УДК 621.43.001.2

К.В. Коритченко[1], В.М. Замана[2]

[1]Факультет військової підготовки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків
[2]Командування Сухопутних військ Збройних Сил України, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ СТИСНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ЗАРЯДУ У ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ В УМОВАХ РЕЛАКСАЦІЇ ЕНЕРГІЇ КОЛИВАЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Визначено методику розрахунку термодинамічних параметрів газового заряду, що складається з двохатомних молекул, під час стиснення в умовах релаксації енергії коливального збудження. На прикладі двигуна 5ТДФ, шляхом математичного моделювання, здійснено розрахунок енергії збудження коливального збудження повітря, за якої досягаються умови для холодного пуск двигуна.

Ключові слова: *двигун 5ТДФ, холодний пуск, процес стиснення, коливальна релаксація, термодинамічний стан заряду.*

Вступ

Попереднє коливальне збудження повітря, що потрапляє до циліндра двигуна, призводить до подальшого збільшення температури повітряного заряду за рахунок процесу релаксації. В результаті покращуються умови для самозапалення палива, що відіграє важливу роль під час холодного пуску двигуна.

Аналіз останніх публікацій та досягнень. Вирішення задачі холодного пуску двигуна за рахунок додаткового підведення тепла у впускному колекторі розглядалось у роботах [1, 2]. Але за таким способом відбувається зменшення густини повітряного заряду. В результаті відбувається зниження індикаторної роботи та виникнення явища «зависання» під час холодного пуску [3]. За рахунок відносно повільної релаксації енергії коливального збудження можливо утворення щільного повітряного заряду у циліндрі двигуна, з подальшим додатковим підігріванням повітря під час стиснення. Для розрахунку швидкості підведення тепла в процесі релаксації можливо застосування моделей, що описані в роботах [4, 5].

Мета і постановка задачі. В даній роботі розглянуто вплив швидкості протікання процесу релаксації на динаміку зміни термодинамічного стану повітряного заряду під час стиснення.

Процес стиснення повітряного заряду в умовах підведення тепла

Процес стиснення повітряного заряду у ДВЗ в умовах енергетичного обміну з зовнішнім середовищем можливо описати рівнянням політропічного стиснення зі змінним показником політропи. У числових розрахунках можливо припустити, що на малій відстані переміщення поршня показник політропи має стале значення. Це дозволяє застосувати на розрахунковому інтервалі рівняння політропічного стиснення для ідеального газу у вигляді

$$TV^{n-1} = const\,, \qquad (1)$$

де T – температура у циліндрі двигуна, V – об’єм, що займає повітряний заряд, n – показник політропи, який визначають з виразу

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_V}\,, \qquad (2)$$

де C – теплоємність газу у даному процесі стиснення, C_p та C_V – теплоємності за постійним тиском та об’ємом, відповідно.

Для визначення показника політропи необхідно знати теплоємність газу у даному процесі. За відомим значенням енергії δQ, що підводиться до системи, з використанням виразу для розрахунку теплоємності C= δQ/dT, представляючи його у вигляді C = δQ/(T_2 – T_1) та рівняння політропи (1), за яким $T_2 = (\frac{V_1}{V_2})^{n-1} T_1$, отримуємо вираз, з якого можливо знайти C, у вигляді

$$\delta Q - C\left[(\frac{V_1}{V_2})^{\frac{C_V - C_p}{C - C_V}} - 1 \right] T_1 = 0\,, \qquad (3)$$

де V_1 та T_1 – об'єм та тиск у розрахунковій точці, відповідно; V_2 – об'єм системи на наступному розрахунковому кроці; δQ – кількість енергії, що підведена, або відведена від системи протягом розрахункового кроку за постійною теплоємністю.

