

А.П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, НТУ «ХПІ»;
К.В. КОРИТЧЕНКО, канд. техн. наук, НТУ «ХПІ»;
В.М. ЗАМАНА, КСВ ЗСУ, Київ;
І.І. СУКАЧОВ, канд. техн. наук, НТУ «ХПІ»;
Ю.І. КІСТЕРНИЙ, канд. техн. наук, НТУ «ХПІ»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХОЛОДНОГО ПУСКУ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ПОВІТРЯНИМ ЗАРЯДОМ

В работе, путем математического моделирования, проведено сравнение индикаторной работы, которая осуществляется в танковых двухтактных дизельных двигателях, при условиях колебательного возбуждения и подогревания воздушного заряда. Определено, что при одинаковом количестве затраченной энергии лучшие условия для холодного пуска реализуются при возбуждении заряда.

Comparison of indicator work by conditions of vibration excitation of air charge with one by heating of the charge which is carried out in tank two-stroke diesel engines is made by the mathematical modeling in the work. It is calculated that by the identical amount of the deposited energy the best terms for cold start of the diesel will be realized by the excitation of the charge.

Вступ

Зниження часу пуску танкових дизелів дозволяє зменшити тривалість підготовки бойових машин до виконання бойових задач зі зростанням відповідних показників рівня бойової готовності бронетехніки. В роботі [1] відмічається, що в двотактних двигунах з протилежно-рухомими поршнями з-за наявності двох поршнів у циліндрі і двох колінчастих валів збільшуються втрати повітря з циліндра та момент опору обертання колінчастих валів. Тому, для покращення пускових якостей необхідна розробка спеціальних заходів для усунення вказаного недоліку.

Для вирішення науково-технічної задачі холодного пуску танкових дизельних двигунів вважається перспективним застосування плазмових технологій. За рахунок відносно повільної релаксації енергії коливального збудження можливо утворення щільного повітряного заряду у циліндрі двигуна, з подальшим додатковим підігріванням повітря під час стиснення.

Таким чином, метою роботи є визначення більш ефективного способу полегшення холодного пуску з мінімальними витратами енергії від зовнішнього джерела. Порівняння здійснювалося стосовно до способу, за яким здійснюється підігрівання повітряного заряду у впускному колекторі, зі способом, за яким здійснюється коливальне збудження заряду.

Механізми впливу стану параметрів повітряного заряду на згорання палива

Здійснимо порівняння стану повітряного заряду за умови однакової

кількості підведеної до нього енергії $Q_{\text{підв}} = 100$ Дж за різними механізмами впливу. Розрахунок здійснено стосовно двигунів типу 5ТДФ. Приймемо температуру оточуючого середовища $T_{\text{оточ}} = 273$ К. Знехтуємо підвищенням тиску у циліндрах на пускових обертах з відповідним прийняттям значення початкового тиску за двома умовами стиснення $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па. Враховуючи об'єм камери згорання двигуна 5ТДФ $V_0 \approx 1,59 \cdot 10^{-3}$ м³ та питому ізобарну теплоємність повітря $C_p = 1009$ Дж/(кг·К) за вищезазначених умов підведення тепла отримаємо за законом ізобари температуру заряду перед початком стиснення за першою умовою у вигляді $T_{01} \approx 333$ К. За другою умовою температура заряду перед початком стиснення дорівнюється $T_{02} = 273$ К. Маємо, що щільність повітряного заряду у першому випадку перед початком стиснення дорівнює $\rho_{01} \approx 1,06$ кг/м³, а у другому $\rho_{02} \approx 1,29$ кг/м³. Розрахуємо кінцевий стан повітряного заряду за зазначеними двома умовами на пусковому режимі ($n = 1,25$ та $n_{\text{дв}} = 200$ хв⁻¹). За результатами розрахунків стиснення за законом політропи маємо, що під час стиснення температура зарядів з наближенням до в.м.т. практично зрівнюється (рис. 1).

