

УДК 621.43

І.С.Козачук

Луцький національний технічний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ ГАЗОВОГО ДВИГУНА, ПЕРЕОБЛАДНАНОГО З ДИЗЕЛЯ

В роботі проведені експериментальні дослідження таких параметрів процесу згоряння як показник згоряння (m) і тривалість згоряння ($\varphi_{зг}$) шляхом визначення індикаторних діаграм робочого циклу газового двигуна 4Ч11/12,5. Визначено характер і межі зміни цих показників для дизеля, переобладнаного для роботи на стисненому природному газі.

Ключові слова: газовий двигун, показник згоряння, тривалість згоряння, індикаторна діаграма, стиснений природний газ.

Постановка проблеми. Основними перевагами, що висувають природний газ на основний і найбільш повноцінний замітник рідких нафтових палив із всіх можливих видів моторних палив, є: великі природні запаси та розгалужена мережа газопроводів; значно нижчі шкідливі викиди, причому практично по всіх основних токсичних компонентах відпрацьованих газів (ВГ); більш низькі викиди двооксиду вуглецю (CO_2) як складового парникового ефекту.

Одним із способів ефективного використання стисненого природного газу (СПГ) є переобладнання існуючих дизелів для роботи на цьому альтернативному паливі. При переобладнанні дизеля в газовий двигун, який працює на природному газі, неодмінно виникає необхідність покращення показників двигуна або виведення їх на рівень базового дизеля. Така необхідність виникає як наслідок зміни деяких конструктивних параметрів дизеля, насамперед зменшення ступені стиснення і примусового запалювання паливоповітряної суміші, а також через відмінність фізико-хімічних властивостей дизельного палива та природного газу [1].

Для оцінки показників двигунів досить широко застосовують математичне моделювання їхніх робочих циклів і характеристик. Такі моделі розроблені для двигунів, що працюють на паливах нафтового походження, а тому деякі процеси робочого циклу газових двигунів вони описують не достатньо точно, і, в першу чергу, це стосується процесу згоряння. Тому виникає необхідність дослідження процесу згоряння газового двигуна і визначення основних його параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз виконаних досліджень [2,3] щодо способів переведення дизелів для роботи на природному газі показав, що, як правило, використання цього палива призводить до трансформації робочих процесів (паливоподачі, сумішоутворення і згоряння) і, як наслідок, до значних змін основних параметрів двигуна.

В зв'язку зі значним загостренням проблеми забруднення довкілля дуже актуальним є розрахунок утворення шкідливих речовин при протіканні робочого циклу в циліндрі двигуна. Такі дані може дати моделювання циклу по багатозонній моделі, запропонованій для бензинового двигуна [4]. В даний час аналогічні методики достатньо добре відпрацьовані.

Важливе значення для точного моделювання показників циклу двигуна має методика розрахунку характеру тепловиділення. Існує багато залежностей, що можна розділити на дві великі групи.

1. Залежності, складені виходячи з уявлень про реакції горіння, швидкості турбулентного полум'я, що зв'язують розвиток процесу з поточними умовами. Точне відтворення умов у кожній конкретній області камери згоряння в динаміці потребує розрахунків по багатозонних моделях із використанням методів моделювання тривимірного руху заряду не тільки в процесі згоряння, але й у тактах впуску і стиску.

2. Формальні залежності, що описують процес в часі і не розкривають особливостей його розвитку.

Ці залежності у випадку процесу згоряння в гомогенному середовищі, характерного для двигунів із примусовим запалюванням, дають задовільне співпадання з експериментом. В основі вказаних залежностей лежать закони, що припускають єдиний характер протікання процесу на всьому його протязі, що справедливо для випадку горіння поширенням фронту полум'я.

Визначення коефіцієнтів і показників степені в рівняннях для формального опису тепловиділення ґрунтоване на аналізі результатів визначення характеристик тепловиділення за експериментальними індикаторними діаграмами.

