

УДК 621.4

## **ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ МОМЕНТУ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ВПОРСКУВАННЯ БЕНЗИНУ НА ЕКОНОМІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ ДВИГУНА 1Д 8,2 / 8,7 З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ**

**Корогодський Володимир Анатолійович**, докт. техн. наук,  
професор кафедри двигунів внутрішнього згорання,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: korohodskiy@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1605-4631

**Хомутов Максим Анатолійович**, аспірант кафедри двигунів внутрішнього згорання, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: m.a.homutov@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-9184-7646

**Стрижак Глеб Олександрович**, магістр кафедри двигунів внутрішнього згорання, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: glebstrijak2003@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-1850-3557

**Кананикін Олексій В'ячеславович**, магістр кафедри двигунів внутрішнього згорання, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: lehapozitiv02@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-3603-5143

**Орлов Микита Анатолійович**, магістр кафедри двигунів внутрішнього згорання, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: nikita\_orlov@ukr.net, ORCID ID: 0009-0000-0278-3828

### **Вступ**

Застосування системи безпосереднього впорскування пального (БВП) у двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ) з іскровим запалюванням потребує ретельної організації процесу утворення паливоповітряної суміші (ППС). Важливо, щоб склад суміші в зоні електродів свічки запалювання залишався у межах її займистості ( $\alpha = 0,4-1,3$ ) [1]. Для забезпечення повного згорання бажано, щоб на момент займання паливо повністю випарувалося, утворивши рівномірно перемішану суміш із повітрям. Якщо ж у зоні горіння залишаються рідкі частинки пального, вони випаровуються під дією високої температури, що призводить до зниження рівня кисню та часткового окиснення пального. Це спричиняє збільшення витрати пального та підвищення концентрації незгорілих вуглеводнів (СН) та оксидів вуглецю (СО) у вихлопних газах [2, 3].

Застосування методу об'ємно-плівкового сумішоутворення у ДВЗ із безпосереднім впорскуванням сприяє покращенню процесу підготовки ППС у розшарованому паливоповітряному заряді (РППЗ). Завдяки випаровуванню рідкого пального з поверхні камери згорання (КЗ) утворюється парова фаза, яка ефективно змішується з потоком повітря, створюючи більш однорідну

суміш. На відміну від об'ємного способу, який потребує підвищеного тиску впорскування (понад 100 бар [4]), об'ємно-плівковий метод дозволяє забезпечити необхідні параметри суміші при тиску до 30 бар [5]. Крім того, випаровування пального сприяє зниженню теплових втрат, зменшенню температури стінок камери згоряння та охолодженню днища поршня, що знижує ризик виникнення детонаційного згоряння.

### Основна частина

Для досягнення високої ефективності процесу згоряння у двотактному двигуні 1Д 8,7/8,2 з іскровим запалюванням та безпосереднім впорскуванням бензину було впроваджено технологію організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду (РЗППЗ) [6]. Розроблена концепція забезпечує стабільну роботу двигуна на часткових навантаженнях при коефіцієнті надлишку повітря в суміші до  $\alpha_{\text{ППС}} = 1,49$  [7]. Підвищення ефективності змішування та горіння при ступені стиснення  $\varepsilon_{\text{д}} = 11,3$  сприяє зниженню витрати пального та зменшенню викидів шкідливих речовин (ШР).

Для забезпечення якісного процесу згоряння необхідно створити в зоні свічки запалювання добре займистий склад ППС як у момент займання, так і в міру поширення фронту полум'я. Одним із методів регулювання цього процесу є вибір оптимального моменту початку впорскування пального, враховуючи особливості конструкції двигуна, навантаження та кількість пального, що впорскується за цикл.

З метою зниження витрати пального та зменшення викидів ШР проведено експериментальні дослідження на двотактному двигуні 1Д 8,2/8,7 у режимі роботи з РЗППЗ. Випробування проводилися за навантажувальною характеристикою при частоті обертання колінчастого валу  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ , змінюючи момент початку подачі пального. Дослідження здійснювалися за незмінного кута випередження запалювання  $\theta_{\text{зап}} = 10$  град. п.к.в. до ВМТ при різних моментах впорскування :  $\varphi_{\text{впр}} = 200, 213, 224$  та  $238$  град. п.к.в. після ВМТ.

