

УДК 623.438.3

К.В. Коритченко¹, Д.В. Бізониш¹, І.В. Цебрюк², О.В. Серпухов¹, В.О. Темніков²¹Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків²Національна академія Національної гвардії України, Харків

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТИСНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ЗАРЯДУ В ДВИГУНІ ТИПУ 5 ТДФ НА РЕЖИМІ ХОЛОДНОГО ПУСКУ

У роботі досліджено зміну стан повітряного заряду на режимі холодного пуску двигуна типу 5 ТДФ. Обґрунтовано техніку вимірювання динамічного тиску в циліндрі дизельного двигуна. Шляхом розрахункового аналізу кривих стиснення в циліндрах двигуна проведено оцінку теплових втрат у двигуні 5 ТДФ на режимі холодного пуску.

Ключові слова: дизельний двигун, тиск, повітряний заряд, холодний пуск, теплові втрати.

Вступ

У безлічі техніці і машинах використано потужні силові установки на основі дизельних двигунів. До такої техніки висувуються вимоги по виконанню швидкого пуску і виходу на експлуатаційний режим в різних кліматичних умовах. Проте в умовах низьких температур, особливо в арктичних районах, не повною мірою розв'язана проблема швидкого і надійного пуску потужних двигунів.

У роботах [1, 2] запропонована технологія електророзрядного пуску дизельного двигуна. Переваги в надійному і прискореному пуску двигуна за даною технологією забезпечуються швидким об'ємним примусовим електророзрядним запаленням горючої суміші в циліндрах двигуна замість традиційної технології повільного запалення нагрітими до високих температур поверхнями малорозмірних елементів.

Для визначення технічних вимог до системи електророзрядного холодного пуску, що створюється під заданий двигун, потребує встановлення стан повітряного заряду на режимі холодного пуску. На вирішення цієї задачі, стосовно двигуна типу 5 ТДФ [3], спрямована дана робота.

Основна частина

Техніка вимірювання динамічного тиску в циліндрі дизельного двигуна

Вимірювання динамічного тиску здійснювалося за допомогою п'єзо датчика тиску. Принцип дії датчика полягає в п'єзо ефекті, що виникає в результаті стиснення п'єзокристалу, та спричиняє до виникнення на його поверхнях електричного заряду, величина якого залежить від сили стиску цього кристала [4]. До п'єзо датчика підключається осцилограф через вимірювальний кабель. Під час стиснення кристала відбувається заряджання ємності C_1 , на якій з'являється напруга (рис. 1). Величина напруги U є прямо пропорційною силі стиску.

Заряд ємності Q , що підключена до активного опору (вхідного опору осцилографа), зменшується за експоненціальним законом:

$$Q = Q_0 e^{\frac{-t}{R_{\text{вх}} C_1}}, \quad (1)$$

де Q_0 – заряд, що створюється в результаті стиснення п'єзоелемента; $R_{\text{вх}}$ – вхідний опір осцилографа; C_1 – номінал ємності; t – час.

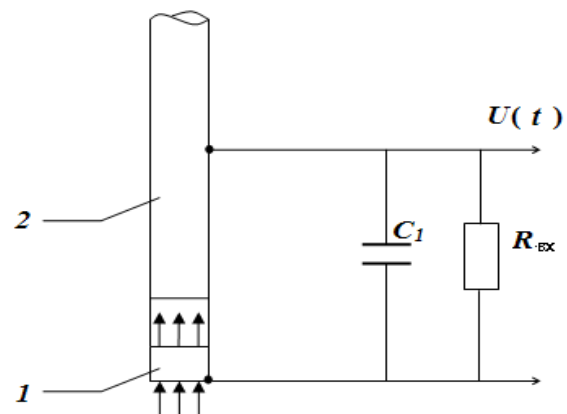


Рис. 1. Схема роботи п'єзо датчика: 1 – п'єзокристал, 2 – стрижень, C_1 – електрична ємність, $P(t)$ – динамічний тиск, $U(t)$ – вихідна напруга

Ємність C_1 містить у собі ємність кристала датчика, провідника та вхідну ємність осцилографа.

У результаті вимірювання на RLC-метрі цифрового типу Е 7-22 встановлено, що внутрішня ємність датчика складає 150 пФ. Для вимірювання тиску застосовувався осцилограф DS1000E фірми RIGOL із розподільником напруги, вхідний опір якого дорівнює не менше ніж 10 МОм. За виразом (1) визначаємо що, час відображення дійсного сигналу тиску складе не менше ніж 10 мс. Цього часу достатньо для відображення процесу стиснення в циліндрі двигуна за пускових оберттах.