Для газових двигунів з іскровим запалюванням і високими ступенями стиснення використання сталих коефіцієнтів і показників в рівняннях, що описують процес тепловиділення, дає суттєву розбіжність розрахункових і експериментальних даних [5]. Тому для більш точного описання процесу згоряння основні показники тепловиділення задаються у вигляді поліноміальних залежностей як функції від частоти обертання колінчастого валу, коефіцієнту надміру повітря і розрідження у впускному трубопроводі.

На кафедрі ДВЗ Харківського національного автомобільно-дорожнього університету розроблена методика визначення таких параметрів тепловиділення як показник згоряння m і тривалість згоряння φ_z [6]. В якості розрахункового рівняння характеристик тепловиділення в ній використано закон згоряння І.І. Вібе.

Проте межі зміни значень показника згоряння в роботах [5] і [6] є різними, що може пояснюватись відмінністю конструкції газових двигунів, тому для газового двигуна, що досліджується в даній роботі, також необхідно встановити залежності зміни параметрів згоряння.

Мета дослідження. Визначення характеру і меж зміни показника згоряння та тривалості згоряння природного газу в циліндрах газового двигуна, переобладнаного з дизеля.

Результати досліджень. Для визначення індикаторних показників газового двигуна, а також для визначення таких параметрів процесу згоряння як показник згоряння m , і тривалість згоряння $\varphi_{z\alpha}$, проводилося індицирування газового двигуна, переобладнаного з дизеля 4С11/12,5.

Для реєстрації індикаторних діаграм-гребінок використовувався комп'ютер з використанням апаратно-програмного комплексу, який включає датчик тиску, підсилювач сигналу датчика із вхідним опором понад 10^{10} Ом, аналого-цифровий перетворювач Е 140 і програмне забезпечення.

Індицирування газового двигуна проводилось в опорних точках за планами факторного експерименту, а також при визначенні регульовальної характеристики за складом паливоповітряної суміші для режиму $\Delta p_k = 30$ кПа при $n_\delta = 1400$ хв⁻¹ і за різних θ_z для режимів $\Delta p_k = 20, 40$ кПа при $n_\delta = 1400$ хв⁻¹. Метою індицирування газового двигуна було визначення максимального тиску згоряння, ступеня нерівномірності послідовних робочих циклів в різних швидкісних і навантажувальних режимах з різними регульовальними параметрами двигуна, індикаторних показників, які характеризують якість робочого процесу в усталених режимах, а також, визначення таких параметрів процесу згоряння як показник згоряння m , і тривалість згоряння $\varphi_{z\alpha}$.

Під час експериментальних досліджень оцінювалась нерівномірність робочих циклів Δ та середній максимальний тиск згоряння \bar{P}_z серії індикаторних діаграм за методикою наведеною в роботі [7].

Для прикладу на рис. 1 приведена діаграма-гребінка газового двигуна, для якої $P_{z_{cp}} = 4,2$ МПа а $\delta_{P_z} = 0,044$.

