

*А.П. Марченко, О.О. Осетров, С.С. Кравченко*

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ФОРКАМЕРИ СТАЦІОНАРНОГО ГАЗОВОГО ДВИГУНА ПРИ РОБОТІ НА НИЗЬКОКАЛОРИЙНИХ ГАЗОВИХ ПАЛИВАХ

*Робота присвячена оптимізації конструктивних параметрів форкамери і налаштувань газової апаратури стаціонарного газового двигуна 11ГД100М при використанні в ньому низькокалорійних газових палив. Показано, що при використанні цих палив в серійній форкамері утворюється збіднена паливо-повітряна суміш, зменшується енергія форкамерного факела та збільшується мінімальна енергія запалювання паливо-повітряної суміші. Означене може призвести до пропусків запалювання суміші у форкамері та циліндрі. Виконане оптимізаційне дослідження дозволило визначити параметри форкамери і налаштування газової апаратури, що забезпечують суттєве покращення обраних критеріїв якості.*

### Вступ

Широке споживання двигунами внутрішнього згоряння традиційних палив призвело до загострення низки глобальних світових проблем, таких як парниковий ефект, виснаження нафтових і газових родовищ, погіршення екологічної ситуації. Тому велика увага в сучасному двигунобудуванні приділяється розробці технологій використання альтернативних джерел енергії, зокрема низькокалорійних газових палив (НГП).

До НГП відносять такі палива, як шахтний газ, коксовий газ, піролізний газ, синтез-газ, біогаз та інші, що мають відносно низьку теплоту згоряння порівняно з традиційними паливами. В Україні ці гази, як правило, викидаються в атмосферу або спалюються і забруднюють навколишнє середовище. Проте аналіз світового досвіду показує, що НГП можна ефективно використовувати в стаціонарних установках з двигунами внутрішнього згоряння [1-6].

В Україні накопичений великий досвід виробництва та експлуатації газових двигунів 11ГД100М, що працюють на природному газі. В робочому циклі таких двигунів реалізована концепція спалювання збіднених паливо-повітряних сумішей при високих значеннях коефіцієнту надлишку повітря. Форкамерно-факельне запалювання дозволяє забезпечити якісне регулювання потужності в широкому діапазоні режимів роботи двигуна, отже отримати високі показники паливної економічності та екологічності. Таким чином, стаціонарні газові двигуни 11ГД100М мають великі перспективи їх конвертації для роботи на НГП.

Важливим конструктивним елементом двигунів 11ГД100М є форкамера. Робочий процес форкамери визначає якість процесів запалювання суміші і згоряння у циліндрі двигуна. Отже вибір параметрів форкамери є одним з основних етапів модернізації конструкції двигуна для використання низькокалорійних газових палив.

### Аналіз публікацій

Відмінність властивостей низькокалорійних

газових палив від природного газу призводить до зміни протікання робочого процесу та, в деяких випадках, унеможливує роботу двигуна. При використанні НГП збільшується коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$  в циліндрі, в деяких випадках зменшується повнота згоряння, виникають пропуски запалювання в форкамері та/або циліндрі двигуна, спостерігається збільшення максимального тиску в циліндрі, підвищується жорсткість циклу, збільшується об'ємна витрата палива та інше [1,3,6]. Означене вимагає зміни конструктивних параметрів елементів і налаштувань двигуна.

Аналіз літературних джерел [1-6] показує, що при зміні виду газового палива можливі випадки, коли запалювання газової суміші від свічки запалювання при базових конструктивних параметрах форкамери є неможливим або енергія газового факела є недостатньою для забезпечення запалювання суміші у циліндрі. В роботі [7] показано, що конструктивні та регульовальні параметри форкамери газового двигуна 8ГЧН22/28 визначають енергетичні параметри факела, які, в свою чергу, впливають на протікання робочого процесу і надійність двигуна. Стверджується, що найбільша енергія факела потрібна для стійкої роботи двигунів при найбільшому збідненні суміші в циліндрі, особливо це стосується газових двигунів з якісним регулюванням потужності. Проте займання збагачених сумішей від потужного факела може призвести до небажаного збільшення тиску згоряння і жорсткої роботи двигуна. Отже при зміні виду газового палива потрібно змінювати конструкцію форкамери і налаштування її газової апаратури.

Для двигуна 11ГД100М проведені широкі експериментальні дослідження з вибору параметрів форкамери [8] для випадку використання природного газу. Проаналізовано вплив означених параметрів на показники робочого процесу форкамери та двигуна в цілому. Показано, що в форкамері утворюється легкозаймиста і високоенергетична суміш. Це сприяє надійному запалюванню та згорянню палива в циліндрі двигуна. Отримані у ро-

боті [8] дані дозволили виконати математичне моделювання робочого процесу форкамери і обґрунтувати її параметри для випадків використання НГП.

**Метою роботи** є оптимізація параметрів форкамери газового двигуна 11ГД100М при використанні в якості палива низькокалорійних газових палив.

**Особливості конструкції форкамери**

На двигунах 11ГД100М форкамера (рис. 1) встановлюється радіально в різбовий отвір у гільзі циліндра. Охолодження форкамери здійснюється охолоджувальною рідиною з системи охолодження двигуна. Горюча суміш запалюється свічкою запалювання. Відмінністю системи форкамерно-факельного запалювання двигунів 11ГД100М від подібних систем газових двигунів є заповнення форкамери газом під тиском 0,15-0,45 МПа через некерований автоматичний клапан. Введення газу в форкамеру під тиском сприяє її очищенню від залишкових газів.

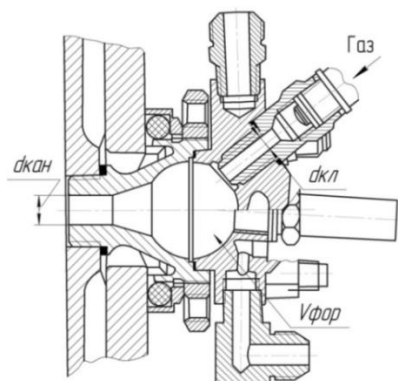


Рис.1. Схематичне зображення форкамери двигуна 11ГД100М

**Критерії якості робочого процесу форкамери**

Для забезпечення можливості запалювання і стійкого згорання збіднених газоповітряних сумішей в циліндрі на усіх режимах роботи двигуна потрібно утворити в форкамері високотемпературний енергетичний заряд продуктів згорання. Отже першим критерієм якості робочого процесу форкамери при використанні НГП прийнято енергію факела, яка повинна бути як можна більшою.

