

ПОЛІПШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДВИГУНА З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ В РЕЖИМАХ ПОВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВИКОРИСТАННЯМ ЗАКИСУ АЗОТУ

Гора М.Д., ДП «ДержавтотрансНДІпроект», Київ, Україна, mgora@insat.org.ua,
orcid.org/0000-0002-1574-3080

IMPROVEMENT OF ENVIRONMENTAL INDICATORS OF THE ENGINE WITH SPARK IGNITION IN FULL LOAD MODES WITH USE OF NITROUS OXIDE

Hora M.D., State Enterprise «State Road Transport Research Institute», Kyiv, Ukraine,
mgora@insat.org.ua, orcid.org/0000-0002-1574-3080

Постановка проблеми.

Кількість викидів забруднювальних речовин (ЗР) з відпрацьованими газами (ВГ) двигунів з іскровим запалюванням залежить від конструктивних особливостей двигунів, якості палива, рівня зношення деталей та режимів роботи двигунів. Режими роботи для автомобільних двигунів визначаються режимами руху транспортних засобів (ТЗ). На даний час зберігається тенденція збільшення на території України кількості приватних та комерційних ТЗ, в тому числі бувають у користуванні. Циклічні масові переміщення ТЗ (робочі та побутові поїздки приватним автомобілями в ранковий та вечірній час, тощо) в межах доби, тижня, місяця, пори року, супроводжується великою інтенсивністю руху ТЗ (окрім руху у заторах), в свою чергу недостатність логістичного управління рухом ТЗ в умовах міжміських сполучень та особливо при русі великими містами, не сприяють оптимізації експлуатації ТЗ в економних режимах, зокрема режимах усталеного руху. Тому досить актуальним є питання роботи двигунів ТЗ в режимах повних навантажень, для забезпечення динамічних показників автомобілів, наприклад при розгонах в умовах інтенсивного руху, при максимальній завантаженості ТЗ тощо. При цьому забезпечення отримання високих енергетичних показників двигунів може супроводжуватись погіршенням екологічних показників і паливної економічності автомобілів. З цієї точки зору і проведені розрахункові дослідження методу поліпшення екологічних показників двигуна з іскровим запалюванням у режимах повних навантажень додавкою закису азоту до повітряного заряду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Зниження викидів ЗР з ВГ двигунів з іскровим запалюванням досягають конструктивними змінами та регульовальними заходами. Основними з них в сучасних двигунах є використання системи управління розподільчим валом, оптимізація геометрії камери згорання, використання декількох клапанів на циліндр, підвищення ступеня стиску, пошарове впорскування палива при безпосередньому впорскуванні, регулювання кута випередження запалювання та впорскування. Одним з найбільш ефективних шляхів поліпшення екологічних показників двигунів внутрішнього згорання є нейтралізація ЗР у ВГ. В сучасних двигунах з іскровим запалюванням використовують трикомпонентні каталітичні нейтралізатори. Для ефективної роботи каталітичного нейтралізатора необхідно забезпечити стехіометричний склад паливо-повітряної суміші. Разом з тим відомо, що найбільшу потужність можна отримати на збагаченій суміші при якій ефективність каталітичного нейтралізатора значно погіршується [4]. Одночасно створити умови для ефективної роботи каталітичного нейтралізатора при стехіометричному складі суміші без погіршення паливної економічності і енергетичних показників можливо змінюючи склад повітряного заряду. Впливати на склад повітряного заряду, зокрема підвищення в ньому кисню, можливо, коли частину повітря замінити газом з високим вмістом кисню. Таким газом є закис азоту, в якому кисень по масі складає близько 36 %.

У статті наведені результати розрахункових досліджень екологічних показників роботи двигуна з іскровим запалюванням, із системою впорскування бензину, зворотним зв'язком і трикомпонентним нейтралізатором у режимах повних навантажень при добавці закису азоту до повітряного заряду двигуна. В розрахунках використані результати експериментальних досліджень цього двигуна, проведених у лабораторії випробування двигунів Національного транспортного університету.

