

Ю.Ф. Гутаревич, М.Д. Гора

ВПЛИВ ДОБАВКИ ЗАКИСУ АЗОТУ ДО ПОВІТРЯНОГО ЗАРЯДУ НА ПОКАЗНИКИ ДВИГУНА З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ ЗА РОБОТИ З ПОВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

В статті наведені методика і результати досліджень по впливу добавки закису азоту до повітряного заряду на енергетичні та екологічні показники і паливну економічність автомобільного двигуна з іскровим запалюванням, зворотним зв'язком і каталітичним трикомпонентним нейтралізатором за роботи з повним навантаженням. Режими повних навантажень двигунів часто використовують в умовах інтенсивного руху автомобілів в містах і населених пунктах. Підвищення енергетичних показників є актуальним для спортивних транспортних засобів, енергетичних стаціонарних установок за роботи з повним навантаженням. При визначенні ефективності отримання високих енергетичних показників двигунів необхідно враховувати вплив методу на екологічні показники і паливну економічність. Відомі декілька методів підвищення енергетичних показників двигунів з іскровим запалюванням. Одним з найбільш використовуваних методів є збагачення паливо-повітряної суміші. Робота двигуна на збагаченій паливо-повітряній суміші призводить до збільшення витрати палива і погіршення екологічних показників, зокрема при використанні каталітичного нейтралізатора. Тому актуальними є визначення методів, які дозволяють поліпшити одночасно енергетичні і екологічні показники двигуна в названих режимах роботи без збільшення витрати палива. Таким методом є використання добавки кисневмісних сполук, зокрема закису азоту, до повітряного заряду. Авторами запропонована методика оцінки впливу даного методу на показники роботи двигуна в відносних величинах в порівнянні з збагаченням паливо-повітряної суміші. Проведені дослідження індикаторних показників роботи двигуна, а саме: енергетичних показників по середньому індикаторному тиску, показників паливної економічності по індикаторному к.к.д., екологічних показників по концентраціях забруднювальних речовин у відпрацьованих газах. Розрахунки, з використанням експериментальних даних, показали, що використанням добавки закису азоту різної величини до повітряного заряду двигуна можливо отримати більш високі енергетичні показники, поліпшення екологічних показників без погіршення паливної економічності в порівнянні з збагаченням паливо-повітряної суміші.

Ключові слова: двигун з іскровим запалюванням; закис азоту, паливо-повітряна суміш; енергетичні показники; паливна економічність; екологічні показники; забруднювальні речовини; коефіцієнт надлишку повітря; індикаторний тиск; індикаторний коефіцієнт корисної дії (к.к.д.); коефіцієнт впливу.

Вступ

Відомо, що основними режимами роботи двигунів транспортних засобів, зокрема автомобілів, у русі останніх в містах і населених пунктах, є часткові швидкісні і навантажувальні режими. Разом з тим в умовах інтенсивного руху значну частину складають розгони автомобілів з високими прискореннями і з використанням максимальних енергетичних показників. Широке використання режимів повних навантажень двигунів сучасних легкових автомобілів у русі по м. Києву встановлено у дослідженнях ДП «ДержавтотрансНДПроект» [1]. Як видно з рис. 1, режими максимального крутного моменту $M_K = 800$ Н·м достатньо часто використовують в експлуатації легкових автомобілів двигунів з іскровим запалюванням. Підвищення енергетичних показників є також актуальним для спортивних транспортних засобів, енергетичних стаціонарних установок за роботи з повним навантаженням.

Відомо, що для отримання високих енергетичних показників двигунів з іскровим запалюванням одним з найбільш використовуваних методів є збагачення паливо-повітряної суміші. Робота двигуна на збагаченій паливо-повітряній суміші призводить до збільшення витрати бензину і погіршення еко-

логічних показників, зокрема при використанні каталітичної нейтралізації для зменшення викидів забруднювальних речовин (ЗР) з відпрацьованими газами (ВГ). Тому актуальними є визначення і дослідження методів, які дозволяють поліпшити одночасно енергетичні і екологічні показники двигуна в названих режимах роботи без збільшення витрати палива. Таким методом є використання добавки кисневмісних сполук, зокрема закису азоту, до повітряного заряду. Провести широкі експериментальні дослідження цього методу складно. Тому на першому етапі доцільно оцінити ефективність цього методу розрахунковими дослідженнями з використанням експериментальних даних, отриманих на конкретному двигуні. Як об'єкт досліджень обрано вітчизняний автомобільний двигун MeM3-307 з системою впорскування бензину, зворотним зв'язком і каталітичним нейтралізатором (рис. 2).

Мета дослідження – розробити методику і визначити вплив добавки різної величини закису азоту до повітряного заряду на енергетичні, екологічні показники і паливну економічність двигуна з іскровим запалюванням за роботи з повним навантаженням та провести порівняння з показниками, які отримують на збагаченій паливо-повітряній суміші.