З іншого боку потрібно забезпечити надійне запалювання і згорання паливо-повітряної суміші у форкамері від іскрового розряду свічки запалювання, що характеризується мінімальною енергією запалювання (МЕЗ). Таким чином, цей параметр прийнято у якості другого оптимізаційного критерію, який потрібно мінімізувати для різних НГП.

Обидва вказані критерії залежать від виду використовуваного газового палива і складу паливо-повітряної суміші в форкамері. Результати розра-

хунку коефіцієнту надлишку повітря в форкамері залежно від тиску форкамерного газу при використанні НГП наведені на рис.2. Видно, що використання в двигунах 11ГД100М низькокалорійних газових палив призводить до суттєвого збільшення коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha_{фор}$  в форкамері.

Оскільки усі розглянуті НГП мають меншу об'ємну теплоту згорання порівняно з природними газом, отже збільшення коефіцієнту надлишку повітря у форкамері призведе до зменшення енергії факела.

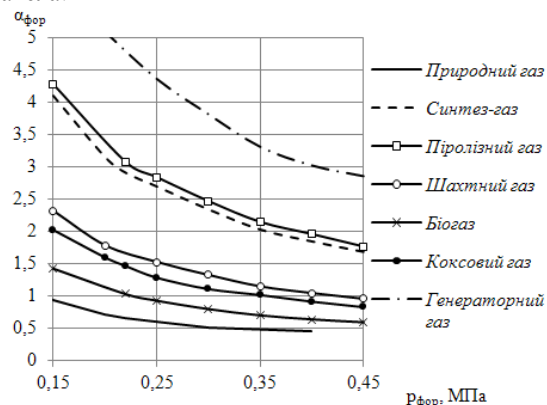


Рис.2. Залежність коефіцієнту надлишку повітря в форкамері від тиску форкамерного газу (при  $N_e = 1100$  кВт,  $p_s = 0,127$  МПа)

Ще одним критерієм прийнято коефіцієнт продувки форкамери, що характеризує втрати форкамерного газу у випускний колектор при продувці, отже паливну економічність двигуна. Потрібно прагнути до мінімізації вказаного критерію.

Розглянемо методику визначення прийнятих критеріїв.

Перший оптимізаційний критерій: мінімальна енергія запалювання

Для виникнення стійкого запалювання паливо-повітряної суміші в форкамері потрібні бути забезпечені певні умови [9,10].

Дотримання умови здійснення іскрового запалювання визначається, з одного боку, властивостями і станом горючої суміші, від яких залежать критичний об'єм і температура, а з іншого боку - потужністю іскрового розряду [9].

Мінімальну енергію запалювання можна визначити за залежністю [11]:

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

де  $\rho_{см}$ ,  $R_{см}$ ,  $T_{см}$  – густина, газова постійна, температура паливо-повітряної суміші, відповідно;  $C_p$ ,  $R_b$ ,  $T_b$  – середня ізобарна теплоємність, газова постійна та температура продуктів згорання, відповідно;  $L$  – відстань між електродами свічки запалювання;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності паливо-повітряної суміші;  $U_n$  – нормальна швидкість розповсюдження полум'я.

Другий оптимізаційний критерій: енергія факела

Як зазначалося вище, основним критерієм удосконалення конструкції форкамери є отримання факела продуктів згоряння з енергією, величина якої пропорційна масі паливо-повітряної суміші:

$$E_{фак} = M_{\phi} \cdot Q_{н.см.} \cdot \rho_{ол},$$

де  $M_{\phi}$  – маса паливо-повітряної суміші в форкамері;  $\rho_{ол}$  – повнота згоряння палива;  $Q_{н.см.}$  – теплота згоряння паливо-повітряної суміші:

$$Q_{н.см.} = \frac{Q_n}{1 + \alpha_{\phi} \cdot m_0},$$

де  $Q_n$  – нижча теплота згоряння палива;  $\alpha_{\phi}$  – коефіцієнт надлишку повітря в форкамері;  $m_0$  – теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння палива.

Таким чином, енергію факела можна визначити за залежністю:

$$E_{фак} = M_{\phi} \cdot \frac{Q_n \cdot \rho_{ол}}{1 + \alpha_{\phi} \cdot m_0},$$

Енергія факела у випадку використання НГП в ході оптимізації параметрів форкамери не повинна перевищувати відповідну енергію при використанні природного газу. Збільшення енергії факела може призвести до збільшення далекобійності факела і, як наслідок, перегріву стінки циліндра двигуна [7, 8].

З іншої сторони зменшення енергії факела може призвести до пропусків запалювання суміші у циліндрі та погіршення повноти згоряння у циліндрі. Відомо, що для запалювання і надійного згоряння багатьох НГП потрібна енергія факела меша ніж для природного газу, оскільки вони мають меншу потрібну МЕЗ. Оскільки, згідно теорії іскрового розряду Я.Б. Зельдовича необхідна енергія запалювання залежить від нормальної швидкості згоряння  $U_n$  для визначення мінімально припустимої енергії факела у випадку використання НГП запропоновано залежність, яка пов'язана з  $U_n$ :

$$E_{фак, \min} = E_{фак, ПГ} \frac{U_{нПГ}}{U_{нНГП}},$$

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

Оптимізовані параметри форкамери повинні забезпечувати максимально можливу енергію факела в припустимих діапазонах.

Третій оптимізаційний критерій: коефіцієнт продувки форкамери.

В дослідному двигуні газ надходить до форкамери протягом процесу продувки циліндрів повітрям, тобто в період, коли відкриті випускні вікна. Очевидно, частина форкамерного газу, що прохо-

дить транзитом через форкамеру, втрачається при продувці циліндра, отже потрібно прагнути до зменшення означеного критерію.

В роботі запропоновано визначити коефіцієнт продувки форкамери за залежністю:

$$\psi = \frac{M_{фор.кл.}}{M_{\phi, \min}},$$

де  $M_{фор.кл.}$  – кількість паливного газу, що проходить через форкамерний клапан;  $M_{\phi, \min}$  – кількість паливного газу в форкамері за умови рівності тиску у форкамері і циліндрі на початку стиснення ( $p_{фор} \approx p_a$ ), та повного її очищення від продуктів згоряння.

Таким чином, наведені вище залежності дозволяють розрахувати обрані критерії якості робочого процесу форкамери і визначити вплив на них конструктивних параметрів форкамери і налаштувань газової апаратури.