Виклад основного матеріалу.

Як зазначено в статті [1] одним з напрямків поліпшення показників двигунів з іскровим запалюванням в режимах повних навантажень є добавка до повітряного заряду кисневмісного газу – закису азоту N_2O . Результати розрахункових і експериментальних досліджень [2] показують, що цей напрям дозволяє поліпшити енергетичні та екологічні показники і паливну економічність двигуна. Разом з тим одночасно поліпшити ці показники неможливо. В статті [1] за результатами розрахункових досліджень з використанням даних експерименту доведено, що добавкою 10% N_2O до повітряного заряду можливо підвищити енергетичні показники двигуна близько 18% без погіршення паливної економічності.

Ефективність використання в сучасних двигунах трикомпонентних каталітичних нейтралізаторів, для нейтралізації ЗР, які в основному утворюються в циліндрах двигуна і викидаються в навколишнє середовище з ВГ, найбільш висока при стехіометричній паливо-повітряній суміші ($\alpha = 1,0$). За такого складу суміші прискорюються реакції окислення і відновлення ЗР, що дозволяє значно знизити викиди основних ЗР, зокрема оксиду вуглецю CO , вуглеводнів C_mH_n і оксидів азоту NO_x . Тому доцільно розглянути питання використання добавки закису азоту N_2O для отримання стехіометричної суміші замість збагаченої паливо-повітряної суміші, яку традиційно використовують для отримання високих енергетичних показників двигуна. Для прикладу на рис. 1 [3] показана залежність коефіцієнту надміру повітря двигуна 6Ч9,5/6,98 обладнаного системою впорскування, зворотним зв'язком і нейтралізатором фірми Arvin Tefh.

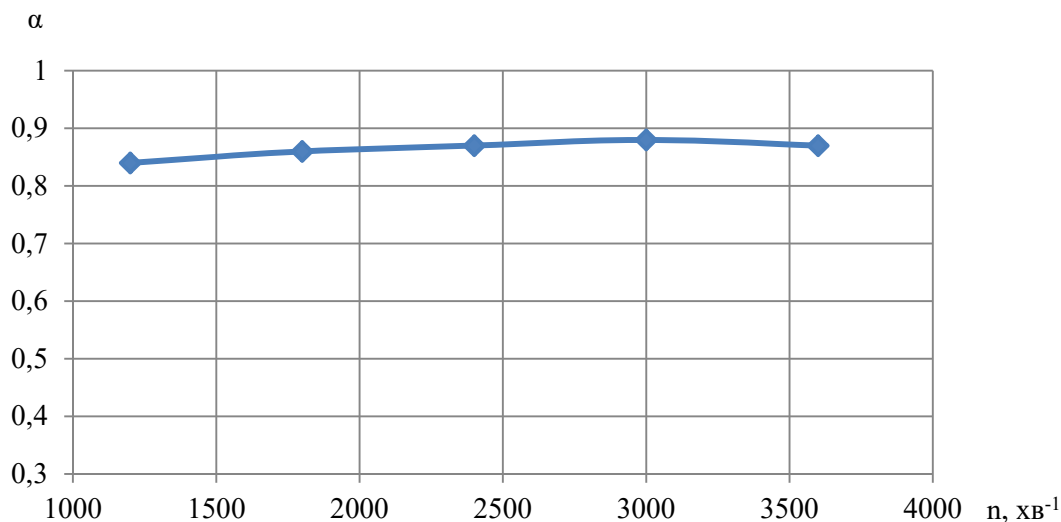


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнту надміру повітря від частоти обертання двигуна 6Ч9,5/6,98 за роботи з повним навантаженням

Figure 1 – Dependence of the coefficient of excess air on the engine speed of engine 6Ch9,5/6,98 at full load