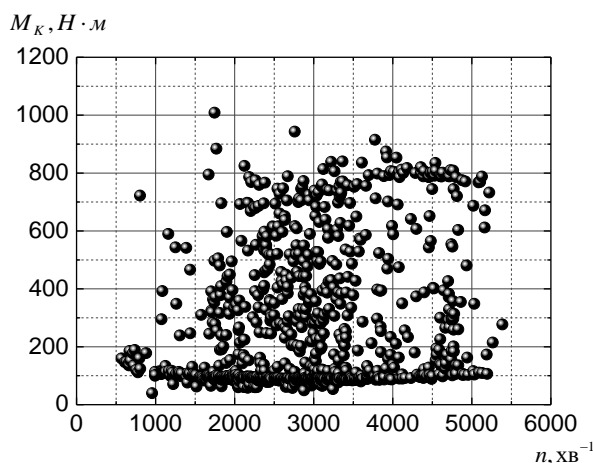


Рис. 1. Усереднений розподіл крутного моменту двигуна автомобіля Chevrolet Tahoe від частоти обертання в русі у м. Києві



Рис. 2. Експериментальна установка на базі двигуна МемЗ-307

Аналіз попередніх досліджень

Добавку кисневмісного газу до повітряного заряду двигунів з іскровим запалюванням можна розглядати як відомий наддув повітря з тією різницею, що при наддуві повітрям збільшують масу повітря, яке надходить в циліндри двигуна, і створює умови для згорання більшої кількості бензину, а при добавці кисневмісного газу крім більшої маси свіжого заряду, в результаті збільшення його густини, зростає концентрація кисню в заряді. Проведені дослідження з використанням різних кисневмісних газів в двигунах [2] підтвердили можливість підвищення енергетичних показників двигуна. Одним з кисневмісних газів, який використовують для підвищення

енергетичних показників двигунів з іскровим запалюванням, є закис азоту, в якому кисень за об'ємом складає 33% (в повітрі близько 21%).

В даний час добавку закису азоту широко використовують у двигунах спортивних автомобілів. Дослідження двигунів серійних і спортивних автомобілів показали можливість значного підвищення енергетичних показників [3]. Широкі теоретичні і експериментальні дослідження впливу добавки закису азоту до повітряного заряду автомобільного карбюраторного двигуна, обладнаного нейтралізатором окисного типу "Lindo Gobex" проведені в роботі [4]. Теоретичні дослідження робочого циклу двигуна показали, що за добавки закису азоту до повітряного заряду в кількості 12% за об'ємом середній індикаторний тиск зростає на 9,3%, індикаторний к.к.д. – на 15,1%. Експериментальні дослідження двигуна показали, що додавання закису азоту до повітря в кількості 12% по об'єму збільшує ефективну потужність двигуна на 6,6% та зменшує ефективну питому витрату палива на 6,3%.

Розрахункові дослідження з використанням експериментально визначених концентрацій ЗР показали, що викиди ЗР з ВГ бензинового двигуна в режимі повних навантажень при добавці закису азоту до повітряного заряду змінюються по різному: викиди продуктів неповного згорання (CO і C_nH_m) знижуються, викиди оксидів азоту (NO_x) зростають. Разом з тим в літературних джерелах не виявлено результатів теоретичних і експериментальних досліджень впливу добавки закису азоту до повітряного заряду сучасного двигуна з іскровим запалюванням з системою впорскування бензину, зворотним зв'язком і каталітичним трикомпонентним нейтралізатором. Зокрема не виявлено методики і результатів розрахунку кількісних показників впливу добавки закису азоту різної величини до повітряного заряду на енергетичні, екологічні показники та паливну економічність двигуна.

Основна частина

До показників роботи двигуна, на які може вплинути добавка закису азоту до повітряного заряду, віднесли енергетичні показники (крутний момент, потужність, середній індикаторний і ефективний тиски), показники паливної економічності (питома індикаторна і ефективна витрати бензину, індикаторний і ефективний к.к.д.), екологічні показники (питомі викиди ЗР з ВГ, віднесені до одиниці ефективної роботи).

Так як механічні втрати в двигуні практично не залежать від складу свіжого заряду, можливо проводити дослідження індикаторних показників роботи двигуна, а саме:

- енергетичних показників по середньому індикаторному тиску;
- показників паливної економічності по індикаторному к.к.д.;
- екологічних показників по концентраціях ЗР в ВГ.

Визначення цих показників провели при повному відкритті дросельної заслінки, різному складі паливо-повітряної суміші, отриманому зміною циклової подачі бензину або складу повітряного заряду в залежності від величини добавки закису азоту.

При вирішенні цієї задачі визначили показники двигуна в таких режимах регулювання:

- за роботи на збагаченій паливо-повітряній суміші ($\alpha = 0,85 - 0,9$); що широко використовують в практиці для отримання максимальних енергетичних показників, і тому саме цей режим регулювання доцільно прийняти основним, так як показники двигуна в цьому режимі відносно легко визначити експериментально і це надає можливість перевірити достовірність результатів теоретичних досліджень;
- за роботи на стехіометричній паливо-повітряній суміші ($\alpha = 1,0$), отриманій зменшенням циклової подачі бензину в порівнянні з першим режимом;
- за роботи на стехіометричній паливо-повітряній суміші ($\alpha = 1,0$) отриманій подачею відповідної дози закису азоту без зміни циклової подачі бензину в порівнянні з першим режимом, тобто зміною маси повітряного заряду і його складу;
- за роботи на стехіометричній суміші при добавці закису азоту до повітряного заряду і відповідному збільшенні циклової подачі бензину;
- за роботи на збагаченій паливо-повітряній суміші ($\alpha = 0,88$), отриманій при збільшеній (відповідній) добавці закису азоту і відповідній циклової подачі бензину. Цей режим може бути реалізований тільки з врахуванням результатів експериментально визначених або розрахованих тиску і температури робочого циклу.

Так як основною метою використання добавки закису азоту до повітряного заряду є підвищення енергетичних показників двигунів з іскровим запалюванням за роботи в режимі повних навантажень, визначили як вплине на середній індикаторний тиск робота в названих режимах регулювань. Відомі залежності для розрахунків названих вище показників роботи двигуна, але ці залежності включають ряд параметрів, які можливо визначити лише при експерименті. Тому запропонована наступна методика, а саме: оцінювати вплив режиму регулювання в відносних безрозмірних величинах – коефіцієнтах впливу режиму регулювання, які визначали як відношення показників, отриманих в даному режимі регулювання до показників в основному (першому)

режимі регулювання. Це дозволило виключити ті параметри, які не залежать від режиму регулювання, а входять в формули для розрахунку енергетичних показників.

