

УДК 621. 431. 74

Канд. техн. наук С. М. Литвин, І. А. Швець

Політехнічний інститут національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,  
м. Первомайськ

## ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ГАЗОВИХ ДВИГУНІВ З ВРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГАЗОПОДІБНИХ ПАЛИВ

Розглянуто питання вдосконалення математичної моделі розрахунку робочого процесу газових двигунів, за рахунок обліку складу та фізико-хімічних властивостей газових палив.

*Газовий двигун, робочий процес, паливний газ, універсальна газова стала, показник адіабати, теплоємність*

Використання газоподібних палив, які видобуваються з надр Землі та відновлюваних газів — біогазу, генераторного та піролізного газів, зваліщного та інших газів, що утворюються з органічної сировини рослинного походження, є одним з пріоритетних напрямків розвитку економіки України. Водночас, на відміну від палив нафтового походження, паливні гази суттєво відрізняються один від одного по фракційному складу, теплотворній здатності, та іншим фізико-хімічним властивостям. В залежності від виду паливного газу його частка в циліндрі двигуна складає від 5 до 30 % [4, 6, 7], що не дозволяє нехтувати його властивостями при розрахунку робочого процесу газових двигунів.

### Постановка проблеми

Існуючі моделі розрахунку дійсного циклу двигуна мають свої особливості. Більшість із них адаптовано для розрахунку робочого процесу дизельних двигунів, розвиток яких тривалий час був пріоритетним напрямком [2, 5]. В зв'язку з цим, в них недостатньо повно враховано особливості протікання робочого циклу газових двигунів, і тому вдосконалення існуючих розрахункових моделей з метою адаптації їх для розрахунку робочого циклу газових двигунів є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показує, що конвертація двигунів для роботи на газоподібних паливах неможлива без теоретичних досліджень робочого процесу [3]. На даний час існує ряд добре відпрацьованих методик розрахунку дизельних двигунів, які після ряду вдосконалень можна використовувати і для газових двигунів.

Однією з найбільш відомих є математична модель об'ємного балансу розрахунку параметрів дійсного робочого циклу двигуна внутрішнього згоряння, що запропонована професором Глаголевым М. М. [2], її адекватність та ефективність

підтверджена результатами експериментальних досліджень.

В основі математичної моделі, запропонованої професором Глаголевым М. М., закладена система з чотирьох основних рівнянь:

$$V(\varphi) = V_h \left[ \frac{1}{\varepsilon - 1} + \frac{\sigma(\varphi)}{2} \right]; \quad (1)$$

$$p(\varphi + \Delta) = p(\varphi) \left( \frac{V(\varphi)}{V(\varphi + \Delta)} \right)^k e^{k \frac{\sqrt{2R}}{6n} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (A\sqrt{T_s} - B\sqrt{T} - C\sqrt{T} + D\sqrt{T_r}) d\varphi}; \quad (2)$$

$$M(\varphi + \Delta) = M(\varphi) e^{k \frac{\sqrt{2R}}{6n} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left( A\sqrt{T_s} - B\sqrt{T} - C\sqrt{T} + D \frac{T}{\sqrt{T_r}} \right) d\varphi}; \quad (3)$$

$$T(\varphi) = \frac{p(\varphi)V(\varphi)}{8,314M(\varphi)}. \quad (4)$$

Дана система рівнянь дозволяє визначити поточні значення чотирьох основних показників робочого тіла в циліндрі, а саме: об'єму простору над поршнем в циліндрі —  $V(\varphi)$ , величини тиску робочого тіла в циліндрі  $p(\varphi + \Delta)$  та молекулярної маси робочого тіла —  $M(\varphi + \Delta)$  на кожному наступному кроці інтегрального обчислення, а також температури робочого тіла в циліндрі —  $T(\varphi)$ .