Як видно з показаної залежності в усіх швидкісних режимах коефіцієнт надміру повітря за роботи з повним навантаженням знаходиться в межах 0,84...0,88. Такий склад паливо-повітряної суміші призводить до значного зниження ефективності нейтралізатора за винятком нейтралізації оксидів азоту. Використання закису азоту дозволяє змінити склад повітряного заряду, збільшити в ньому концентрацію кисню, що дозволить використовувати більші циклові подачі бензину при стехіометричному складі суміші. Розглянемо, як визначити необхідну добавку закису азоту для отримання стехіометричної суміші в режимі, де двигун працює на збагаченій суміші. Для аналізу виконаємо це для швидкісного режиму 2400 хв^{-1} , в якому була визначена навантажувальна характеристика [3], рис. 2.

В цьому режимі двигун працює з коефіцієнтом надміру повітря $\alpha = 0,87$. В роботі [3] проведені дослідження показників двигуна 6Ч9,5/6,98 в цьому режимі і отримані такі результати: крутний момент $M_K = 203,89 \text{ Н}\cdot\text{м}$, витрата палива $G_{\text{п}} = 14,52 \text{ кг/год}$, витрата повітря $G_{\text{пов}} = 188,23 \text{ кг/год}$, питома витрата палива $g_e = 284 \text{ г/кВт}\cdot\text{год}$, коефіцієнт наповнення $\eta_v = 0,72$, концентрація оксиду вуглецю $CO = 4,6 \text{ \%}$, концентрація діоксиду вуглецю $CO_2 = 12,8 \text{ \%}$, концентрація вуглеводнів $C_mH_n = 120 \text{ млн}^{-1}$, концентрація оксидів азоту $NO_x = 1180 \text{ млн}^{-1}$. Визначимо, яка добавка закису азоту до

повітряного заряду дозволить отримати стехіометричну суміш при незмінній витраті бензину. Для роботи без добавки N_2O витрату повітря на один робочий цикл визначимо з співвідношення:

