

САФТЮК ЯРОСЛАВ

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0009-0003-9730-7198>e-mail: groupyaslav@gmail.com

ВПЛИВ ШКІДЛИВИХ ДОМІШОК В ПАЛИВІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

У роботі проаналізовано вплив шкідливих домішок у моторних паливах на ефективність, довговічність та екологічні показники сучасних бензинових і дизельних двигунів внутрішнього згорання з акцентом на системи Common Rail та GDI. Розглянуто вимоги Euro-5/6 і стандарти ДСТУ 7687:2015 та ДСТУ 7688:2015, а також систематизовано основні забруднювачі, що виникають під час виробництва, транспортування, зберігання та експлуатації палива: сірковмісні сполуки, вода, механічні частинки/зола, смолисті речовини й нестабільні фракції, поліциклічні ароматичні вуглеводні, важкі фракції та біологічні забруднення. Показано, що домішки діють комплексно й кумулятивно, змінюючи фізико-хімічні властивості палива та порушуючи процеси сумішоутворення і згорання, що спричиняє погіршення розпилення, утворення відкладень і нагару, корозійне та абразивне зношування елементів паливної системи й циліндро-поршневої групи, а також зниження ефективності систем нейтралізації. Типові наслідки включають засмічення фільтрів, деградацію форсунок, інтенсивне нагароутворення та забруднення каталізатора, що призводить до втрати потужності, зростання питомої витрати палива й токсичності викидів. Обґрунтовано потребу оперативного контролю якості палива та розвитку експрес-методів моніторингу в умовах експлуатації.

Ключові слова: нафтопродукти, сірка, екологічні стандарти, система живлення, паливна система, суміш, алгоритм керування, енергоефективність, турбулентність, параметри, дизельне паливо, бензин.

SAFTIUK YAROSLAV

Vinnytsia National Agrarian University

INFLUENCE OF HARMFUL IMPURITIES IN FUEL ON THE EFFICIENCY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE OPERATION

The paper analyses how harmful impurities in motor fuels affect the efficiency, durability and emission performance of modern gasoline and diesel internal combustion engines, with emphasis on high-pressure injection systems such as Common Rail and gasoline direct injection (GDI). Fuel-quality constraints aligned with Euro-5/6 and the Ukrainian standards DSTU 7687:2015 (gasoline) and DSTU 7688:2015 (diesel fuel) are considered. The most relevant contaminants arising during fuel production, transportation, storage and on-vehicle operation are systematized: sulfur-containing compounds, water, mechanical particles/ash, resinous substances and unstable fractions, polycyclic aromatic hydrocarbons, heavy hydrocarbon fractions and biological contamination. It is shown that impurities act in a coupled and cumulative way, altering physicochemical properties of the fuel and disturbing key in-cylinder processes (mixture formation, combustion stability, heat transfer and gas exchange). As a result, injector spray quality deteriorates, deposits and carbon build-up intensify, corrosion and abrasive wear of fuel-system components and the cylinder–piston group accelerate, and aftertreatment efficiency decreases. Typical operational outcomes are illustrated by fuel-filter clogging, injector deposit formation, intensive deposits in the combustion chamber and catalyst fouling, which collectively lead to power loss, higher specific fuel consumption and increased toxic emissions. The need for rapid on-site fuel quality assessment and further development of express monitoring methods suitable for operational conditions is substantiated. Regulatory limit values for sulfur and water, mechanical impurities, aromatics and stability are summarized to support interpretation of mechanisms.

Keywords: petroleum products; sulfur; environmental standards; fuel supply system; fuel system; mixture; control algorithm; energy efficiency; turbulence; parameters; diesel fuel; gasoline.

Стаття надійшла до редакції / Received 05.05.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Сафтьок Ярослав

Постановка проблеми

Сучасне двигунобудування стрімко розвивається в напрямку впровадження технологій, що забезпечують підвищення паливної економічності, зниження шкідливих викидів та зростання експлуатаційної надійності як дизельних, так і бензинових двигунів внутрішнього згорання. Однією з ключових інновацій у дизельному сегменті є система впорскування палива Common Rail, яка забезпечує високоточне керування процесом згорання та дає змогу зменшувати викиди оксидів азоту (NO_x), твердих частинок і вуглекислого газу (CO₂), що відповідає сучасним вимогам екологічного регулювання.

Разом із тим у бензинових двигунах широкого поширення набули системи безпосереднього впорскування палива (GDI), які працюють за підвищених тисків і характеризуються високою чутливістю до фізико-хімічних властивостей бензину. Відхилення складу пального від нормативних вимог, зокрема наявність води, механічних домішок, смолистих речовин або нестабільних фракцій, призводять до порушення процесів сумішоутворення, утворення відкладень на форсунках і впускних клапанах, а також до зростання детонаційної схильності двигуна.