Здійснено перевірку датчиків на чутливість за методикою, яка викладена у роботі [4]. Чутливість датчика розраховувалась за формулою:

$$F = 0,58 \cdot U_{\text{макс}} \cdot t \cdot S_{\text{кр}} / (m_{\text{кул}} \cdot V) \text{ [В/атм]}, \quad (2)$$

де F – показник чутливості, $U_{\text{макс}}$ – максимальне амплітудне значення напруги, яке реєструється під час вимірювань у заданих умовах; t – тривалість періоду сигналу; $S_{\text{кр}}$ – площа поверхні вимірювання п'єзокристалу; $m_{\text{кул}}$ – маса кульки; V – швидкість, з якою здійснюється зіткнення кульки з п'єзокристалом.

Швидкість зіткнення кульки з п'єзокристалом розраховувалась за формулою:

$$V = (2gh)^{1/2}, \quad (3)$$

де g – нормальне прискорення вільного падіння; h – висота падіння кульки на датчик.

Під час калібрування висота дорівнювала $h = 40$ мм. За виразом (3) обчислюємо швидкість близько 0,88 м/с. Застосування наведеної методики калібрування датчиків дозволило підтвердити значення чутливості, що наводилися в паспорті датчика.

Результати вимірювання та вихідні дані, за якими здійснено розрахунок чутливості на прикладі одного з п'єзодатчиків тиску, що використовувався в дослідженнях, наведено в табл. 1. Датчик установлювався на місце розташування клапана повітропуску (рис. 2). Вимірювання тиску здійснювалось без подавання палива за пускових обертів. Вимірювання відбувалось через 5 секунд від початку обертання колінчастих валів стартером за практично сталих обертів.

Таблиця 1

Результати вимірювання та розрахунку чутливості п'єзодатчика

Вихідні дані для розрахунку					Результат
Максимальне значення напруги, В	Маса кульки, кг	Період, с	Площа диска, м ²	Висота, м	Чутливість датчика, атм/В
20	0,0005	0,00001	0,0000196	0,04	21,7



Рис. 2. Установлення п'єзодатчика тиску на місці клапана повітропуску

Результати вимірювання динамічного тиску

У результаті вимірювання динаміки стиснення в циліндрі холодного двигуна типу 5 ТДФ за пускових обертів без подавання палива та мастиловпорскування спостерігалось відхилення від ідеальної адіабати стиснення, що відображалось у відсутності симетричності в кривих стиснення та розширення (рис. 3).

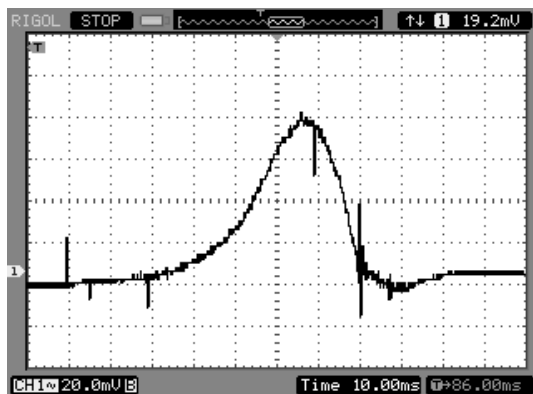


Рис. 3. Результати вимірювання динаміки стиснення в циліндрі двигуна (по вертикалі шкала поділок за тиском дорівнює 1 МПа/діл.)

Це може бути пояснено наявністю інтенсивного відбору тепла від стисненого повітряного заряду. За знайденими кривими стиснення та розширення можна розрахувати теплові втрати, що відбуваються у двигуні за пускових обертів. Теплові втрати $Q_{\text{втр}}$ визначимо за результатами порівняння робіт зі стиснення та розширення за виразом:

$$Q_{\text{втр}} = \int_{V_0}^{V_1} p dV - \int_{V_1}^{V_2} p dV, \quad (4)$$

де V_0 – об'єм повітряного заряду перед початком стиснення; V_1 – об'єм повітряного заряду у верхній об'ємній мертвій точці; V_2 – об'єм повітряного заряду в кінці стиснення.

Порівняння потрібно робити за закритими впускними та випускними вікнами циліндрів двигуна та однаковими між собою об'ємами повітряного заряду перед початком та в кінці стиснення $V_0 = V_2$. Згідно з діаграмою фази газорозподілу двигуна типу 5 ТДФ знаходимо, що кут закриття впускних вікон перевищує кут відкриття випускних вікон (рис. 4).

