

УДК 621.45.038

О. М. КЛИМЕНКО, В. О. ПИЛЬОВ, І. М. ШУЛЬГА

**ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ АВТОМОБІЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІЇ БАЖАНОСТІ ХАРІНГТОНА**

Проаналізовано можливості комплексного покращення техніко-економічних показників автомобільного дизеля при використанні систем автоматичного регулювання його теплового стану. Для розв'язання компромісної задачі запропоновано використовувати узагальнену функцію бажаності Харінгтона з метою оптимізації досліджуваних показників на кожному режимі заданої моделі експлуатації. За керуючі фактори використано режимні та регульовальні параметри роботи дизеля. Оцінено ефективність різних варіантів САР.

**Ключові слова:** регулювання, економічність ДВЗ, димність, тверді частки, оксиди азоту, модель експлуатації, оптимізація

**Вступ.** Підвищення рівня форсування двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), що є необхідним для досягнення високого рівня їхньої ефективності, суттєво впливає на ресурс деталей камери згоряння, зокрема поршня, як найбільш термонавантаженої деталі.

Для забезпечення достатнього рівня надійності окреслених деталей передбачається впровадження різних технологічних і конструктивних заходів. Стосовно поршнів основним таким заходом є застосування одного зі способів їхнього примусового масляного охолодження [1].

Однак, масляне охолодження разом з перевагами має і ряд недоліків. Основний з них – переохолодження поршнів при ненормальних навантаженнях, що може привести до погіршення сумішоутворення і збільшення відносних теплових втрат [2–4]. Крім того, надмірне охолодження поршня на часткових режимах призводить до зростання амплітуд перепадів температур при скиданні або накиданні навантаження, що в значній мірі знижує надійність та довговічність поршня [5, 6].

Тому можна зазначити, що для підтримання достатнього рівня надійності конструкції доцільно підвищувати температури поршня на часткових режимах роботи ДВЗ при незміненому рівні його температури на важких режимах. Реалізація цих заходів, вочевидь, пов'язана з застосуванням систем автоматичного регулювання (САР), в тому числі й за допомогою мікропроцесорної техніки.

Результати дослідження впливу регулювання теплового стану поршня (ТСП) на його ресурсну міцність [6 – 8] доказали ефективність вищезгаданих припущень.

© В. О. Пильов, О. М. Клименко, І. М. Шульга, 2015

З іншого боку, відомі експериментальні дослідження [2, 4], які виявили поліпшення показників викидів СО, СН, димності і паливної економічності при незначному збільшенні викидів NO<sub>x</sub> внаслідок відключення охолодження поршнів на часткових режимах роботи дизеля.

Відомим фактом є впровадження провідними фірмами систем регулювання охолодження поршнів у сучасні двигуни з метою досягнення перспективного рівня форсування, екологічних та економічних показників [9].

Проте теоретичні засади такого регулювання, а також принципи врахування керуючих факторів при

цьому в літературі практично відсутні.

**Метою роботи** є оцінка можливості комплексного покращення показників паливної економічності та екологічності автомобільного дизеля на основі застосування регульованого масляного охолодження його поршнів.

**Дослідження ефективності застосування автоматичного регулювання ТСП.** Вихідними даними даного дослідження слугують результати експериментального дослідження впливу теплового стану поршнів дизеля 4ЧН12/14 на показники його екологічності та паливної економічності [10].

Експериментальне дослідження показало, що відключення охолодження поршнів і збільшення кута випередження подачі палива призводить до зниження димності відпрацьованих газів (ВГ) та витрати палива при одночасному збільшенні викидів NO<sub>x</sub>. Найбільший вплив виявлено на режимах з малою частотою обертання колінчастого вала та на режимах часткових навантажень.

Враховуючи вище описане, дане дослідження є вирішенням компромісної задачі вибору значень керуючих параметрів, що дозволить комплексно покращити ефективність робочого процесу дизеля.

Для комплексної оцінки якості роботи ДВЗ запропоновано використовувати методику, засновану на пошуку оптимального поєднання комплексу керуючих факторів для кожного режиму моделі експлуатації з використанням узагальненої функції бажаності Харінгтона для 3х критеріїв якості [11, 12]:

$$D = \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3} \rightarrow 1,$$

де  $d_1$  – часткова функція бажаності питомої ефективної витрати палива;

$d_2, d_3$  – часткові функції бажаності викидів шкідливих речовин (оксиди азоту NO<sub>x</sub> та тверді частки).

Зв'язок між частковими функціями бажаності та дійсними значеннями параметрів здійснювати як:

$$d_i = \exp[-\exp(a + b \cdot f_i)], i = 1, 2, 3,$$

де  $f_i$  – дійсне значення параметру якості конструкції.

