

Слинько Георгій Іванович, д.т.н., професор, завідувач кафедри ДВЗ, Національний університет «Запорізька політехніка», [gslynko@zntu.edu.ua](mailto:gslynko@zntu.edu.ua)  
Бокарьов Владислав Ігорович, аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», [vladyslavbokaryov@gmail.com](mailto:vladyslavbokaryov@gmail.com)

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВНОГО РОБОЧОГО ЦИКЛУ ДВЗ З УРАХУВАННЯМ МЕХАНІЧНИХ ВТРАТ

На сьогодні моделювання робочого циклу ДВЗ є невід'ємною частиною процесу проектування, налаштування, доводочних робіт та випробування двигунів. Значна увага приділяється розрахунку двигунів при часткових навантаженнях для можливості імітації дорожніх навантажень [1]. При всьому різноманітті існуючих розрахункових програм для ЕОМ внесення змін в алгоритми розрахунку доступно виключно для авторів програмних продуктів, що звужує область їхнього застосування.

На кафедрі ДВЗ НУ «Запорізька політехніка» розроблено програму для дослідження повного робочого циклу двигунів з урахуванням процесів газообміну. Програма базується на моделях розрахунку газообміну за методикою В.Г. Дьяченко [2] і теплового розрахунку циклу ДВЗ за методикою Я.О. Єгорова [3], які виконано у вигляді окремих програмних блоків. Передача і перевірка збіжності даних між блоками відбувається в автоматичному режимі.

Поєднання двох фізико-математичних моделей дозволило зменшити необхідну кількість емпіричних даних для розрахунку. Наповнення циліндра, а отже і циклова масова подача палива є розрахунковими величинами, які залежать від обраних фаз газорозподілу, втрат тиску та підігріву заряду у впускній системі. Розрахунок ефективного часу-перетину клапана може бути заданий синусоїдальною кривою з обрізаною вершиною або у табличному вигляді за наявності даних продувки або моделювання за допомогою методу кінцевих елементів.

Початок розрахунку процесів газообміну починається з моменту відкриття впускного клапана. Ініціалізаційні тиск і температура робочого тіла в циліндрі в момент його відкриття обираються за емпіричними даними для схожих двигунів у зв'язку з тим, що розрахункова програма сама виконує перерахунки допоки не буде досягнуто схожимість між початковими умовами і розрахунковими значеннями цих параметрів, вони не мають значного впливу на результати розрахунку.

На відміну від фізико-математичної моделі другого рівня при розрахунку повного циклу з урахуванням газообміну необхідно визначити тільки тиск і температуру повітря перед клапаном, при цьому необхідно враховувати втрати тиску ( $k_{\Delta p_{вв}}$ ) та теплообмін тільки з впускною системою і каналами головки блоку циліндрів ( $\Delta T_{вп}$ ). Втрати тиску в органах газорозподілу та теплообмін робочого тіла з циліндром та підігрів заряду за рахунок змішування із залишковими газами враховуються розрахунковими алгоритмами.

$$p_s = p_k - k_{\Delta p_{вв}} \cdot p_k \quad (1)$$

$$T_s = T_k - \Delta T_{\text{вп}} \quad (2)$$

Більшість вихідних параметрів робочого циклу двигуна в значній мірі залежать від частоти обертання колінчастого валу. Так, при зміні режиму необхідно враховувати зростання гідравлічних втрат зі зростанням частоти обертання колінчастого валу і зниження підгріву заряду за рахунок зменшення часу на теплообмін з деталями впускної системи.

Циклова подача палива знаходиться в залежності від циклового заряду повітря  $\Delta m_{\text{вц}}$ , який визначається на підставі розрахунку процесів газообміну. Серед змін внесених до розрахункових алгоритмів авторів [2,4] слід зазначити коефіцієнт залишкових газів  $\gamma$ , отриманий на підставі даних газообміну, виходячи з розрахункової маси робочого тіла і масового заряду:

$$\gamma = \frac{M_\gamma}{M_a} \quad (3)$$

де  $M_\gamma$  – маса залишкових газів в циліндрі:

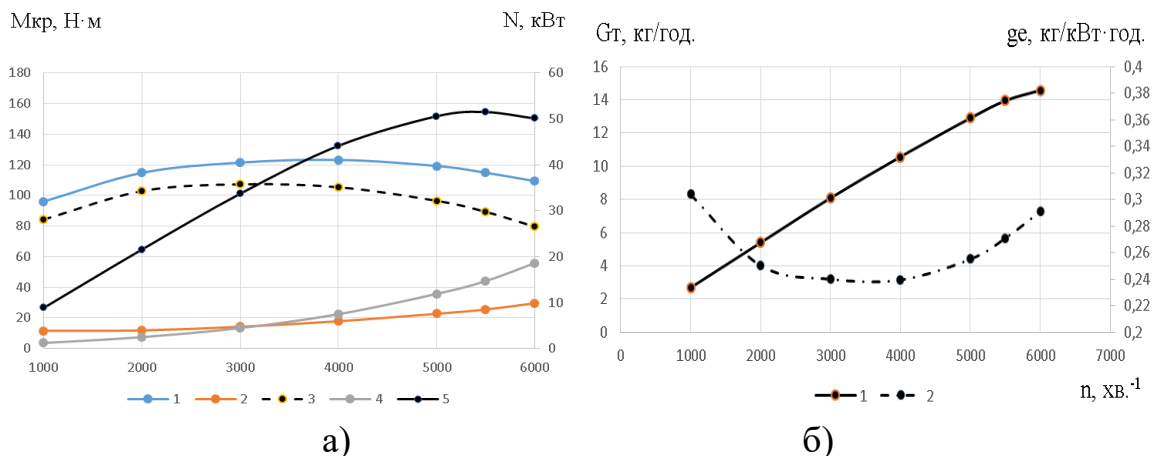
$$M_\gamma = M_a - \Delta m_{\text{вц}} \quad (4)$$

де  $M_a$  – маса робочого тіла в циліндрі;

$\Delta m_{\text{вц}}$  – цикловий масовий заряд повітря з розрахунку процесу газообміну.

Для визначення механічного ККД двигуна використовуються значення механічних втрат, отриманих під час прокручування двигуна методом індиціювання або розрахунковим шляхом, які задаються у табличному вигляді. Розроблена програма надає можливість окремо відобразити втрати на тертя в механізмах та вузлах, а також насосні втрати.

При апробації програми отримано розрахункові характеристики двигуна MeM3-307 (рис.1). Характер розрахункових кривих добре узгоджується з результатами натурних випробувань на моторному стенді [5].



а) зовнішня швидкісна характеристика

1 – індикаторний крутний момент; 2 – момент механічних втрат; 3 – ефективний крутний момент; 4 – потужність механічних втрат; 5 – ефективна потужність.

б) витрата палива на зовнішній швидкісній характеристиці

1 – годинна ефективна витрата палива; 2 – питома ефективна витрата палива

Рисунок 1 – Розрахункові характеристики двигуна MeM3-307

Таким чином, представлена методика моделювання робочого циклу ДВЗ дозволяє зменшити необхідну кількість емпіричних даних та, водночас наблизити результати розрахунку до даних, що можливо отримати при експериментальних випробуваннях. Результати роботи можуть бути використані при теоретичних дослідженнях, проектуванні, підготовці до випробувань та у навчальному процесі для студентів зі спеціальності «Двигуни внутрішнього згорання».

### Література

1. Слинько, Г.І. Моделювання робочого циклу ДВЗ в області режимів навантаження сертифікаційного їздового циклу NEDC [Електронний ресурс] / Г.І. Слинько, В.І. Бокар'юв // Тиждень науки-2019. Транспортний факультет : щоріч. наук.-практ. конф., 15-19 квітня 2019 р. : тези доп. / Редкол.: В.В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. – С. 79–80.
2. Дьяченко, В.Г. Газообмен в двигателях внутреннего сгорания: Учебн.пособие [Текст] / В.Г. Дьяченко. – К.: УМК ВО, 1989. – 204 с.
3. Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни «Теорія ДВЗ» для студентів спеціальності 7(8).05050304 «Двигуни внутрішнього згорання» всіх форм навчання [Текст] / Укл.: Г.І. Слинько, Я.О. Єгоров. □ Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. – □ 50 с.
4. Єгоров, Я.О. Фізико-математична модель робочого циклу двигуна внутрішнього згорання автотракторного типу: Навчальний посібник [Текст] / Я.О. Єгоров. – К.: УМК ВО, 1991. – 56 с.
5. Технический отчет №3617 О проведении испытаний моторного масла Лукойл "Люкс" 5W40 API SL/CF по оценке его качества и возможности применения в производстве по методике испытаний двигателя MeMЗ-307.1000420 "Евро-4" на безотказность в течении 300 часов. [Текст] / Утв. А.Г. Москаленко. – Мелитополь: ПП «MeMЗ» ПАО «ЗАЗ». – 2012. – 15 с.

Филипковский Сергей Владимирович, д.т.н., с.н.с., доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, sfilipkovskij@gmail.com

### МЕТОДА РАСЧЕТА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА ТВЕРДОТӨПЛИВНОЙ РАКЕТЫ

Проблема обеспечения устойчивости и прочности ракет является одной из важных научно-технических проблем ракетной техники. Известно, что на активном участке траектории полета в результате динамического взаимодействия упругой конструкции корпуса ракеты и работающего двигателя могут возникнуть колебания корпуса, способные нарушить нормальную работу приборов системы управления и привести к различным аварийным ситуациям.