На першому етапі тестувань впорскування пального відбувалося при  $\varphi_{\text{впр}} = 200$  град. п.к.в. після ВМТ. Параметри роботи двигуна фіксувалися у стаціонарних режимах, регулюючи подачу повітря через дросельну заслінку та встановлюючи максимальне навантаження за допомогою динамометричної головки гальмівного стенда. Частота обертання підтримувалась на рівні  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ . На кожному режимі оптимальний склад ППС встановлювався відповідно до максимального крутного моменту при сталій подачі пального за цикл.

У процесі збільшення навантаження від  $p_e = 0,13$  МПа до  $p_e = 0,303$  МПа питома витрата пального знижувалася з  $g_e = 0,323$  кг/(кВт·год) до  $g_e = 0,269$  кг/(кВт·год), що супроводжувалося зміною коефіцієнта надлишку

повітря  $\alpha_{\text{цил}}$ . При  $p_e = 0,22$  МПа  $\alpha_{\text{цил}}$  становив 1,8, а при  $p_e = 0,303$  МПа – 1,64. Температура відпрацьованих газів ( $t_{\text{ВГ}}$ ) зростала від 245°C до 321°C, а температура поверхні камери згоряння ( $t_{\text{кз}}$ ) – від 145°C до 198°C. Концентрація СО у вихлопних газах залишалася в межах 0,06 %, а рівень незгорілих вуглеводнів СН коливався від 42 до 50 ppm.

На наступному етапі експериментальних досліджень було змінено кут впорскування на  $\phi_{\text{впр}} = 213$  град. п.к.в. після ВМТ. У цьому режимі за всієї навантажувальної характеристики спостерігалось зростання коефіцієнта надлишку повітря в циліндрі. Значення  $\alpha_{\text{цил}}$  змінювалися в межах від 1,55 ( $p_e = 0,149$  МПа) до 1,85 ( $p_e = 0,22$  МПа), після чого знижувалися до 1,62 ( $p_e = 0,327$  МПа). При цьому питома витрата пального зменшилася від  $g_e = 0,313$  кг/(кВт·год) ( $p_e = 0,149$  МПа) до мінімального рівня  $g_{\text{emin}} = 0,262$  кг/(кВт·год) ( $p_e = 0,26$  МПа), після чого зросла до 0,269 кг/(кВт·год) при  $p_e = 0,327$  МПа.

Зміщення моменту початку впорскування ближче до ВМТ ( $\phi_{\text{впр}} = 224$  град. п.к.в. після ВМТ) сприяло зниженню питомої витрати пального. У зоні низьких навантажень ( $p_e = 0,144$  МПа) витрата палива склала  $g_e = 0,299$  кг/(кВт·год), а при часткових навантаженнях ( $p_e = 0,192$ – $0,322$  МПа) досягала мінімального значення  $g_{\text{emin}} = 0,259$  кг/(кВт·год). Ефективніший процес згоряння та зменшення теплових втрат у систему охолодження підтверджували зниження температури поверхні камери згоряння.

Формування глибоко розширеного збідненого паливоповітряного заряду в процесі згоряння дало змогу отримати найнижчий рівень викидів СО у відпрацьованих газах для всієї навантажувальної характеристики при частоті обертання  $n = 3000$  хв<sup>-1</sup>. У діапазоні мінімальних і часткових навантажень ( $p_e = 0,144$ – $0,284$  МПа) вміст СО у вихлопних газах становив 0,02 %. Із підвищенням навантаження до максимального рівня ( $p_e = 0,428$  МПа) концентрація СО у вихлопних газах зросла до 0,17 %.

Щодо вмісту незгорілих вуглеводнів (СН), то зі збільшенням навантаження від  $p_e = 0,144$  МПа до  $p_e = 0,192$  МПа їхня концентрація зменшувалася з 20 ppm до 15 ppm. Однак при подальшому підвищенні навантаження до максимального рівня ( $p_e = 0,428$  МПа) концентрація СН зросла до 80 ppm.