### Невирішена раніше частина проблеми

Якщо дизельні палива мають відносно стабільний хімічний склад і кількість дизельного палива в складі робочого тіла в циліндрі двигуна відносно мала, то газоподібні палива мають суттєві розбіжності, як по своїм фізико-хімічним параметрам, так і по фракційному складу. Не враховувати дані обставини не можна, особливо в процесах газообміну та стискання.

Серед термодинамічних величин, що входять до рівнянь (2) та (3) методики М. М. Глаголева,

присутні показник адіабати робочого тіла  $k$  та газова стала робочого тіла  $R$ . Ці параметри робочого тіла залежать від фізико-хімічних властивостей робочого тіла та впливають на вихідні параметри математичної моделі.

В зв'язку з цим, постає задача врахування впливу вищезгаданих величин в математичній моделі розрахунку робочого циклу ДВЗ, що працюють на газоподібних паливах.

### Викладення основного матеріалу

Враховуючи, що газоподібне паливо є багатокомпонентним по своєму складу, газова стала кожного окремого компоненту визначається на основі залежності:

$$R_i = \frac{8314}{\mu_i}, \quad (5)$$

де 8314 – універсальна газова стала;

$\mu_i$  – молекулярна маса  $i$ -го газового компоненту;

Для багатокомпонентної газової суміші рівняння набуде вигляду:

$$R_c = \sum_{i=0}^n m_i \frac{8314}{\mu_i}, \quad (6)$$

де  $m_i$  – масова доля газового компоненту в паливі;

А газова стала газоповітряної суміші з урахуванням залишкових газів буде описана рівнянням:

$$R_{p.m} = \sum_{i=0}^n m_i \frac{8314}{\mu_i} + m_n \frac{8314}{\mu_n} + \sum_{j=0}^n m_j \frac{8314}{\mu_j}, \quad (7)$$

де  $\mu_n$  – молекулярна маса повітря;

$m_n$  – масова доля повітря в газоповітряній суміші;

$m_j$  – масова доля  $j$ -го компоненту у відпрацьованих газах;

$\mu_j$  – молекулярна маса  $j$ -го компоненту відпрацьованих газів.

Таким чином багатокомпонентність газового палива та вплив його властивостей на робочий процес буде враховано.

Важливим чинником, який визначає параметри робочого тіла та залежить від фізико-хімічних

властивостей робочого тіла, є  $i$  показник адіабати робочого тіла:

$$k_i(\varphi) = 1 + \frac{8,314}{\mu c_{vi}(\varphi)}. \quad (8)$$

Вихідна величина показника адіабати, як видно із виразу (8), безпосередньо буде залежати від молярної ізохорної теплоємності складових компонентів робочого тіла.

Для визначення молярної ізохорної теплоємності компоненту, зазвичай, використовують лінійну модель вигляду:

$$\mu c_v(T) = a + bT. \quad (9)$$

Застосування даної моделі під час виконання розрахунку дійсного робочого процесу набуло широкого вжитку внаслідок її простоти.

У випадках, коли частка палива в складі робочого тіла значна і на результати розрахунку впливають характеристики палива, необхідним є застосування більш точних моделей.

Для порівняння ефективності застосування різних моделей було виконано інтерполяцію табличних даних [1] молярної ізохорної теплоємності водню  $H_2$ , результати якої представлені на рисунку 1.

Аналіз похибки різних моделей при апроксимації молярних ізохорних теплоємностей надано в таблиці 1.

Обробка експериментальних даних теплоємностей різних газів дозволила отримати необхідні математичні залежності для визначення теплоємностей окремих складових газоподібних палив. Графічне зображення отриманих математичних залежностей для метану ( $CH_4$ ) надано на рис. 2.