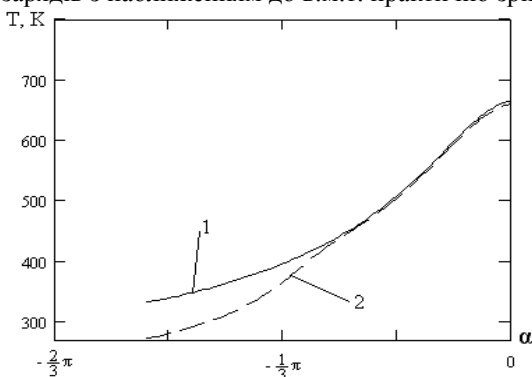


Рисунок 1 – Порівняння динаміки зміни температури повітряного заряду за першим (крива 1) та другим (крива 2) способами дії на заряд

Але при цьому наявні суттєві відмінності у тиску, що досягається під час стиснення, зі зростанням різниці при наближенні до в.м.т. (рис. 2). Отримуємо, що за другої умови тиск у в.м.т. на 20 % перевищує тиск, який досягається за першою умовою, коли підведення енергії до повітряного заряду у вигляді тепла здійснюється до моменту потрапляння повітря до циліндра двигуна.

Ця різниця викликана відмінностями у щільності повітряних зарядів на початку стиснення.

Процес згорання палива у дизельних двигунах прийнято розділяти на 4 періоди: затримка запалення, згорання в процесі впорскування палива, розвинуте дифузійне горіння після закінчення впорскування палива та догорання пари палива та продуктів неповного згорання після випаровування всього палива.

Розглянемо вплив стану повітряного заряду на протікання процесу згорання у зазначених періодах. Згідно роботи [С. 123, 2], період затримки запалення характеризується двома основними інтегральними показниками: тривалістю періоду та кількістю палива, що випаровується за цей час. В цій

роботі пропонується тривалість періоду затримки τ_i розраховувати за емпіричним виразом А.І. Толстова:

$$\tau_i = 3,8 \cdot 10^{-6} (1 - 1,6 \cdot 10^{-4} n_{\text{об}}) \sqrt{\frac{T_{\text{вп}}}{P_{\text{вп}}}} \exp\left(\frac{E_A}{8,314 \cdot T_{\text{вп}}}\right), \quad (1)$$

де $n_{\text{дв}}$ – частота обертів колінчастого валу двигуна у [хв.⁻¹], $P_{\text{вп}}$ та $T_{\text{вп}}$ – тиск [МПа] та температура [К] газового заряду в циліндрі на момент початку впорскування палива, E_A – умовна енергія активації передполум'яних реакцій, що для дизельних двигунів дорівнює $E_A = (23 \div 25) \cdot 10^3$ кДж/кмоль.

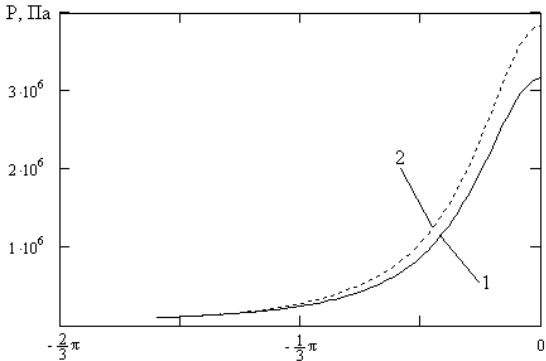


Рисунок 2 – Порівняння динаміки зміни тиску повітряного заряду за першою (крива 1) та другою (крива 2) способами дії на заряд

Враховуючи те, що впорскування палива в двигуні 5ТДФ здійснюється за $14 \div 17^\circ$ до в.м.т., за розрахунками отримуємо тиск та температуру у цей момент за вищезазначеними двома умовами: $P_{\text{вп1}} \approx 1,96$ МПа, $T_{\text{вп1}} \approx 598$ К, $P_{\text{вп2}} \approx 2,38$ МПа, $T_{\text{вп2}} \approx 594$ К. Підставляючи ці значення у вираз (1) отримуємо відповідні періоди затримки $\tau_{i1} \approx 8$ мс, $\tau_{i2} \approx$

7,5 мс. Таким чином, за другою умовою підведення енергії до заряду, тобто за рахунок релаксації енергії коливального збудження молекул, відбувається прискорення процесу згорання.

