

УДК 621.43.068

Слинько Г.І., Сухонос Р.Ф.

ЗНИЖЕННЯ ТОКСИЧНОСТІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ У ДВОТАКТНИХ ДВЗ: СУЧАСНІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ, ЇХ НЕДОЛІКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Проаналізовано чинники підвищеної токсичності відпрацьованих газів двотактних двигунів внутрішнього згоряння та сучасні способи її зниження. Визначено переваги, недоліки й обмеження впровадження технічних рішень з урахуванням умов експлуатації, призначення двигуна та економічної доцільності.

Ключові слова: *безпосереднє впорскування, відпрацьовані гази, двотактний двигун, екологічність, економічність, каталітичний нейтралізатор, продувка, роздільне мащення.*

The factors causing increased toxicity of exhaust gases from two-stroke internal combustion engines and modern methods for reducing it are analyzed. The advantages, drawbacks, and limitations of implementing technical solutions are identified with regard to operating conditions, engine purpose, and economic feasibility.

Key words: *two-stroke engine, exhaust gas, direct injection, scavenging, separate lubrication, catalytic converter, environmental friendliness, economy.*

Двотактні двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) тривалий час зберігають практичне значення в тих сегментах техніки, де пріоритетними є висока питома потужність, мала маса, конструктивна простота, компактність і здатність працювати в автономних умовах. Вони широко застосовуються в мотоциклетній техніці, на маломірних суднах, у ручному механізованому інструменті, переносних енергетичних установках, безпілотних системах, а також у деяких видах спеціальної техніки. Разом із цим саме двотактні ДВЗ характеризуються підвищеним рівнем токсичності відпрацьованих газів, що обумовлено особливостями газообміну, сумішотворення та мащення. У сучасних умовах посилення екологічних вимог це суттєво звужує сферу їх ефективного використання та вимагає впровадження технічних рішень, спрямованих на зниження викидів шкідливих речовин.

Основними причинами високої токсичності відпрацьованих газів у двотактних двигунах є втрати частини свіжого заряду під час продувки циліндра, неповне згоряння паливоповітряної суміші, а також потрапляння продуктів згоряння мастила до складу відпрацьованих газів. Перекриття процесів випуску і наповнення призводить до потрапляння незгорілого палива у випускну систему, що зумовлює підвищення концентрації вуглеводнів. Використання паливно-мастильної суміші в традиційних конструкціях сприяє збільшенню викидів чадного газу, димності та утворенню твердих частинок. Додатково на екологічні показники негативно впливають нестабільність складу робочої суміші та обмежені можливості точного керування процесом згоряння в простих карбюраторних системах.

Одним із найрезультативніших напрямів зниження токсичності є застосування систем безпосереднього впорскування палива. Таке рішення дозволяє подавати паливо після закінчення основної фази продувки, зменшуючи втрати свіжого заряду через випускні вікна. Унаслідок цього скорочуються викиди незгорілих вуглеводнів, покращується паливна економічність і підвищується стабільність робочого процесу. Проте зазначене рішення має і суттєві недоліки. Насамперед це ускладнення конструкції двигуна, зростання вартості системи живлення, підвищення вимог до якості палива та сервісного обслуговування. Для малогабаритної техніки, де визначальними чинниками є дешевизна, ремонтпридатність і технологічна простота, впровадження безпосереднього впорскування часто є економічно недостатньо обґрунтованим. Крім того, в умовах запиленості, високої вологості, змінного температурного середовища, характерного для ручного інструменту чи польової техніки, електронно-керовані

системи можуть демонструвати меншу експлуатаційну надійність порівняно з простішими механічними рішеннями.

Суттєвий ефект може бути досягнутий шляхом оптимізації процесу продувки циліндра. Удосконалення форми і розміщення продувних та випускних вікон, налаштування хвильових процесів у випускній системі, використання резонансних трубопроводів та вдосконалення аеродинаміки каналів сприяють кращому очищенню циліндра від залишкових газів і зменшенню виносу свіжого заряду. Однак такі рішення, як правило, забезпечують високий ефект лише в обмеженому діапазоні частот обертання та навантажень. Це особливо важливо для двигунів універсального призначення, що працюють у змінних режимах, наприклад у бензопилах чи мотокосах. Для таких сфер застосування вузькодіапазонне налаштування газодинаміки не завжди гарантує стабільне покращення екологічних показників у реальних умовах експлуатації. Крім того, складніша геометрія каналів і випускної системи може ускладнювати виробництво та збільшувати вимоги до точності виготовлення.