У разі застосування у розрахунку питомої теплоємності за постійним тиском та об'ємом, що має розмірність [Дж/(кг·К)], вираз (3) змінюється

$$\frac{\delta Q}{m} - C\left[(\frac{V_1}{V_2})^{\frac{C_V - C_p}{C - C_V}} - 1 \right] T_1 = 0\,, \qquad (4)$$

де m – маса повітряного заряду.

Отримати значення C з рівняння (4) можливо, наприклад, за допомогою функції root у програмному середовищі MATHCAD. Ця функція знаходить рішення рівняння у разі наведення приблизного значення C, що очікується. У зв'язку з тим, що для адіабатичного процесу в ідеальному газі C = 0, а для ізотермічного процесу C = ∞, то існує потреба у попередньому визначенні приблизного значення C в залежності від значення δQ. Слід відзначити, що рішення цього рівняння не завжди можливо за допомогою функції root, коли $C > 10^{307}$.

Розрахунок динаміки виділення енергії за рахунок релаксації в процесі стиснення повітряного заряду. Розглянемо випадок, коли суттєво збуджено лише перші коливальні рівні двохатомних молекул. За цим випадком рівняння для релаксації коливальної енергії має вигляд [6]

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E_p(T_g) - E}{\tau_{VT}}\,, \qquad (5)$$

де τ_{VT} - час коливальної релаксації, $E_p(T_g)$ – енергія коливань молекул в умовах термодинамічної рівноваги за температури повітряного заряду T_g, E – енергія, що зосереджена у коливальному збудженні молекул на поточний момент часу.

Час коливальної релаксації τ_{VT} визначається формулою [6]

$$\tau_{VT} = Z_{10}/Z = \tau_{ст}/p_{10}, \qquad (6)$$

де Z_{10} - найбільш вірогідне число зіткнень, за яким відбувається коливальна релаксація молекул, Z - повне число зіткнень в одну секунду в одиниці об'єму, $\tau_{ст}$ – середній час між газокінетичними зіткненнями, p_{10} – вірогідність дезактивації коливально збудженої молекули при зіткненні.

Прямо-пропорційна залежність часу коливальної релаксації від середнього часу між газокінетичними зіткненнями призводить до необхідності урахування зміни термодинамічного стану повітряного заряду в процесі його стиснення на час коливальної релаксації.

Згідно з [6], час коливальної релаксації залежить від температури за законом

$$\tau = \tau_{ст} \hat{A} \exp(bT^{-1/3}), \qquad (7)$$

де b = const, $\hat{A}$ –функція температури, що повільно змінюється.

Експоненціальна залежність часу коливальної релаксації від температури призводить до суттєвого скорочення часу релаксації в умовах зростання температури повітряного заряду.

Середній час між газокінетичними зіткненнями знаходиться за виразом [7]

$$(\tau_{ст})^{-1} = \sqrt{2} \cdot \upsilon(T) \cdot \sigma \cdot n(T, p)\,, \qquad (8)$$

де $\upsilon(T)$ – середня арифметична швидкість молекул, що дорівнює $\upsilon(T) = \sqrt{\frac{8R \cdot T}{\pi M}}$; σ - перетин зіткнення молекул, n(T, p) – густина молекул, що дорівнює $n(T,p) = \frac{p}{k \cdot T}$, де k – постійна Больцмана.

Вірогідність дезактивації коливально збудженої молекули при зіткненні, порівнюючи вирази (8) та (10), будемо шукати у вигляді

$$(p_{10})^{-1} = \hat{A} \exp(bT^{-1/3}),. \qquad (9)$$

Для визначення числових значень $\hat{A}$ та b за виразом (9) скористуємося результатами експериментальних досліджень (табл. 1), що представлені в роботі [6]. При цьому, будемо вважати, що функція $\hat{A}$ температури у повітрі в діапазоні температур від 300 до 1000 K має стале значення. Для азоту за відповідними значеннями p_{10} за температури 600 та 3000 K отримуємо $\hat{A}$ = 1,831, b = 141.