**Вплив конструктивних параметрів форкамери і налаштувань газової апаратури на критерії якості робочого процесу форкамери**

Означені критерії якості робочого процесу форкамери визначаються конструктивними параметрами форкамери і налаштуваннями газової апаратури. Основними параметрами, що визначають робочий процес форкамери, є її об'єм  $V_{фор}$ , діаметри форкамерного каналу та газового клапану, відповідно  $d_{кан}$  і  $d_{кл}$  (рис. 1), а також тиск у газовій магістралі перед некерованим газовим клапаном  $p_{фор}$ . Отже потрібно проводити їх обґрунтований вибір при зміні виду газового палива.

На рис. 3 показано вплив тиску форкамерного газу на енергію факела, мінімальну енергію запалювання паливо-повітряної суміші та коефіцієнт продувки форкамери газом при використанні природного газу та НГП. З рис.3, а видно, що при збільшенні тиску форкамерного газу для більшості випадків використання НГП (окрім коксового газу) зростає енергія факела. Це пояснюється збільшенням тривалості наповнення форкамери газом і, як наслідок, збільшенням маси газу, що потрапляє до форкамери. У випадку використання природного газу в форкамері утворюється збагачена паливо-повітряна суміш. При підвищенні тиску газу від 0,15 до 0,25 МПа коефіцієнт надлишку повітря в форкамері зменшується до  $\alpha_{фор} = 0,6$  (рис.2), що призводить до збільшення неповноти згоряння паливо-повітряної суміші та зменшення енергії факела. Подібне спостерігається при використанні коксового газу в серійній форкамері за умови  $p_{фор} > 0,35$ . Для більшості НГП енергія факела в усьому діапазоні зміни тиску форкамерного газу є достатньою для ефективного запалювання паливо-повітряної суміші. Виключенням є шахтний газ і біогаз, для яких збільшення  $p_{фор}$  як самостійний захід не дозволяє досягти потрібної енергії факела для запалювання суміші.

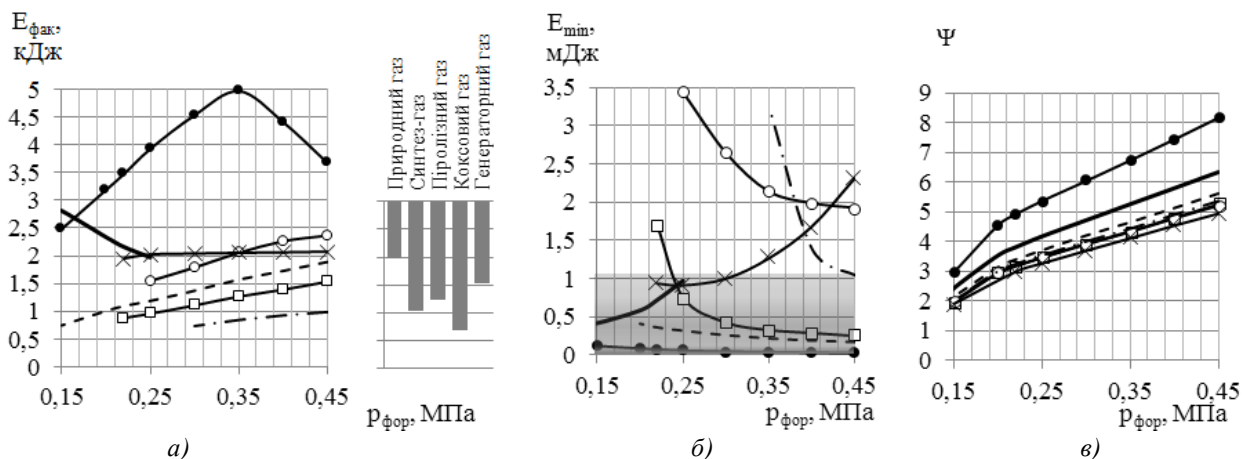


Рис. 3. Залежність енергії форкамерного факела (а), МЕЗ паливо-повітряної суміші в форкамері (б) та коефіцієнту продувки газу (в) від тиску газу, що надходить до форкамери ( $V_{\text{фор}}=46\text{см}^3$ ,  $d_{\text{кан}}=12\text{ мм}$ ,  $d_{\text{кл}}=7,5\text{ мм}$ ):

— — — — — Природний газ; — — — — — Синтез-газ; □ — Піролізний газ; ○ — Шахтний газ; \* — Біогаз;  
 ● — Коксовий газ; — . — — — — Генераторний газ; [шaded] — зона ефективного запалювання суміші

З рис. 3, б видно, що для всіх НГП (окрім біогазу) підвищення тиску форкамерного газу призводить до зменшення МЕЗ. Це пояснюється збагаченням паливо-повітряної суміші та збільшенням нормальної швидкості згоряння палив.

При використанні шахтного газу в двигуні з форкамерно-факельним запалюванням можливі пропуски запалювання паливо-повітряної суміші в форкамері, оскільки мінімально-необхідна енергія запалювання шахтного газу в 4,5 – 5 разів вища, ніж для природного газу. При використанні серійної форкамери МЕЗ знаходиться в припустимому діапазоні для піролізного газу при  $p_{\text{фор}} = 0,22-0,45\text{МПа}$ , для біогазу при  $p_{\text{фор}} = 0,2-0,3\text{МПа}$ , для генераторного газу при  $p_{\text{фор}} \geq 0,45\text{МПа}$ . Для синтез-

газу та коксового газу суміш запалюється в усьому діапазоні зміни  $p_{\text{фор}}$ .

Аналіз впливу тиску форкамерного газу на обрані критерії якості показує, що для більшості НГП підвищення  $p_{\text{фор}}$  позитивно впливає на  $E_{\text{фак}}$  і  $E_{\text{мин}}$ . Проте при цьому збільшується коефіцієнт продувки (рис. 3, в), що може призвести до збільшення втрат палива.

На рис. 4 наведено результати розрахункового дослідження впливу об'єму форкамери на обрані критерії. Як правило, об'єм форкамери складає 2-7% від об'єму камери стиску [7,8,10]. Тому в розрахунковому дослідженні  $V_{\text{фор}}$  змінювали в межах 45-85  $\text{см}^3$ .

