

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

КРАВЧЕНКО СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.433.3:662.76

**КОНВЕРТАЦІЯ СТАЦІОНАРНОГО ДВИГУНА ГД100
ДЛЯ РОБОТИ НА НИЗЬКОКАЛОРИЙНИХ ГАЗОВИХ ПАЛИВАХ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Марченко Андрій Петрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
проректор з наукової роботи

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тимошевський Борис Георгійович,
Національний університет кораблебудування
ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв,
завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння

кандидат технічних наук, доцент
Корогодський Володимир Анатолійович,
Український державний університет залізничного
транспорту, м. Харків,
доцент кафедри теплотехніки та теплових двигунів

Захист відбудеться «19» травня 2016 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 64.050.13 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, кафедра двигунів внутрішнього згоряння, ауд. 11.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «15» квітня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої Вченої ради



Ребров О. Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перспективним в умовах сьогодення є використання низькокалорійних газових палив (НГП) в стаціонарних енергоустановках з ДВЗ, що мають найбільший ККД з відомих на цей час двигунів і перетворювачів енергії. Утилізація НГП є актуальним питанням для України як з точки зору економіки, розглядаючи його у якості ресурсу забезпечення енергетичних потреб країни, так і з екологічного міркування – зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Проте спалювання НГП в ДВЗ викликає низку проблем, які пов'язані з пропусками запалювання, зниженням потужності двигуна, зростанням емісії шкідливих речовин з відпрацьованими газами та ін. Часткове їх вирішення можливо за рахунок використання у ДВЗ системи форкамерно-факельного запалювання (ФФЗ), а також реалізації концепції спалювання збіднених паливо-повітряних сумішей. В Україні накопичений великий досвід виробництва та експлуатації газових двигунів типу ГД100, які працюють на природному газі. Ці двигуни мають оригінальну організацію робочого процесу, яка характеризується ФФЗ збіднених паливо-повітряних сумішей і якісним регулюванням потужності, що забезпечує їх високі техніко-економічні показники. Більше того, означені двигуни менш чутливі до зміни компонентного складу палива.

Невирішеними залишаються питання, пов'язані з детонацією паливо-повітряної суміші, вибором конструктивних і регульовальних параметрів двигунів типу ГД100 і ряд інших проблем при використанні в них низькокалорійних газів. Крім того, на сьогодні відсутні теоретичні дослідження процесу згоряння сильно збіднених (коефіцієнт надлишку повітря $\alpha > 2$) сумішей НГП з повітрям, що не дозволяє виконати детальне математичне моделювання робочого процесу двигуна та виконати багатопараметричну оптимізацію його параметрів.

Таким чином, науково-практична задача, яка спрямована на дослідження впливу фізико-хімічних властивостей НГП на робочий процес в двигунах з форкамерно-факельним запалюванням і якісним регулюванням потужності, обґрунтування параметрів означених двигунів є актуальною, що й обумовило напрямок дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння НТУ «ХП» за планами науково-дослідних робіт відповідно до завдань держбюджетної теми МОН України «Розробка технічних рішень із забезпечення енергозбереження, ресурсу та екологізації транспортних і стаціонарних двигунів» (ДР № 0115U000525), в якій здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є конвертація стаціонарного газового двигуна ГД100 для роботи на низькокалорійних газових паливах шляхом вибору його конструктивних і регульовальних параметрів та параметрів робочого процесу.

Для досягнення мети в роботі поставлені основні задачі.

1. Аналіз сучасного стану проблеми виробництва і використання низькокалорійних газових палив у ДВЗ.
2. Дослідження впливу фізико-хімічних властивостей низькокалорійних газових палив на показники двигунів.

3. Розробка математичної моделі робочого процесу стаціонарного двигуна з форкамерно-факельним запалюванням і якісним регулюванням потужності.

4. Розрахунково-експериментальне дослідження робочого процесу двигуна ГД100 при використанні низькокалорійних газових палив.

5. Вибір та обґрунтування раціональних значень параметрів двигуна ГД100 при використанні низькокалорійних газових палив.

Об'єкт дослідження – робочий процес газового двигуна з форкамерно-факельним запалюванням та якісним регулюванням потужності.

Предмет дослідження – вплив фізико-хімічних властивостей низькокалорійних газових палив на параметри процесів у форкамері та циліндрі, а також на показники стаціонарного газового двигуна з форкамерно-факельним запалюванням і якісним регулюванням потужності.

Методи дослідження. Дисертаційне дослідження базується на фундаментальних положеннях теорії двигунів внутрішнього згорання. Для розрахунку параметрів термодинамічної системи використаний метод об'ємного балансу проф. М. М. Глаголева. Для розрахунку тепловіддачі газів у стінки циліндра застосовувався метод Ньютона-Ріхмана. В основу математичної моделі опису процесу згорання покладено метод проф. І. І. Вібе. Розрахункові рівняння для визначення температурного стану деталей камери згорання отримано апроксимацією експериментальних даних за методом найменших квадратів з використанням методу планування експерименту за 2-х факторним позиційним ортогональним планом. Пошук раціональних значень параметрів двигуна проводився за методом дослідження простору параметрів І. М. Соболя та Р. Б. Статнікова. Усі розрахункові дослідження реалізовано в програмному комплексі MATLAB.

Наукова новизна. Запропоновано системний підхід щодо конвертації газового двигуна для роботи на різних низькокалорійних газових паливах, що базується на використанні уточненої математичної моделі робочого процесу, розрахункових і експериментальних дослідженнях, оптимізації конструктивних і регулювальних параметрів двигуна:

- вперше запропоновані залежності для визначення середньої температури стінки камери згорання двигуна ГД100, що враховують вплив площі поверхні камери згорання, а також параметрів навантажувального режиму;

- вперше запропоновані узагальнені емпіричні залежності, що описують динаміку та тривалість згорання вкрай збіднених ($\alpha=1,7-3,0$) сумішей газових палив з повітрям;

- вперше визначено кількісний та якісний вплив виду низькокалорійного газового палива на показники робочого процесу двигуна ГД100;

- отримала подальший розвиток методика оптимізації параметрів форкамери двигуна з форкамерно-факельним запалюванням із використанням комплексу критеріїв ефективності, що характеризуються мінімальною енергією запалювання суміші (МЕЗ), енергією форкамерного факелу та коефіцієнтом продувки форкамери.

Практичне значення отриманих результатів для двигунобудування полягає у наступному:

1. Розроблено та програмно реалізовано комплекс математичних моделей внутрішньоциліндрових процесів двигуна з форкамерно-факельним запалюванням і якісним регулюванням потужності, який дозволяє врахувати вплив компонентного складу і фізико-хімічних властивостей НГП на робочий процес і показники двигуна.

2. Запропоновано комплекс конструкторських заходів для забезпечення номінальної потужності двигуна ГД100 при використанні НГП.

3. Визначені раціональні конструктивні та регулювальні параметри двигуна ГД100, що дозволять забезпечити якісне запалювання та згоряння паливо-повітряної суміші, високі техніко-економічні показники двигуна при використанні НГП.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в практику дослідно-конструкторських робіт у ДП «Завод ім. В.О. Малишева» (м. Харків), а також використовуються при проведенні навчального процесу й наукових досліджень на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційного дослідження одержані здобувачем особисто. Серед них: виконаний аналіз теоретичних та експериментальних досліджень використання НГП в двигунах з примусовим запалюванням; здійснено аналіз і систематизацію результатів експериментальних досліджень двигунів типу ГД100 при їх роботі на природному газі та біогазі; розроблено і програмно реалізовано математичну модель робочого процесу двигуна з форкамерно-факельним запалюванням і якісним регулюванням потужності; отримано результати розрахункового дослідження впливу виду газового палива на параметри робочого процесу та показники двигуна ГД100; визначено раціональні конструктивні та регулювальні параметри двигуна ГД100 при використанні НГП.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідалися та отримали схвалення на: XX-XXII Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2012-2014 рр.); 75-й та 77-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 2013 р. та 2015 р.), XIX міжнародному Конгресі двигунобудівників (с. Коблево, 2014 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображені в 14 наукових працях, з яких 9 статей опубліковано в наукових фахових виданнях України (6 – у наукометричних базах), 5 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків. Загальний обсяг дисертації – 169 сторінок; з них 63 рисунки за текстом, 7 рисунків на 6 окремих сторінках; 20 таблиць за текстом; 1 таблиця на 1 сторінці; список використаних джерел з 122 найменувань на 14 сторінках; 2 додатки на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, розглянуто стан проблеми, сформульовано мету та задачі дослідження, зазначено шляхи їх вирішення, наведено інформацію про наукову новизну та практичну цінність роботи, визначено особистий внесок здобувача в одержанні результатів досліджень, представлені відомості щодо апробації результатів дослідження.