Слід зазначити, що час коливальної релаксації залежить від типу зіткнень молекул за рівнями їх коливального збудження, який домінує. Наведені результати досліджень (табл. 1) відносяться до випадку, коли домінують зіткнення молекул з першим рівнем збудження з молекулами, що знаходяться на нульовому рівні.

У таблиці 1 прийняті наступні позначення: p_{10} – вірогідність переходу молекули зі стану з збудженим першим коливальним рівнем у нульовий при одному акті зіткнення, Z_{10} – число зіткнень молекули, що забезпечує коливальну релаксацію, $\tau_{кол}$ – час коливальної релаксації.

Таблиця 1

Коливальна релаксація в кисні та азоті [6]

T, K	p_{10}, (експер имент)	p_{10}, (теорія)	Число зіткнень Z_{10} (експери-мент)	$\tau_{кол}$, с (приведено до густини n=2,67·10^{27} м^3)
Кисень				
288 900 1200	$4\cdot10^{-8}$ $1,1\cdot10^{-5}$ $2,4\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-8}$ $3\cdot10^{-6}$ $1,3\cdot10^{-5}$	$2,5\cdot10^{7}$ $1\cdot10^{5}$ $5\cdot10^{4}$	 $96\cdot10^{-7}$ $41\cdot10^{-7}$
Азот				
600 3000	$3\cdot10^{-8}$ $3,1\cdot10^{-5}$	$3,3\cdot10^{-7}$ $4,6\cdot10^{-4}$		 $2,1\cdot10^{-6}$

В роботі [8] час коливальної релаксації двохатомних молекул пропонується розраховувати за формулою

$$\tau(p,T)=\frac{A}{p}\exp\left(\frac{B}{T^{1/3}}+C\right), \qquad (10)$$

де коефіцієнти, за даними Блекмана, дорівнюють A = 7,2·10^{-9}; B = 124,07; C = 0.

У роботі [9] для розрахунку часу коливальної релаксації пропонується використовувати емпіричну залежність, що отримана Мілліканом та Вайтом, для двохатомних молекул у діапазоні температур 300÷10000 К у вигляді

$$\ln(p\cdot\tau_{VT})=C\cdot m_{екв}^{1/2}\Theta^{4/3}(T^{-1/3}-0,015m_{екв}^{1/4})-$$
$$-18,42\,, \qquad (11)$$

де C – константа, яка для азоту та кисню має відповідні значення (C_{N2} = 1,15·10^{-3}, C_{O2} = 1,1·10^{-3}), $m_{екв}$ – приведена маса в [а.о.м]. У виразі (13) прийнята наступна розмірність величин: p [атм], T [K], τ_{VT} [c].

Порівняння часу релаксації, що отримується за тиском 10^5 Па у діапазоні температур 300÷1000K, за виразами (9-11), (12), (13) для азоту надають значення, що збігаються за порядком величини (табл. 2).

Енергія коливань двохатомних молекул (гармонічних осциляторів) в умовах термодинамічної рівноваги розраховується за рівнянням [6]:

$$E_p(T_g)=\frac{N\cdot\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT_g}\right)-1}, \qquad (12)$$

Таблиця 2

Порівняння розрахункових значень часу коливально-поступальної релаксації у азоті, що отримуються за різними виразами

Температура, K	Час коливально-поступальної релаксації τ_{VT}, с		
	за виразами (9-11)	за виразом (12)	за виразом (13)
300	0,362	0,797	2,778
400	0,061	0,146	0,332
500	0,017	0,044	0,073
600	$6,639\cdot10^{-3}$	0,017	0,023
700	$3,104\cdot10^{-3}$	$8,337\cdot10^{-3}$	$9,132\cdot10^{-3}$
800	$1,662\cdot10^{-3}$	$4,538\cdot10^{-3}$	$4,259\cdot10^{-3}$
900	$9,825\cdot10^{-3}$	$2,713\cdot10^{-3}$	$2,234\cdot10^{-3}$
1000	$6,256\cdot10^{-3}$	$1,741\cdot10^{-3}$	$1,281\cdot10^{-3}$

де ħω – енергія коливального кванта, N – число молекул в одиниці об’єму.