За умови незмінності константи випаровування та масової швидкості впорскування палива сумарна швидкість випаровування крапель палива у циліндрі двигуна на фіксований момент часу τ визначається за виразом [С. 110, 2]:

$$\frac{dM_V}{d\tau} = \left[1 - (1 - b_v \tau)^{1,5} \right] B_f, \quad (2)$$

де B_f – масова швидкість впорскування палива у циліндр, b_v – відносна константа випаровування, τ – час випаровування.

Теоретичне значення константи випаровування визначається за виразом [С. 134, 2]:

$$b_v = \frac{K}{d_{32}^2}, \quad (3)$$

де d_{32} – середній поверхневий діаметр крапель палива, K – середнє значення константи випаровування, яка для дизельних палив в надкритичній зоні

дорівнює:

$$K = \frac{1}{10^6 P_c}, \quad (4)$$

де P_c – тиск в кінці умовно продовженого до в.м.т. стиснення (без згорання) у [МПа].

З виразів (2-4) маємо, що зі збільшенням тиску відбувається зменшення швидкості випаровування крапель палива. Тобто, при порівнянні вищезазначених умов стиснення у першому випадку швидкість випаровування палива буде більшою. За розрахунками маємо тиск на кінці умовно продовженого до в.м.т. стиснення (без згорання) за двома умовами $P_{c1} \approx 3,168$ МПа, $P_{c2} \approx 3,838$ МПа. Маємо, що середнє значення константи випаровування у першому випадку буде на 21 % більше.

У процесі згорання в період впорскування палива відбувається спалах пари палива, яка утворилася за період затримки запалення, згорання палива, яке випаровується після спалаху, та догорання продуктів неповного згорання.

На підставі аналізу параметрів, від яких залежить швидкість згорання палива, та швидкість догорання продуктів неповного згорання встановлено, що на зазначені швидкості суттєво впливає коефіцієнт надлишку повітря у циліндрі. У випадку, коли підведення енергії до заряду відбувається за рахунок коливальної релаксації енергії збудження, коефіцієнт надлишку повітря буде більшим, що може сприяти збільшенню індикаторної роботи в період пуску двигуна з відповідним уникненням явища «зависання» [2].

Обґрунтування початкових умов моделювання холодного пуску дизельних двигунів

Для перевірки припущення щодо переваги способу полегшення пуску за коливальним збудженням, було застосовано програмний комплекс, який дозволяє розраховувати характеристики сумішоутворення і згорання палива, індикаторну діаграму циклу дизеля. Дана програма була розроблена на кафедрі «Двигуни внутрішнього згорання» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Марченком А.П. та Сукачовим І.І. на основі моделі М.Ф. Разлейцева [3]. Математична модель включала характеристики впорскування палива та форми камери згорання, які лімітують ефективність випаровування та згорання палива. Характеристики паливopодачі, розпилювання палива, динаміка і геометрія паливного струменя визначалися за відомими узагальненими емпіричними залежностями О.С. Лишевського.

Зазначений програмний комплекс дозволяє адекватно описати процеси, що відбуваються у дизелі на робочих режимах за умови налаштування розрахункових коефіцієнтів на попередньо відому експериментальну індикаторну діаграму дизеля на одному із режимів. Враховуючи це, розрахунок проводився за програмою, яка була налаштована за експериментальними даними на розрахунок двигуна типу 3ТД.

Слід враховувати, що на режимі пуску виникають не тільки відмінності у стані стисненого повітряного заряду, але й погіршується якість розпилювання палива. Емпіричні залежності, що застосовуються в моделі, на режимі пуску в переважній більшості лише якісно описують процеси в дизелі. Враховуючі ці обмеження моделі ставилася задача виявити якісний вплив застосування технології коливального збудження заряду на процес пуску двигуна.