Основним для дослідження прийняли перший режим регулювання на збагаченій паливо-повітряній суміші. Визначили експериментальну швидкісну зовнішню характеристику двигуна MeM3-307 (рис. 3), для проведення досліджень обрали швидкісний режим 3000 хв^{-1} , в якому максимальний крутний момент і коефіцієнт надміру повітря близький до $\alpha = 0,88$.

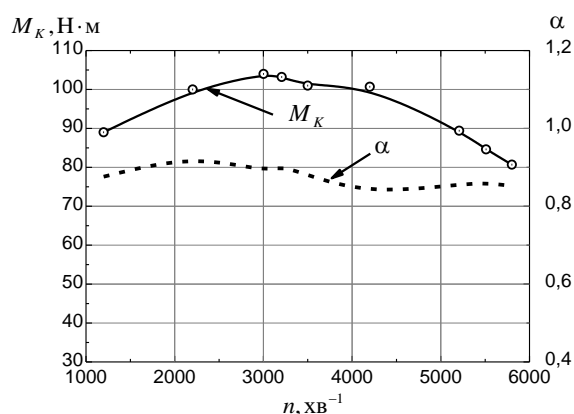


Рис. 3. Швидкісна зовнішня характеристика двигуна MeM3-307 (залежність M_k і α від частоти обертання)

Для оцінки впливу регулювання на енергетичні показники (середній індикаторний тиск) використали коефіцієнт впливу регулювання

$$K_p = \frac{p_{i1}}{p_{i0}}, \quad (1)$$

де p_{i1} – середній індикаторний тиск в робочому циклі при відповідному регулюванні складу паливо-повітряної суміші;

p_{i0} – середній індикаторний тиск в робочому циклі при коефіцієнті надміру повітря $\alpha = 0,88$.

Для визначення середнього індикаторного тиску p_i скористаємось відомою залежністю

$$p_i = \frac{\eta_i \cdot \eta_v \cdot \rho_K \cdot H_u}{l_0 \cdot \alpha}, \quad (2)$$

де η_i – індикаторний к.к.д., η_v – коефіцієнт наповнення циліндра в робочому циклі свіжим зарядом. Якщо розглядати всі названі режими роботи, то свіжий заряд в ряді режимів буде містити лише повітря, в ряді режимів суміш повітря і закису азоту;

ρ_K – густина свіжого заряду, $\text{кг}/\text{м}^3$;

H_u – нижча теплота згорання, $\text{МДж}/\text{кг}$;

l_0 – теоретично необхідна кількість повітря для згорання 1 кг палива, кг/кг;

α – коефіцієнт надміру свіжого заряду.

Після підстановки значення p_i в (1) і скорочення сталих показників отримуємо залежність для визначення K_p

$$K_p = \frac{\eta_{i1} \cdot \eta_{v1} \cdot \rho_{K1} \cdot l_{00} \cdot \alpha_0}{\eta_{i0} \cdot \eta_{v0} \cdot \rho_{K0} \cdot l_{01} \cdot \alpha_1} \quad (3)$$

В цій залежності невідомі індикаторні к.к.д., величини яких в значній мірі залежать від коефіцієнту надміру повітря α . В роботі [4] наведена залежність відносного індикаторного к.к.д. від коефіцієнту надміру повітря (рис. 4). Відносний індикаторний к.к.д. отримано як відношення індикаторного к.к.д. при певному α до індикаторного к.к.д. при $\alpha = 1,0$, який прийнятий за 100 %.

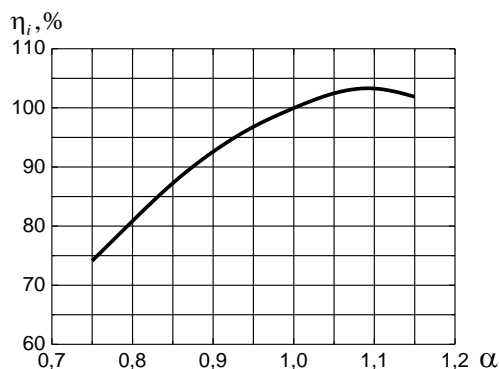


Рис. 4. Залежність відносного індикаторного к.к.д. від коефіцієнту надміру повітря

Залежність $\eta_i(\alpha)$ використана для визначення відношення η_{i1}/η_{i0} .

Одним з основних показників в цій залежності (3) є коефіцієнт наповнення η_v .

Обґрунтування незмінної величини η_v наведено в роботі [4], де зазначається, що при добавці закису азоту до повітряного заряду змінюються параметри повітряного заряду, зокрема ρ_K , що впливає на масу свіжого заряду і враховується зміною ρ_K . Об'єм свіжого заряду в момент закриття впускного клапану однаковий і його відношення до робочого об'єму циліндра не змінюється, тобто коефіцієнт η_v для режиму, коли незмінна частота обертання і повністю відкрита дросельна заслінка, буде незмінним.

З врахуванням цього отримали

$$K_p = \frac{\eta_{i1} \cdot \rho_{K1} \cdot l_{00} \cdot \alpha_0}{\eta_{i0} \cdot \rho_{K0} \cdot l_{01} \cdot \alpha_1} \quad (4)$$

Для вирішення першої задачі порівняння енергетичних показників при роботі двигуна на збагаченій паливо-повітряній суміші ($\alpha_0 = 0,88$) і стехіометричній суміші ($\alpha_1 = 1,0$), отриманій зменшенням циклової подачі бензину, $\eta_{i1} = 100$ (відносних %) для $\alpha_1 = 1,0$ і $\eta_{i0} = 90\%$ для $\alpha_0 = 0,88$.

