrukcij forsovanih dviguniv nazemnih transportnih mashin]*, Kharkiv, 384 p.

Надійшла до редакції 22.06.2020р.

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

**Левченко Денис Вадимович** – аспірант кафедри ДВЗ Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: [denislev4enko@gmail.com](mailto:denislev4enko@gmail.com)

## ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК НЕЗАВИСИМОГО ФАКТОРА ВЛИЯНИЯ НА ЕГО ПУСКОВЫЕ КАЧЕСТВА

*О.В. Грицюк, Д.В. Левченко*

Представлена оригинальная методика исследования пуска высокооборотного малолитражного дизеля (ВМД) с учетом изменения минимальной температуры холодного пуска без применения климатической камеры. В данной работе рассматривается момент сопротивления прокручивание коленчатого вала электростартером во время холодного пуска дизельного двигателя. Дана характеристика, числовые значения и влияние на качество процесса пуска фактора среднего приведенного к коленчатому валу момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала электростартером. Представлено описание лабораторного стенда для исследования пусковых качеств ВМД в условиях учреждения высшего образования. Приведен состав информационно-измерительной системы для определения параметров, освещенных в исследовании. Практически показано, что фактор эквивалентной температуры холодного пуска может быть представлен в качестве соответствующего момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала при регулируемой нагрузке на коленчатом валу дизеля во время холодного пуска. Определены значения коэффициентов приведенной эмпирической зависимости для исследуемого ВМД серии 4ДТНА. Обозначено, что для определения момента сопротивления двигателя использована классическая методика тарированного стартера, которая заключается в определении момента на валу электростартера при прокрутке коленчатого вала, который определенным образом соотносится с моментом на коленчатом валу. Определены регрессионные зависимости вязкостно-температурных характеристик эталонных моторных масел в диапазоне пусковых температур и эмпирической зависимости момента сопротивления исследуемого двигателя от кинематической вязкости масла. В результате создано таблицу эквивалентных температур холодного пуска при использовании переменных нагрузок во время пуска ВМД. На основе результатов эксперимента приведены теоретически рассчитанные значения эквивалентных температур холодного пуска для других масел, применяемых при эксплуатации ВМД. Уточненный диапазон варьирования фактора эквивалентной температуры холодного пуска для дальнейшего многофакторного исследования процесса пуска ВМД, которые примут значения 0 °С, 5 °С и 10 °С.

**Ключевые слова:** момент сопротивления прокручиванию КВ; холодный пуск дизеля; эквивалентная температура холодного пуска; прокручивание коленчатого вала.

## FEATURES OF REPRESENTING THE TORQUE OF A DIESEL ENGINE AS AN INDEPENDENT FACTOR OF INFLUENCE ON ITS STARTING QUALITIES

*O.V. Grytsyuk, D.V. Levchenko*

In this study, we presented an original method for a high-speed small displacement diesel engine (HSSDDE) start with changing the minimum cold start temperature without using a climate chamber. This work deals with the diesel engine torque reduced to the crankshaft while its electric starter motoring in the cold start process. The characteristic, numerical values and influence of the average torque factor and its diesel engine start process efficiency are given. Scheme of the laboratory bench intended for study of the HSSDDE starting qualities in the conditions of a higher education institution is presented. The structure of the information-measuring system for determining the parameters, used in current study, is given. Empirically shown, that the equivalent cold start temperature can be presented as a dependent factor of the adjustable diesel engine torque during cold start. 4DTNA series HSSDDE empirical dependencies coefficients are determined. The torque of crankshaft motoring was determined

with the classical method of a calibrated starter using the correlation of electric starter shaft torque while motoring the crankshaft with the diesel engine torque. Some standard motor oils viscosity-temperature characteristics regression dependences in the range of starting temperatures and the empirical torque dependence on the oil kinematic viscosity are determined. As a result, a table of equivalent cold start temperatures was created using variable loads during HSSDDE startup. On the basis of the results of the experiment the theoretically calculated values of equivalent cold start temperatures for other oils used in the operation of HSSDDE are given. Specified range of variation of the cold start equivalent temperature factor for further polyfactorial investigation of the HSSDDE start process, which will take values of 0 °C, 5 °C and 10 °C.