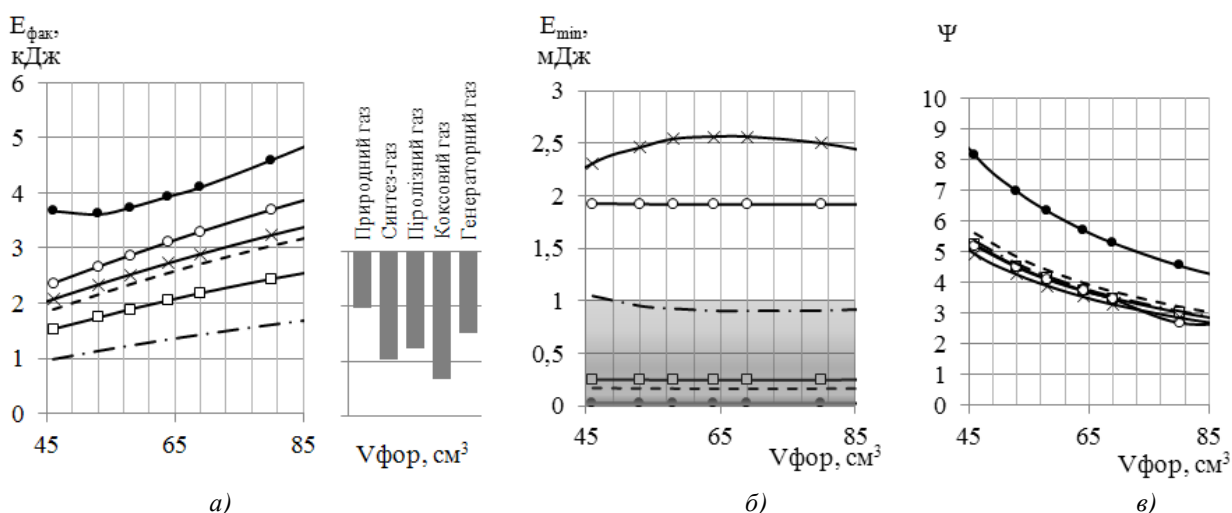


Рис. 4. Вплив об'єму форкамери на енергію форкамерного факела (а), МЕЗ паливо-повітряної суміші в форкамері (б) та коефіцієнту продувки газу (в) при використанні НГП ( $p_{\text{фор}} = 0,45\text{ МПа}$ ,  $d_{\text{кан}}=12\text{ мм}$ ,  $d_{\text{кл}}=7,5\text{ мм}$ ):

[шaded] - зона ефективного запалювання паливо-повітряної суміші; — — — — — Синтез-газ; □ — Піролізний газ; ○ — Шахтний газ; \* — Біогаз; ● — Коксовий газ; — . — — — — Генераторний газ

Видно, що збільшення об'єму форкамери призводить до зростання енергії факела, що пояснюється зростанням маси газового палива на момент подачі іскри.  $E_{фак}$  для більшості НГП (за виключенням шахтного газу і біогазу) перевищує мінімально припустиму енергію факела, отже забезпечує надійне запалювання і згоряння паливо-повітряної суміші в циліндрі.

Збільшення  $V_{фор}$  майже не впливає на мінімальну енергію запалювання (рис. 4, б), оскільки якість суміші при цьому практично не змінюється. При цьому МЕЗ для більшості НГП (за виключенням шахтного газу і біогазу) знаходиться у припустимих межах.

Коефіцієнт продувки зі збільшенням  $V_{фор}$  зменшується, оскільки більше газу залишається в форкамері за інших незмінних умов (рис. 4, в).

Аналіз рис. 4 показує, що збільшення  $V_{фор}$  до певних значень позитивно впливає на  $E_{фак}$  і  $\psi$ . Проте з однієї сторони зростання об'єму форкамери може призвести до перегріву стінки циліндра факелом, а з іншої сторони призводить до збільшення втрат теплоти у стінки, а отже зниження ККД двигуна.

На рис. 5 показано вплив зміни діаметра газового клапана на енергію факела, МЕЗ та коефіцієнт продувки. Видно, що збільшення  $d_{кл}$  для більшості НГП призводить до незначного підвищення енергії

факела внаслідок зростання кількості газу, який надходить до форкамери. Для коксового газу, навпаки, зі збільшенням  $d_{кл}$  енергія форкамерного факела зменшується, що пояснюється збагаченням паливо-повітряної суміші і зростанням неповноти згоряння.

Енергія факела для більшості НГП (за виключенням біогазу і шахтного газу) знаходиться в припустимих межах. Слід відзначити, що підвищення  $d_{кл}$ , як самостійний захід, не дозволяє досягти потрібних значень  $E_{фак}$  у випадку використання біогазу і шахтного газу.

Діаметр клапана майже не впливає на мінімальну енергію запалювання (рис.5,б), і лише в окремих випадках (для біогазу) зменшення  $d_{кл}$  призводить до зменшення  $E_{min}$ . Для більшості НГП (за виключенням шахтного газу і біогазу) МЕЗ знаходиться у припустимих межах.

З рис.5, в видно, що збільшення діаметра клапана призводить до значного зростання коефіцієнту продувки  $\psi$ , а отже до збільшення витрат паливного газу.

Таким чином, з огляду на незначний вплив діаметра газового клапана на критерії  $E_{min}$  і  $E_{фак}$ , а також суттєвий негативний вплив збільшення  $d_{кл}$  на коефіцієнт продувки  $\psi$ , вважаємо, що діаметр газового клапана доцільно зменшувати.