Так як в двох режимах першої задачі повітряний заряд має однакові параметри ($\rho_{K1} = \rho_{K0}, l_{01} = l_{00}$), то коефіцієнт впливу

$$K_p = \frac{\eta_{i1} \cdot \alpha_0}{\eta_{i0} \cdot \alpha_1} = 0,97 \quad (5)$$

Тобто отримати збільшення енергетичних показників двигуна шляхом збіднення складу збагаченої суміші до стехіометричного неможливо.

Для вирішення другої задачі порівняння третього і першого режимів регулювання необхідно визначити, яка добавка закису азоту до повітряного заряду забезпечить стехіометричну паливо-повітряну суміш без зміни циклової подачі бензину.

За роботи на стехіометричній суміші ($\alpha = 1,0$) показники робочого циклу, зокрема теоретично необхідна кількість повітряного заряду l_0 буде відрізнятися для кожної добавки закису азоту, так як змінюється вміст кисню в свіжому заряді. Крім того, змінюється густина заряду на впуску ρ_K , так як питома маса закису азоту, який добавляли до повітряного заряду більша в порівнянні з повітрям. Величину добавки закису азоту до повітряного заряду оцінюють об'ємними частками або в % закису азоту в суміші повітря-закис азоту (r_{N_2O}).

На рис. 5 показані отримані за відомими для газових сумішей формулами розрахункові залежності l_0 і ρ_K від вмісту N_2O в суміші повітря-закис азоту (r_{N_2O}). З використанням цих графіків визначили, що при однаковій циклової подачі бензину для збіднення паливо-повітряної суміші від $\alpha_0 = 0,88$ до $\alpha = 1,0$ необхідна добавка закису азоту близька до $r_{N_2O} = 0,1$ (10%). Для величини $r_{N_2O} = 0,1$ (10%), $l_{01} = 13,7$ кг/кг, $\rho_{K1} = 1,29$ кг/м³.

По аналогії з першою задачею $\eta_{i1} = 1,0$ при $\alpha = 1,0$ і $\eta_{i0} = 0,9$ при $\alpha_0 = 0,88$ з використанням залежності (4) отримали

$$K_p = \frac{1,0 \cdot \rho_{K1} \cdot l_{00} \cdot \alpha_0}{0,9 \cdot \rho_{K0} \cdot l_{01} \cdot \alpha_1} = 1,1 \quad (6)$$

Таким чином, можливо збільшити енергетичні показники двигуна близько 10 % використовуючи регулювання двигуна на стехіометричну суміш, при якій індикаторний к.к.д. вищий в порівнянні з роботою на збагаченій паливо-повітряній суміші.

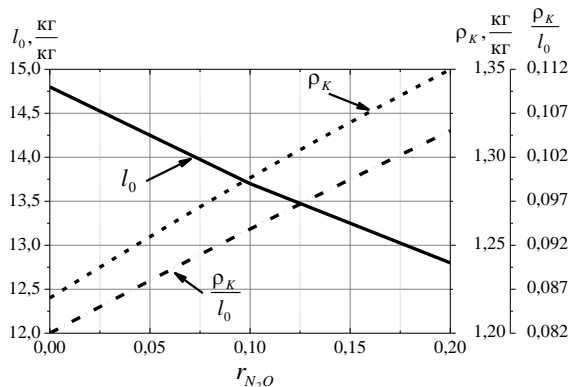


Рис. 5. Залежність показників свіжого заряду від вмісту закису азоту

При порівнянні показників за роботи двигуна на суміші повітря і закису азоту результати розрахунків залежать від складу паливо-повітряної суміші. Для розрахунків прийнято умову, що склад паливо-повітряної суміші буде таким як в першій задачі ($\alpha = 0,88$). Тоді відношення η_{i1}/η_{i0} дорівнює 1,0, так як відносний індикаторний к.к.д. буде для обох випадків порівняння однаковий (близько 0,9). За роботи на збагаченій паливо-повітряній суміші ($\alpha = 0,88$) при повітряному заряді без добавки N_2O $l_{00} = 14,8$ кг/кг, $\rho_{K0} = 1,22$ кг/м³. При добавці 10% закису азоту, як показано вище, $l_{01} = 13,7$ кг/кг, $\rho_{K1} = 1,29$ кг/м³. Тоді

$$K_p = \frac{\rho_{K1} \cdot l_{00}}{\rho_{K0} \cdot l_{01}} = 1,14. \quad (7)$$

При добавці 20 % закису азоту $l_{01} = 12,8$ кг/кг, $\rho_{K1} = 1,35$ кг/м³, $K_p = 1,28$. При цьому необхідно збільшити циклову подачу бензину, щоб паливо-повітряна суміш залишилась стехіометричною.

З графіку отриманих результатів (рис. 6) видно, що очікувані величини коефіцієнтів впливу регулювання для енергетичних показників при регулюванні на збагачену паливо-повітряну суміш ($\alpha = 0,88$) пропорційні величині добавки закису азоту $K_p = 1,4 \cdot r_{N_2O} + 1,0$.

Подальше підвищення енергетичних показників двигуна можливо отримати збільшенням частки закису азоту і відповідно циклової подачі бензину,

але це необхідно підтвердити розрахунком або експериментально з заміром тиску і температури в процесі згорання.

Одним з важливих питань при використанні добавки закису азоту до повітряного заряду двигуна є дослідження паливної економічності. Як оцінку паливної економічності прийняли індикаторний К.К.Д. η_{i0} . Так як основною метою використання закису азоту є підвищення енергетичних показників двигуна, недоцільно аналізувати режим регулювання, в якому енергетичні показники знижуються. До таких режимів відноситься другий режим, в якому стехіометрична паливо-повітряна суміш отримана зменшенням циклової подачі бензину, для якого коефіцієнт впливу режиму роботи двигуна на енергетичні показники $K_p = 0,97$.