У першому розділі виконано аналіз, узагальнення та систематизацію світового досвіду використання газових палив в двигунах з примусовим запалюванням, зокрема газів вторинної переробки (синтез-газу, біогазу, генераторного та піролізного газів) та газів, які отримані як побічний продукт промисловості (коксового та шахтного газів). Дослідженнями різних аспектів цього питання займалися відомі вчені Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, А. П. Марченко, В. О. Пильов, І. В. Парсаданов, А. О. Прохоренко, С. О. Кравченко, А. А. Лісовал, Ф. І. Абрамчук, Р. З. Кавтарадзе, Н. Г. Певнев, А. В. Козлов, Daniel Favrat, Anne Roubaud, K. C. Midkiff, G. A. Karim, Jorge Arroyo та ін. Подібні дослідження проводилися у різні часи провідними фірмами, зокрема Caterpillar, Waukesha Engine Dresser Inc, GE Energy Jenbacher gas engines, Cummins Power Generation, MWM GmbH (в минулому Deutz Power Systems) та ін. Слід відмітити роботи Б. Г. Стечкіна та К. І. Генкіна, які присвячені використанню газових палив в двигунах ГД100. Практично всі дослідники відмічають, що відмінність властивостей НГП від традиційних палив призводить до зміни протікання процесів у циліндрі двигуна та, в деяких випадках, погіршення його показників. Зокрема, відзначають зменшення потужності й ККД двигуна, зростання годинної витрати палива, зниження якості запалювання паливо-повітряної суміші та ін.

Проаналізовано фізико-хімічні властивості НГП та їх вплив на показники газових двигунів. Показано, що найкращими властивостями володіють НГП, які мають високі значення метанового числа та об'ємної нижчої теплоти згорання, низький вміст інертних компонентів та широкі межі запалювання.

Виконаний аналіз показав, що означені проблеми вирішуються за рахунок адаптації конструкції та систем двигуна для використання певного виду палива, а також частково за рахунок застосування системи ФФЗ збіднених паливо-повітряних сумішей. При цьому кожне з цих палив формує комплекс своїх проблем, пов'язаних зі зниженням нижчої теплоти згорання, наявністю інертних компонентів та ін.

Визначені перспективи використання НГП в двигунах вітчизняного виробництва типу ГД100 з системою ФФЗ та якісним регулюванням потужності. Наведено основні конструктивні та регульовальні параметри двигуна 11ГД100М. Показано, що при роботі двигунів типу ГД100 на НГП відбувається зниження потужності, зниження якості запалювання паливо-повітряної суміші в форкамері та циліндрі, в деяких випадках має місце збільшення неповноти згорання палива. Тому конвертація означених двигунів для роботи на НГП передбачає комплексне вирішення.

На основі виконаного аналізу стану питання визначено напрям і методи дослідження, поставлено мету та основні задачі, які необхідно вирішити.

У другому розділі виконано аналіз та узагальнення результатів експериментальних досліджень двигунів типу ГД100 при роботі на природному газі та суміші природного і вуглекислого газів в різних співвідношеннях (т.зв. квазібіогаз).

В основу дисертаційної роботи покладено експериментальні дослідження проведені на ДП «Завод ім. В. О. Малишева» разом з ТОВ «Газпром ВНИИГАЗ» (м. Москва). Представлено результати досліджень з вибору раціональних конструктивних і регульовальних параметрів двигуна та його форкамери при використанні в

якості палива природного газу. Наведено експериментальні навантажувальні характеристики за різних ступенів стиску та тиску наддуву, комплекс індикаторних діаграм і характеристик тепловиділення.

Результати експериментальних досліджень газового двигуна 15ГД100Б при роботі на квазібіогазі показали, що зміна складу суміші газів за вмістом CO_2 від 0 до 36% практично не впливає на процес згоряння в циліндрі та показники двигуна. Проте суттєво (до 63,5%) збільшується об'ємна витрата палива, що вимагає додаткових заходів для забезпечення необхідної циклової подачі палива.

Наведені результати експериментальних досліджень є достатніми для розробки та ідентифікації комплексу математичних моделей внутрішньоциліндрових процесів двигуна типу ГД100.

У третьому розділі описано математичну модель робочого процесу газового двигуна типу ГД100. В основу моделі покладені рівняння першого принципу термодинаміки, закону збереження маси та рівняння стану:

$$\delta Q = dI - Vdp; \quad dM = dM_s - dM_b; \quad \frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dM}{M} + \frac{dT}{T}, \quad (1)$$

де dM – зміна маси робочого тіла (РТ) внаслідок надходження до циліндру свіжого заряду dM_s і виходу РТ із циліндру dM_b ; δQ – теплота, що підведена до (або відведена від) РТ внаслідок хімічних реакцій та теплообміну; dI , dp , dT , dV – відповідно, зміна ентальпії, тиску, температури РТ, об'єму надпоршневої порожнини.

При моделюванні теплообміну кількість переданої теплоти в стінку на розрахунковому кроці визначалася за формулою Ньютона-Ріхмана

$$\delta Q_T = \alpha_m (T - T_{cm}) \cdot F_{cm} d\tau, \quad (2)$$

де α_m – поточне значення середнього по поверхні камери згоряння (КЗ) коефіцієнта тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T – поточне значення температури газів у надпоршневій порожнині, К ; T_{cm} – середня по поверхні КЗ температура стінки, К ; F_{cm} – площа надпоршневої поверхні, м^2 ; $d\tau$ – розрахунковий інтервал за часом, с .

За результатами обробки експериментальних даних з використанням методу планування експерименту за 2-х факторним позиційним ортогональним планом запропоновано залежність для визначення середньої температури стінки КЗ

$$T_{cm} = 486,4 + 0,0217 \cdot N_e - 900,6 \cdot F_{cm} + 1362,6 \cdot F_{cm}^2 + 0,056 \cdot N_e \cdot F_{cm}, \quad (3)$$

де N_e – ефективна потужність двигуна, кВт .

Для визначення коефіцієнту тепловіддачі проаналізовано можливість застосування в газових двигунах з ФФЗ емпіричних залежностей: Г. Вошні, Г. Ейхельберга, Г. Хохенберга, В. Аннанда, Г. Б. Розенбліта. Показано, що теплообмін в циліндрі газового двигуна ГД100 найбільш точно описується залежностями Г. Б. Розенбліта та В. Аннанда – середньоквадратичне відхилення результатів розрахунку відносно втрати теплоти в стінки від експериментальних даних не перевищує, відповідно, 12,5 % і 10,9 %. Тому для моделювання процесу теплообміну в роботі використано залежність В. Аннанда

$$\alpha_m = a \cdot \frac{\lambda_{cm}}{D} R_e^b + c \frac{T^4 - T_{cm}^4}{T - T_{cm}}, \quad (4)$$

де $\lambda_{см}$ – теплопровідність суміші в циліндрі, Вт/(м·К); R_e – число Рейнольдса; D – діаметр циліндра, м; $a=b=0,7$ – коефіцієнти, що характеризують інтенсивність конвекційного теплообміну; $c=4,252 \cdot 10^{-9}$ – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність радіаційного теплообміну під час процесу згоряння.

Математичне моделювання процесу згоряння виконано на основі моделі проф. І. І. Вібе

$$x = 1 - \exp \left[-C \cdot \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right], \quad (5)$$

де φ_0 , φ_z , φ – відповідно, кут початку згоряння, тривалість згоряння та поточне значення кута повороту кривошипа в процесі згоряння; C – константа, що характеризує повноту згоряння палива; m – показник динаміки згоряння.

Константа C формули (5) визначається за залежністю

$$C = \ln(1-pol), \quad (6)$$

де pol – доля палива, що повністю згоряє за цикл

$$pol = \sum_{i=1}^n pol_i \cdot r_i; \quad (7)$$

pol_i , r_i – відповідно, повнота згоряння та об'ємна доля i -го компоненту палива.

Апроксимацією експериментальних даних методом найменших квадратів для двигуна типу ГД100 при роботі на природному газі і значеннях коефіцієнту надлишку повітря $\alpha = 1,7-3$ отримана емпірична залежність для показника повноти згоряння метану CH_4

$$pol_{CH_4} = -0,427 \cdot \alpha^2 + 1,457 \cdot \alpha - 0,315. \quad (8)$$

При значеннях $\alpha < 1,7$ показник повноти згоряння CH_4 приймався постійним і рівним 0,92. Для водню показник повноти згоряння прийнятий рівним 0,999, оскільки він майже повністю згоряє при значеннях α до 10. Межі займання і ламінарна швидкість розповсюдження полум'я для монооксиду вуглецю CO є близькими до метану CH_4 . Тому в роботі висунуто гіпотезу, що повнота згоряння CO при різних α змінюється подібно CH_4 .

За результатами обробки експериментальних індикаторних діаграм отримано значення коефіцієнтів тривалості згоряння φ_z та динаміки згоряння m на режимах навантажувальної характеристики при використанні в якості палива природного газу. Поточні значення показника динаміки згоряння m в ході процесу можна визначити з залежності проф. І. І. Вібе

$$m = -1 - \log_{\frac{\varphi}{\varphi_z}} \frac{C}{\ln(1-x_i)}. \quad (9)$$

Згідно (9) m змінюється протягом часу процесу (рис. 1). Середньоінтегральні за циклом значення m_{cp} на режимах навантажувальної характеристики наведені на рис. 2. Зі збільшенням коефіцієнту надлишку повітря α від 1,77 до 2,5 тривалість згоряння φ_z зростає з 30 до 70 гр.п.к.в., а середній показник динаміки згоряння m_{cp} навпаки зменшується від 0,55 до -0,5 (рис. 2).