Зокрема, енергія коливального кванта молекули кисню дорівнює ħω(O_2) = 0,19 еВ, а молекули азоту ħω(N_2) = 0,29 еВ.

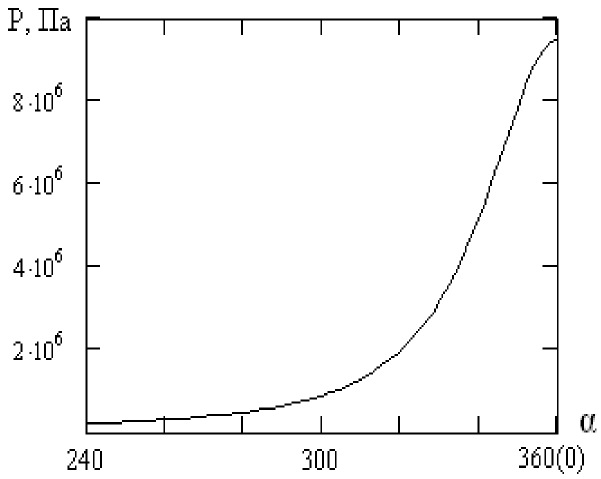
Результати моделювання стиснення повітряного заряду у поршневих ДВЗ в умовах релаксації коливального збудження молекул під час пуску. Зробимо кількісну оцінку зазначеного процесу стиснення на прикладі двигуна типу 5ТДФ. Тиск наддуття на номінальних обертах двигуна дорівнює $P_н$ = 0,235 МПа. За експериментальними даними [10], середній показник політропи процесу стиснення на номінальному режимі дорівнює $n_н$ ≈ 1,35. Розрахункова динаміка стиснення повітряного заряду за цими умовами має вигляд (рис. 1а). Порівняння розрахункової динаміки стиснення заряду з результатами експериментальних вимірювань (рис. 1б), що наведені в роботі [1], підтверджує правильність розрахунку зміни об’єму заряду.

Кількість енергії, що підведена до системи протягом розрахункового кроку за часом, отримаємо з виразу (7), перетворюючи його для числового розрахунку у вигляд

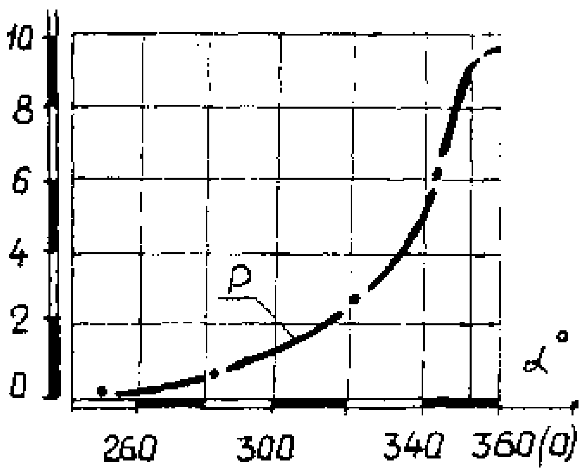
$$\delta Q=\Delta E=\frac{E_p(T_g)-E(t)}{\tau_{VT}(P,T_g)}\cdot\Delta t\,, \qquad (13)$$

де Δt - розрахунковий крок за часом.

Цей вираз застосовуємо за умови, що E(t) > $E_p(T_g)$. За іншої умови ΔE = 0.



а



б

Рис. 1. **Динаміка стиснення заряду на номінальному режимі роботи двигуна типу 5ТДФ: а - розрахунок, б – вимірювання [1]**

Залежність розрахункового кроку за часом від кроку за кутом та частоти обертів колінчастого вала прийме вигляд

$$\Delta t = \frac{\Delta\alpha \cdot 60}{2\pi \cdot n}, \tag{14}$$

де n – частота обертів колінчастого вала [хв.$^{-1}$], Δα - крок за кутом, який в розрахунках дорівнювався Δα = 0,018 рад.