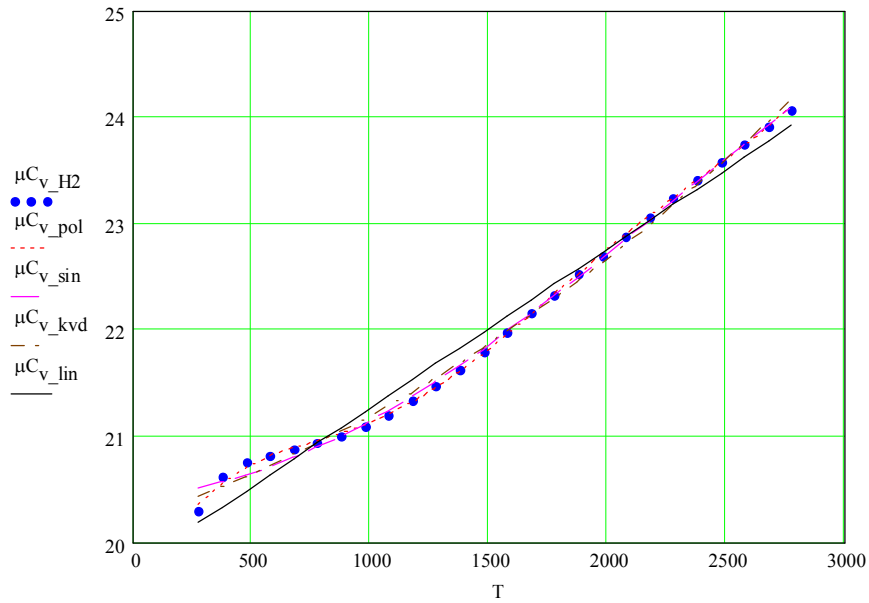
Дане графічне зображення дуже наглядно відображає зміну ізохорної теплоємності при зміні тиску та температури, але є незручним для практичного застосування. На практиці більш зручним є застосування:

а) математичної апроксимуючої залежності  
 $\mu C_V(p, T) = -998,172 + 5,55 \cdot 10^{-5} \cdot p + 589,378 \cdot \ln(T) + 1,28 \cdot 10^{-13} \cdot p^2 - 114,081 \cdot \ln(T)^2 - 1,69 \cdot 10^{-5} \cdot p \cdot \ln(T) - 2,88 \cdot 10^{-19} \cdot p^3 + 7,413 \cdot \ln(T)^3 + 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot p \cdot \ln(T)^2 + 1,43 \cdot 10^{-13} \cdot p^2 \cdot \ln(T);$

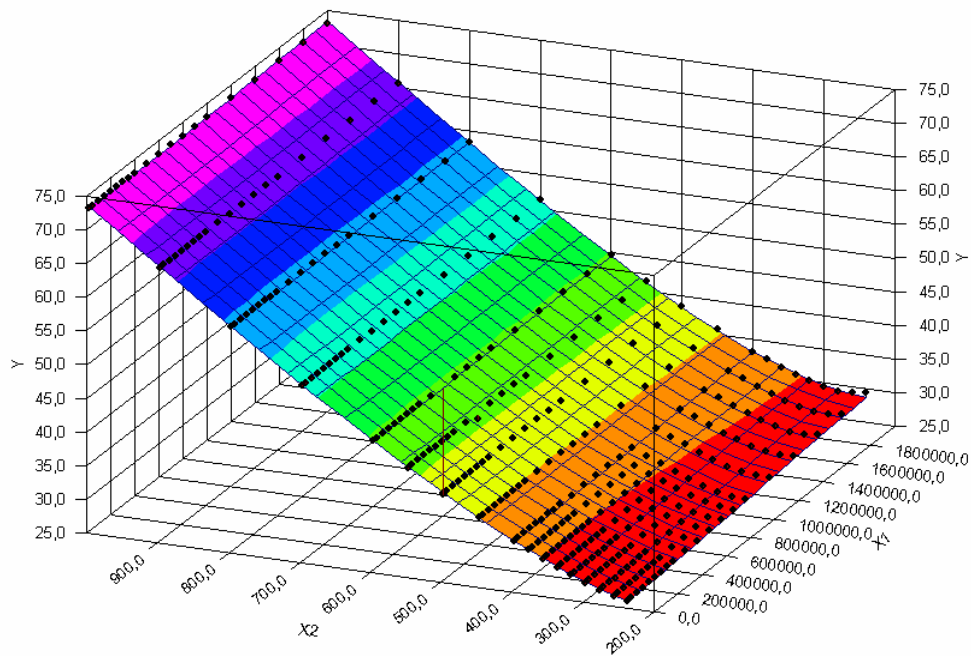
б) апроксимованої номограми, представленої на рис. 3.