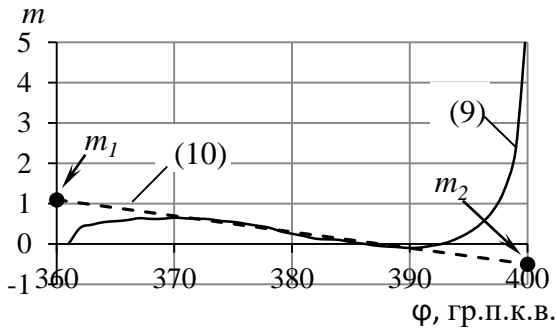


Рисунок 1 – Зміна показника динаміки згоряння за часом, який розраховано за залежностями (9) і (10) на режимі 75% N_e , $n=750$ хв⁻¹

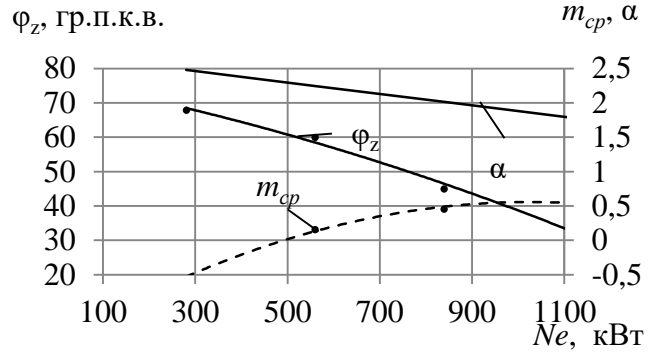
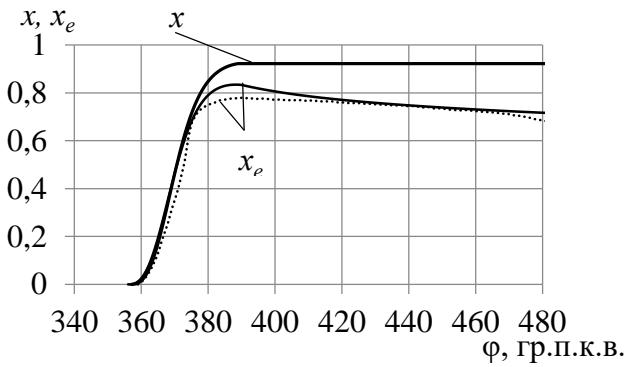


Рисунок 2 – Вплив навантаження двигуна ГД100 на коефіцієнт надлишку повітря α , тривалість згоряння φ_z та середнє значення показника динаміки згоряння m_{cp} при $n = 750$ хв⁻¹

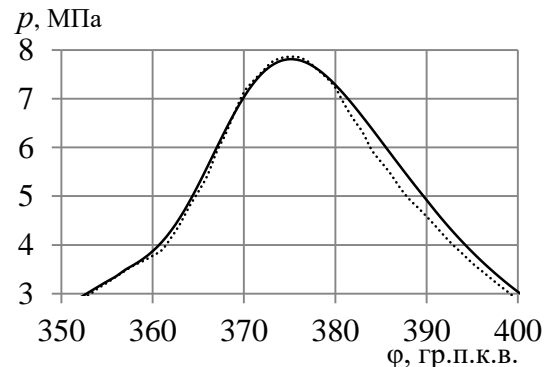
Дослідження показали, що розрахунок з простійним середньоінтегральним значенням m_{cp} не дозволяє достовірно описати процес згоряння в циліндрі. Тому при моделюванні згоряння в роботі запропоновано використовувати показник динаміки згоряння, що змінюється за лінійною залежністю від m_1 до m_2 (рис. 1)

$$m = (m_2 - m_1) \cdot \bar{\varphi} + m_1. \quad (10)$$

Коефіцієнти m_1 та m_2 підбиралися виходячи із забезпечення найкращого погодження між розрахунковими та експериментальними характеристиками тепловиділення та індикаторними діаграмами. Приклад результатів розрахунку характеристик тепловиділення та індикаторних діаграм за пропонованою методикою на режимі номінальної потужності наведений на рис. 3. Найкраща кореляція між розрахунковими та експериментальними даними на цьому режимі забезпечується при $m_1 = 1,1$ та $m_2 = -0,5$.



а)



б)

Рисунок 3 – Закон згоряння x , ефективні характеристики тепловиділення x_e (а) та індикаторні діаграми (б) на режимі номінальної потужності двигуна ГД100 ($N_e=1100$ кВт, $n=750$ хв⁻¹, $\varepsilon=14,5$); ———— розрахунок; експеримент

Для визначення показників моделі проф. І. І. Вібе (5) з урахуванням (10) запропоновано апроксимуючі залежності:

$$\varphi_z = -18,32 \cdot \alpha^2 + 129,45 \cdot \alpha - 139,95; \quad (11)$$

$$m_1 = -2,059 \cdot \alpha + 5,186. \quad (12)$$

Коефіцієнт m_2 на кожному режимі роботи двигуна типу ГД100 за навантажувальною характеристикою приймався постійним $m_2 = -0,5$.

Для знаходження оптимальних параметрів форкамери двигуна розроблено квазістаціонарну термодинамічну математичну модель процесу газообміну в форкамері. В основу математичної моделі покладено залежності (1).

Для проведення розрахункових досліджень за математичною моделлю робочого процесу двигуна типу ГД100 розроблено алгоритм, який реалізовано у програмному середовищі MATLAB. Перевірка адекватності математичної моделі здійснювалась співставленням розрахункових та експериментальних індикаторних діаграм за навантажувальною характеристикою в діапазоні зміни потужності $N_e=280-1100$ кВт, тиску наддуву $p_s=0,107-0,127$ МПа, ступенів стиску 12,5 і 14,5. Похибка розрахунку індикаторних та ефективних показників не перевищує 5%.

Таким чином, розроблена математична модель, яка адекватно описує внутрішньоциліндрові процеси газового двигуна типу ГД100 та дозволяє з достатньою точністю проводити дослідження робочого процесу при використанні газових палив довільного компонентного складу.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено розрахунковому дослідженню робочого процесу газового двигуна 11ГД100М при використанні в якості палива НГП на режимах навантажувальної характеристики.

Дослідження показують, що при використанні синтез-газу, генераторного та піролізного газів в циліндрі двигуна зменшується період затримки запалювання та збільшується швидкість згоряння в початковий період згоряння та, як наслідок, збільшується на 4,7 – 9% максимальний тиск циклу (рис. 4). Пояснюється це наявністю в цих паливах значної кількості водню H_2 (23-53 % об.), що має високу швидкість згоряння і низьку теплоємність. Крім того, наявність водню в цих НГП приводить до розширення меж запалювання і згоряння, а отже збільшення на 4,2-4,6% повноти згоряння палива.

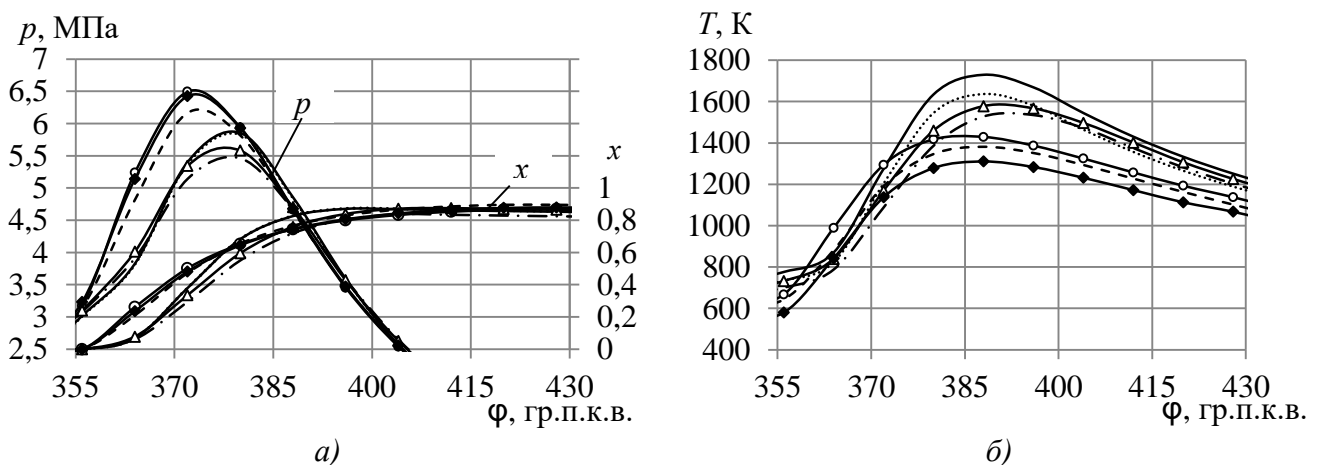


Рисунок 4 – Розрахункові індикаторні діаграми, характеристики тепловиділення (а) та температура РТ в процесі згоряння в циліндрі двигуна 11ГД100М (б) при використанні в якості палива природного газу та НГП ($n = 750$ хв⁻¹; $N_e = 1100$ кВт; $p_s = 0,127$ МПа; $\theta=358$ гр. п.к.в; $\varepsilon=12,5$); — — — Природний газ; ○ – Синтез-газ; - - - - Піролізний газ; — . — — Шахтний газ; – Біогаз; Δ – Коксовий газ; ◆ – Генераторний газ