Для виконання умови рівності початкового та кінцевого об'ємів повітряного заряду візьмемо найменше значення кута $\alpha = 106^\circ$, де впускні та випускні вікна є закритими.

Для розрахунку роботи стиснення та розширення за допомогою кривої стиснення (рис. 3) та виразу (4), необхідно здійснити перетворення залежності тиску від часу на залежність тиску від поточного об'єму повітряного заряду. Для цього потрібно знати площу поршня S , радіус кривошипа r та частоту обертання колінчастого вала n . В умовах проведених досліджень під час пуску частота обертів була стабільною, що відображається в рівномірності відстані за часом між амплітудними значеннями тиску, яка дорі-

вноє $\Delta t \approx 280$ мс (рис. 5). Зазначеній періодичності Δt відповідає частота обертів двигуна $n = 214$ хв⁻¹.

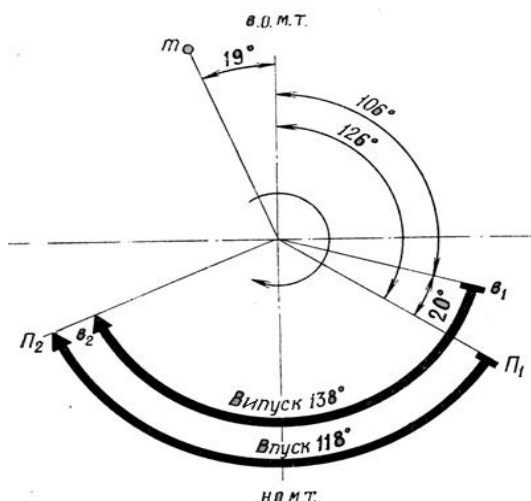


Рис. 4. Діаграма фаз газорозподілу двигуна типу 5 ТДФ [5]

Слід зазначити, що за осцилограмою зміни тиску за декілька циклів стиснення спостерігалось коливання максимальних значень тиску в циліндрі двигуна (рис. 3). Відхилення від середнього значення, що дорівнювало близько $P_{cp} \approx 4$ МПа, складо $\Delta P \approx 0,4-0,5$ МПа. Отже, відносне значення коливань тиску за режиму пуску складо близько 10%. Явище коливання тиску може бути пояснене суттєвим впливом коливальних процесів у русі газового потоку, що відбувається як у впускному, так і випускному колекторах.

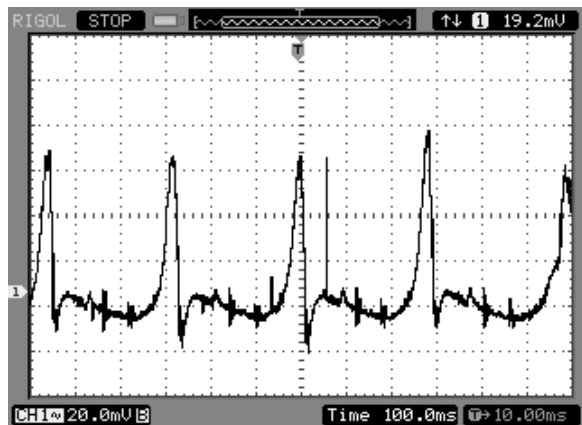


Рис. 5. Осцилограма зміни тиску в циліндрі за декілька циклів (по вертикалі шкала поділок за тиском дорівнює 1 МПа/діл.)

Залежність поточного об'єму від часу розрахуємо за виразом:

$$V(t) = V_{\min} + r \cdot S \times \left[2 + \cos\left(\pi + \frac{\alpha_0}{2} - \left|\frac{2\pi n t}{60}\right|\right) + \cos\left(\pi - \frac{\alpha_0}{2} - \left|\frac{2\pi n t}{60}\right|\right) \right], \quad (5)$$

де V_{\min} – об'єм заряду в о.в.м.т., що дорівнює $V_{\min} = 9,66 \cdot 10^{-5}$ м³; r – радіус кривошипа, що дорівнює $r = 0,06$ м; S – площа поршня, що дорівнює $S = 113 \cdot 10^{-4}$ м²; α_0 – кут зсуву між впускним і випускним валом, що дорівнює $\alpha_0 = \pi/18$.