Незважаючи на очевидні переваги сучасних систем упорскування, ефективність і довговічність їх роботи значною мірою залежать від стабільної якості палива. Для дизельних двигунів забруднення пального спричиняє передчасне зношування форсунок і насосів високого тиску, тоді як у бензинових двигунах це призводить до

погіршення якості розпилення, нестабільності згоряння та зростання викидів незгорілих вуглеводнів. У результаті знижуються експлуатаційні характеристики двигуна і зростає ймовірність серйозних технічних відмов.

Аналіз останніх джерел

Проблематика забезпечення якості моторних палив і впливу шкідливих домішок на роботу двигунів внутрішнього згоряння широко висвітлена у сучасних наукових дослідженнях. У роботі Білинського Й.Й., подано систематизований огляд методів визначення вмісту сірки в нафтопродуктах, підкреслено її природну присутність у нафті [1]. Автор вказує, що сірковмісні домішки знижують корозійну стійкість елементів паливної системи, прискорюють зношування двигуна та погіршують екологічні показники, що робить актуальним застосування точних і швидких методів контролю вмісту сірки.

У дослідженні Крайнюка О. В. акцент робиться на відповідності моторних палив європейським екологічним нормам. Зазначається, що сучасні вимоги Євро-5/6 передбачають суттєве обмеження вмісту сірки, бензолу, ароматичних вуглеводнів, смолистих речовин та води. Наголошується, що неякісне паливо спричиняє корозію, детонаційні явища, погіршення згоряння, підвищення токсичності відпрацьованих газів та порушення роботи каталізаторів і системи нейтралізації. У роботі також виділена проблема розбіжностей між українськими технологіями виробництва палив та вимогами європейських стандартів [2].

Важливим доповненням є праці Міткова Б. В. який на основі експериментальних досліджень показав, що відхилення фізико-хімічних показників бензину та дизельного палива від нормативних значень призводить до зниження потужності, перебоїв у роботі двигуна, збільшення витрати палива, закоксовування форсунок та інтенсивного зношування циліндро-поршневої групи [3].

Зарубіжні вчені також приділяють значну увагу цій проблемі. Зокрема, у роботах Н. Zhao, С. Eastwood, R. Stone, J. Heywood та інших дослідників зазначено, що відхилення якості палива безпосередньо впливають на характеристики сумішоутворення, температурні режими, турбулентність горіння, формування нагару та викиди оксидів азоту й вуглецю [4,5,6]. Наголошується, що вміст сірки й ароматичних вуглеводнів погіршує індикаторні показники двигуна, спричиняє деградацію каталізаторів і збільшує екологічне навантаження. J. Heywood підкреслює важливість стабільності хімічного складу палива для коректної роботи алгоритмів керування двигуном і систем упорскування у сучасних бензинових та дизельних ДВЗ [5].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: комплексний аналіз впливу шкідливих домішок у моторних паливах на ефективність роботи двигуна внутрішнього згоряння, з урахуванням сучасних екологічних вимог та особливостей функціонування паливних систем і алгоритмів керування, а також обґрунтування необхідності оперативного контролю якості палива в умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Моторні палива є складними багатокомпонентними системами, у складі яких поряд з основними вуглеводневими фракціями можуть бути присутні різноманітні шкідливі домішки. До найбільш поширених і небезпечних домішок належать сірковмісні сполуки, вода, механічні частинки, смолисті речовини, зола, поліциклічні ароматичні вуглеводні, важкі вуглеводневі фракції, а також біологічні забруднення [7].

Сірка міститься в нафті у вигляді меркаптанів, сульфідів, дисульфідів і тіофенів і є однією з найбільш небезпечних домішок для двигунів внутрішнього згоряння [1]. Навіть після процесів гідроочищення певна її кількість залишається у готових бензинах і дизельному паливі, а під час згоряння сірковмісних сполук утворюються оксиди сірки, що спричиняють корозію елементів паливної системи та камери згоряння [4]. Вода в паливі може бути розчиненою, емульгованою або перебувати у вільному стані та потрапляє в нього під час транспортування, зберігання або внаслідок конденсації в резервуарах [5].