Значення коефіцієнтів  $a$  та  $b$  запропоновано встановлювати з системи двох рівнянь, які визначають найкраще ( $d_i = 0,8$ ) та найгірше ( $d_i = 0,2$ ) значення часткової функції бажаності на окремому досліджуваному режимі. Для емісії шкідливих

© О. М. Клименко, В. О. Пильов, І. М. Шульга, 2015

речовин запропоновано застосування загальної шкали бажаності, з використанням методики приведення викидів за агресивністю [13].

За керуючі фактори прийнято частоту обертання колінчастого валу дизеля  $n$ , середній ефективний тиск  $p_e$ , кут випередження подачі палива  $\Theta$  та тепловий стан поршнів.

$$K_{\text{ПЕ}} = \frac{3600}{H_u \frac{\sum_{i=1}^z (G_{\text{Пі}} P_i)}{\sum_{i=1}^z (N_{\text{еі}} P_i)}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^z (G_{\text{Пі}} P_i)}{\sum_{i=1}^z (G_{\text{Пі}} P_i) + \sigma \sum_{i=1}^z \left[ G_{\text{Пі}} P_i \cdot \sum_{k=1}^N \frac{G_{\text{ШРпр } k}}{G_{\text{Пі}}} \right]}$$

де  $P_i$  – коефіцієнт значущості кожного представницького режиму, що відповідає імовірнісному розподілу відповідного полігону моделі експлуатації з урахуванням узагальнення напрацювання двигуна за терміновий цикл;

$H_u$  – нижча теплота згоряння палива;

$N_{\text{еі}}$  – ефективна потужність дизеля на кожному представницькому режимі;

$G_{\text{Пі}}$  – погодинна витрата палива на кожному представницькому режимі;

$G_{\text{ШРпр } k}$  – приведена маса викиду  $k$ -ї шкідливої речовини з ВГ дизеля;

$z$  – кількість представницьких режимів моделі експлуатації;

$N$  – загальна кількість токсичних компонентів, що враховуються при оцінці шкідливих викидів з ВГ до навколишнього середовища;

$\sigma$  – безрозмірний показник відносної небезпеки забруднення на різних територіях;

$f$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує характер розсіювання ВГ в атмосфері.

$$G_{\text{ШРпр } k} = A_k \cdot G_{\text{ШР } k},$$

де  $A_k$  – показник відносної агресивності  $k$ -го компонента токсичних викидів з ВГ ДВЗ;

$G_{\text{ШР } k}$  – маса викиду цього компонента.

Розрахунки виконано для кожного експлуатаційного режиму моделі експлуатації вантажного автомобіля при русі по шосе [13].

Результати розв'язання компромісної задачі перевірялися з використанням комплексного паливно-екологічного критерію ДВЗ [13]:

В ході дослідження було оцінено різні варіанти сумісного регулювання керуючих факторів.

Першим етапом було розв'язання оптимізаційної задачі при роботі ДВЗ з кутом випередження подачі палива  $\Theta = 23$  гр.п.к.в. (базовий варіант) та регулюванні ТСП. Розрахунки показали, що для комплексного поліпшення показників токсичності і паливної екологічності доцільно включити охолодження поршнів тільки при досягненні  $\bar{p}_e = 0,92$  на всьому діапазоні частот обертання колінчастого валу.

Наступним етапом була оцінка ефективності регулювання кута випередження подачі палива при постійно включеному охолодженні поршнів, а також комплексного керування кутом випередження подачі палива та ТСП.

Результати дослідження представлено в табл. 1 у вигляді розрахованих значень витрати палива та викидів шкідливих речовин, а також значень комплексного паливно-екологічного критерію для базового (нерегульованого) варіанту і різних варіантів, що передбачають застосування САР за термін експлуатації дизеля.

Таблиця 1 – Ефективність застосування різних варіантів сумісного керування

Варіанти сумісного регулювання керуючих факторів	$K_{\text{ПЕ}}$	$G_{\text{Пі}}$	$G_{\text{ШРпр}}$	$G_{\text{NOx}}$	$G_{\text{Тч}}$
	–	кг/експл.	кг/експл.	кг/експл.	кг/експл.
Базовий $\Theta$ без регулювання ТСП	0,006	90567,2	355082,3	304796,7	50285,6
Регулювання ТСП при незмінному $\Theta$	0,006	90238,3	357124,5	308160,7	48963,8
Регулювання $\Theta$ без регулювання ТСП	0,0063	90880,6	342832,2	289727,2	53105,0
Сумісне керування $\Theta$ та ТСП	0,0073	90876,6	313432,2	265879,8	47552,4

Видно, що регулювання ТСП при постійному значенні кута випередження палива  $\theta$  не приводить до відчутних змін параметрів оптимізації в порівнянні з базовим варіантом; регулювання  $\theta$  при постійно включеному охолодженні дозволяє знизити емісію шкідливих речовин на 3,45%; при комплексному регулюванні ТСП і  $\theta$  досягається значне поліпшення екологічних показників ДВЗ (на 11,7%) при незначному (0,34%) погіршенні паливної економічності за термін експлуатації дизеля.