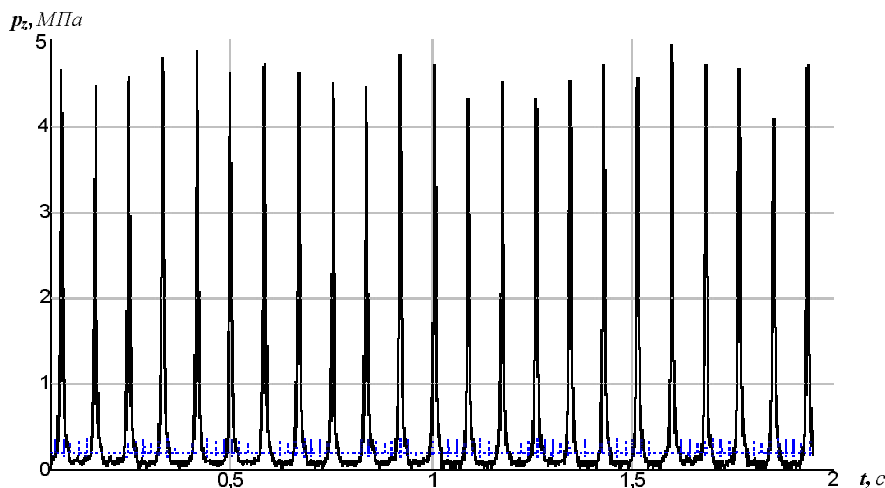


Рис. 1. Індикаторна діаграма-гребінка робочого процесу газового двигуна

$$(n_d = 1400 \text{ хв}^{-1}; \Delta p_k = 20 \text{ кПа})$$

За розрахунковими значеннями P_{zcp} вибирається розгорнута індикаторна діаграма, за якою визначаються значення тиску в циліндрі двигуна на протязі всього робочого циклу з подальшим визначенням середнього індикаторного тиску p_i , показник згоряння і тривалість згоряння, значення кута повороту колінчастого при максимальному тиску згоряння в циліндрі двигуна тощо.

На рис. 2 наведені розгорнуті індикаторні діаграми отримані при частоті обертання колінчастого валу $n_d = 1400 \text{ хв}^{-1}$ та розрідженні у впускному трубопроводі $\Delta p_k = 20, 40$ і 60 кПа .

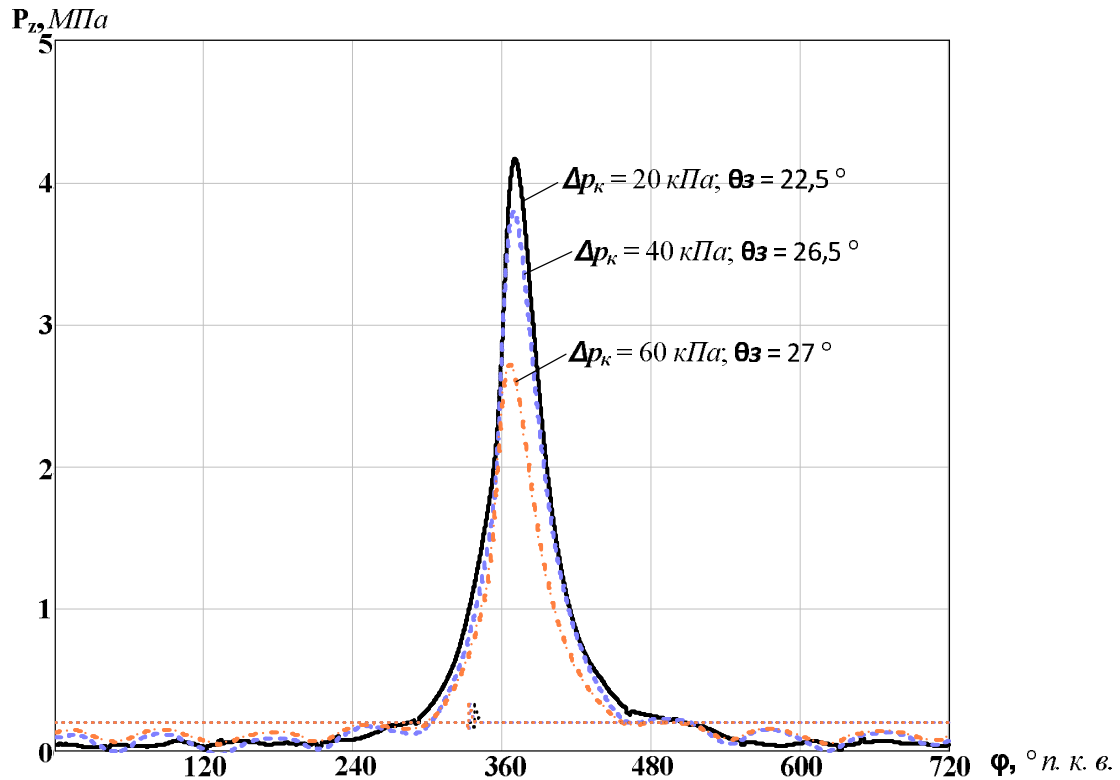


Рис. 2. Розгорнуті індикаторні діаграми робочого процесу газового двигуна ($n_d = 1400 \text{ хв}^{-1}$)