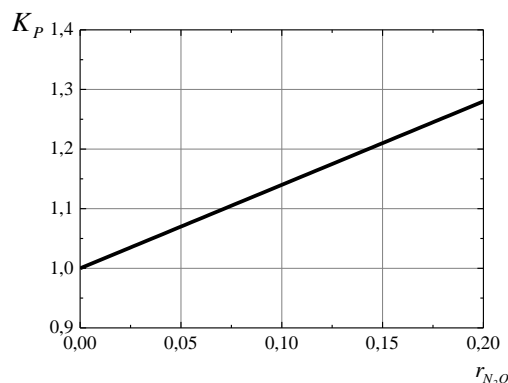


Рис. 6. Вплив добавки закису азоту на величину коефіцієнтів впливу регулювання для енергетичних показників

Збільшення енергетичних показників одержано на третьому режимі за роботи двигуна на стехіометричній суміші отриманій при незмінній циклової подачі бензину в порівнянні з першим режимом зміною складу і маси свіжого заряду десяти відсотковою добавкою закису азоту до повітряного заряду.

Як основний (базовий) режим прийняли режим роботи на збагаченій паливо-повітряній суміші (коефіцієнт надміру повітря $\alpha_0 = 0,88$). Вплив складу паливо-повітряної суміші оцінювали зміною індикаторного к.к.д. Цей коефіцієнт розраховували за формулою (8).

$$\eta_i = \frac{l_0 \cdot \alpha \cdot p_i}{H_u \cdot \eta_v \cdot \rho_K}. \quad (8)$$

Проблема полягає в тому, що при переході до стехіометричної суміші змінюється не лише індикаторний к.к.д., а і середній індикаторний тиск. Разом з тим відомо, що оцінювати паливну економічність

необхідно при однаковому навантаженні. Тому коефіцієнт впливу режиму регулювання двигуна на паливну економічність K_η визначали з врахуванням коефіцієнта впливу на енергетичні показники K_p

$$K_\eta = \frac{\eta_{i1}}{\eta_{i0}} = \frac{l_{01} \cdot \alpha_1 \cdot H_u \cdot \eta_v \cdot \rho_{K0}}{H_u \cdot \eta_v \cdot \rho_{K1} \cdot l_{00} \cdot \alpha_0} \cdot \frac{p_{i1}}{p_{i0}}. \quad (9)$$

В цій залежності відношення p_{i1}/p_{i0} є коефіцієнтом впливу режиму регулювання двигуна на енергетичні показники. Це відношення визначене вище $K_p = 1,1$, що свідчить про підвищення енергетичних показників (середнього індикаторного тиску p_i) і збільшення коефіцієнту впливу режиму регулювання на паливну економічність K_η .

Для визначення закономірності зміни коефіцієнта впливу режиму регулювання на паливну економічність (зміна відношення η_{i1}/η_{i0}) скористались залежністю (9). В цій залежності p_{i1}/p_{i0} є коефіцієнтом впливу режиму регулювання двигуна на енергетичні показники. Як визначено вище цей коефіцієнт дорівнює $K_p = 1,1$, тобто енергетичні показники в цьому режимі роботи зростають в порівнянні з базовим режимом роботи, що приводить до зниження витрати бензину.

Добавка закису азоту в кількості 10 % по об'єму впливає на величину $l_{01} = 13,7$ кг/кг, в базовому режимі $l_{00} = 14,8$ кг/кг, на величину $\rho_{K1} = 1,29$ кг/м³, в базовому режимі $\rho_{K0} = 1,22$ кг/м³. При цьому $\alpha_1 = 1,0$, $\alpha_0 = 0,88$, інші показники не залежать від режиму регулювання. Після скорочення H_u і η_v розрахований коефіцієнт впливу режиму регулювання двигуна на паливну економічність

$$K_\eta = \frac{l_{01} \cdot \alpha_1 \cdot \rho_{K0}}{l_{00} \cdot \alpha_0 \cdot \rho_{K1}} \cdot K_p = 1,105. \quad (10)$$

З розрахованого значення K_η видно, що добавкою до повітряного заряду 10 % закису азоту і відповідним регулюванням циклової подачі бензину для отримання стехіометричної паливо-повітряної суміші можливо поліпшити паливну економічність за рахунок підвищення енергетичних показників ($K_p = 1,1$).

Якщо метою регулювання є максимальне підвищення енергетичних показників, то, як показано вище, необхідно при добавці закису до повітряного

заряду збільшенням циклової подачі бензину забезпечити роботу двигуна на збагаченій паливо-повітряній суміші ($\alpha_0 = 0,88$). Розрахунки проведені при добавці 10 % закису азоту. В цьому режимі коефіцієнт впливу режиму регулювання на паливну економічність розраховуємо по залежності (10) з відповідним коригуванням показників: $\alpha_1 = 0,88$, $K_p = 1,14$.

$$K_\eta = \frac{13,7 \cdot 1,22}{14,8 \cdot 1,29} \cdot 1,14 = 1,0. \quad (11)$$

При добавці 20 % закису азоту

$$K_\eta = \frac{12,8 \cdot 1,22}{14,8 \cdot 1,35} \cdot 1,28 = 1,0. \quad (12)$$

В цих випадках паливна економічність залишається незмінною в порівнянні з базовим режимом. При цьому можливе підвищення енергетичних показників близько 14% і 28%.