Важливим способом зменшення токсичності є перехід від змішаної системи мащення до роздільної. Дозоване подавання мастильного матеріалу безпосередньо в зони тертя знижує його загальну витрату і, відповідно, скорочує кількість продуктів згоряння мастила у відпрацьованих газах. Також це сприяє зменшенню нагароутворення та підвищенню ресурсу деталей двигуна. Разом із тим роздільне мащення вимагає ускладнення системи мащення, потребує точного дозування оливи. Для техніки, яка працює у віддалених або важкодоступних умовах, наприклад у лісовому господарстві, на маломірних суднах, простота традиційного змішування палива з мастилом іноді виявляється більш прийнятною з погляду експлуатаційної надійності, навіть попри гірші екологічні характеристики.

Перспективним напрямом є використання каталітичних нейтралізаторів у випускних системах двотактних ДВЗ. Їх застосування дозволяє зменшувати концентрацію оксиду вуглецю та незгорілих вуглеводнів у відпрацьованих газах. Проте ефективність каталітичного очищення у двотактних двигунах обмежується низкою факторів. По-перше, склад газів таких двигунів є менш стабільним, що ускладнює підтримання оптимального режиму роботи каталізатора. По-друге, наявність у відпрацьованих газах залишків вуглеводнів від палива та мастила пришвидшує деградацію каталітичного матеріалу. По-третє, для малогабаритної ручної техніки додатковий опір випуску, збільшення габаритів і вартості системи є небажаними. В умовах обмеженого монтажного простору, жорстких масогабаритних вимог і потреби у високій мобільності застосування каталізаторів має обмежений характер.

Окрему групу рішень становить удосконалення систем запалювання, електронного керування подачею палива та використання цифрових алгоритмів регулювання режимів роботи. Такі засоби дозволяють точніше адаптувати параметри двигуна до змін навантаження, температури та зовнішніх умов, сприяючи зменшенню токсичності та підвищенню економічності. Водночас їх недоліками є вища ціна, залежність від джерел електроживлення, ускладнення діагностики та ремонту, а також більша чутливість до вологості, вібрацій і електромагнітних перешкод. Саме тому доцільність упровадження електронних систем значною мірою залежить від конкретної сфери використання двигуна. Якщо в безпілотних літальних апаратах або спеціалізованих силових установках така модернізація може бути технічно й економічно виправданою, то для масової дешевої переносної техніки вона часто суперечить вимогам мінімізації собівартості.

Зменшенню токсичності відпрацьованих газів також може сприяти застосування альтернативних палив і сучасних синтетичних мастильних матеріалів. Використання нових видів палив потенційно дозволяє знизити димність, концентрацію оксиду вуглецю та деяких інших шкідливих компонентів. Синтетичні мастила з меншою схильністю до нагароутворення також покращують екологічні характеристики двигуна. Однак ці рішення не усувають базових конструктивних недоліків двотактного циклу, пов'язаних із втратою частини свіжого заряду під час продувки. Крім того, альтернативні палива можуть потребувати зміни параметрів системи живлення, корекції кута випередження запалювання та адаптації матеріалів паливної апаратури.

тури. Для багатьох категорій техніки додатковим обмеженням є доступність відповідного палива в польових умовах та відсутність належної інфраструктури його постачання.

Слід підкреслити, що область застосування двотактних двигунів сама по собі визначає межі впровадження екологічних удосконалень. Такі двигуни переважно використовуються там, де вирішальне значення мають низька маса, компактність, висока питома потужність, швидкий набір обертів і конструктивна простота. Саме ці переваги можуть бути частково втрачені при надмірному ускладненні двигуна додатковими системами впорскування, каталізаторами, насосами, датчиками та електронними блоками керування. У результаті виникає суперечність між екологічною модернізацією та базовими експлуатаційними перевагами двотактного ДВЗ. Для ряду застосувань, зокрема в ручному інструменті, перехід на складніші конструкції може знизити рентабельність використання самого двигуна як класу.

Висновки. Зниження токсичності відпрацьованих газів двотактних ДВЗ потребує комплексного поєднання конструктивних, паливних і керувальних заходів, зокрема вдосконалення газообміну, застосування безпосереднього впорскування, роздільного мащення, каталітичної нейтралізації та електронного керування. Водночас кожне з наведених рішень супроводжується технічними, економічними та експлуатаційними обмеженнями. Тому перспективним є диференційований підхід до екологічної модернізації двотактних ДВЗ, за якого вибір технічних засобів визначається умовами експлуатації, функціональним призначенням двигуна та економічною доцільністю.