Результати свідчать, що при використанні шахтного газу в якості палива максимальний тиск згоряння зменшується на 0,5 МПа порівняно з роботою на природ-

ному газі. Також спостерігається зменшення швидкості згоряння та погіршення динаміки тепловиділення. Процес згоряння біогазу в циліндрі двигуна протікає без суттєвих змін у робочому циклі. При цьому, тиск і температура РТ при згорянні майже не змінюються. Отримані результати підтверджуються даними експериментальних випробовувань на ДП «Завод ім. В. О. Малишева». Результати розрахунку робочого процесу двигуна 11ГД100М, що працює на НГП та природному газі на номінальному режимі, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні параметри робочого процесу двигуна 11ГД100М на номінальному режимі ($N_e=1100$ кВт; $p_s=0,127$ МПа; $\theta=358$ гр. п.к.в; $\varepsilon=12,5$)

| Вид палива | Природний газ | Синтез-газ | Піролізний газ | Шахтний газ | Біогаз | Коксовий газ | Генераторний газ |
|--|---------------|------------|----------------|-------------|--------|--------------|------------------|
| Параметр | Значення | | | | | | |
| Коефіцієнт надлишку повітря | 1,915 | 2,545 | 2,45 | 2,055 | 1,915 | 2,105 | 2,51 |
| Максимальний тиск циклу, МПа | 5,92 | 6,51 | 6,22 | 5,51 | 5,89 | 5,67 | 6,45 |
| Неповнота згоряння палива, % | 9,8 | 5,9 | 5,3 | 13,1 | 9,8 | 8,8 | 6,1 |
| Індикаторний ККД | 0,453 | 0,445 | 0,457 | 0,432 | 0,452 | 0,455 | 0,455 |
| Ефективний ККД | 0,339 | 0,333 | 0,342 | 0,323 | 0,338 | 0,340 | 0,341 |
| Об'ємна витрата палива м ³ /год | 339,23 | 1156,6 | 1257,7 | 824,8 | 524,9 | 663,02 | 1906,4 |

При використанні НГП (окрім біогазу) значно зростає коефіцієнт надлишку повітря α порівняно з роботою на природному газі (табл.1). Проте показники ефективності робочого циклу (індикаторний та ефективний ККД) майже не змінюються, що пояснюється розширенням меж запалювання і згоряння паливо-повітряної суміші. Винятком є використання шахтного газу, для якого індикаторний ККД двигуна зменшується на 4,6 %. Це паливо, що складається в основному з метану і повітря, має такі самі властивості як і природний газ. Отже збільшення α призводить до зменшення швидкості та повноти згоряння шахтного газу в циліндрі ДВЗ.

Слід відмітити суттєве збільшення об'ємної витрати палива при використанні НГП, внаслідок зменшення їх теплотворної здатності та збільшення теплоємності. Так, найбільше зростання об'ємної витрати палива (в 5,6 разів) спостерігається при використанні генераторного газу, найменше зростання – у випадку використання біогазу (в 1,5 разів), коксового газу (в 1,95 разів) та шахтного газу (в 2,4 разів).

На рис. 5 наведені навантажувальні характеристики двигуна 11ГД100М при використанні природного газу та НГП. При використанні НГП (окрім біогазу та коксового газу) на режимах часткових навантажень індикаторний та ефективний ККД двигуна зменшуються порівняно з роботою на природному газі (рис. 5). Спостерігається збільшення повноти згоряння синтез-газу, генераторного та піролізного газів на всіх режимах роботи двигуна, що призводить до збільшення максимального тиску згоряння на 0,8-2 МПа. Проте, не дивлячись на це, на режимах малих та середніх навантажень ефективність циклу погіршується у порівнянні з роботою двигуна на природному газі. Так, наприклад, на режимі 25% N_e індикаторний ККД двигуна при використанні синтез-газу, генераторного та піролізного газів зменшується, відповідно, на 19,3 %, 16,3 % та 14,2 %. Пояснюється це значним зростанням коефіцієнту надлишку повітря (до $\alpha=2,85$) та зменшенням температури циклу.

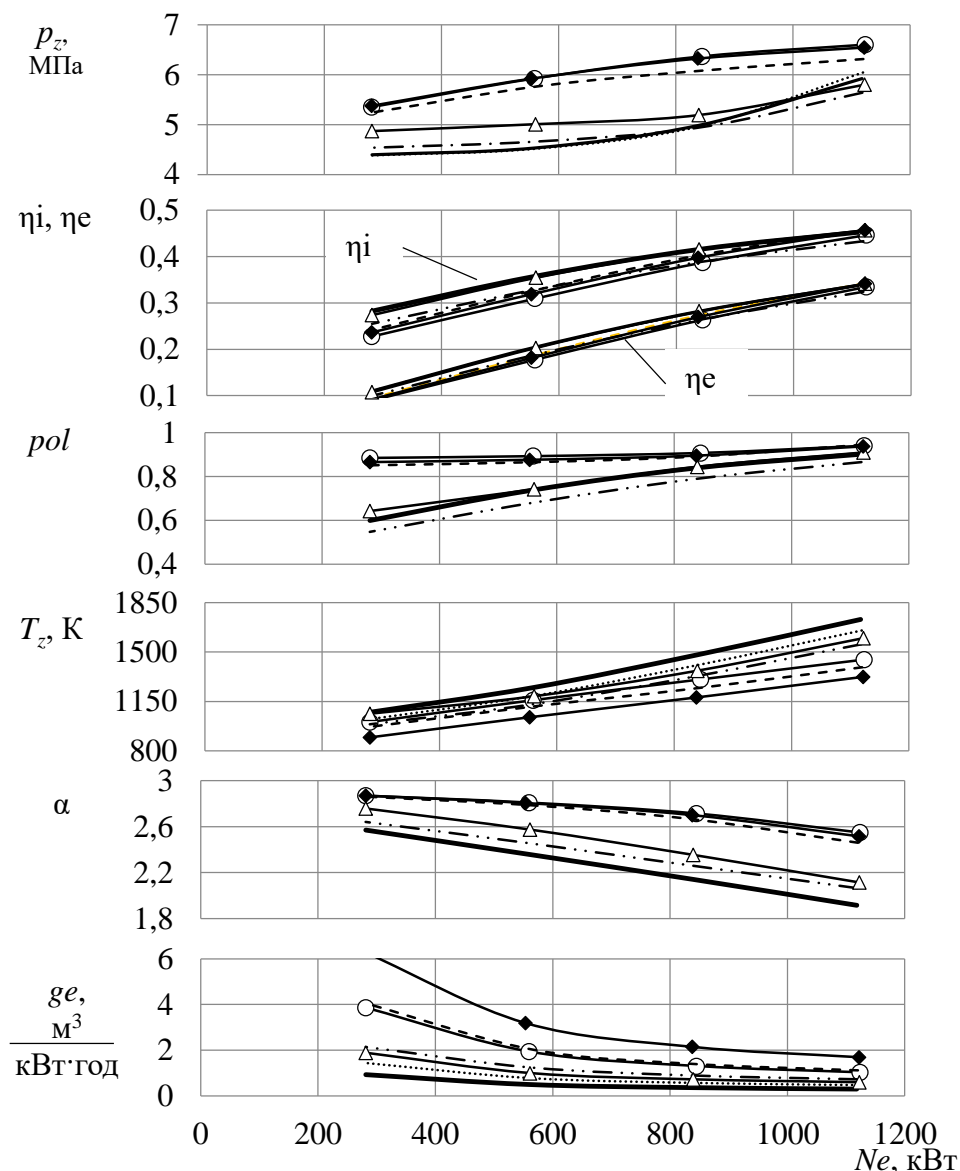


Рисунок 5 – Навантажувальні характеристики двигуна 11ГД100М при використанні природного газу та НГП ($n=750 \text{ хв}^{-1}$): — — — — Природний газ; ○ – Синтез-газ; - - - - Піролізний газ; — . — — Шахтний газ; – Біогаз; Δ – Коксовий газ; ◆ – Генераторний газ

Таким чином, визначений кількісний та якісний вплив виду низькокалорійних газових палив на показники робочого процесу газових двигунів типу ГД100 дозволив сформулювати основні заходи щодо їх конвертації.