Відлік часу потрібно вести з моменту часу t_0 , де тиск набуває максимального значення P_{\max} (рис. 4). Відповідно поточне значення часу t у виразі (5) буде розраховуватися у вигляді інтервалу в часі:

$$t = t_N - t_0. \quad (6)$$

Таким чином, кожному значенню за часом визначимо відповідне значення об'єму за виразом (5) та відповідне значення тиску з осцилограми тиску (рис. 6).

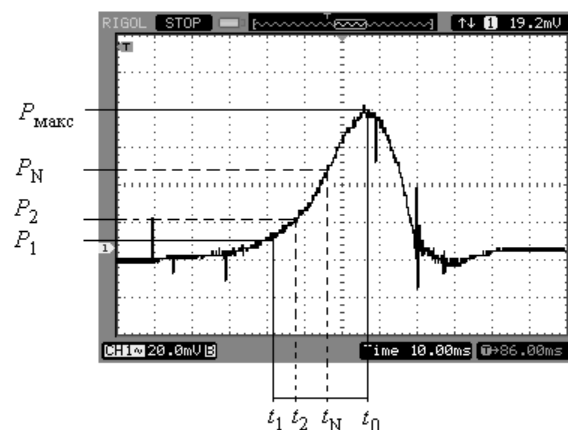


Рис. 6. Пояснення вихідних значень до перетворення графіка стиснення за часом на графік стиснення за об'ємом

Результати перетворення графіка стиснення за часом (рис. 3) на графік стиснення за об'ємом наведено на рис. 7.

Здійсимо розрахунок роботи Q за рахунок інтегрування визначених кривих за формулами чисельних розрахунку:

$$Q = \sum_{n=1}^N \frac{(P_{n+1} + P_n)}{2} (V_{n+1} - V_n), \quad (7)$$

де P – значення тиску у відповідних точках; V – значення об'єму у відповідних точках.

За результатами інтегрування кривої 1 (рис. 7) визначена енергія, що витрачається на стиснення газу, не враховуючи тепловтрати та втрати повітряного заряду, яка дорівнює $Q_1 \approx 381$ Дж, а під час розширення на механічну роботу зворотно перетворюється $Q_2 \approx 182$ Дж (за результатами інтегрування кривої 2). Звідси знаходимо, що під час розширення втрачається близько 200 Дж/цикл, а складова втрат досягає не менше ніж 50%.

Розрахуємо роботу стиснення за адіабатою в разі стискання ідеального газу за виразом:

$$Q_{ид} = \int_{V_{поч}}^{V_{о.в.м.т.}} \frac{P_1 V_1^\gamma}{V^\gamma} dV, \quad (8)$$

де γ – показник адіабати (для повітря дорівнює $\gamma = 1,4$).

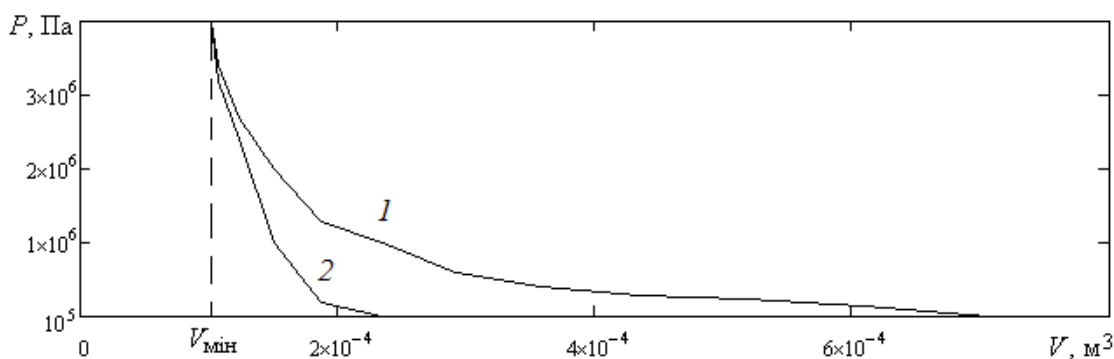


Рис. 7. PV-діаграми стиснення (крива 1) та розширення (крива 2) за результатами оброблення вимірювань тиску на холодному пуску