При дослідженні впливу добавки закису азоту до повітряного заряду на екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням доцільно порівнювати різні режими регулювань з роботою двигуна на стехіометричній суміші ($\alpha = 1,0$), так як ефективність роботи каталітичного нейтралізатора при цьому буде найвищою. Тому варто порівнювати базовий режим ($\alpha_0 = 0,88$) з режимами, в яких $\alpha = 1,0$ і має місце поліпшення енергетичних показників і паливної економічності. Разом з тим недоцільно розглядати режим, в якому погіршуються енергетичні показники, так як основною метою збагачення паливо-повітряної суміші є підвищення цих показників. Тому немає сенсу аналізувати режими збіднення паливо-повітряної суміші при незмінному повітряному заряді зменшенням циклової подачі бензину.

Проведено порівняння екологічних показників за роботи на збагаченій паливо-повітряній суміші і стехіометричній суміші, отриманій добавкою закису азоту до повітряного заряду $r_{N_2O} = 0,1$ (10%).

Проведено порівняння без використання каталітичного нейтралізатора і за його використання. При порівнянні без використання каталітичного нейтралізатора коефіцієнт впливу режиму регулювання складає

$$K_{3P} = \frac{G_{i3P}}{G_{03P}}, \quad (13)$$

де G_{i3P} – маса i -ої ЗР, яка викидається в i -му режимі регулювання з ВГ за годину за роботи двигуна на стехіометричній суміші, кг/год;

$G_{0ЗР}$ – маса ЗР, яка викидається в базовому режимі регулювання з ВГ за годину за роботи двигуна на збагаченій суміші ($\alpha = 0,88$), кг/год.

Згідно [5] викиди ЗР з ВГ за годину розраховують за залежністю

$$G_i = \frac{C'_j}{100} \cdot \mu_i \cdot M_{ВГ}, \quad (14)$$

де C'_j – концентрації i -ої ЗР відповідно в % чи млн⁻¹;

μ_i – молярна маса i -ої ЗР, кг/кмоль;

$M_{ВГ}$ – кількість продуктів згорання, кмоль/год.

Кількість продуктів згорання визначалося використавши заміряні за годину витрати палива $G_{нал}$ і повітря $G_{нов}$, кг/год

$$M_{ВГ} = a \cdot (b \cdot G_{нал} + G_{нов}), \quad (15)$$

де a і b – розраховані коефіцієнти для різного виду палива, різного стану продуктів згорання і різного складу паливо-повітряної суміші.

При визначенні показників за роботи на бензині на стехіометричній ($\alpha = 1,0$) або збагаченій паливо-повітряній суміші для сухих продуктів згорання при розрахунку викидів оксиду вуглецю і вуглеводнів $a = 0,02250$ і $b = 6,104$, для вологих продуктів згорання при розрахунку викидів оксидів азоту $a = 0,027$ і $b = 5,31$. При підстановці виразу $M_{ВГ}$ в залежність (14) і відповідному скороченні однакових параметрів отримуємо, що коефіцієнт впливу режиму регулювання на масові викиди i -ої ЗР має вид

$$K_{ЗР} = \frac{\frac{C''_{j1}}{100} \cdot \mu_i \cdot a \cdot (b \cdot G_{нал1} + G_{нов1})}{\frac{C'_{j0}}{100} \cdot \mu_i \cdot a \cdot (b \cdot G_{нал0} + G_{нов0})} = \quad (16)$$

$$= \frac{C''_{j1} \cdot (b \cdot G_{нал1} + G_{нов1})}{C'_{j0} \cdot (b \cdot G_{нал0} + G_{нов0})}$$

В залежності (16) годинні витрати бензину $G_{нал1} = G_{нал0}$, так як перехід від збагаченої суміші ($\alpha = 0,88$) до стехіометричної ($\alpha = 1,0$) здійснено без зміни циклової подачі бензину, а відповідною добавкою закису азоту (близько 10% об'ємних) до повітряного заряду. Годинні витрати повітря розраховували з використанням залежностей $G_{нов1} = G_{нал1} \cdot l_{01} \cdot \alpha_1$, $G_{нов0} = G_{нал0} \cdot l_{00} \cdot \alpha_0$. При дода-

вці 10% об'ємних закису азоту до повітряного заряду теоретично необхідна кількість повітря для згорання 1 кг бензину $l_{01} = 13,7$ кг/кг при коефіцієнті надміру повітря $\alpha_0 = 1$, $l_{00} = 14,8$ кг/кг. Після підстановки цих значень в формулу (16) та скорочення $G_{нал1}$ і $G_{нал0}$ отримуємо для сухих продуктів згорання (CO , C_mH_n)

$$K_{ЗР} = 1,043 \cdot \frac{C''_{j1}}{C'_{j0}}. \quad (17)$$

Для вологих продуктів згорання (NO_x) $K_{ЗР} = 1,045$. Коефіцієнти 1,043 і 1,045 свідчать про те, що отримані при порівнянні відношення концентрацій ЗР для об'єктивної оцінки необхідно збільшувати, так як доцільно порівнювати масові викиди ЗР, а не їх концентрації.

Для аналізу впливу регулювання складу паливо-повітряної суміші на екологічні показники двигуна при оцінці екологічних показників розраховують відношення масових викидів i -ої ЗР при роботі двигуна на збагаченій ($\alpha = 0,88$) і стехіометричній ($\alpha = 1,0$) паливо-повітряних сумішах. При цьому доцільно врахувати коефіцієнти 1,043 і 1,045, які характеризують різницю в відносній оцінці екологічних показників, визначених як відношення концентрацій і масових викидів окремих компонентів. Для прикладу використано результати експериментів, що отримані на двигуні МеМЗ-307 з системою впорскування бензину, зворотним зв'язком і каталітичним нейтралізатором. Концентрації ЗР у ВГ до нейтралізатора за роботи з повним навантаженням при частоті обертання 3000 хв⁻¹ на збагаченій паливо-повітряній суміші ($\alpha = 0,88$) складають CO – 5,18 %, C_mH_n – 2116 млн⁻¹, NO_x – 1037 млн⁻¹, CO_2 – 12,6 %, на стехіометричній суміші ($\alpha = 1,0$) CO – 0,532 %, C_mH_n – 1440 млн⁻¹, NO_x – 3020 млн⁻¹, CO_2 – 15,11 %.