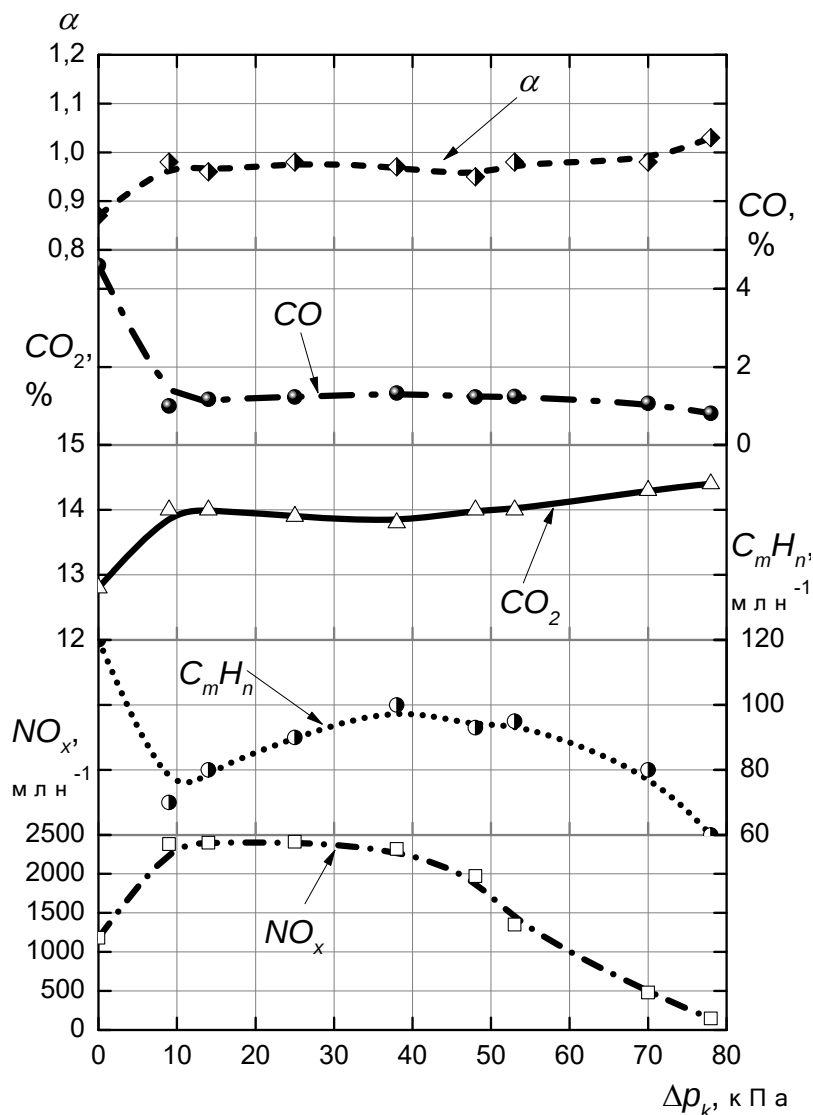


Рисунок 2 – Навантажувальна характеристика двигуна 6Ч9,5/6,98 ($n = 2400$ хв⁻¹)

Figure 2 – Load characteristics of the engine 6Ch9,5/6,98 ($n = 2400$ rpm)

$$V_h \cdot \eta_v \cdot \rho_{\text{пов}} = \alpha \cdot l_0 \cdot q_{\text{ц}}, \quad (1)$$

де V_h – робочий об'єм циліндра, м³; η_v – коефіцієнт наповнення, визначений в експерименті, $\eta_v = 0,72$; $\rho_{\text{пов}}$ – густина повітряного заряду, визначена в процесі експерименту, $\rho_{\text{пов}} = 1,22$ кг/м³; α – коефіцієнт надміру повітря, визначений в процесі експерименту, $\alpha = 0,87$; l_0 – теоретично необхідна кількість повітря для згорання 1 кг бензину, $l_0 = 14,8$ кг/кг (для роботи без добавки закису азоту); $q_{\text{ц}}$ – циклова подача бензину, кг/цикл. За добавки закису азоту ця рівність має вид:

$$V_h \cdot \eta_v \cdot \rho_{\text{сум}} = 1,0 \cdot l'_0 \cdot q_{\text{ц}}, \quad (2)$$

де $\rho_{\text{сум}}$ – густина суміші повітря і закису азоту, $\rho_{\text{сум}} = r_{N_2O} \cdot \rho_{N_2O} + (1 - r_{N_2O}) \cdot \rho_{\text{пов}}$; l'_0 – теоретично необхідна кількість суміші повітря і закису азоту для згорання 1кг бензину; r_{N_2O} – об'ємна частка закису азоту в суміші з повітрям. Розділив почленно (2) на (1), скоротивши V_h і η_v , отримаємо:

$$\frac{\rho_{\text{сум}}}{\rho_{\text{пов}}} = \frac{1,0}{0,87} \cdot \frac{l'_0}{l_0} \quad (3)$$

Величина l'_0 залежить від розміру частки N_2O в суміші. Згідно [2] $l'_0 = 14,8 - 10 \cdot r_{N_2O}$. З виразу (3) отримуємо величини $r_{N_2O} = 0,106$, $l'_0 = 13,74$ кг/кг. Як видно з графіків навантажувальної характеристики концентрації ЗР різко змінюються при розрідженні на впуску $\Delta p_k \approx 10$ кПа в результаті зміни складу паливо-повітряної суміші і різкого її збагачення. При цьому в режимі перед збагаченням коефіцієнт надміру повітря $\alpha = 0,98 \dots 0,99$, тобто суміш близька до стехіометричної. Так як цей режим за положенням дросельної заслінки і розрідженням близький до повного навантаження це дає підставу прийняти концентрації ЗР при повному навантаженні такі ж як і в цьому режимі в випадку, коли збагачення суміші не здійснювали, а з добавкою закису азоту при повному відкритті дросельної заслінки і розрідженні $\Delta p_k = 0$ двигун працює на стехіометричній суміші. При такому допущенні, точність якого буде перевірена експериментально, можна очікувати показники при переході від збагаченої суміші до стехіометричної на рівні: $\alpha = 0,98 \dots 0,99$, $CO = 1,0$ %, $CO_2 = 14,0$ %, $C_m H_n = 70$ млн⁻¹, $NO_x = 2380$ млн⁻¹. Задача полягає в порівнянні цих екологічних показників з наведеними вище показниками, отриманими експериментально.