За параметрами танкового двигуна типу 5 ТДФ $V_{\text{поч}} \approx 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $V_{\text{о.в.м.т}} \approx 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ та за $P_{\text{поч}} \approx 10^5 \text{ Па}$ (ступінь збільшення тиску в турбокомпресорі за пускових обертів є незначною) для ідеального газу обчислюємо за виразом (8) роботу стиснення $Q_{\text{ід}} \approx 750 \text{ Дж}$. Порівняння роботи стиснення ідеального газу з роботою стиснення, що розрахована за результатами експериментальних досліджень, свідчить про наявність суттєвих утрат повітряного заряду та тепла. Потрібно враховувати, що втрата повітряного заряду призводить до зменшення роботи стиснення. Це дає підставу вважати, що під час стиснення втрачається близько 250 Дж/цикл . Таким чином загальні втрати під час стиснення та розширення повітряного заряду складають близько $Q_{\text{втр}} \approx 450 \text{ Дж}$. Здійснимо перевірку визначених значень роботи виходячи з потужності, що витрачається в цьому разі. У цьому разі потужність W розраховується за виразом:

$$W = \frac{Q_{\text{втр}} \cdot \kappa \cdot n}{60}, \quad (9)$$

де κ – кількість циліндрів ($\kappa = 5$); $Q_{\text{втр}}$ – енергія, що втрачається за цикл на одному циліндрі двигуна; n – частота обертів у $[\text{хв}^{-1}]$. За виразом (9) та вихідними значеннями за розрахунковим випадком визначимо потужність близько $W \approx 8 \text{ кВт}$. Потужність стартера генератора СГ-10 залежить від стану акумуляторних батарей та має значення в діапазоні від 10 до 22 кВт. До того ж, мають місце механічні та електричні втрати. Збіг за порядком величин потужностей підтверджує коректність розрахункових результатів.

Висновки

У роботі досліджено зміну стан повітряного заряду на режимі холодного пуску двигуна типу

5 ТДФ, що дозволяє для обґрунтувати технічні вимоги до системи електророзрядного холодного пуску, що створюється під даний двигун. Встановлено, що пускових обертах двигуна $n = 214 \text{ хв}^{-1}$ усереднені максимальні значення тиску в циліндрі двигуна дорівнюють близько $P_{\text{сп}} \approx 4 \text{ МПа}$. При цьому, відхилення від середнього значення складало $\Delta P \approx 0,4\text{--}0,5 \text{ МПа}$.

За методикою розрахункового аналізу кривих стиснення в циліндрах двигуна визначено втрати, що відбуваються в циліндрах двигуна типу 5 ТДФ. В умовах проведених досліджень величина теплових втрат дорівнювала 450 Дж/цикл , а що потребує потужності на пускових обертах двигуна $n = 214 \text{ хв}^{-1}$ біля 8 кВт .

Список літератури

1. Коритченко К.В. *Можливість застосування плазмових технологій у засобах пуску танкових дизельних двигунів* / К.В. Коритченко, В.М. Замана // *Збірник тез доповідей Третьої Всеукраїнської науково-технічної конференції "Перспективи розвитку озброєння та техніки Сухопутних військ"*, Академія Сухопутних військ. – 2010. – С. 73.
2. Коритченко К.В. *Теоретичне обґрунтування вимог до іскрового розряду в системі холодного пуску дизельного двигуна* / В.М. Замана, К.В. Коритченко, С.А. Соколовський [та ін.] // *Збірник наукових праць: Академії внутрішніх військ МВС України*. – X., 2012. – № 1, (19) – С. 14–18.
3. *Двигатель 5ТДФ*. – М.: Воениздат, 1977. – 144 с.
4. В. Jaffe, W. Jr. Cook and H. Jaffe, *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, New York, 1971.
5. Рязанцев Н.К. *Конструкция форсированных двигателей наземных транспортных машин* / Н.К. Рязанцев. – X.: ХДПУ, 1996. – Ч. 1. – 388 с.

Надійшла до редколегії 12.02.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.К. Шаша, Національна академія Національної гвардії України, Харків.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖАТИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА В ДВИГАТЕЛЕ ТИПА 5 ТДФ НА РЕЖИМЕ ХОЛОДНОГО ПУСКА

К.В. Коритченко, Д.В. Бизоньч, И.В. Цебрюк, А.В. Серпухов, В.А. Темников

В работе исследовано изменение состояния воздушного заряда на режиме холодного пуска двигателя типа 5 ТДФ. Обоснованно технику измерения динамического давления в цилиндре дизельного двигателя. Путем расчетного анализа кривых сжатия в цилиндрах двигателя проведена оценка тепловых потерь в двигателе 5 ТДФ на режиме холодного пуска.

Ключевые слова: дизельный двигатель, давление, воздушный заряд, холодный пуск, тепловые потери.