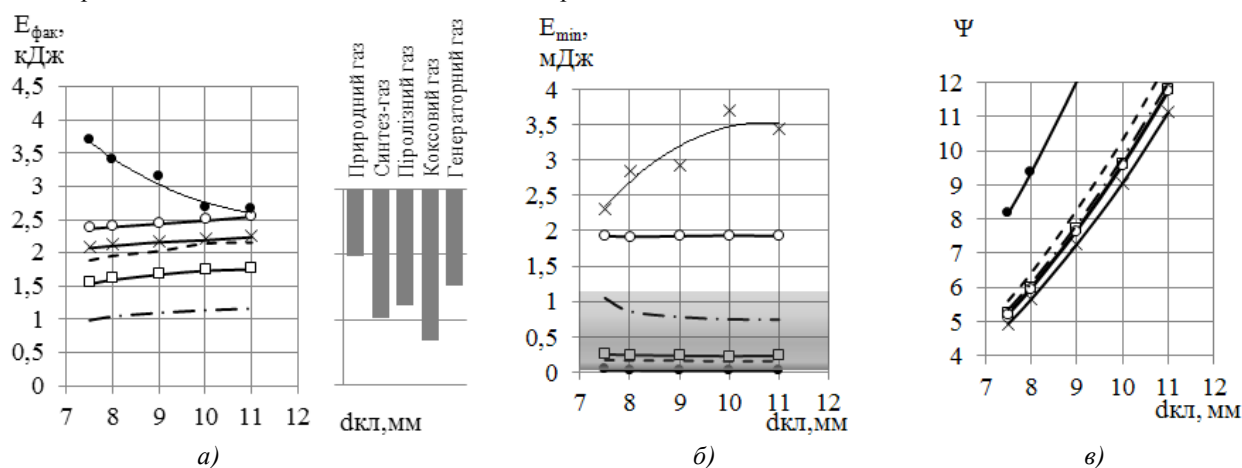


Рис. 5. Вплив діаметра газового клапана на енергію факела (а), мінімальну енергію запалювання паливо-повітряної суміші (б) та коефіцієнт продувки газу через форкамеру (в) при використанні НГП ( $p_{фор} = 0,45 \text{ МПа}$  та  $V_{фор} = 46 \text{ см}^3$ ):

■ – зона ефективного запалювання паливо-повітряної суміші; — — — Синтез-газ; □ – Піролізний газ; ○ – Шахтний газ; \* – Біогаз; ● – Коксовий газ; — . — — Генераторний газ

На рис. 6 показано вплив зміни діаметра форкамерного каналу на обрані критерії якості робочого процесу форкамери. Видно, що цей вплив на значення критеріїв  $E_{фак}$  і  $E_{min}$  є незначним для більшості НГП і носить протилежний характер зміни відносно впливу діаметра газового клапана. При цьому зміна діаметра каналу майже не впливає на

коефіцієнт продувки. Враховуючи те, що зі зменшенням діаметра форкамерного каналу зростає далекобійність факела і вірогідність перегріву стінки циліндра вважаємо, що параметр  $d_{кан}$  доцільно збільшувати.

Слід зазначити, що далекобійність факела визначається не тільки діаметром каналу  $d_{кан}$ , а у зна-

чній мірі відношенням об'єму форкамери до діаметра каналу  $V_{фор}/d_{кан}$  [12]. В існуючих газових двигунах з форкамерно-факельним запалюванням це

відношення знаходиться в межах  $V_{фор}/d_{кан} = 15-70$  [7,12] та уточнюється при доведенні робочого процесу.

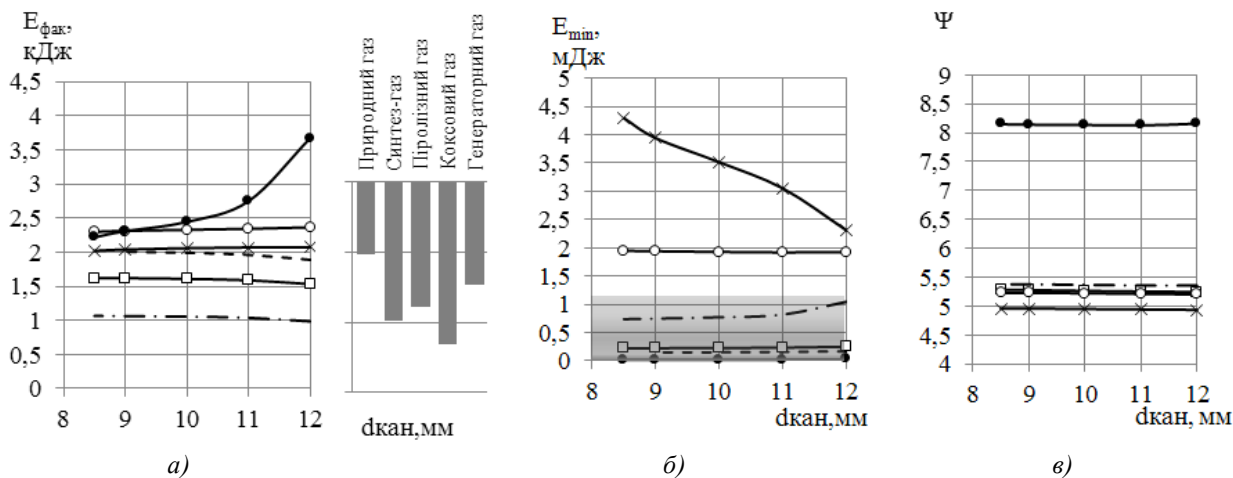


Рис. 6. Вплив діаметра каналу на енергію факела (а), мінімальну енергію запалювання паливо-повітряної суміші (б) та коефіцієнт продувки газу через форкамеру (в) при використанні НГП ( $p_{фор} = 0,45 \text{ МПа}$  та  $V_{фор} = 46 \text{ см}^3$ ):

■ – зона ефективного запалювання паливо-повітряної суміші; — — — Синтез-газ; □ – Піролізний газ; ○ – Шахтний газ; \* – Біогаз; ● – Коксовий газ; — . — — Генераторний газ

При надто великому значенні відношення  $V_{фор}/d_{кан}$  далекобійність факела зростає настільки, що виникає місцевий перегрів стінки циліндра проти сопла форкамери, в результаті чого в циліндрі двигуна може виникнути самозаймання. Так, за результатами експериментальних досліджень роботи двигуна 11ГД100М на природному газі при  $V_{фор} = 53 \text{ см}^3$  і  $d_{кан} = 9 \text{ мм}$  ( $V_{фор}/d_{кан} = 83,5$ ) було встановлено, що нормальна робота двигуна виявилася неможливою при навантаженнях більше 75% внаслідок різкого зростання температури стінки циліндра проти форкамери [8]. При малому значенні відношення  $V_{фор}/d_{кан}$  ефективність факельного запалювання знижується. Тому в роботі [8] на основі експериментальних даних для газового двигуна 11ГД100М було рекомендовано відношення  $V_{фор}/d_{кан}$  обмежувати значеннями 30..45. В даному дослідженні рекомендовані значення відношення  $V_{фор}/d_{кан}$  були прийняті у якості обмежень при варіюванні конструктивних параметрів форкамери.

Аналіз впливу зміни параметрів форкамери на обрані критерії показав, що одночасно з покращенням одних критеріїв, як правило, спостерігається погіршення інших. Тому, для кожного окремого випадку використання НГП потрібно проводити оптимізаційне дослідження з вибору параметрів форкамери і налаштувань газової апаратури.