З виразів (13) та (14) витікає, що зміна частоти обертів буде впливати на динаміку виділення енергії коливальної релаксації під час стиснення повітряного заряду.

Зменшення енергії коливального збудження E(t) за часом враховувалося на кожному розрахунковому кроці шляхом зменшення попереднього значення на ΔE.

На пускових обертах тиском наддуття можливо знехтувати. Тобто, тиск перед початком стиснення дорівнює близько $P_0 \approx 10^5$ Па. Початкову температуру заряду приймемо рівною T_0 = 273 К.

Порівняння динаміки стиснення повітряного заряду за різними значеннями енергії E_0, що зосереджена у коливальному збудженні молекул в початковий момент часу, представлено (рис. 2). Значення тиску у в.м.т. за умови релаксації коливальної енергії E_{01} = 100 Дж у порівнянні з випадком відсутності додаткового підвода енергії E_{00} = 0 перевищує тиск за останнім випадком на 0,67 МПа.

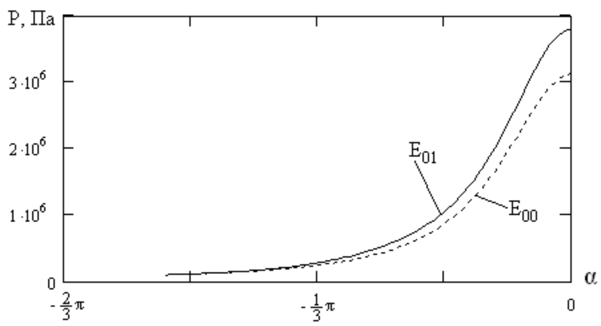


Рис. 2. **Порівняння динаміки зміни тиску у повітряному заряді в залежності від кута повороту колінчастого вала α за обертами n = 200 хв.$^{-1}$ та за початковими значеннями енергії коливального збудження E_{00} = 0, E_{01} = 100 Дж**

На момент початку впорскування палива (за 14÷17 град до в.м.т.) температура заряду за умови релаксації коливальної енергії на пускових обертах перевищує 600 К (рис. 3).

Тобто, виникають умови для надійного самозапалення дизельного палива. Зі збільшенням частоти обертів колінчастого вала відбувається зростання протяжності релаксації енергії коливального збудження за кутом повороту колінчастого вала.

Це призводить до падіння температури, що досягається у в.м.т. На наведеному прикладі це падіння зі зростанням частоти обертів зі 100 хв.$^{-1}$ до 600 хв.$^{-1}$ склало близько 20 К.

У разі, якщо б підведення енергії δQ = 100 Дж до повітряного заряду відбувалося «миттєво» у в.м.т., то за рахунок такого підведення за вищезазначеними умовами температура заряду зросла б з 545 К до 613 К.

За рахунок підведення тієї за величиною енергії під час стиснення, температура у в.м.т. перевищує на 50 К та складає 663 К.

Додаткове підведення енергії до заряду відбувається за рахунок збільшення роботи стиснення.

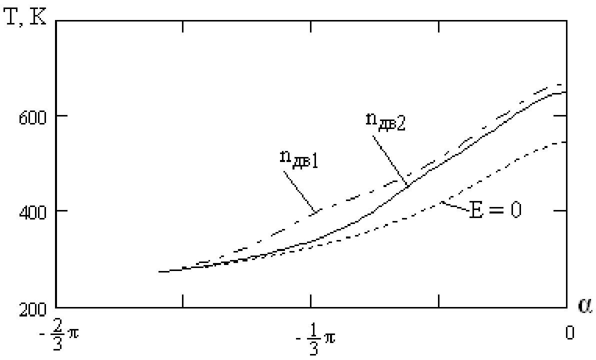


Рис. 3. **Порівняння динаміки зміни температури у повітряному заряді в залежності від кута повороту колінчастого вала α за обертами $n_{дв1}$ = 100 хв.$^{-1}$ та $n_{дв2}$ = 600 хв.$^{-1}$ за початковою енергією коливального збудження E_{01} = 100 Дж та за умови відсутності підводу енергії E = 0**