При подальшому зміщенні кута впорскування на  $\phi_{\text{впр}} = 238$  град. п.к.в. після ВМТ спостерігалось збагачення паливоповітряної суміші, що відобразилося на зміні коефіцієнта надлишку повітря: значення  $\alpha_{\text{цил}}$  варіювалися від 1,71 ( $p_e = 0,125$  МПа) до 1,55 ( $p_e = 0,365$  МПа). Витрата пального залишалася найнижчою при малих навантаженнях ( $g_e = 0,305$  кг/(кВт·год) при  $p_e = 0,125$  МПа), проте мала тенденцію до зростання у межах часткових і підвищених навантажень.

Вміст СО у вихлопних газах при застосуванні кута впорскування  $\phi_{\text{впр}} = 238$  град. п.к.в. після ВМТ поступово знижувався до 0,03 % при збіль-

шенні навантаження до  $p_e = 0,168$  МПа, що дещо перевищувало значення для  $\varphi_{\text{впр}} = 224$  град. п.к.в. після ВМТ. Надалі, при зростанні навантаження до максимального рівня ( $p_e = 0,365$  МПа), концентрація СО у вихлопних газах збільшилася до 0,17 %.

Щодо рівня СН у відпрацьованих газах, то при застосуванні кута впорскування  $\varphi_{\text{впр}} = 238$  град. п.к.в. після ВМТ спостерігалось зменшення концентрації з 42 ppm до 18 ppm при підвищенні навантаження до  $p_e = 0,21$  МПа, що відповідало значенням, отриманим при  $\varphi_{\text{впр}} = 224$  град. п.к.в. після ВМТ. Подальше збільшення навантаження до  $p_e = 0,351$  МПа призвело до зменшення викидів СН до 12 ppm, що на 75 % менше порівняно з  $\varphi_{\text{впр}} = 224$  град. п.к.в. після ВМТ. Максимальна концентрація СН у вихлопних газах при  $\varphi_{\text{впр}} = 238$  град. п.к.в. після ВМТ досягала 52 ppm при максимальному навантаженні ( $p_e = 0,365$  МПа).

### Висновки

Результати досліджень двотактного двигуна 1Д 8,2/8,7 з іскровим запалюванням та безпосереднім впорскуванням бензину у режимі розширеного збідненого паливоповітряного заряду свідчать про те, що оптимальним є момент початку впорскування  $\varphi_{\text{впр}} = 224$  град п.к.в. після ВМТ.

Цей режим дозволяє мінімізувати витрату пального та викиди шкідливих речовин (СО і СН), забезпечуючи оптимальний баланс між економічністю, екологічністю та ефективністю роботи двигуна при частоті обертання  $n = 3000$  хв<sup>-1</sup> та куті випередження запалювання  $\theta_{\text{зап}} = 10$  град п.к.в. до ВМТ.

### Литература

1. Heywood, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals [Text] / J. B. Heywood. – Second Edition. McGraw-Hill Education: New York, 2018. 1056 p.
2. Eichlseder H. Grundlagen und Technologien des Ottomotors / H. Eichlseder, M. Klüting, W.F. Piock. – Wien (Austria): Springer-Verlag, 2008. 264 p.
3. Дяченко В. Г. Двигуни внутрішнього згоряння. Теорія: підручник для вузів / В. Г. Дяченко; Мін-во освіти і науки України; за ред. А. П. Марченка. – Х.: НТУ «ХП», 2008. 488 с.
4. Ottomotor mit Direkteinspritzung: Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial / R. van Basshuysen (Hrsg.). – Wiesbaden (Deutschland): Springer Vieweg, 2013. 465 p.
5. Корогодський В.А. Організація раціонального способу регулювання потужності двигуна з іскровим запалюванням. Двигуни внутрішнього згорання, 2013. №1. С. 11-16, див: <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/21246>
6. Корогодський, В.А. Визначення раціонального циклу та способу організації робочого процесу двигуна за нава-нтажувальною характеристикою [Текст] / В.А. Корогодський // Вісник ХНАДУ. 2020. Вип. 90. С. 80-94.
7. Korohodskiy, V., Voronkov, A., Rogovyi, A., Kryshota, S. et al. (2021). Influence of the stratified fuel-air charge pattern on economic and environmental indicators of a two-stroke engine with spark ignition. AIP Conf. Proc.: Transport, Ecology - Sustainable Development EKO Varna, 2021. No. 2439 (2021) 020011, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0068466>