Список використаних джерел

1. Mattarelli E., Rinaldini, C. Two-Stroke Gasoline Engines for Small-Medium Passenger Cars. *SAE Technical Paper*. 2015. 2015-01-1284. DOI: 10.4271/2015-01-1284
2. Korohodskyi V., Manoylo V., Kryshchuk S., Gogorenko O., Slynko G., Khomutov M., Skrypnyk N. Determination of properties of the working medium in the cylinder of a two-stroke engine with spark ignition during combustion of a stratified fuel-air charge. *AIP Conference Proceedings*. 16 July 2025; 3428 (1): 020006. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5183859>
3. Mavinahally N. S. An Historical Overview of Stratified Scavenged Two-Stroke Engines - 1901 through 2003. *SAE Technical Paper*. 2004. 2004-32-0008. DOI: 10.4271/2004-32-0008.
4. Ciampolini M., Raspanti S., Romani L., Ferrara G., Merolla S., Gagliardi V. On the Effects of Piston Pocket, Intake Port, and Transfer Duct Geometries in a Small Stratified-Scavenging Two-Stroke Engine. *SAE Technical Papers*. 24 Oct 2023. DOI: 10.4271/2023-01-1825
5. Слинько Г. І., Сухонос Р. Ф., Слинько В. В., Лук'яненко В. П. Дослідження впливу резонансного наддуву бензинового двотактного двигуна на його швидкісну характеристику. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2024. № 4. С. 59–66. DOI: 10.15588/1607-6885-2024-4-6
6. Слинько Г. І., Сухонос Р. Ф. Аналіз технічного рівня двотактних двигунів для бензопил. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії '2025 : Міжнародна конференція, 11–12 березня 2025 р. : тези доповіді*. Харків : ФОП Бровін О.В., 2025. С. 44–47.
7. Patschull J., Roth P. Measurement and reduction of particles emitted from a two-stroke engine. *Journal of Aerosol Science*. 1995. Vol. 26, Issue 6. P. 979–987. DOI: 10.1016/0021-8502(95)00022-5
8. Слинько Г. І., Сухонос Р. Ф., Слинько В. В. Аналіз напрямків покращення економічності та екологічності 2-тактних двигунів внутрішнього згорання. *Інноваційні аспекти розвитку автомобільного транспорту України : Міжнарод. наук.-практ. конф., 16-18 травня 2023 р. : тези доповіді*. Кам'янське : ДДТУ, 2023. С. 123–125.
9. Корогодський В. А. Наукові основи перспективних робочих процесів двигунів з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / Корогодський Володимир Анатолійович. Харків, 2018. 499 с
10. Slynko G., Sukhonos R. Small Stratified-Scavenging Two-Stroke Internal Combustion Engine. *Тиждень науки-2025. Транспортний факультет. Науково-практ. конф., Запоріжжя, 14-18 квітня 2025 р. : тези доповіді*. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. С. 18–20.

11. Slynko G., Sukhonos R. Methods for Improving 2-stroke Internal Combustion Engines. *Тиждень науки-2024. Транспортний факультет. Науково-практ. конф., Запоріжжя, 15-19 квітня 2024 р.: тези доповіді.* Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2024. С. 81–83.

Слинько Георгій Іванович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри «Автомобілі, теплові двигуни та гібридні енергетичні установки» транспортного факультету Національного університету «Запорізька політехніка» (69063, м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64, ауд. 131, e-mail: gslynko@zp.edu.ua).

Сухонос Роман Федорович – магістр, старший викладач кафедри «Автомобілі, теплові двигуни та гібридні енергетичні установки» транспортного факультету Національного університету «Запорізька політехніка» (69063, м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64, ауд. 135, e-mail: romevs@zp.edu.ua).

Slynko Georgiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, Faculty of Transport, National University "Zaporizhzhia Polytechnic" (69063, Zaporizhzhia, Universytetska Street, 64, room 131, e-mail: gslynko@zp.edu.ua).

Sukhonos Roman – Master, senior teacher of Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, Faculty of Transport, National University "Zaporizhzhia Polytechnic" (69063, Zaporizhzhia, Universytetska Street, 64, room 135, e-mail: romevs@zp.edu.ua).