**Висновки.** Вирішення задачі комплексного покращення техніко-економічних показників автомобільного дизеля на підставі запропонованого алгоритму порежимного пошуку оптимальних значень керуючих параметрів дозволило встановити можливі закони його керування.

Отримані результати свідчать про доцільність використання САР температурного стану поршня з метою комплексного покращення техніко-економічних показників автомобільного дизеля.

Сумісне використання зазначеної САР з сучасними паливними системами із електронним керуванням кутом випередження подачі палива значно збільшує ефект порівняно із індивідуальним використанням вищезгаданих систем.

**Список літератури.** 1. Чайнов М. Д. Вплив масляного охолодження на тепловий стан поршнів ДВЗ / М. Д. Чайнов, Л. Л. М'яков, А. В. Кареньков // Двигуни внутрішнього згорання. – 2005. – № 2. – С. 66–70. 2. Минак А. Ф. Улучшение показателей форсированного тракторного дизеля путем регулирования масляного охлаждения поршнем : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.04.02 «Тепловые двигатели» – Харьков, 1982. – 21 с. 3. Шеховцов А. Ф. Исследование теплового состояния поршня тракторного дизеля : автореф. дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук : спец. 05.04.02 «Тепловые двигатели» – Харьков, 1978. – 47 с. 4. Вейнблат М. Х. Отключение охлаждения поршней на частичных режимах резерв улучшения эксплуатационных показателей форсированного турбопоршневого дизеля / М. Х. Вейнблат, В. Ю. Быков // Двигателестроение. – 1985. – № 6. – С. 20–21. 5. Розенблит Г. Б. Теплопередача в дизелях / Г. Б. Розенблит. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с. 6. Матвеев В. В. Влияние регулируемого струйного масляного охлаждения поршня на ресурсную прочность кромки его камеры сгорания / В. В. Матвеев, В. Т. Турчин, В. А. Пылев [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. № 21. – С. 29–33. 7. Матвеев В. В. Оценка влияния двухступенчатого масляного охлаждения поршня на его ресурсную прочность / В. В. Матвеев, В. А. Пылев, В. Т. Коваленко [и др.] // Решения энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: науч.-техн. конф. 5-е Луканские чтения, 14 марта, 2011 г.: тезисы докл. – М.: МАДИ, 2011. – С. 137. 8. Пильов В. О. Попередня оцінка резервів підвищення ресурсної міцності поршня при використанні систем автоматичного регулювання його масляного охолодження / В. О. Пильов, О. М. Клименко // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Транспортне машинобудування. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 14 (1057). – С. 83–88. 9. Volkswagen Technical Site. Двигатели Audi TFSI 1,8 л и 2,0 л семейства EA888 (поколение 3) [Електронний ресурс]. – Режим доступу. [http://vwts.ru/ppp/pps\\_606\\_dvig\\_audi\\_tfsi\\_18\\_20\\_ea888\\_rus.pdf](http://vwts.ru/ppp/pps_606_dvig_audi_tfsi_18_20_ea888_rus.pdf). 10. Пильов В. О. Экспериментальне дослідження впливу регулювання теплового стану поршня на показники дизеля / В. О. Пильов, О. М. Клименко, С. В. Обозний // Двигуни внутрішнього згорання. – 2014. – № 2. – С. 24–27. 11. Пильов В. О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності: Монографія. – Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ». – 2001. – 332 с. 12. Harrington E. C., Jr. The Desirability Function / E. C. Harrington // Industrial Quality Control. – 1965. – № 21