**Key words:** crankshaft motoring torque; diesel engine cold start; equivalent cold start temperature; motoring the crankshaft.

УДК 621.432.3

DOI: 10.20998/0419-8719.2020.2.10

*А.Э. Хрулев, С.А. Дмитриев*

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ВПУСКА НА ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ ПЫЛИ И ИЗНОС ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ДВС

*В условиях жестких ограничений, накладываемых на конструкцию ДВС экономическими и экологическими требованиями, имеется риск нештатного и незапланированного снижения ресурса ДВС вследствие повышенного абразивного износа. В соответствии с этим цель работы сформулирована как исследование типовых конструкторских решений впускных каналов ДВС с точки зрения их влияния на абразивный износ деталей. При определении возможных источников абразивных частиц было выявлено, что получившие широкое распространение воздушные фильтры из волокнистых материалов обладают свойством пропуска пыли при сильном загрязнении. В связи с этим для типового элемента впускного канала была разработана методика расчета криволинейного движения частицы по линии тока воздуха с учетом действующих сил вблизи бокового отвода из канала. Расчет с допущением о движении воздуха по радиусу показал, что в результате центрифугирования частица пыли отклоняется от линии тока воздуха и переходит на больший радиус тем сильнее, чем больше ее размер и скорость воздуха. Оценка достоверности результатов расчета выполнена путем численного моделирования двухфазного течения с помощью программного комплекса ANSYS. Получено совпадение результатов расчета движения частицы с результатами моделирования в диапазоне наиболее разрушительных при абразивном износе размеров частиц 10-20 мкм с точностью не хуже +20%. Сравнение результатов расчета и моделирования с опытными данными выполненных исследований причин неисправностей ДВС подтвердило, что во впускной системе за счет неравномерного распределения частиц может возникнуть локальный абразивный износ в одном или нескольких цилиндрах. На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по повышению надежности и ресурса ДВС в эксплуатации, включая необходимость не только учета процессов центрифугирования пыли при проектировании, но и возможного уточнения регламентов обслуживания уже существующих ДВС.*

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания; абразивный износ; впускной коллектор; частица; инерция; центрифугирование.

### Постановка проблемы

Известно, что абразивный износ является одним из главных факторов, определяющих надежность и ресурс всех типов ДВС в эксплуатации [1,2]. Влияние абразивного износа на техническое состояние двигателей в эксплуатации подтверждается известным фактом – на протяжении многих десятилетий значительные усилия конструкторов и исследователей были направлены на решение комплекса проблем, связанных с абразивным изнашиванием деталей и узлов, включая не только разработку мероприятий по снижению поступления абразивных частиц к парам трения, но и по уменьшению воздействия этих частиц на трущиеся поверхности [3,4].

И действительно, за долгие годы все основные закономерности абразивного износа пар трения применительно к двигателям внутреннего сгорания были достаточно подробно изучены, в том

числе, в рамках фундаментальной научной дисциплины, исследующей трение и износ – трибологии [5,6]. В результате исследований практически не осталось "белых пятен" в процессах, связанных с абразивным износом деталей ДВС. Так, были разработаны вполне конкретные и исчерпывающие рекомендации как по выявлению (диагностике), так и по предотвращению абразивного износа [7]. Это касается комплекса соответствующих мероприятий, начиная от конструктивных, осуществляемых при проектировании и создании новых образцов с целью организации эффективной очистки воздуха, масла, рабочих жидкостей от абразивных частиц, и технологических, включая обеспечение износостойкости деталей и узлов [8]. Далее мероприятия продолжают в эксплуатации, что включает приемы и принципы надлежащей эксплуатации транспортных средств, позволяющие ограничить поступление абразива в двигатель, своевременную и