Відомо, що більш об'єктивним показником забруднення двигуном навколишнього середовища є не концентрації ЗР, а їх масові викиди, віднесені до одиниці часу або роботи. Разом з тим, як зазначено вище, годинна витрата бензину при переході до стехіометричної суміші залишається однаковою, а змінюється повітряний заряд добавкою закису азоту. Повітряний заряд входить в залежність для розрахунку масових викидів ЗР [4]

$$G_i = \frac{C_i}{100} \cdot \mu_i \cdot a \cdot (b \cdot G_{\text{п}} + G_{\text{пов}}), \quad (4)$$

де G_i – маса ЗР, кг/год; C_i – i -концентрації i -ї шкідливої речовини, %; μ_i – молярна маса i -ї шкідливої речовини, кг/кмоль; a і b – розраховані коефіцієнти встановлені для випадків розрахунку кількості сухих і вологих продуктів згорання за умови згорання бідних і багатих сумішей [4]; $G_{\text{п}}$ – годинна витрата палива, кг/год; $G_{\text{пов}}$ – годинна витрата повітря, кг/год.

Годинна витрата повітря незначно зростає в зв'язку з тим, що густина закису азоту більша в порівнянні з густиною повітря ($\rho_{N_2O} = 1,77$ кг/м³, $\rho_{\text{пов}} = 1,22$ кг/м³). Можлива похибка в визначенні повітряного заряду

$$G_{\text{пов}} = V_h \cdot \eta_v \cdot \rho_{\text{сум}}, \quad (5)$$

$\rho_{\text{сум}}$ – густина повітряного заряду при добавці N_2O , $\rho_{\text{сум}} = \rho_{\text{пов}} \cdot r_{\text{пов}} + \rho_{N_2O} \cdot r_{N_2O}$, для $r_{\text{пов}} = 0,894$, $r_{N_2O} = 0,106$, $\rho_{\text{сум}} = 1,28$ кг/м³. Похибка не перевищує 5 %, тому можна прийняти свіжий заряд по масі при добавці N_2O незмінним. Тоді порівняння екологічних показників двигуна за роботи на збагаченій суміші і на стехіометричній на першому етапі можна провести на концентраціях ЗР, зокрема приведенням концентрацій до оксиду вуглецю

$$G_{\Sigma CO} = CO + 3,16 \cdot C_m H_n \cdot 10^{-4} + 41,1 \cdot NO_x \cdot 10^{-4}, \quad \% \quad (6)$$

Сумарні, приведені до CO концентрації ЗР складають при $\alpha = 0,87$ $G_{\Sigma CO} = 9,48$ %, при $\alpha = 1,0$ $G_{\Sigma CO} = 10,8$ %, тобто для двигуна без системи нейтралізації екологічні показники практично однакові за роботи на збагаченій суміші і на стехіометричній суміші.

Сучасні двигуни з іскровим запалюванням обладнані каталітичними трикомпонентними нейтралізаторами. Коефіцієнт ефективності такого нейтралізатора при стехіометричному складі суміші становить [4] $K_{CO} = 95$ %, $K_{CH} = 85$ %, $K_{NO_x} = 95$ %, при збагаченій суміші ($\alpha = 0,87$) $K_{CO} = 35$ %, $K_{CH} = 25$ %, $K_{NO_x} = 95$ %. При таких коефіцієнтах ефективності нейтралізації приведені до CO концентрації при збагаченій суміші $G_{\Sigma CO} = 5,61$ %, при стехіометричній суміші $G_{\Sigma CO} = 0,542$ %. Таким чином можна стверджувати, що використовуючи добавку кисневмісного газу N_2O можливо значно поліпшити екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням з системою впорскування і каталітичним нейтралізатором в режимах повних навантажень. Питання зміни енергетичних показників двигуна при переході від роботи на збагаченій бензоповітряній суміші до стехіометричної суміші потребує додаткових досліджень.