В даній математичній моделі як вихідні дані використовується показник політропи процесу стиснення, що визначається за експериментальними даними. На режимі холодного пуску за експериментальними даними цей показник складає $n_1 \approx 1,25$. За розрахунками динаміки стиснення коливально-збудженого повітряного заряду, методика яких викладена в роботі [4], встановлено, що в процесі стиснення відбувається зміна показника політропи. Враховуючи це, для випадку стиснення коливально-збудженого повітряного заряду у циліндрі двотактних танкових двигунів було здійснено підбір усередненого значення цього показника. За результатами розрахунків встановлено, що у разі релаксації енергії, що дорівнює 100 Дж, усереднений показник політропи дорівнює $n_2 \approx 1,32$ (рис. 3). У наведеному прикладі початкова температура повітря на впуску у двигун дорівнювала 273 К, а початковий тиск дорівнював 0,1 МПа.

Р, Па

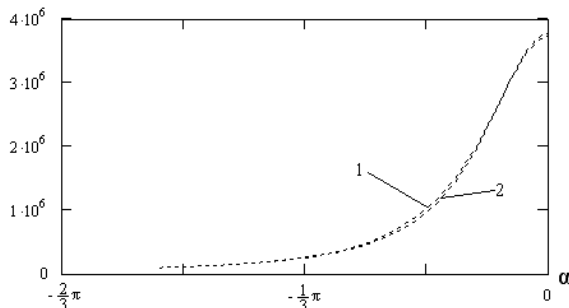


Рисунок 3 – Розрахунок стиснення (1) коливально-збудженого повітряного заряду у циліндрі танкового дизеля та стиснення (2) за усередненим показником $n_2 \approx 1,32$.

показник політропи стиснення – $n_2 = 1,32$.

Зі зростанням пускових обертів відбувається незначне збільшення температури повітря та показника адиабати. Тому при розрахункових обертах 450 хв^{-1} та 600 хв^{-1} зазначені показники збільшувалися на 5 К та 10 К по температурі та на 0,01 та 0,02 за показником адиабати, відповідно. Наявність механічного зв'язку компресора двигуна з колінчастим валом зумовлює незначне зростання тиску на пускових обертах. Тому, тиск перед впускними вікнами дорівнював 0,103; 0,104 та 0,105 МПа на частоті обертів 300; 450 та 600 хв^{-1} , відповідно.

Таким чином, порівняння процесів на частоті обертів колінчастого валу 300 хв^{-1} здійснювалося за наступними умовами:

1. Температура повітря перед впускними вікнами – $T_1 = 333 \text{ К}$, показник політропи стиснення – $n_1 = 1,25$.
2. Температура повітря перед впускними вікнами – $T_2 = 273 \text{ К}$,

На відміну від номінальних режимів роботи двигуна, під час розрахунку холодного пуску середня температура тепловідведення (по Г. Вошні) дорівнювала 300 К. Тобто враховувався холодний стан циліндра двигуна, температура якого незначно зростала внаслідок тертя з кільцями поршня.

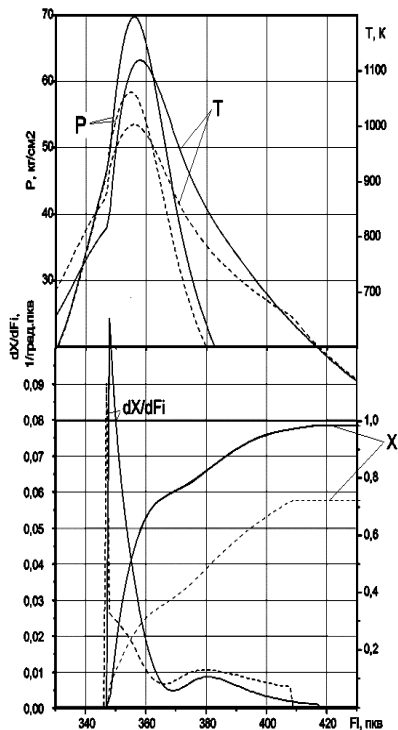


Рисунок 4 – Порівняння процесів згорання у двигуні 3ТД, що відбувається в умовах релаксації енергії коливального збудження у заряді (суцільні криві) та підігрівання заряду (пунктирні криві) на частоті 300 хв⁻¹