Таблиця 1 – Апроксимація даних молярних ізохорних теплоємностей водню

| № п/п | Назва апроксимуючої моделі   | Рівняння апроксимуючої моделі                           | Коефіцієнт кореляції | Стандартна похибка |
|-------|------------------------------|---|----------------------|--------------------|
| 1     | Поліноміальна (5-го) ступеню | $m C_V(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 + \dots + eT^4 + fT^5$ | 0,999                | 0,027              |
| 2     | Синусоїдальна                | $m C_V(T) = a + b \cdot \cos(c \cdot T + d)$            | 0,998                | 0,065              |
| 3     | Квадратична                  | $m C_V(T) = a + bT + cT^2$                              | 0,998                | 0,074              |
| 4     | Лінійна                      | $m C_V(T) = a + bT$                                     | 0,991                | 0,151              |



**Рис. 1.** Порівняння різних апроксимуючих моделей для визначення молярної ізохорної теплоємності водню  $H_2$ :  $\mu C_{V_{H_2}}$  – дійсна молярна ізохорна теплоємність водню отримана експериментальним шляхом;  $\mu C_{V_{POL}}$  – апроксимована молярна ізохорна теплоємність на основі поліному 5-го ступеню;  $\mu C_{V_{SIN}}$  – апроксимована молярна ізохорна теплоємність на основі синусоїдальної функції;  $\mu C_{V_{KVD}}$  – апроксимована молярна ізохорна теплоємність на основі рівняння квадратичного трьохчлену;  $\mu C_{V_{LIN}}$  – апроксимована молярна ізохорна теплоємність на основі лінійного рівняння



**Рис. 2.** Ізохорна теплоємність метану ( $CH_4$ ) в залежності від тиску та температури:

$X_1$  – вісь температури ( $T$ ) в К;

$X_2$  – вісь тиску ( $p$ ) в Па;

$Y$  – вісь ізохорної теплоємності ( $\mu C_V$ ) в кДж / (кмоль К)