В п'ятому розділі запропоновано комплекс конструктивних рішень для забезпечення ефективної та надійної роботи двигуна типу ГД100 при використанні НГП.

Дослідження показують, що при зміні виду газового палива можливі випадки коли запалювання газової суміші при базових параметрах форкамери є неможливим або енергія факелу є недостатньою для забезпечення запалювання суміші у циліндрі. Тому в роботі було поставлено та вирішено задачу пошуку параметрів форкамери, що забезпечують ефективне запалювання і згоряння суміші НГП з повітрям. Розглянуто три критерія ефективності.

В якості першого критерію ефективності запалювання паливо-повітряної суміші в форкамері від іскрового розряду свічки запалювання використано МЕЗ

$$E_{\min} = 12,6 \cdot \rho_{cm} \cdot R_{cm} \cdot T_{cm} \cdot \left(\frac{C_p}{R_b} \right) \cdot \left(\frac{T_b - T_{cm}}{T_b} \right) \cdot \left(\frac{a}{U_n} \right)^2 \cdot L, \quad (13)$$

де ρ_{cm} , R_{cm} , T_{cm} – відповідно, густина, газова стала, температура паливо-повітряної суміші; C_p , R_b , T_b – відповідно, середня ізобарна теплоємність, газова стала та температура продуктів згоряння; L – відстань між електродами свічки запалювання; a – коефіцієнт температуропровідності; U_n – нормальна швидкість розповсюдження ламінарного полум'я.

Другим критерієм, що характеризує ефективність запалювання суміші в циліндрі, прийнято енергію форкамерного факелу

$$E_{фак} = M_{\phi} \cdot \frac{Q_n \cdot pol}{1 + \alpha_{\phi} \cdot m_0}, \quad (14)$$

де M_{ϕ} – маса паливо-повітряної суміші в форкамері; Q_n – нижча теплота згоряння палива; α_{ϕ} – коефіцієнт надлишку повітря в форкамері; m_0 – теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння палива.

Енергія форкамерного факелу не повинна перевищувати відповідну енергію при використанні природного газу, оскільки збільшення енергії факелу може призвести до зростання далекобійності факелу і, як наслідок, перегріву стінки циліндра двигуна. З іншої сторони, зменшення енергії факелу може призвести до пропусків запалювання суміші у циліндрі та погіршення повноти згоряння.

Згідно теорії іскрового розряду акад. Я. Б. Зельдовича необхідна енергія запалювання залежить від нормальної швидкості згоряння U_n . Тому для визначення мінімально допустимої енергії факелу у випадку використання НГП запропоновано залежність, яка пов'язана з U_n ,

$$E_{фак_{\min}} = E_{фак.ПГ} \frac{U_{n.ПГ}}{U_{n.НГП}}, \quad (15)$$

де $E_{фак.ПГ}$ – мінімальна енергія факелу при використанні природного газу ($E_{фак.ПГ} = 2$ кДж); $U_{n.ПГ}$, $U_{n.НГП}$ – нормальні швидкості згоряння, відповідно, для природного газу та НГП.

Третім критерієм, що характеризує втрати форкамерного газу у випускний колектор при продувці, а отже й паливну економічність двигуна, прийнято коефіцієнт продувки форкамери

$$\psi = \frac{M_{фор.кл.}}{M_{\phi.min}}, \quad (16)$$

де $M_{фор.кл.}$ – кількість паливного газу, що проходить через форкамерний клапан; $M_{\phi.min}$ – кількість паливного газу в форкамері за умови повного її очищення від продуктів згоряння.

Означені критерії якості (13, 14, 16) визначаються конструктивними параметрами форкамери і налаштуваннями газової апаратури (ГА). Основними параметрами, що визначають якісний склад паливо-повітряної суміші форкамери, є її об'єм $V_{фор}$, діаметри форкамерного каналу $d_{кан}$ та газового клапану $d_{кл}$, а також тиск у газовій магістралі перед некерованим газовим клапаном $p_{фор}$ (рис. 6).

Оптимізацію параметрів форкамери двигуна виконано за методом дослідження простору параметрів І. М. Соболя та Р. Б. Статнікова, так званим ЛП_т-пошуком. Для кожного НГП проводилися розрахункові експерименти в 512 точках. За прийнятими обмеженнями були відсіянні неефективні точки, а точки, що залишилися наносили на графіки в системах критеріїв $1/E_{фак} - E_{min}$ і $1/E_{фак} - \psi$ таким чином, що кращі точки розташовувалися ближче до початку координат (рис.7). Приклад пошуку оптимальних параметрів форкамери у випадку використання синтез-газу наведено на рис. 7.

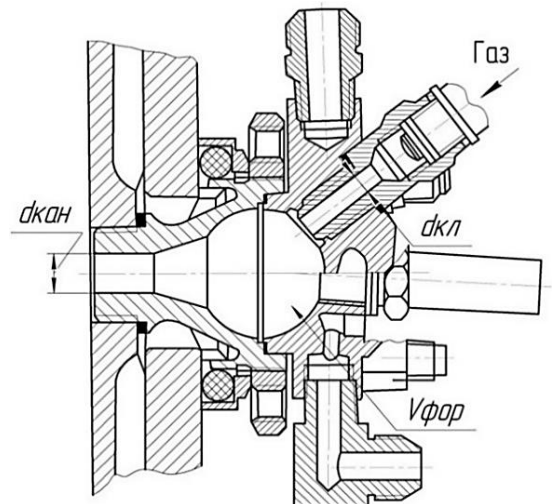


Рисунок 6 – Схематичне зображення форкамери двигуна ГД100

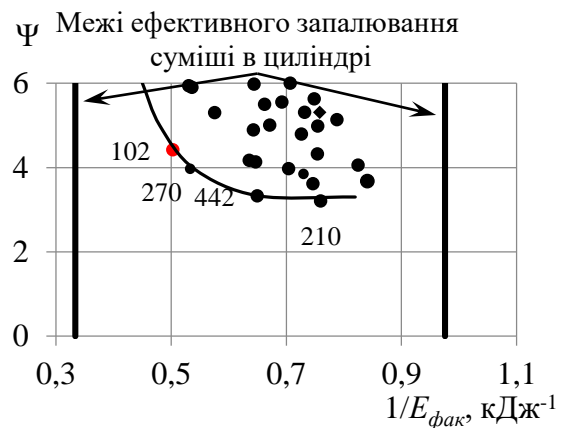
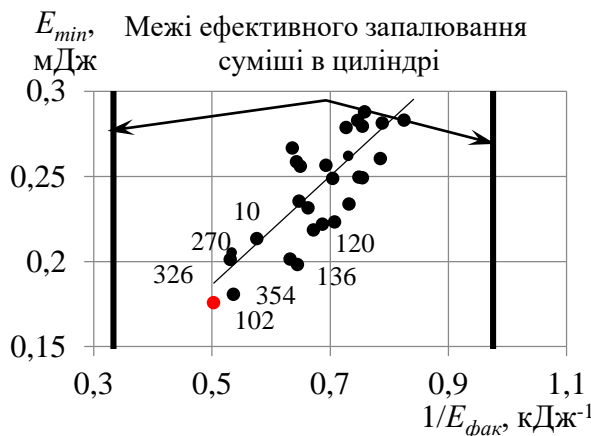


Рисунок 7 – Приклад знаходження оптимуму значень критеріїв якості (для випадку використання синтез-газу)

На графіку вертикальними прямими показано межі ефективного спалювання паливо-повітряної суміші. Згідно рис. 7 залежність $E_{фак}$ від E_{min} близька до лінійної: з покращенням одного критерію якості покращується інший і навпаки. Найкращим значенням критеріїв $E_{фак}$ та E_{min} відповідають точки з № 102, 354, 270 і 326. В свою чергу точки, що відповідають найкращим значенням коефіцієнту продувки форкамери газом ψ знаходяться на так званій компромісній кривій. Рухаючись по компромісній кривій обирається одна із багатьох паретівських точок з урахуванням значимості того чи іншого критерію. Точка № 102, яка відповідає кращим критеріям $E_{фак}$ та E_{min} , лежить на компромісній кривій, тобто ця точка є шуканим оптимумом (рис. 7). Подібним чином виконано пошук оптимальних параметрів форкамери і налаштувань ГА для інших НГП. Результати досліджень наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Оптимізовані значення параметрів форкамери при використанні НГП (параметри серійної форкамери: $V_{фор} = 46 \text{ см}^3$; $d_{кан} = 12 \text{ мм}$; $d_{кл} = 7,5 \text{ мм}$; $p_{фор} = 0,25 \text{ МПа}$)

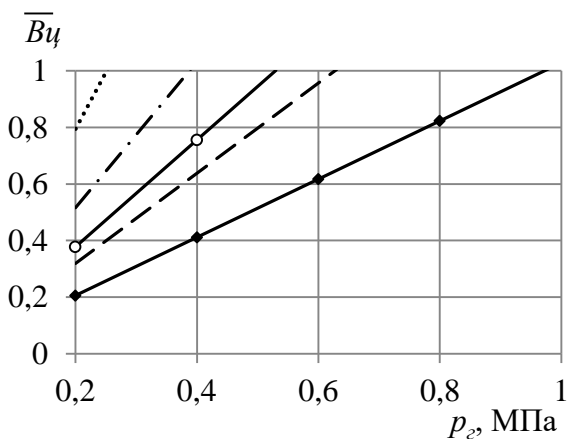
| Газ | $V_{фор}$, см ³ | $d_{кан}$, мм | $d_{кл}$, мм | $p_{фор}$, МПа |
|------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| Синтез-газ | 52 | 11,5 | 7 | 0,45 |
| Піролізний газ | 52 | 11,5 | 7 | 0,45 |
| Коксовий газ | 41 | 11,5 | 6,5 | 0,2 |
| Генераторний газ | 80 | 11,5 | 9 | 0,45 |
| Біогаз | 52 | 12 | 8 | 0,275 |

При використанні в якості палива шахтного газу в форкамері утворюється паливо-повітряна суміш, значення МЕЗ якої перевищують припустимі значення навіть при оптимізованих параметрах. В цьому випадку рекомендується до форкамери подавати природний газ.