Як видно з рисунка, максимальний тиск згоряння $p_{z \text{ max}}$ при збільшенні навантаження зростає від $2,72 \text{ МПа}$ при $\Delta p_k = 60 \text{ кПа}$ до $4,2 \text{ МПа}$ при $\Delta p_k = 20 \text{ кПа}$. При цьому пік індикаторної діаграми віддаляється від ВМТ на $6,5^\circ$, 9° і 10° п. к. в. відповідно для $\Delta p_k = 60, 40$ і 20 кПа . Середній індикаторний тиск для цих режимів рівний відповідно $0,32 \text{ МПа}$, $0,46 \text{ МПа}$ і $0,6 \text{ МПа}$. В результаті обробки індикаторних діаграм на визначення показника згоряння і тривалості згоряння встановлено, що з підвищенням навантаження значення показника згоряння зменшується, а тривалість згоряння зростає. Так при $\Delta p_k = 60 \text{ кПа}$ $m = 3,3$ і $\varphi_z = 48^\circ$ п. к. в., а при $\Delta p_k = 20 \text{ кПа}$ $m = 2,15$ і $\varphi_z = 54^\circ$ п. к. в.

Залежності зміни показника згоряння m і тривалості згоряння φ_z від режиму роботи двигуна отримано при обробці індикаторних діаграм. Обробка індикаторних діаграм здійснювалась шляхом порівняння експериментальних діаграм та діаграм, розрахованих за допомогою математичної моделі робочого процесу газового двигуна[8]. Вибір потрібних значень показника характеру згоряння та тривалості згоряння здійснювався одночасно для конкретного режиму роботи двигуна.

Критерієм вибору показника характеру згоряння було значення кута повороту колінчастого валу за якого досягався максимальний тиск робочої суміші в циліндрі двигуна. За значень показника згоряння $1 \dots 1,5$ пік індикаторної діаграми наближається до ВМТ, за більших значень – віддаляється до НМТ. Потрібний показник характеру згоряння забезпечував збіг піків експериментальної та розрахункової індикаторних діаграм.

Критерієм вибору тривалості згоряння було значення максимальної температури згоряння. При збільшенні тривалості згоряння максимальний тиск в циліндрі зменшується внаслідок зменшення кількості горючої суміші, що вигоряє, за одиницю часу, тобто зменшення швидкості вигоряння. Потрібне значення тривалості згоряння забезпечує наближення розрахункового значення максимальної температури в циліндрі до експериментального.

Обробка індикаторних діаграм роботи двигуна в робочому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів дала можливість зробити висновок, що значення показника характеру згоряння та тривалості згоряння в значній мірі залежать від навантаження двигуна і практично не змінюються при зміні частоти обертання колінчастого валу двигуна.

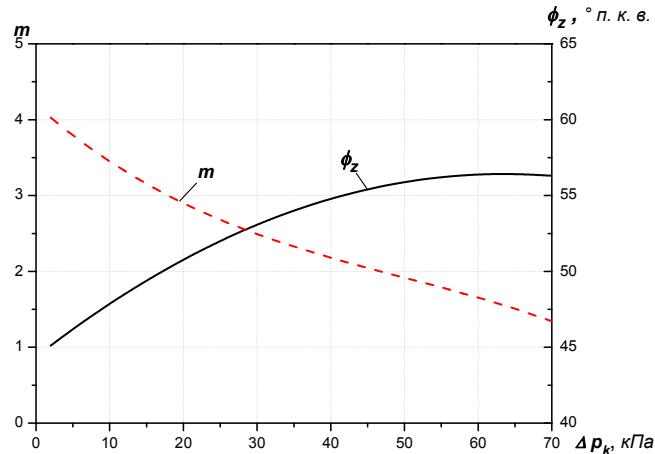


Рис. 3. Графічні залежності показника характеру згоряння m і тривалості згоряння ϕ_z від режиму роботи двигуна.