Висновки

Повільна релаксація енергій коливального збудження за низької температури дозволяє утворити щільний повітряний заряд. Зростання швидкості підводу енергії релаксації під час стиснення забезпечує приріст у роботі стиснення, що призводить до суттєвого збільшення температури заряду у в.м.т. Таким чином, технологія попереднього коливального збудження повітряного заряду може розглядатись як ефективний засіб для вирішення задачі полегшення пуску танкового дизельного двигуна.

Список літератури

1. *Конструкция форсированных двигателей наземных транспортных машин: Учебное пособие. Ч.2. // Н.К. Рязанцев. - Харьков: ХДПУ, 1996. - 388 с.*
2. *Теория и конструкция танка, Т.4 // Под ред. П.П. Исакова. - М.: Машиностроение, 1984. – 348 с.*
3. *Дис. к.т.н. Грицюк А.В. Обеспечение холодного пуска форсированных двухтактных танковых дизелей до температуры минус 30 °С за счет разработки и применения пусковых систем с рациональными параметрами. – Харьков, ХКБД, 1989. – 233 с.*
4. *Неравновесная колебательная кинетика. Пер. с англ. / под ред. М. Капителли. – М.: Мир, 1989. - 392 с.*
5. *Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Химические процессы в газах. – М.: Наука, 1981. – 264 с.*
6. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. - М.: Наука, 1966. – 688 с.*
7. *Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука, 1987. - 592 с.*
8. *Mallinger F. Numerical Analysis of Different Vibrational Relaxation Models for Master Equations. // Report of INRIA No 3263. – sept. 1997.*
9. *Григорьев Ю.Н., Ершов И.В., Ершова Е.Е. Влияние колебательной релаксации на пульсационную активность в течениях возбужденного двухатомного газа // Прикладная механика и техническая физика, 2004. – Т.45, № 3. – С.15 – 23.*
10. *Конструкция форсированных двигателей наземных транспортных машин: Учебное пособие. Ч.1. // Н.К. Рязанцев. - К.: ИСДО, 1993. - 252с.*

Надійшла до редакції 21.10. 2010 р.

Рецензент: член кореспондент Академії наук України А.М. Довбня, директор фізико-технічного інституту, Харків.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖАТИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ В УСЛОВИЯХ РЕЛАКСАЦИИ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

К.В. Коритченко, В.Н. Замана

Определено методику расчета термодинамических параметров газового заряда во время сжатия в условиях релаксации энергии колебательного возбуждения. Путем математического моделирования на примере двигателя 5ТДФ выполнен расчет энергии колебательного возбуждения воздуха, при которой достигаются условия для холодного пуска двигателя.

Ключевые слова: *двигатель 5ТДФ, холодный пуск, процесс сжатия, колебательная релаксация, термодинамическое состояние заряда.*

MODELLING OF AIR CHARGE CPOMPRESSION IN DIEZEL ENGINES UNDER THE CONDITIONS OF VIBRATIONAL EXCITATION RELAXATION

K.V. Korytchenko, V.N. Zamana

Methodology of calculation of thermo-dynamical parameters of gas charge during compression under the conditions of vibrational excitation relaxation has been defined. Using mathematical modeling method, on the example of 5ТДФ, engine calculation of air vibrational excitation has been conducted, which allows cold start of the engine.

Keywords: *5ТДФ engine, cold start, compression process, vibrational relaxation, thermo-dynamical state of charge.*