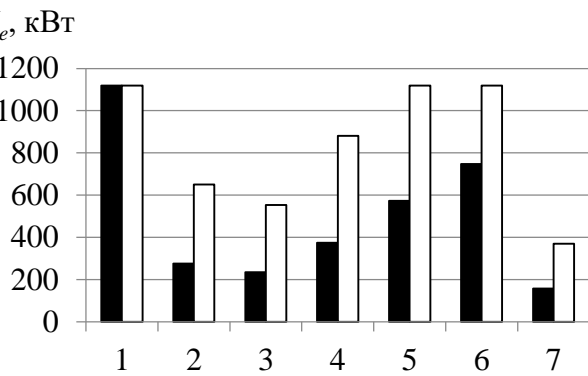
НГП мають меншу теплоту згоряння, ніж природний газ, що вимагає збільшення циклової подачі палива для отримання незмінної потужності двигуна. Для цього запропоновано збільшувати прохідні перетини газового клапана, мультиплікатора і дозатора, збільшувати тиск в системі подачі газу та дублювати ГА.

При застосуванні серійної ГА двигуна 11ГД100М при тиску в газовій магістралі $p_2 = 0,3$ МПа циклова подача палива та номінальна потужність знижуються на 33-85% від потрібних значень при спалюванні НГП (рис. 8). У випадку застосування ГА зі збільшеними прохідними перетинами (ГА двигуна 17ГД100А) при використанні біогазу та коксового газу наповнення циліндру забезпечується на 100%. В той же час цей захід є недостатньо ефективним у випадку використання інших дослідних газів.

Підвищуючи тиск компресором в газовій магістралі до 1 МПа досягається 100% наповнення газом циліндра при використанні ГА зі збільшеними прохідними перетинами (рис. 9, а). Проте звертає на себе увагу суттєве зростання витрати потужності компресора у випадку використання піролізного і генераторного газів при підвищенні тиску (рис. 9, б). Це призведе до зниження надійності роботи ГА та збільшення витрати паливного газу.



а)



б)

Рисунок 8 – Потужність двигуна при використанні природного газу та НГП: ■ – ГА двигуна 11ГД100М; □ – ГА двигуна 17ГД100А; 1 – Природний газ; 2 – Синтез-газ; 3 – Піролізний газ; 4 – Шахтний газ; 5 – Біогаз; 6 – Коксовий газ; 7 – Генераторний газ

Рисунок 9 – Залежність відносної циклової подачі від тиску газу в магістралі (а) та потужності, що витрачається на привід компресора від створюваного тиску газу (б) при застосуванні ГА зі збільшеними прохідними перетинами: ○ – Синтез-газ; - - - - Піролізний газ; — . — — Шахтний газ; – Біогаз; Δ – Коксовий газ; ◆ – Генераторний газ

Конструкцією ГА двигуна типу ГД100 передбачено можливість встановлення двох розподільних валів, газових клапанів, дозаторів, тобто дублювання ГА. В цьому випадку, як показують розрахункові дослідження, забезпечити потрібну циклову подачу газу можливо при меншому в 4,8 (для коксового газу) і 5,4 (для генераторного газу) разів тиску нагнітання палива у порівнянні з базовим варіантом, а також меншій потужності, що витрачається на привід компресора.

Для покращення показників двигуна 11ГД100М при роботі на НГП проведено оптимізацію його параметрів для режиму номінальної потужності. В якості варійованих параметрів приймали: ступінь стиску ε , тиск наддуву p_s , температура заряду на впуску T_s і кут початку запалювання θ . Критерієм ефективності роботи двигуна прийнято індикаторний ККД.

Як обмеження прийнято критерій виникнення детонації

$$K_n = \frac{h_{sp} - h_t}{Q_{cm}} \cdot (1 - x) \cdot (\varepsilon - 1), \quad (17)$$

де h_{sp} , – питома ентальпія незгорілої суміші в момент запалювання, кДж/кг; h_t – поточна питома ентальпія незгорілої суміші, кДж/кг; Q_{cm} – теплота згоряння паливоповітряної суміші, кДж/кг.

Детонаційне згоряння в газових двигунах виникає у випадку, коли максимальні значення $K_n > 1$. В якості інших обмежень прийнято максимальний тиск циклу, що не повинен перевищувати значення за технічними умовами на двигун ($p_z \leq 7,5$ МПа) та коефіцієнт продувки циліндру за умови забезпечення повного очищення КЗ від продуктів згоряння ($\psi = 1,2-1,5$). Пошук раціональних значень параметрів виконано на основі сіток І. М. Соболя та Р. Б. Статнікова.

Згідно отриманих результатів при використанні дослідних газів в двигунах ГД100 потрібно зменшувати тиск наддувочного повітря на 6-12 % та збільшувати температуру заряду на впуску 3-7 % (табл. 3). Ступінь стиску ε залишається не змінною, а кут випередження запалювання змінюються для різних низькокалорійних газових палив у незначних межах (1-4 гр.п.к.в.). Порівняння показників двигуна 11ГД100М за базових та оптимізованих параметрів наведено на рис. 10. При використанні оптимізованих значень параметрів двигуна відбувається збільшення максимального тиску та температури циклу (рис. 10, б, в), повноти згоряння палива (рис. 10, г). Як результат, підвищується на 2-8% індикаторний ККД двигуна (з 0,43-0,46 до 0,46-0,49) у порівнянні з базовим варіантом.

Таблиця 3 – Оптимізовані значення параметрів газового двигуна 11ГД100М при використанні НГП (базові параметри: $p_s = 0,127$ МПа; $T_s = 300$ К; $\theta = 358$ гр.п.к.в.; $\varepsilon = 12,5$)

| Газ | p_s , МПа | T_s , К | θ , гр. п.к.в. | ε |
|------------------|-------------|-----------|-----------------------|---------------|
| Синтез-газ | 0,115 | 315 | 354 | 12,5 |
| Піролізний газ | 0,117 | 315 | 356 | 12,5 |
| Шахтний газ | 0,112 | 315 | 357 | 12,5 |
| Біогаз | 0,12 | 310 | 355 | 12,5 |
| Коксовий газ | 0,117 | 315 | 356 | 12,5 |
| Генераторний газ | 0,116 | 320 | 357 | 12,5 |

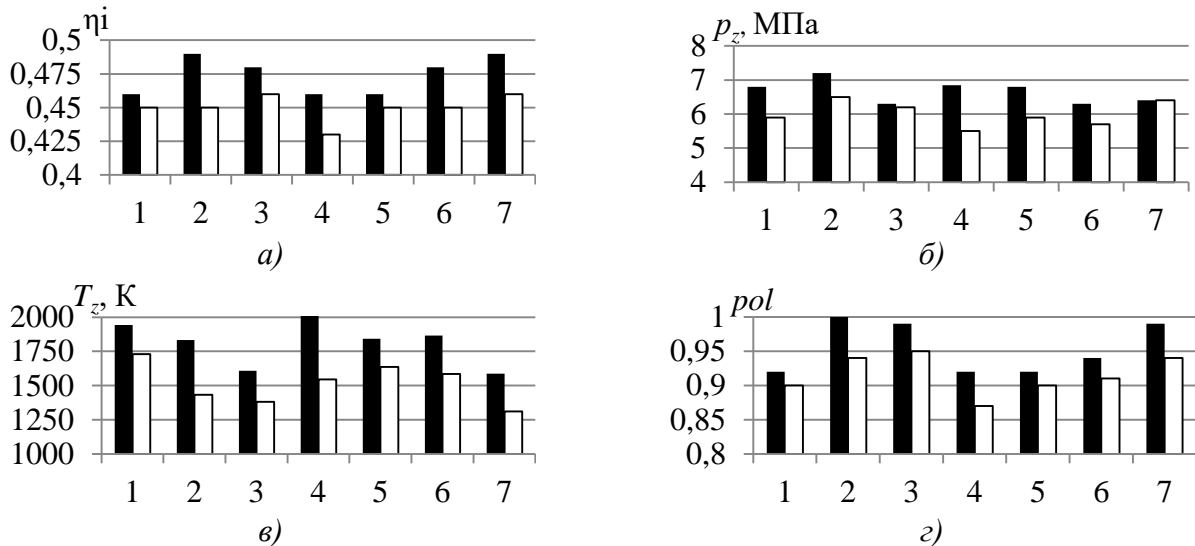


Рисунок 10 – Порівняння показників двигуна 11ГД100М за базовими та оптимізованими параметрами при використанні природного газу та НГП: ■ – оптимізовані параметри; □ – базові параметри; а – індикаторний ККД двигуна; б – максимальний тиск циклу; в – максимальна температура циклу; г – повнота згоряння палива; 1 – Природний газ; 2 – Синтез-газ; 3 – Піролізний газ; 4 – Шахтний газ; 5 – Біогаз; 6 – Коксовий газ; 7 – Генераторний газ