Із використанням даної методики отримані поліноміальні залежності другої і третьої ступені відповідно для показника характеру згоряння та тривалості згоряння від навантаження газового двигуна.

Значення показника характеру згоряння описується поліноміальною залежністю:

$$m(\Delta p_k) = 0.872 + 0.0761 \cdot \Delta p_k - 0.0006 \cdot \Delta p_k^2.$$

Тривалість згоряння змінюється при зміні режиму роботи двигуна і визначається за залежністю:

$$\phi_z(\Delta p_k) = 60.972 - 0.4277 \cdot \Delta p_k + 0.006 \cdot \Delta p_k^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p_k^3.$$

Характер залежностей показника згоряння та тривалості згоряння показаний на рис. 3.

Із графіків видно, що при зменшенні навантаження показник характеру згоряння зростає, що пояснюється зменшенням швидкості згоряння і збільшенням тривалості першої фази згоряння внаслідок поганого сумішоутворення і порівняно великої кількості залишкових газів у робочій суміші при низьких навантаженнях. При малих навантаженнях більші значення показника характеру згоряння викликають скорочення фази догорання. В поєднанні із низьким наповненням циліндру і високим значенням кута випередження запалювання це викликає меншу тривалість процесу згоряння в порівнянні із режимами високих навантажень.

Висновки. Під час індицирування газового двигуна 4Ч11/12,5 були визначені такі основні показники його робочого циклу як максимальний тиск в циліндрах двигуна, ступінь нерівномірності послідовних робочих циклів в різних швидкісних і навантажувальних режимах з різними регульовальними параметрами двигуна, індикаторні показники, які характеризують якість робочого процесу в усталених режимах. Встановлено що значення показника характеру згоряння та тривалості згоряння природного газу в значній мірі залежать від навантаження двигуна і практично не змінюються при зміні частоти обертання колінчастого валу двигуна. Отримано поліноміальні залежності, що описують зміну цих показників від навантаження двигуна, для використання в математичному моделюванні робочих процесів газового двигуна.

1. Матейчик В.П., Яновський В.В., Захарчук В.І., Сітовський О.П., Козачук І.С. Дослідження газового двигуна з іскровим запалюванням, переобладнаного з дизеля // Науково-виробничий журнал "Автошляховик України". – №4 – 2008. – С. 13-16.
2. Kamel M.M. Duggal V.K. Cummins B5.9G Natural Gas Engine. NGV'94 International Conference. Toronto, Ontario, Canada.
3. Гайворонский А.И., Марков В.А., Илатовский Ю.В. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях. – ООО «ИРЦ Газпром», 2007. – 480 с.
4. Максимов А.Л., Черняк Б.Я. Расчетная модель действительного цикла двигателя внутреннего сгорания // Труды МАДИ, вып. 126. – М.: МАДИ. – 1976. – С. 74-84.
5. Луканин В.Н., Хачиян А.С., Федоров В.М., Шишлов И.Г., Хамидуллин Р.Х. Результаты исследования двигателя КамАЗ, питаемого природным газом. Сб. науч. тр. НИИЭПАК/МАДИ(ТУ). – М: МАДИ. – 1997.
6. Абрамчук Ф.И., Кабанов А.Н. Методика расчета процесса сгорания газового двигателя с высокоэнергетической системой зажигания // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – №2. – С. 67 – 73.
7. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, К.С. Золотаревский, И.В. Скородинский. – М.: АН СССР, 1960.
8. Матейчик В.П., Яновський В.В., Козачук І.С. Перевірка адекватності математичної моделі робочого процесу газового двигуна // Вісник НТУ і ТАУ, Київ –2003. - № 7. – с.55-59.