(10). – Р. 494–498. 13. Парсаданов И. В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия: Монография. – Харьков: Изд. Центр НТУ «ХПІ», 2003. – 244 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Chaynov M. D. Vplyv maslyanoho okhолоdzhennya na teplovyy stan porshniv DVZ / M. D. Chaynov, L. L. Myahkov, A. V. Karen'kov // Dvyhuny vnutrishn'oho z'horyannya. – 2005. – No 2. – P. 66–70. 2. Minak A. F. Uluchshenie pokazatelej forsirovannogo traktornogo dizelja putem regulirovaniya masljanogo ohlazhdenija porshnem : avtoref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk : spec. 05.04.02 «Teplovyje dvigateli» – Kharkov, 1982. – 21 p. 3. Shehovcov A. F. Issledovanie teplovogo sostojanija porshnja traktornogo dizelja : avtoref. dis. na soiskanie uch. stepeni dokt. tehn. nauk : spec. 05.04.02 «Teplovyje dvigateli» – Kharkov, 1978. 4. Veynblat M. X. Otkljuchenie ohlazhdenija porshnej na chastichnyh rezhimah rezerv uluchshenija jekspluatacionnyh pokazatelej forsirovannogo turboporshnevo dizelja / M. X. Veynblat, V. Ju Bykov // Dvigatelistroenie. – 1985. – No 6. – P. 20–21. 5. Rozenblit G. B. Teploperedacha v dizeljah / G. B. Rozenblit. – Moscow: Mashinostroenie, 1977. – 216 p. 6. Matveenko V. V. Vlijanie reguliruемого strujnogo masljanogo ohlazhdenija porshnja na resursnuju prochnost' kromki ego kamery sgoranija / V. V. Matveenko, V. T. Turchin, V. A. Pylev [i dr.] // Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Tematychnyy vypusk «Innovatsiyni doslidzhennya u naukovykh robotakh studentiv». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2011. No 21. – P. 29–33. 7. Matveenko V. V. Ocenka vlijanija dvuhstupenчатого masljanogo ohlazhdenija porshnja na ego resursnuju prochnost' / V. V. Matveenko, V. A. Pylev, V. T. Kovalenko [i dr.] // Reshenija jenergojekologicheskikh problem v avtotransportnom komplekse: nauch.-tehn. konf. 5-e Lukaninskie chtenija, 14 marta, 2011. : tezisy dokl. – M. : MADI, 2011. – P. 137. 8. Pyl'ov V. O. Poperednya otsinka rezerviv pidvishchennya resursnoyi mitsnosti porshnja pry vykorystanni system avtomatychnoho rehulyuvannya yoho maslyanoho okhолоdzhennya / V. O. Pyl'ov, O. M. Klymenko // Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Transportne mashynobuduvannya. – Kh.: NTU «KhPI». – 2014. – No 14 (1057). – P. 83–88. 9. Volkswagen Technical Site. Dvigateli Audi TFSI 1,8 l i 2,0 l semejstva EA888 (pokolenie 3). <[http://vwts.ru/ppp/pps\\_606\\_dvig\\_audi\\_tfsi\\_18\\_20\\_ea888\\_rus.pdf](http://vwts.ru/ppp/pps_606_dvig_audi_tfsi_18_20_ea888_rus.pdf)>. 10. Pyl'ov V. O. Eksperymental'ne doslidzhennja vplyvu reguljuvannya teplovogo stanu porshnja na pokaznyky dyzelja / V. O. Pyl'ov, O. M. Klymenko, S. V. Oboznyj // Dvygyny vnutrishn'ogo zgorjannja. – 2014. – No 2. – P. 24–27. 11. Pyl'ov V. O. Avtomatyzovane proektuvannya porshniv shvydkohidnyh dyzeliv iz zadanyim rivnem tryvaloї mitsnosti: Monografija. – Kharkiv: Vydavnychyj centr NTU «KhPI». – 2001. – 332 p. 12. Harrington E. C., Jr. «The Desirability Function.» *Industrial Quality Control* 21 (1965): P. 494–498. 13. Parsadanov I. V. Povyshenie kachestva i konkurentosposobnosti dizelej na osnove kompleksnogo toplivno-jekologicheskogo kriterija: Monografija. – Kharkov: Izd. Centr NTU «KhPI», 2003. – 244 p.

Надійшла (received) 20.08.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Клименко Олександр Миколайович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; тел.: (097) 901-74-77; e-mail: [klim23051987@rambler.ru](mailto:klim23051987@rambler.ru)

**Клюменко Олександр Миколайович** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student; тел.: (097) 901-74-77; e-mail: [klim23051987@rambler.ru](mailto:klim23051987@rambler.ru)

**Пильов Володимир Олександрович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри двигунів внутрішнього згорання; тел.: (095) 612-73-58; e-mail: [pylyov@meta.ua](mailto:pylyov@meta.ua).

**Пyl'ov Volodymyr Olexsandrovych** – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Internal Combustion Engines; тел.: (095) 612-73-58; e-mail: [pylyov@meta.ua](mailto:pylyov@meta.ua).

**Шульга Ігор Миколайович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (063) 876-86-65.

**Shul'ga Igor Mykolajovych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; тел.: (063) 876-86-65.