При використанні шахтного газу і біогазу оптимізація параметрів форкамери не дозволить забезпечити надійну роботу двигуна внаслідок великої потрібної енергії запалювання суміші. В цьому

випадку окрім оптимізації параметрів форкамери і налаштувань газової апаратури потрібно збільшувати енергію іскрового розряду. Можливо також подавати до форкамери природний газ в якості додаткового палива, що успішно використовують провідні виробники стаціонарних газових двигунів при переведенні їх на живлення низькокалорійними газовими паливами [5,7].

#### Методика та результати оптимізаційного дослідження

Основною метою даного дослідження є пошук сполучень параметрів, що забезпечують мінімальні значення МЕЗ  $E_{мин}$  та максимальні значення енергії факела  $E_{фак}$ . Критеріальними обмеженнями є забезпечення коефіцієнта продувки форкамери  $\psi$  не більше 4,5, максимальної енергії факела не більше 3 кДж (при параметричному обмеженні відношення  $V_{фор}/d_{кан}$  в межах 30..45) та мінімальної енергії запалювання не більше 1мДж.

В роботі виконано оптимізацію параметрів форкамери двигуна за методом дослідження простору параметрів І.М. Соболя та Р.Б. Статнікова [13], так званім ЛП-пошуком. В цьому методі за математичною моделлю проводять розрахунковий експеримент і знаходять обрані критерії якості при сполученнях дослідних параметрів, що задаються за ЛПт-последовностями. Ці последовності забезпечують краще представлення функції порівняно з кубічною решіткою [13]. За результатами розрахункового експерименту знаходять паретівські точки, в яких досягаються найкращі значення обраних



критеріїв. Аналіз результатів розрахункового експерименту з урахуванням прийнятих параметричних і критеріальних обмежень дозволяє визначити оптимальні сполучення дослідних параметрів.

Сполучення параметрів, що обираються для розрахункового експерименту, задаються за допомогою генератора ЛПт-последовательностей в одиничному багатовимірному кубі. Кількість вимірів куба  $n$  відповідає числу досліджуваних параметрів, а кількість експериментальних точок  $N$  визначається потрібною точністю визначення оптимуму і можливостями обчислювальної техніки. Число експериментів обирають за формулою  $N = 2^l$ , де  $l$  – будь-яке натуральне число. В більшості випадків вважають достатнім проведення експерименту в 512 пробних точках [13], тобто  $l=9$  ( $N=2^9=512$ ).

Поточні абсолютні значення  $j$ -го параметру в  $i$ -тій точці  $n$ -вимірному куба визначають за формулою:

$$\alpha_{i,j} = q_{i,j}(\alpha_{j \max} - \alpha_{j \min}) + \alpha_{j \min},$$

де  $\alpha_{j \max}, \alpha_{j \min}$ , відповідно, максимальні та мінімальні значення  $j$ -го параметру;  $q_{i,j}$  – відносне значення  $j$ -го параметру в  $i$ -тій точці.

Відносне значення параметру

$$q_{i,j} = \sum_{k=1}^m 2^{-k+1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \sum_{l=k}^m [2\{i \cdot 2^l\}] \cdot [2\{r_{j,l} \cdot 2^{k-l-1}\}] \right\},$$

де  $m$  – границя суми:

$$m = 1 + [\ln(i) / \ln(2)],$$

де,  $r_{j,l}$  – значення чисельника, що задаються за даними роботи [13].

В формулах квадратні дужки [ ] і фігурні дужки { } позначають відповідно цілу і дробову частини вмісту цих дужок.

Максимальні та мінімальні значення варійованих параметрів наведені в табл. 1.

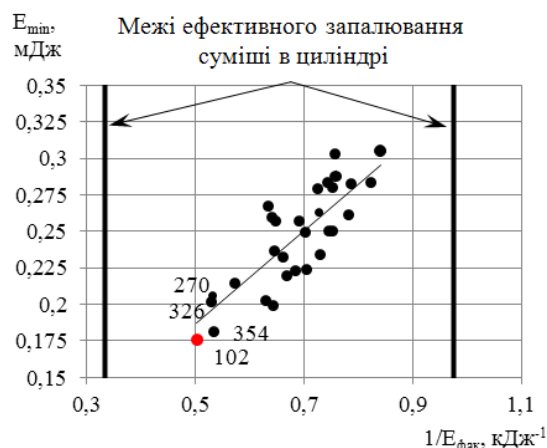
Таблиця 1. Діапазон варіювання параметрів форкамери

	$V_{\text{фор}}, \text{см}^3$	$d_{\text{кл}}, \text{мм}$	$d_{\text{кан}}, \text{мм}$	$R_{\text{фор}}, \text{мм}$
max	80	12	12	0,45
min	40	6,5	9	0,2

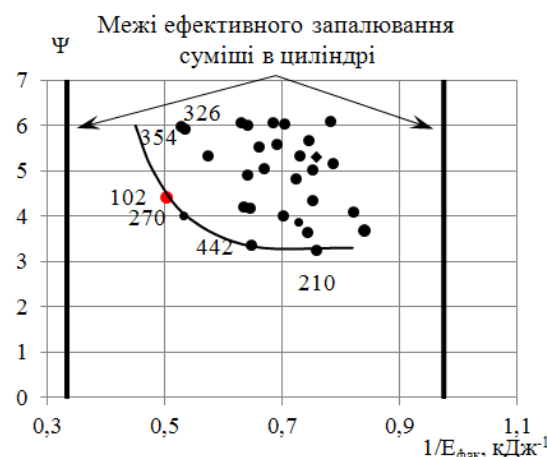
Для кожного НГП проводилися розрахункові експерименти в 512 точках. За прийнятими обмеженнями були відсіяні неефективні точки, а точки що залишилися, наносили на графіки в системах критеріїв  $1/E_{\text{фак}} - E_{\text{min}}$  і  $1/E_{\text{фак}} - \psi$ , таким чином, що кращі точки розташовувалися ближче до початку координат. На графіку вертикальними прямими показано межі ефективного спалювання паливоповітряної суміші. Приклад результатів оптиміза-

ційного дослідження при використанні в якості палива синтез-газу наведений на рис.7.