Таким чином, наведені матеріали щодо вибору раціональних значень параметрів газового двигуна типу ГД100, які забезпечують якісне запалювання та згоряння паливо-повітряної суміші, високі техніко-економічні показники двигуна при використанні НГП.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні поставлена та вирішена науково-практична задача конвертації стаціонарного газового двигуна ГД100 для роботи на низькокалорійних газових паливах за рахунок вибору його оптимальних конструктивних і регульовальних параметрів та параметрів робочого процесу.

1. Проаналізовано сучасний стан проблеми виробництва і використання НГП у ДВЗ. Показано, що НГП доцільно використовувати в стаціонарних двигунах з ФФЗ, які менш вимогливі до якісного та кількісного складу НГП порівняно з іншими типами ДВЗ. Запропоновано загальні підходи щодо їх конвертації.

2. Проаналізовано фізико-хімічні властивості НГП та їх вплив на показники газових двигунів. Найкращими властивостями володіють НГП, що мають високі значення метанового числа, нижчої теплоти згоряння, низький вміст інертних компонентів та широкі межі займання. Проте, підвищений вміст окремих компонентів НГП неоднозначно впливає на властивості палив та показники двигунів.

3. Розроблено та програмно реалізовано комплекс математичних моделей внутрішньоциліндрових процесів у двигунах з ФФЗ і якісним регулюванням потужності, який дозволяє: врахувати вплив компонентного складу і фізико-хімічних властивостей газового палива на робочий процес і показники двигуна; виконувати розрахункові дослідження внутрішньоциліндрових процесів; проводити багатокритеріальну і багатопараметричну оптимізацію. Математична модель включає:

- залежності для визначення середньої температури стінки КЗ двигуна типу ГД100, що враховують вплив площі надпоршневої поверхні стінки, а також параметрів навантажувального режиму;

- емпіричні залежності, що описують динаміку та тривалість згоряння вкрай збіднених ($\alpha=1,7-3,0$) сумішей газових палив з повітрям, як функції від якісного складу паливо-повітряної суміші.

4. Визначено кількісний та якісний вплив виду НГП на показники робочого процесу двигуна типу ГД100. Показано, що при використанні більшості низькокалорійних газових палив на режимі номінальної потужності показники ефективності циклу майже не змінюються у порівнянні з роботою на природному газі. Проте, слід відзначити збільшення в 1,5-5,6 разів об'ємної витрати НГП внаслідок суттєвого зменшення нижчої теплоти згоряння цих палив. На режимах малих та середніх навантажень показники паливної економічності двигуна при використанні дослідних НГП погіршуються внаслідок значного зростання коефіцієнту надлишку повітря в циліндрі (до $\alpha=2,85$) та зменшення температури циклу.

5. Запропоновано методику оптимізації параметрів форкамери двигуна з ФФЗ і якісним регулюванням потужності з використанням комплексу критеріїв ефективності: мінімальної енергії запалювання суміші, енергії форкамерного факелу та коефіцієнта продувки форкамери. Результати оптимізаційного дослідження свідчать, що при використанні синтез-газу, біогазу, піролізного, генераторного газів потрібно збільшувати об'єм форкамери та тиск форкамерного газу, для коксового газу – навпаки зменшувати, для шахтного газу – збільшувати енергію іскрового розряду на електродах свічки запалювання та/або подавати до форкамери природний газ в якості додаткового палива. Це дозволить забезпечити надійне та ефективно запалювання паливо-повітряної суміші в циліндрі двигуна.

6. Зниження теплотворної здатності НГП передбачає збільшення циклової подачі для отримання незмінної потужності двигуна типу ГД100. Для забезпечення відповідної циклової подачі палива запропоновано збільшувати прохідні перетини ГА, збільшувати тиск в системі подачі газу та дублювати ГА. Показано, що при використанні в якості палива: коксового газу та біогазу достатньо замінити ГА на таку, що має збільшені прохідні перетини; синтез-газу та шахтного газу доцільно змінити ГА у сукупності з підвищенням тиску паливного газу в газовій магістралі до 0,45-0,65 МПа; генераторного та піролізного газів раціонально застосувати подвійну ГА зі збільшеними прохідними перетинами у сукупності із підвищенням тиску в паливній магістралі до 0,5 МПа.

7. Визначено, що при використанні НГП в двигунах типу ГД100 потрібно зменшувати тиск наддувочного повітря на 6-12% та збільшувати його температуру на 3-7%. Ступінь стиску ϵ залишається не змінною, кут випередження запалювання змінюються для різних НГП у незначних межах (1-4 гр.п.к.в.). Запропоновані значення параметрів забезпечують підвищення індикаторного ККД двигуна на 2-8%.

8. Отримані результати впроваджені в практику дослідно-конструкторських робіт у ДП «Завод ім. В. О. Малишева», а також використовуються при проведенні навчального процесу й наукових досліджень на кафедрі ДВЗ НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кравченко С. С. Аналіз можливості використання синтетичного газового палива в стаціонарному двигуні 11ГД100М / О. О. Осетров, С. С. Кравченко,

Ю. О. Климець // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 1. – С. 109–116. *Здобувачем розроблено схему комбінованої установки отримання синтез-газу з подальшим його використанням в двигуні, виконане розрахункове дослідження роботи газового двигуна на синтетичному газовому паливі.*

2. Кравченко С. С. Проблемы и перспективы производства синтетических газовых топлив (Обзор) / А. П. Марченко, А. А. Осетров, С. С. Кравченко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2013. – №4. – С. 5–14. *Здобувачем проаналізовано проблеми та перспективи виробництва синтез-газу у світі та в Україні.*

3. Кравченко С. С. Проблемы та перспективи використання синтетичних газових палив в двигунах внутрішнього згоряння / А. П. Марченко, О. О. Осетров, С. С. Кравченко // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т.35, №5. – С. 70–79. *Здобувачем проаналізовані способи використання синтетичних палив у ДВЗ, досліджено показники робочого процесу двигуна 11ГД100М при роботі на синтез-газі.*

4. Кравченко С. С. Обґрунтування вибору моделі теплообміну в циліндрі стаціонарного газового двигуна 11ГД100М / А. П. Марченко, О. О. Осетров, С. С. Кравченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – №14 (1057). – С. 72–82. *Здобувачем виконано дослідження процесу теплообміну в циліндрі стаціонарного газового двигуна 11ГД100М, обґрунтовано вибір залежності для визначення коефіцієнту тепловіддачі.*

5. Кравченко С. С. Дослідження та математичне моделювання процесу згоряння в двигуні з форкамерно-факельним запалюванням / А.П. Марченко, О. О. Осетров, С. С. Кравченко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2014. – № 2. – С. 12-19. *Здобувачем обґрунтовано вибір математичної моделі для опису процесу згоряння в циліндрі двигуна 11ГД100М, запропоновано емпіричні залежності для визначення показників моделі І. І. Вібе .*

6. Кравченко С. С. Порівняльний аналіз моделей теплообміну в циліндрі стаціонарного газового двигуна 11ГД100М А. П. Марченко, О. О. Осетров, С. С. Кравченко // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2014. – № 5. – С. 24-31. *Здобувачем отримано емпіричні залежності для визначення середньої температури стінки циліндру, для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі запропоновано використовувати емпіричну залежність В. Аннанда.*

7. Кравченко С. С. Моторные свойства низкокалорийных газовых топлив и их влияние на показатели двигателей внутреннего сгорания / А. П. Марченко, А. А. Осетров, С. С. Кравченко, О. А. Хамза // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – № 5,6. – С.3 – 12. *Здобувачем проаналізовані моторні властивості НГП та їх вплив на показники двигуна 11ГД100М, виконано дослідження робочого процесу дослідного двигуна при роботі на НГП.*

8. Кравченко С. С. Забезпечення номінальної потужності стаціонарного газового двигуна при використанні низкокалорийних газових палив / А. П. Марченко, О. О. Осетров, С. С. Кравченко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2015. – №1. – С. 27-33. *Здобувачем проаналізовані заходи забезпечення необхідної циклової подачі газового палива до циліндру для отримання незмінної потужності двигуна.*

9. Кравченко С. С. Оптимізація параметрів форкамери стаціонарного газового двигуна при роботі на низкокалорийних газових паливах / А. П. Марченко, О. О. Осетров, С. С. Кравченко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2015. – № 2 .