Коефіцієнти впливу регулювання на відносні масові викиди окремих ЗР з врахуванням різниці в коефіцієнтах отриманих з використанням концентрацій і масових викидів ЗР наведені в таблиці 1.

Як видно з даних таблиці, за роботи на стехіометричній суміші в порівнянні з роботою на збагаченій суміші коефіцієнти впливу CO і C_mH_n значно менші 1,0, тобто масові викиди CO і C_mH_n зменшуються, масові викиди NO_x значно зростають, масові викиди CO_2 майже не змінюються.

Таблиця 1. Коефіцієнт впливу регулювання на відносні масові викиди окремих ЗР

$$K_{CO} = K_{ЗР} \cdot \frac{C_{CO_1}}{C_{CO_0}} = 1,043 \cdot \frac{CO_1}{CO_0} = 1,043 \cdot \frac{0,532}{5,18} = 0,01 ;$$

$$K_{C_{mH_n}} = K_{ЗР} \cdot \frac{C_{C_{mH_{n1}}}}{C_{C_{mH_{n0}}}} = 1,043 \cdot \frac{C_{mH_{n1}}}{C_{mH_{n0}}} = 1,043 \cdot \frac{1440}{2116} = 0,7 ;$$

$$K_{NO_x} = K_{ЗР} \cdot \frac{C_{NO_{x1}}}{C_{NO_{x0}}} = 1,043 \cdot \frac{NO_{x1}}{NO_{x0}} = 1,043 \cdot \frac{3020}{1037} = 3,03 ;$$

$$K_{CO_2} = K_{ЗР} \cdot \frac{C_{CO_{21}}}{C_{CO_{20}}} = 1,043 \cdot \frac{CO_{21}}{CO_{20}} = 1,043 \cdot \frac{15,11}{12,6} = 1,25 .$$

В даний час практично всі автомобілі обладнані системами впорскування з зворотним зв'язком і каталітичним нейтралізатором. Тому доцільно порівняти екологічні показники за роботи двигуна на стехіометричній і збагаченій сумішах з врахуванням ефективності нейтралізатора.

Визначені в експериментальних дослідженнях двигуна MeM3-307 коефіцієнти ефективності каталітичного нейтралізатора «LINDO GOBEX» при стехіометричному складі суміші становить $K_{CO} = 99\%$, $K_{C_{mH_n}} = 62\%$, $K_{NO_x} = 96\%$, при збагаченій суміші ($\alpha = 0,88$) $K_{CO} = 60\%$, $K_{C_{mH_n}} = 90\%$, $K_{NO_x} = 78\%$. При таких коефіцієнтах ефективності нейтралізації приведені до CO з врахуванням коефіцієнтів відносної агресивності концентрації при збагаченій суміші $G_{\Sigma CO} = 3,07\%$, при стехіометричній суміші $G_{\Sigma CO} = 0,67\%$. Таким чином можна стверджувати, що використовуючи добавку N_2O можливо значно поліпшити екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням з системою впорскування і каталітичним нейтралізатором в режимах повних навантажень.

Висновки

Встановлено, що при добавці закису азоту в кількості 10% до повітряного заряду, переходом на роботу на стехіометричній суміші можливо збільшити енергетичні показники двигуна з іскровим запалюванням в порівнянні з роботою на збагаченій паливо-повітряній суміші близько 10%. Це є наслідком більшої величини індикаторного к.к.д. на стехіометричній суміші в порівнянні з роботою на збагаченій паливо-повітряній суміші.

Порівняння енергетичних показників двигуна за роботи на збагаченій паливо-повітряній суміші, отриманій збільшенням циклової подачі бензину при добавці закису азоту 10% показало можливість збільшення енергетичних показників двигуна близько 14%. При збільшенні величини добавки закису азоту пропорціонально зростають енергетичні показники.

Добавкою до повітряного заряду 10 % закису азоту і відповідним регулюванням циклової подачі бензину для отримання стехіометричної паливо-повітряної суміші можливо поліпшити паливну економічність за рахунок підвищення енергетичних показників ($K_p = 1,1$).

Розрахунки з використанням експериментальних даних, отриманих на двигуні з системою впорскування бензину, зворотним зв'язком і каталітичним нейтралізатором, показали, що, зведені до CO концентрації з врахуванням коефіцієнтів відносної агресивності і різниці в коефіцієнтах отриманих з використанням концентрацій і масових викидів ЗР за роботи на збагаченій паливо-повітряній суміші $G_{\Sigma CO} = 3,07\%$, при стехіометричній суміші $G_{\Sigma CO} = 0,67\%$. Таким чином можна стверджувати, що використовуючи добавку N_2O можливо значно поліпшити екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням.