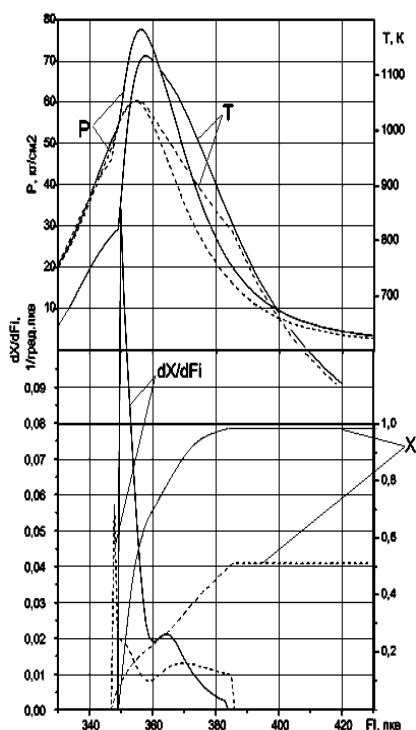


Рисунок 5 – Порівняння процесів згорання у двигуні 3ТД, що відбувається в умовах релаксації енергії коливального збудження у заряді (суцільні криві) та підігрівання заряду (пунктирні криві) на частоті 450 хв⁻¹

Результати математичного моделювання холодного пуску

Результати моделювання процесів згорання у двигуні 3ТД, що відбувається в умовах релаксації енергії коливального збудження у повітряному заряді та з підігріванням заряду, на частоті 300 хв⁻¹ показали (рис. 4), що період затримки запалення у збудженому заряді незначно більший порівняно з попередньо підігрітим зарядом. Це видно з кривих швидкості згорання палива dX/dF_i .

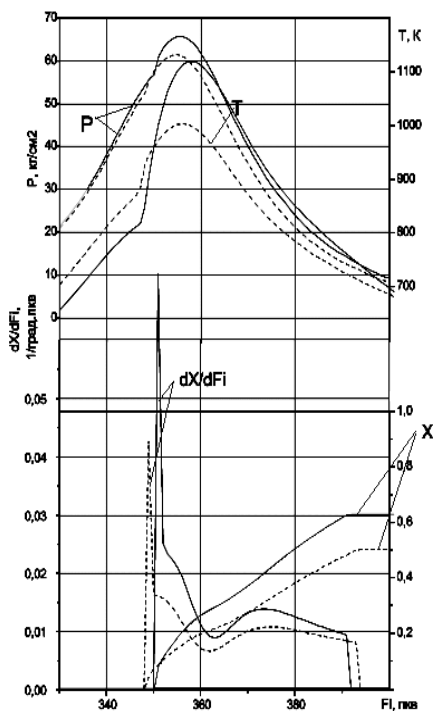


Рисунок 6 – Порівняння процесів згорання у двигуні ЗТД, що відбувається в умовах релаксації енергії коливального збудження у заряді (суцільні криві) та підігрівання заряду (пунктирні криві) на частоті 600 хв^{-1}

Незначне підвищення тиску повітря біля впускних вікон та зменшення теплових втрат зі зростанням частоти обертів забезпечують зростання максимальних значень температури та тиску. Потужність двигуна при підігріванні заряду знижується до $P \approx 2,6 \text{ кВт}$ з крутним моментом $M \approx 5,7 \text{ Н·м}$. В умовах збудження заряду спостерігається зростання потужності двигуна до $P \approx 11,2 \text{ кВт}$ з крутним моментом $M \approx 24,2 \text{ Н·м}$.