Висновки.

Добавка кисневмісного газу – закису азоту до повітряного заряду двигуна з іскровим запалюванням неоднозначно впливає на показники двигуна за роботи з повним навантаженням. Змінюючи склад паливо-повітряної суміші добавкою закису азоту до повітряного заряду двигуна таким чином, щоб забезпечити його роботу при повному навантаженні на стехіометричній паливо-повітряній суміші, можливо значно поліпшити екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням з системою впорскування, зворотним зв'язком і каталітичним нейтралізатором. Разом з тим, якісна зміна паливо-повітряної суміші дозволяє забезпечити роботу двигуна без погіршення паливної економічності і енергетичних показників.

Розрахунки, проведені з використанням результатів експериментальних досліджень, отриманих на двигуні 6Ч9,5/6,98 з системою впорскування бензину, зворотним зв'язком і каталітичним нейтралізатором, показали, що добавкою закису азоту до повітряного заряду у кількості, яка забезпечує роботу двигуна на стехіометричній паливо-повітряній суміші ($\alpha = 1,0$), забезпечить отримання сумарних, приведених до CO концентрації ЗР на рівні 0,542% у порівнянні з відповідними концентраціями ЗР при роботі на збагаченій суміші ($\alpha = 0,87$), які становлять 5,61%. При цьому для двигуна без системи нейтралізації екологічні показники практично однакові за роботи на збагаченій суміші і на стехіометричній суміші та складають при $\alpha = 0,87$ $G_{SCO} = 9,48$ %, при $\alpha = 1,0$ $G_{SCO} = 10,8$ %.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гора, М.Д. Поліпшення енергетичних показників двигуна з іскровим запалюванням в режимах повних навантажень / М. Д. Гора // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». - К., 2022. - Вип. 53. - С. 104-109.
2. 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. – К. 2010. – 146 с.
3. Дядченко В.Л. Покращення паливної економічності багаточиліндрових 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. – К., 2010. – 172 с.
4. Екологія та автомобільний транспорт: навчальний посібник / Ю. Ф. Гутаревич, Д. В. Зеркалов, А. Г. Говорун, А. О. Корпач, Л. П. Мержиєвська. - К.: Арістей, 2006. – 292 с.

REFERENCES

1. Hora, M.D. Polipshennia enerhetichnykh pokaznykh dvyhuna z iskrovym zapaliuvanniam v rezhymakh povnykh navantazhen [Improvement of the energy indicators of the engine with spark ignition in full loads modes] / M. D. Hora // Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriiia "Tekhnichni nauky". - K., 2022. - Vyp. 53. - P. 104-109.
2. Harkusha Yu.V. Polipshennia enerhetichnykh pokaznykh i palyvnoi ekonomichnosti benzynovoho dvyhuna v rezhymakh povnykh navantazhen [Improving the energy performance and fuel economy of a gasoline engine at full load. Doct. Diss.]. Kyiv, 2010. 146 p.
3. Dyadchenko V.L. Pokrashchennia palyvnoi ekonomichnosti bahatotsylindrovyyh dvyhuniv z vporskuvanniam benzynu v rezhymakh malyh navantazhen i holostoho hodu [Improving the fuel economy of multi-cylinder engines with gasoline injection at low loads and idling. Doct. Diss.]. Kyiv, 2010. 172 p.
4. Ekolohiia ta avtomobilnyi transport: navchalnyi posibnyk [Ecology and road transport: study guide] / Yu.F. Hutarevych, D.V. Zerkalov, A.H. Hovorun, A.O. Korpach, L.P. Merzhievskia. – K.: Aristei, 2006. - 292 p.