Список літератури:

1. Провести дослідження впливу особливостей конструкції нових типів колісних транспортних засобів та сучасних умов експлуатації на споживання палива і мастильних матеріалів з метою вдосконалення чинної системи нормування: звіт про НДР / ДП «ДержавтотрансНДПроект» – Київ, 2009. – 157 с. 2. Yuh-Yin Wu Improving the performance of small spark-ignition engine by using oxygen-enriched intake air [Electronic resource] / Yuh-Yin Wu, K. David Huang

// SAE Techn. Pap. – Oct. 2007. – № 2007-32-0004. – Mode of access: <http://www.sae.org/technical/papers/2007-32-0004> (date of access: 03.04.2024). 3. Langfield T. *The nitrous oxide. High-Performance manual* // Veloce Publishing Limited, Dorchester, - 2006, 112 p. 4. Гаркуша Ю.В. Поліпшення енергетичних показників і паливної економічності бензинового двигуна в режимах повних навантажень: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03/Гаркуша Юхим Володимирович; Нац. транс. ун-т. – Київ, 2010. – 146 с. 5. Екологія та автомобільний транспорт: навчальний посібник / [Ю. Ф. Гутаревич, Д. В. Зеркалов, А. Г. Говорун, А. О. Корпач, Л. П. Мерзхивська]. – К.: Арістей, 2006. – 292 с. 6. Дядченко В.Л. Покращення паливної економічності багаточислинних двигунів з впорскуванням бензину в режимах малих навантажень і холостого ходу: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03/ Дядченко Вячеслав Леонідович; Нац. транс. ун-т. – Київ, 2010. – 172 с.

Bibliography (transliterated):

1. 2009, To study the impact of design features of new types of wheeled vehicles and modern operating conditions on the consumption of fuel and lubricants in order to improve the current rationing system: report on scientific research work [Provesty doslidzhennya vplyvu osoblyvosti

konstryktsii novykh typiv kolisnykh transportnykh zasobiv ta suchasnykh umov ekspluatatsii na spozhuvannya palyva i mastylnykh materialiv z metoyu vdoskonalennya chunnoi system normuvannya: zvit pro NDR], State Enterprise "State Road Transport Research Institute", Kyiv. 2. Yuh-Yin Wu, K. David Huang (2007), "Improving the performance of small spark-ignition engine by using oxygen-enriched intake air" [Electronic resource], SAE Techn. Pap., № 2007-32-0004, Mode of access: <http://www.sae.org/technical/papers/2007-32-0004> (date of access: 03.04.2024). 3. Langfield, T. (2006), *The nitrous oxide. High-Performance manual*, Veloce Publishing Limited, Dorchester, 112 p. 4. Harkusha, Yu.V. (2010), *Improving the energy performance and fuel economy of a gasoline engine at full load: Doct. Diss.* [Polipshennya enerhetychnykh pokaznykiv i palyvnoi ekonomichnosti benzynovoho dyvuhuna v rezhymah povnykh navantazhen: dis. ... kand. tehnic. nauk], Kyiv, 146 p. 5. Hutarevych, Yu.F., Zerkalov, D.V., Hovorun, A.H., Korpach, A.O., Merzhyievska, L.P. (2006). *Ecology and road transport: study guide* [Ekolohiia ta avtomobilnyi transport: navchalnyi posibnyk], Aristei, Kyiv, 292 p. 6. Dyachenko, V.L. (2010), *Improving the fuel economy of multi-cylinder engines with gasoline injection at low loads and idling: Doct. Diss.* [Pokrashchennia palyvnoi ekonomichnosti bahatotsylindrovyykh dyvuhuniv z vporskuvanniam benzynu v rezhymah malyykh navantazhen i holostoho hodu: dis. ... kand. tehnic. nauk], Kyiv, 172 p.

Надійшла до редакції 14.05.2024 р.

Гутаревич Юрій Феодосійович – доктор техн. наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри «Двигуни і теплотехніка»; м. Київ, Україна, e-mail: yugutarevich@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4939-4384>.

Гора Микола Дмитрович – аспірант Національного транспортного університету, завідувач сектору випробовування транспортних засобів, двигунів і моторних палив науково-виробничої лабораторії енергетики та екології транспорту, Державне підприємство «Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: 0011008@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1574-3080>.

THE INFLUENCE OF NITROUS OXIDE ADDITION TO THE AIR CHARGE ON THE INDICATORS OF A SPARK IGNITION ENGINE UNDER FULL LOAD OPERATION

Y.F. Gutarevich, M.D. Hora

The article presents the methodology and research results on the influence of nitrous oxide addition to the air charge on the energy and environmental indicators, as well as the fuel economy of a spark ignition engine with feedback and a three-way catalytic converter under full load conditions. Full load engine modes are often used in conditions of intense traffic of vehicles in cities and settlement. Increasing energy indicators is relevant for sports vehicles and stationary energy installations operating at full load. When determining the most efficient method of achieving high engine energy indicators, it is necessary to take into account the method's impact on the engine's environmental indicators and fuel economy. Several methods for increasing the energy indicators of spark ignition engines are known. One of the most utilized methods is enriching the fuel-air mixture. Engine operation on enriched fuel-air mixture leads to increased gasoline consumption and deterioration of environmental indicators, especially when using a catalytic converter. Therefore, research into methods that simultaneously improve the energy and environmental indicators of the engine in the mentioned operating modes without increasing fuel consumption is relevant. One such method is the use of oxygen-containing compounds, in particular nitrous oxide, added to the air charge. The article proposes a methodology for assessing the method's impact on engine performance indicators in relative terms compared to fuel-air mixture enrichment. We conducted a study of indicator indicators of engine operation, namely: energy indicators based on average indicator pressure, fuel efficiency indicators based on indicator coefficient of useful action, environmental indicators based on concentrations of pollutants in exhaust gases. Calculations using experimental data showed that by adding various amounts of nitrous oxide to the engine's air charge, it is possible to achieve higher energy indicators, improve environmental indicators without worsening fuel economy compared to fuel-air mixture enrichment.

Keywords: spark ignition engine; nitrous oxide; fuel-air mixture; energy indicators; fuel economy; environmental indicators; pollutants; air-fuel ratio; indicated pressure; indicator coefficient of useful action (c.u.a.); influence coefficient.