Таким чином, за результатами розрахунків отримуємо, що явище «зависання» під час підігрівання повітряного заряду виникає на частоті обертів 450 хв^{-1} , що співпадає з результатами експериментальних досліджень [1].

Зі збудженим зарядом на цій частоті обертів це явище не виникає. Але з подальшим збільшенням частоти обертів до 600 хв^{-1} відбувається суттєве погіршення показників за обома процесами (рис. 6). Суттєво зменшуються повнота згорання палива (до 62 % за збудженим зарядом та до 50 % за

Незважаючи на більший час затримки, за рахунок збільшеного тиску та густини заряду у циліндрі, при подальшому розвитку процесу згорання відбувається більш стрімке зростання температури у циліндрі з перевищенням максимальних значень температури згорання більше, ніж на 100 К. При цьому, кількість палива, що вигорає за робочий процес на цьому режимі більше, ніж на 25 % перевищує за умов релаксації енергії коливального збудження у порівнянні з не збудженим повітрям. Розраховано, що потужність двигуна на цій частоті з коливально-збудженим зарядом досягає $P \approx 6,1 \text{ кВт}$ з крутним моментом $M \approx 19,9 \text{ Н·м}$. При підігріванні заряду потужність двигуна на цій частоті досягає $P \approx 3,3 \text{ кВт}$ з крутним моментом $M \approx 10,7 \text{ Н·м}$. Зі збільшенням частоти обертання колінчатого валу до 450 хв^{-1} тенденції зміни динаміки згорання, тиску та температури, що виявлені у попередньому порівнянні, зберігаються (рис. 5).

підігрітим зарядом).

За умови підігрівання заряду на частоті 600 хв^{-1} потужність двигуна складає $P \approx 3,9 \text{ кВт}$ за крутним моментом $M \approx 6,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$. За умови релаксації енергії коливального збудження $P \approx 8,5 \text{ кВт}$ за крутним моментом $M \approx 13,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Таким чином маємо, що за умови коливального збудження заряду виникнення явища «зависання» зміщується до частоти 600 хв^{-1} . Але навіть в умовах падіння потужності двигуна на цьому режимі за умови збудження заряду його потужність продовжує суттєво перевищувати потужність двигуна за умови підігрівання заряду.

Висновки

Проведеним математичним моделюванням холодного пуску двотактних дизельних двигунів визначено вплив попереднього підігрівання повітря на вході в циліндр у порівнянні з коливальним збудженням повітряного заряду. Встановлено підвищення тиску на 20 % у ВМТ для коливально-збудженого заряду.

Застосування способу коливального збудження повітряного заряду з повільною релаксацією енергії коливань забезпечує підвищення індикаторних показників на режимі холодного пуску не менш, ніж у 1,2 рази у порівнянні з підігріванням повітря за умови однакових витрат енергії. Зазначене може сприяти покращенню холодного пуску двотактних дизельних двигунів.

Список літератури: 1. Конструкция форсированных двигателей наземных транспортных машин: Учебное пособие. Ч.2. // *Н.К. Рязанцев*. - Харьков: ХДПУ, 1996. – 388с. 2. 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*.— К.: Техника, 1992.— 272 с. 3. Процессы в перспективных дизелях // *Шеховцов А.Ф., Абрамчук Ф.И., Крутов В.И., Марченко А.П., Разлейцев Н.Ф., Сукачев И.И., Третьяк Е.И., Шокотов Н.К., Э. Эплер* / Под ред. А.Ф.Шеховцова. – Х.: Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1992. – 352 с. 4. *Коритченко К.В., Замана В.М.* Моделювання стиснення повітряного заряду у дизельних двигунах в умовах релаксації енергії коливального збудження // Військово-технічний збірник / Академія сухопутних військ. – Львів: АСВ, 2011. - №1(4). – С. 130-134.

Поступила в редколегію 02.05.2011