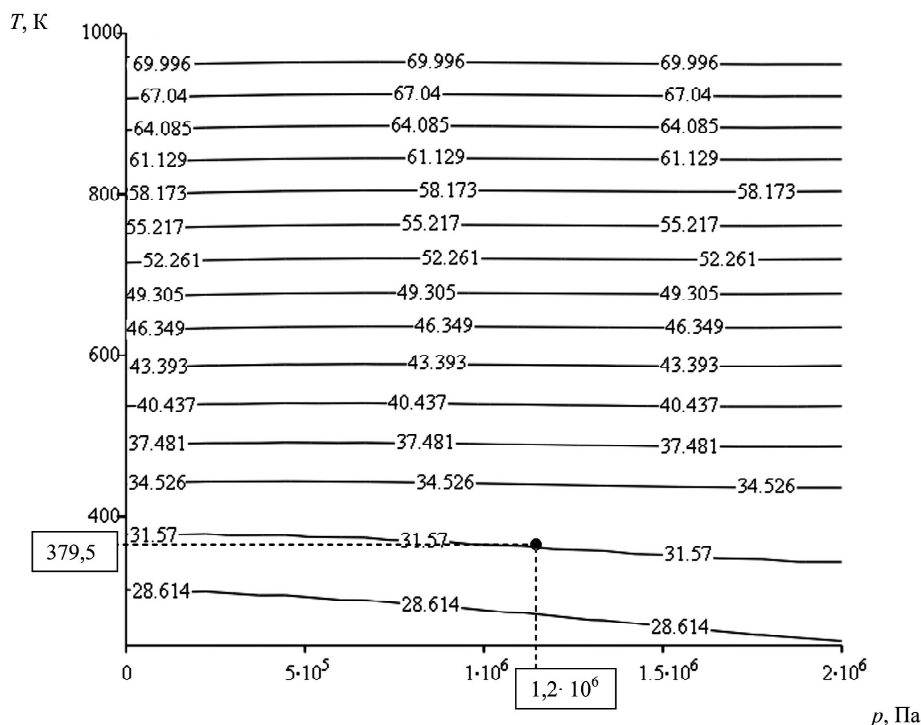


Рис. 3. Номограма ізохорної теплоємності метану ( $\text{CH}_4$ ) в залежності від тиску та температури

Як видно з рисунку 3, ізохорна теплоємність суттєво залежить від температури і майже не залежить від тиску.

#### Висновки

1. Підвищення точності визначення показника адиабати робочого тіла та його газової сталої дозволили врахувати склад газового палива та його фізико-хімічні показники в розрахунку робочого процесу газових двигунів.

2. Виконані вдосконалення математичної моделі стосуються процесів газообміну та стискання.

3. Вдосконалення математичної моделі розрахунку робочого циклу газових двигунів шляхом врахування особливостей газоподібних палив дозволили суттєво підвищити точність розрахунку.

#### Перспективи використання результатів дослідження

Підвищення точності розрахунку робочого процесу дозволить більш якісно проводити конвертацію двигунів на газоподібні палива, скоротивши витрати на налагоджувальні роботи.

В подальшому в математичній моделі необхідно врахувати вплив коефіцієнта надлишку повітря та фракційного складу газового палива на закон процесу горіння та робочий процес в цілому.

#### Перелік посилань

1. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – [изд. перераб. и доп.]. – М.: «Наука», 1972, – 721 с.
2. Глаголев Н. М. Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания / Глаголев Н. М. – К.: Машгиз, 1950. – 480 с.
3. Горбань А. И. Пути улучшения рабочего процесса среднеоборотных двигателей, работающих на газе // [Горбань А. И., Литвин С. Н., Кинжалов О. С., Грабовенко А. И.] // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. – № 1 – С. 57–62.
4. Коллеров Л. К., Газовые двигатели поршневого типа / Коллеров Л. К., Л.: Машиностроение, 1968. – 248 с.
5. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: уч. для вузов по спец. «Двигатели внутреннего сгорания» / [Д. Н. Вырубов, Н. А. Ивашенко, В. И. Ивин и др.]; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с., ил.
6. Хандов З. А., Судовые газосиловые установки / Хандов З. А., Генкин А. Б. – М.: Изд-во Мин. реч. флота СССР, 1951. – 372 с.
7. Ф. Г. Гайнуллин. Природный газ как моторное топливо на транспорте / [Ф. Г. Гайнуллин, А. И. Гриценко, Ю. Н. Васильев, Л. С. Золотаревский]. – М.: Недра 1986. – 237 с.

Поступила в редакцию 31.08.2009

*S. M. Litvin, I. A. Shvets*

**IMPROVEMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF  
WORKING PROCESS OF GAS ENGINES TAKING INTO ACCOUNT  
CHARACTERISTICS OF GASEOUS FUELS**

*Рассмотрены вопросы совершенствования математической модели расчета рабочего процесса газовых двигателей, за счет учета состава и физико-химических свойств газовых топлив.*

***Газовый двигатель, рабочий процесс, топливный газ, универсальная газовая постоянная, показатель адиабаты, теплоемкость***

*There are reviewed issues related to improvement of mathematical model for calculation of working process of gas engines at the account of calculation of composition and physical-chemical characteristics of gaseous fuels.*

***Gas engine, working process, fuel gas, universal gas constant, adiabatic index, heat capacity***