– С. 13-21. *Здобувачем запропоновано методика оптимізації параметрів форкамери з використанням комплексу критеріїв ефективності запалювання та згоряння паливо-повітряної суміші, виконано оптимізація параметрів форкамери газового двигуна 11ГД100М при використанні НГП.*

10. Кравченко С. С. Конвертація двигуна ГД100М для роботи на синтетичному газовому паливі, що отримано газифікацією вугілля / С. С. Кравченко, О. О. Осетров // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали ХХ міжнародної наук.-практ. конф., 15-17 травня 2012 р. : тези доп. – Харків : НТУ «ХП», 2012. – С. 193. *Здобувачем розроблена енергетична установка з двигуном 11ГД100М, виконані розрахунки енергетичних балансів установки для отримання синтез-газу.*

11. Кравченко С. С. Аналіз життєвих циклів синтетичних палив / С. С. Кравченко, О. О. Осетров // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали ХХІ міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня 2013 р. : тези доп. – Харків : НТУ «ХП», 2013. – С. 236. *Здобувачем проаналізовано історія, сучасний стан, сировинна база та технологія виробництва синтетичних газових палив.*

12. Кравченко С. С. Проблеми та перспективи виробництва і використання синтетичних газових палив у ДВЗ / С. С. Кравченко, О. О. Осетров // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту : 75-а міжнародна наук.-техн. конф., 24-25 квітня 2013 р. : тези доп. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 136. – С. 308. *Здобувачем проаналізовано способи використання синтетичних газових палив у ДВЗ.*

13. Кравченко С. С. Дослідження і математичне моделювання робочих процесів в циліндрі двигуна з форкамерно-факельним запалюванням паливо-повітряної суміші / С. С. Кравченко, А. П. Марченко, О. О. Осетров // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали ХХІІ міжнародної наук.-практ. конф., 15-17 жовтня 2014 р. : тези доп. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – С. 209. *Здобувачем обґрунтовано вибір і запропоновано емпіричні залежності та коефіцієнти математичних моделей процесу згоряння і теплообміну у двигуні 11ГД100М.*

14. Кравченко С. С. Обґрунтування параметрів двигуна 11ГД100М при використанні низькокалорійних газових палив / С. С. Кравченко, А. П. Марченко, О. О. Осетров // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту : 77-а міжнародна наук.-техн. конф., 21-23 квітня 2015 р. : тези доповідей. – Х. : УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 151. – С. 76-77. *Здобувачем запропоновані значення параметрів двигуна 11ГД100М, що дозволять забезпечити високі техніко-економічні показники при використанні низькокалорійних газових палив.*

АНОТАЦІЇ

Кравченко С. С. Конвертація стаціонарного двигуна ГД100 для роботи на низькокалорійних газових паливах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2016.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню особливостей використання низькокалорійних газових палив в двигунах з форкамерно-факельним запалюванням паливо-повітряної суміші та якісним регулюванням потужності, моделюванню

внутрішньоциліндрових процесів двигуна та пошуку його раціональних параметрів. Розроблений, реалізований і набув практичного застосування комплекс математичних моделей, що описують внутрішньоциліндрові процеси двигуна з форкамерно-факельним запалюванням. Проведені розрахункові дослідження дозволили визначити вплив властивостей НГП на показники газового двигуна типу ГД100. Запропоновано методику визначення оптимальних параметрів форкамери на основі комплексу критеріїв ефективності – мінімальної енергії запалювання суміші, енергії форкамерного факелу і коефіцієнта продувки форкамери. В результаті виконаного оптимізаційного дослідження запропоновані раціональні параметри форкамери за яких забезпечується якісне запалювання та згоряння паливо-повітряної суміші в циліндрі. Проаналізовано можливості конструктивного забезпечення номінальної потужності двигуна при використанні в якості палива різних низькокалорійних газів. Отримані конструктивні та регульовальні параметри двигуна ГД100, що дозволяють забезпечити високі техніко-економічні показники при його роботі на НГП.

Ключові слова: газовий двигун, низькокалорійні газові палива, форкамерно-факельне запалювання, згоряння, математичне моделювання, оптимізовані параметри.

Кравченко С. С. Конвертация стационарного двигателя ГД100 для работы на низкокалорийных газовых топливах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2016.

Диссертация посвящена исследованию особенностей использования низкокалорийных газовых топлив (НГТ) в двигателях с форкамерно-факельным зажиганием топливо-воздушной смеси и качественным регулированием мощности, моделированию рабочего процесса двигателя и поиска его рациональных параметров.

В диссертационной работе усовершенствована термодинамическая математическая модель расчета процесса сгорания: 1) предложена зависимость для определения средней температуры стенки камеры сгорания двигателя ГД100, учитывающая влияние площади надпоршневой поверхности стенки камеры сгорания и цилиндра, параметров нагрузочного режима; 2) предложены эмпирические зависимости, описывающие динамику и продолжительность сгорания сверх обедненных ($\alpha = 1,7-3,0$) смесей природного газа и НГТ с воздухом, как функции от качественного состава топливо-воздушной смеси; 3) показано, что для расчета количества тепла переданной в стенки цилиндра может быть использована зависимость В. Аннанда.

Проведенные расчетные исследования с использованием разработанной математической модели позволили определить влияние свойств НГТ на показатели газового двигателя типа ГД100. Показано, что при использовании большинства НГТ в двигателях с форкамерно-факельным зажиганием на режиме номинальной мощности показатели эффективности цикла почти не изменяются по сравнению с работой на природном газе, на режимах малых и средних нагрузок – несколько ухудшаются.

Предложена методика определения оптимальных параметров форкамеры на основе комплекса критериев эффективности зажигания топливо-воздушной смеси – минимальной энергии зажигания смеси, энергии форкамерного факела и коэффициента продувки форкамеры. С помощью данной методики были определены рациональные параметры форкамеры, обеспечивающие качественное воспламенение топливо-воздушной смеси в цилиндре двигателя.

Проанализированы мероприятия, позволяющие обеспечить номинальную мощность двигателя при использовании в качестве топлива исследуемых низкокалорийных газов. Показано, что обеспечить заданную цикловую подачу топлива и соответственно номинальную мощность двигателя возможно за счет: увеличения проходных сечений газовой аппаратуры; увеличения давления в газовой магистрали; дублирования газовой аппаратуры.

С использованием разработанной математической модели рабочего процесса выполнено оптимизационное исследование по выбору рациональных конструктивных и регулировочных параметров двигателя ГД100 при его работе на низкокалорийных газовых топливах. Найденные рациональные значения параметров: степень сжатия $\epsilon = 12,5$; угол начала зажигания $\theta = 354-357$ гр.п.к.в. (увеличивать на 1-4 гр.п.к.в. до ВМТ); давление наддува $p_* = 0,11-0,12$ МПа. Увеличение индикаторного КПД двигателя при этом составляет 2-8%.

Ключевые слова: газовый двигатель, низкокалорийные газовые топлива, форкамерно-факельное зажигание, сгорания, математическое моделирование, оптимизационные параметры.

Kravchenko S. Conversion of stationary engine GD100 to work on low-calorie gas fuels. – On the manuscript.

The thesis on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 05.05.03 – engines and power plants. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to the investigation of the use of low-calorie gas fuels (LCG) in engines with pre-chamber ignition of fuel-air mixture and quality regulation power, cylinder engine processes internally modelling and search his rational parameters. Designed program has been implemented and received practical application of complex mathematical models that describe the internal cylinder engine processes with pre-chamber ignition. Carried out calculations have allowed to determine the effect of the properties of the LCG on the performance of gas engine GD100 type. The technique of determination of optimal parameters of the latter on the basis of a set of performance criteria: minimum ignition energy mix, energy pre-chamber torch and purge coefficient pre-chamber. As a result of the optimization performed studies offered rational parameters of the pre-chamber where quality is provided by ignition and combustion of fuel-air mixture in the cylinder. Analyzed the possibility of constructive ensure the rated power of the engine when used as a fuel by various low-calorie gases. Received constructive and adjusting parameters of engine GD100 to ensure high technical-economic indicators in the LCG.

Key words: gas engine, low-calorie fuel gas, pre-chamber ignition, combustion, mathematical modeling, optimizing parameters.



Підп. до друку 04.03.2016 р. Формат видання 134x215. Формат паперу 60x90/16.
Папір офсет. Цифровий друк. Гарнітура Times New Roman. Обсяг авт. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 126

Надруковано у копії-центрі "МОДЕЛІСТ"
(ФО-П Миронов М.В. Свідоцтво ВО №022953)

м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1

тел. 7-170-354

www.modelist.in.ua