РЕФЕРАТ

Гора М.Д. Поліпшення екологічних показників двигуна з іскровим запалюванням в режимах повних навантажень використанням закису азоту / М.Д. Гора // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал – К.: НТУ, 2023. – Вип. 1 (55).

У статті запропоновано метод поліпшення екологічних показників двигуна з іскровим запалюванням у режимах повних навантажень шляхом використання добавки закису азоту до повітряного заряду.

Об'єкт дослідження – вплив добавки закису азоту до повітряного заряду на екологічні показники при незмінній витраті палива двигуна з іскровим запалюванням у режимах повних навантажень.

Мета дослідження – теоретичне дослідження поліпшення умов для ефективної роботи каталітичного нейтралізатора при стехіометричному складі суміші без погіршення паливної економічності і енергетичних показників.

Наведені результати розрахункових досліджень впливу добавки кисневмісного газу – закису азоту до повітряного заряду на екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням, системою впорскування без використання каталітичного нейтралізатора та з використанням каталітичного нейтралізатора і зворотним зв'язком. Показано, що використанням добавки закису азоту можливо поліпшити екологічні показники сучасного бензинового двигуна без погіршення паливної економічності і енергетичних показників.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДВИГУН З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ, ЗАКИС АЗОТУ, ПАЛИВО-ПОВІТРЯНА СУМІШ, КОЕФІЦІЄНТ НАДМІРУ ПОВІТРЯ, КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН, МАСОВІ ВИКИДИ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН, ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ, СУМАРНІ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН.

ABSTRACT

Hora M.D. Improvement of the spark-ignition engine emissions in full-load mode using nitrous oxide. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2023. – Issue 1 (55).

The article proposes a method to improve the emissions of a spark-ignition engine in full-load mode by using nitrous oxide additive to the air charge.

The research object is the influence of the addition of nitrous oxide to the air charge on a spark-ignition engine emission at constant fuel consumption under full load.

The purpose of the study is a theoretical study of the improvement of the conditions for the effective operation of the catalytic converter at the stoichiometric composition of the mixture without deterioration of fuel efficiency and energy indicators.

The results of calculation studies of the impact of the addition of oxygen-containing gas - nitrous oxide to the air charge on the emissions of the spark-ignition engine with an injection system, feedback and with or without catalytic converter are given. It is shown that the use of nitrous oxide additives can improve the emissions of a modern gasoline engine without decreasing of fuel economy and performance.

KEYWORDS: SPARK IGNITION ENGINE, NITROUS OXIDE, FUEL-AIR MIXTURE, EXCESS AIR RATIO, CONCENTRATIONS OF POLLUTANTS, MASS EMISSIONS OF POLLUTANTS, ENVIRONMENTAL INDICATORS, TOTAL CONCENTRATIONS OF POLLUTANTS.

АВТОР:

Гора Микола Дмитрович, завідувач сектору, ДП «ДержавтотрансНДІпроект», e-mail: mgora@insat.org.ua, orcid.org/0000-0002-1574-3080, тел. +380442010863, Україна, 03113, м. Київ, просп. Перемоги 57, к. 7.

AUTHOR:

Hora Mykola Dmytrovych, head of sector, State Enterprise “State Road Transport Research Institute”, e-mail: mgora@insat.org.ua, orcid.org/0000-0002-1574-3080, ph. num. +380442010863, Ukraine, 03113, Kyiv, Peremohy avenue 57, k. 7.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Сахно В.П., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри «Автомобілі», Україна, Київ.

Клименко О.А., доктор технічних наук, доцент, ДП «ДержавтотрансНДІпроект», заступник директора з наукової роботи, Україна, Київ.

REVIEWER:

Sakhno V. PhD, Engineering (Dr.), professor, National Transport University, Head of Department of Automobiles, Ukraine, Kyiv.

Klymenko O. PhD, Engineering (Dr.), associate professor, State Enterprise “State Road Transport Research Institute”, Deputy Director for Research, Ukraine, Kyiv.