З рис 7, а видно, що залежність  $E_{\text{фак}}$  від  $E_{\text{min}}$  близька до лінійної: з покращенням одного критерію якість покращується інший і навпаки. Найкращим значенням критеріїв якості  $E_{\text{фак}}$  та  $E_{\text{min}}$  відповідають точки з № 102, 354, 270 і 326. В свою чергу точки, що відповідають найкращим значенням коефіцієнта продуквки форкамери газом, лежать на так званій компромісній кривій, оскільки з покращенням одного критерію погіршується інший ( $\psi$ ). Рухаючись по компромісній кривій, дослідник вибирає одну із багатьох паретівських точок з урахуванням значимості того чи іншого критерію. З рис. 7, б видно, що точка №102, яка відповідає кращим критеріям  $E_{\text{фак}}$  або  $E_{\text{min}}$  лежить на компромісній кривій, тобто ця точка є шуканим оптимумом. Подібним чином виконано оптимізаційне дослідження параметрів форкамери для інших НГП.



а)



б)

Рис.7. Результати розрахунку знаходження оптимуму значень критеріїв якості (для випадку використання синтез-газу)

В табл. 2 наведені значення рекомендованих параметрів форкамери і налаштувань газової апаратури.

тури для випадків використання НГП.

В табл. 3 порівнюються критерії якості за рекомендованих параметрів із критеріями якості за серійних параметрів.

Таблиця 2. Основні конструктивні параметри форкамери, що рекомендуються при використанні НГП

Газ	Рекомендовані параметри форкамери			
	$V_{фор}$ , см <sup>3</sup>	$d_{кан}$ , 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
Шахтний газ	54	12	7,5	3,5

Таблиця 3. Порівняння критеріїв якості при оптимізованих (табл.2) та базових параметрах 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	Значення критеріїв якості					
	При базових параметрах форкамери			При оптимізованих параметрах форкамери		
	$E_{фак}$ кДж	$E_{мін}$ мДж	$\Psi$	$E_{фак}$ кДж	$E_{мін}$ мДж	$\Psi$
Синтез-газ	1,19	0,32	3,7	2,07	0,17	4,28
Піролізний газ	0,96	0,76	3,46	1,67	0,25	4,02
Коксовий газ	3,96	0,06	5,4	2,67	0,09	3,96
Генераторний газ	0,64	0,63	3,53	1,78	0,78	4,4
Біогаз	2	0,91	3,25	2,3	0,94	3,4
Шахтний газ	1,55	3,43	3,45	2,35	2,14	3,6

На рис. 8 показано, як змінюються критерії якості для оптимізованих параметрів порівняно з базовими. Видно, що в усіх випадках (за винятком початкових точок, що знаходяться у зоні критеріальних обмежень) положення точок зміщується в напрямку початку координат, тобто відбувається суттєве покращення критеріїв.

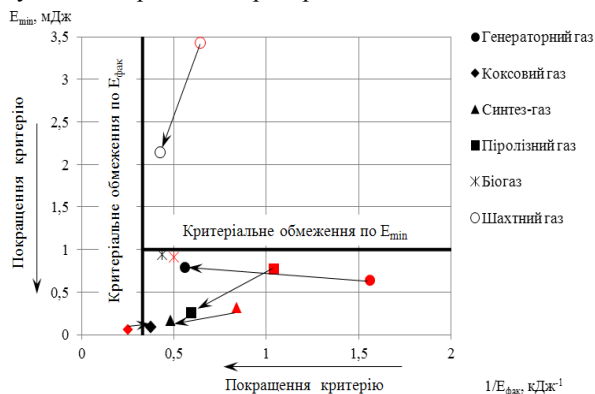


Рис. 8. Порівняння критеріїв якості при базових та оптимізованих параметрах форкамери

Слід відзначити, що забезпечити потрібну енергію факела при використанні генераторного газу вдається лише виходячи за межі параметричного обмеження  $V_{фор}/d_{кан} \approx 70$ , що за даними роботи [8] може викликати перегрів стінки циліндра на протилежній форкамери та самозаймання паливо-повітряної суміші. Проте, енергія факела при даному відношенні є набагато нижчою ніж для природного газу, що дає можливість розширити вказане обмеження для генераторного газу.

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.

### Висновки

В результаті виконаного оптимізаційного дослідження запропоновані конструктивні параметри форкамери і налаштування форкамерної газової апаратури стаціонарного газового двигуна 11ГД100М при використанні в ньому НГП. При цьому вирішені наступні задачі:

1. Обґрунтовано в якості критеріїв ефективності надійного запалювання паливо-повітряної суміші в форкамері та циліндрі двигуна використання МЕЗ суміші, енергії форкамерного факела та коефіцієнту продувки форкамери.

2. Досліджено вплив зміни конструктивних параметрів форкамери і налаштувань ГА на обрані критерії якості. Показано, що з покращенням одних критеріїв якості відбувається погіршення інших.

3. При використанні шахтного газу оптимізація параметрів форкамери не дозволить забезпечити надійну роботу двигуна внаслідок великої потрібної енергії запалювання суміші. В цьому випадку окрім оптимізації параметрів форкамери і налаштувань ГА потрібно збільшувати енергію іскрового розряду та/або подавати до форкамери природний газ в якості додаткового палива.

4. Запропоновані значення параметрів форкамери дозволяють забезпечити суттєве покращення обраних критеріїв якості для усіх випадків використання НГП.

### Список літератури:

1. Goto S. Developmen of Hight Density Gas Engine 22AG / S. Goto, H. Nishi, S. Nakayama, S. Takahashi // IHI Engineering Review. – 2004. – Vol.37, №3. – P. 104-107. 2. Yamasaki Y. Combustion Characteristics of Low-Calorific-Value Gaseous Fuels in Small Gas Engine / Y. Yamasaki, G. Tomatsu, Y. Nagata, S. Kaneko // Journal of Environment and Engineering/ - 2009. – vol.4, №1. – P. 188-197. 3. Md. Ehsan. Performance of a Biogas Run Petrol Engine for Small



Scale Power Generation / Md. Ehsan, N. Nazhin // *Journal of Energy & Environment*. – 2005. Vol.4. – P. 1-9. 4. Roubaud A. Lean-Burn Cogeneration Biogas Engine with Unscavenged Combustion Prechamber: Comparison with Natural Gas / A. Roubaud, R. Rothlisberger, D. Favrat // *Int.J. Applied Thermodynamics*. – 2002. – Vol. 5, №4. – P. 169-175. 5. Mueller G. P. Landfill Gas Application Development of the Caterpillar G3600 Spark-Ignited Gas Engine / G. P. Mueller // *J. Eng. Gas Turbines Power*. – 1995. – Vol.117, №4. – P. 820-825. 6. Марченко А. П. 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 ресурсосбережения*. – 2014. – № 5,6. – С.3 – 12. 7. Лимонов А.К. Совершенствование рабочего процесса газового двигателя с форкамерно-факельным зажиганием / А.К. Лимонов, А.В. Сеземин // *Двигателестроение*. – 2013. - №1 (251). – С.20-23. 8. Генкин, К.И. Газовые двигатели ГД100 и агрегаты на их базе / К.И. Генкин, Д.Т. Аксенов, Б.Н. Струнге. – Л. : Недра, 1970. – 328 с. 9. Генкин К.И. Газовые двигатели / К.И. Генкин. – М.: Машиностроения, 1977. – 196с. 10. Зельдович, Я.Б. К теории искрового воспламенения газовых взрывчатых смесей / Я.Б. Зельдович, Н.Н. Симонов // *Журнал физической химии*. – 1949. – Т.23, № 11. – С.1361–1374. 11. Sally P. M. Bane, Spark Ignition: Experimental and Numerical Investigation With Application to Aviation Safety / California Institute of Technology Pasadena, California. – 2010. – 260 p. 12. Васильев Ю.Н., Гриценко А.И., Золоторевский Л.С. Транспорт на газе. – М. : Недра, 1992. – 342с. 13. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников – М.: Наука. 1985. –110 с.

**Bibliography (transliterated):**

1. Goto S. Developmen of Hight Density Gas Engine 22AG / S. Goto, H. Nishi, S. Nakayama, S. Takahashi // *IHI Engineering Review*. – 2004. – Vol.37, №3. – P. 104-107. 2. Yamasaki Y. Combustion Characteristics of Low-Calorific-Value Gaseous Fuels in Small Gas Engine / Y. Yamasaki, G. Tomatsu, Y. Nagata, S. Kaneko // *Journal of Environment and Engineering* / - 2009. – vol.4, №1. – P. 188-197. 3. Md. Ehsan. Performance of a Biogas Run Petrol Engine for Small Scale Power Generation / Md. Ehsan, N. Nazhin // *Journal of Energy & Environment*. – 2005. Vol.4. – P. 1-9. 4. Roubaud A. Lean-Burn Cogeneration Biogas Engine with Unscavenged Combustion Prechamber: Comparison with Natural Gas / A. Roubaud, R. Rothlisberger, D. Favrat // *Int.J. Applied Thermodynamics*. – 2002. – Vol. 5, №4. – P. 169-175. 5. Mueller G. P. Landfill Gas Application Development of the Caterpillar G3600 Spark-Ignited Gas Engine / G. P. Mueller // *J. Eng. Gas Turbines Power*. – 1995. – Vol. 117, №4. – P. 820-825. 6. Marchenko A. P. Motornye svoystva nizkokaloriynih gazovyh topliv i ih vliyanie na pokazateli dvigatelej vnutrennego sgoranija / A.P. Marchenko, A.A. Osetrov, S.S. Kravchenko, O. A. Hamza // *Jenergotehnologii i resursosberzhenija*. – 2014. – № 5,6. – С.3 – 12. 7. Limonov A.K. Sovershenstvovanie rabocheho processa gazovogo dvigatelja s forkamerno-fakel'nyh zzhiganiem / A.K. Limonov, A.V. Sezemin // *Dvigateloestroyeniye*. – 2013. - №1 (251). – С.20-23. 8. Genkin, K.I. Gazovyedvigateli GD100 i agregaty na ih baze / K.I. Genkin, D.T. Aksenov, B.N. Strunge. – L. : Nedra, 1970. – 328 s. 9. Genkin K.I. Gazovyedvigateli / K.I. Genkin. – M.: Mashinostroyeniya, 1977. – 196s. 10. Zel'dovich, Ya.B. K teorii iskrovogo vosplamneniya gazovyh vzryvchatyh smesey / Ya.B. Zel'dovich, N.N. Simonov // *Zhurnal fizicheskoy himii*. – 1949. – T.23, № 11. – S.1361–1374. 11. Sally P. M. Bane, Spark Ignition: Experimental and Numerical Investigation With Application to Aviation Safety / California Institute of Technology Pasadena, California. – 2010. – 260 p. 12. Vasil'ev Ju.N., Gricenko A.I., Zolotorevskij L.C. Transport na gaze. – M. : Nedra, 1992. – 342s. 13. Sobol' I.M. Vybhor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami / I.M. Sobol', R.B. Statnikov – M.: Nauka. 1985. –110 s.

Надійшла до редакції 12.06.2015 р.

**Марченко Андрій Петрович** – докт. техн. наук, професор, зав. кафедри двигуни внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua.

**Осетров Александр Александрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигуни внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

**Кравченко Сергій Сергійович** – аспірант кафедри двигуни внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: skyler-tm@yandex.ru.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРКАМЕРЫ СТАЦИОНАРНОГО ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА НИЗКОКАЛОРИЙНЫХ ГАЗОВЫХ ТОПЛИВАХ

*А.П. Марченко, А.А. Осетров, С.С. Кравченко*

Работа посвящена оптимизации конструктивных параметров форкамеры и настроек газовой аппаратуры стационарного газового двигателя 11ГД100М при использовании в нем низкокалорийных газовых топлив. Показано, что при использовании этих топлив в серийной форкамере образуется обедненная топливо-воздушная смесь, уменьшается энергия форкамерного факела и увеличивается минимальная энергия зажигания топливо-воздушной смеси. Указанное может привести к пропускам зажигания смеси в форкамере и цилиндре. Выполнено оптимизационное исследование позволило определить параметры форкамеры и настройки газовой аппаратуры, обеспечивающих существенное улучшение выбранных критериев качества.

## OPTIMIZATION OF PARAMETERS PRECHAMBER STATIONARY GAS ENGINES WHEN OPERATING ON THE LOW CALORIE GAS FUELS

*A. Marchenko, A. Osetrov, S. Kravchenko*

The work is dedicated to the optimization of design parameters and settings prechamber gas equipment 11GD100M stationary gas engine using low calorie gas in its fuel. It is shown that by using low calorie gas as fuel in the settling chamber is formed of lean fuel-air mixture, reduced energy pre-chamber flare and increases the minimum ignition energy of the fuel-air mixture. This may result in misfire mixture in the cylinder. It is shown that the impact of changing design parameters and settings prechamber gas equipment to the selected criteria of quality is ambiguous. Achieved optimization study showed that the proposed values of parameters for all cases of use of the LCG allow a significant improvement in the quality of the selected criteria.