Механічні домішки представлені частинками пилу, корозійними продуктами резервуарів, трубопроводів і паливної апаратури рис. 1. Смолисті речовини, пероксиди та нестабільні фракції утворюються внаслідок окиснювального старіння палива під дією кисню, температурних коливань і каталізуючого впливу металевих поверхонь. Значна частина зазначених домішок може потрапляти в паливо або інтенсивно накопичуватися під час зберігання на нафтобазах, зокрема внаслідок конденсації вологи в резервуарах, корозії їх внутрішніх поверхонь, недостатнього очищення ємностей та тривалого зберігання без оновлення палива (рис. 1). Додатковим джерелом забруднення є перевезення палива автомобільними та залізничними цистернами, де можливе потрапляння механічних частинок, води та продуктів корозії через негерметичність, залишки попередніх вантажів і температурні коливання [7]. Під час експлуатації транспортного засобу домішки можуть також утворюватися або накопичуватися безпосередньо в паливній системі, зокрема внаслідок корозії паливного бака, старіння палива, утворення осаду та розвитку мікроорганізмів за наявності води. Для дизельних палив характерна наявність біологічних забруднень (бактерій і грибів), які розвиваються на межі «паливо–вода» та утворюють слизові відкладення, що призводять до засмічення фільтрів і порушення подачі пального [6].

Таким чином, наявність різноманітних шкідливих домішок у моторних паливах обумовлює комплексний негативний вплив як на фізико-хімічні властивості палива, так і на робочі процеси двигуна внутрішнього згоряння. Це зумовлює необхідність жорсткого нормативного регулювання якості палива та переходу до аналізу екологічних і технічних стандартів, що встановлюють допустимі межі вмісту шкідливих компонентів [9].



Рис. 1. Зберігання нафтопродуктів у металевих резервуарах

Нормативні вимоги до якості моторних палив в Україні та країнах Європейського Союзу сформовані з урахуванням сучасних екологічних обмежень, технологічних особливостей двигунів внутрішнього згоряння та необхідності забезпечення стабільної роботи систем упорскування і нейтралізації відпрацьованих газів. Основу нормативного регулювання становлять стандарти Euro-5 та Euro-6 [9,10], а також гармонізовані з ними національні стандарти ДСТУ 7687:2015 для автомобільних бензинів і ДСТУ 7688:2015 для дизельного палива [11-12] наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні нормативні вимоги до якості моторних палив згідно з Euro 5,6 та ДСТУ

Показник	Бензин (ДСТУ 7687:2015, Euro-5/6)	Дизельне паливо (ДСТУ 7688:2015, Euro-5/6)
Масова частка сірки, ppm	≤ 10	≤ 10
Вміст води	Вільна вода відсутня	≤ 200 мг/кг
Механічні домішки	Відсутні	≤ 24 мг/кг
Октанове / цетанове число	≥ 95 (RON)	≥ 51
Ароматичні вуглеводні	≤ 35 % (об.)	≤ 11 % (ПАВ)
Смолисті речовини	≤ 5 мг/100 см ³	≤ 25 мг/100 см ³
Густина при 15 °C	720–775 кг/м ³	820–845 кг/м ³
Кінематична в'язкість при 40 °C	—	2,0–4,5 мм ² /с
Змащувальна здатність (HFRR)	—	≤ 460 мкм
Зольність	≤ 0,01 %	≤ 0,01 %

Таким чином, нормативні вимоги до якості моторних палив мають комплексний характер і охоплюють як екологічні, так і експлуатаційні параметри. Дотримання встановлених стандартів є необхідною умовою забезпечення стабільності складу палива та створює базу для подальшого аналізу впливу шкідливих домішок на робочі процеси двигуна внутрішнього згоряння.

Наявність шкідливих домішок у моторному паливі призводить до комплексних змін перебігу робочих процесів у двигуні внутрішнього згоряння, зокрема процесів сумішоутворення, згоряння, теплообміну та газообміну. Домішки впливають не ізольовано, а взаємопов'язано, змінюючи як фізико-хімічні властивості палива, так і умови роботи елементів паливної системи та циліндро-поршневої групи.

Сірковмісні сполуки під час згоряння утворюють оксиди сірки, які в присутності водяної пари формують агресивні кислоти. Це призводить до корозійного ураження паливної апаратури, камери згоряння та випускного тракту, а також до прискореного старіння моторної оливи. У довготривалій перспективі такі процеси знижують механічну ефективність двигуна та скорочують його ресурс [4].

Вода, що міститься в паливі у розчиненому або вільному стані, погіршує якість розпилення, знижує температуру горіння та спричиняє нестабільність займання. У дизельних двигунах наявність води викликає кавітаційне руйнування плунжерних пар і форсунок, а також порушення точності дозування палива. Це безпосередньо відображається на нерівномірності роботи двигуна та зростанні питомої витрати палива [5].

Механічні домішки та зола чинять абразивну дію на високоточні елементи паливної апаратури та поверхні тертя циліндро-поршневої групи. Навіть незначні концентрації твердих частинок у паливі призводять до прискореного зношування форсунок, паливних насосів і поршневих кілець, що знижує герметичність камери згоряння та погіршує умови згоряння палива [3].

Смолисті речовини, поліциклічні ароматичні вуглеводні та важкі фракції сприяють утворенню нагару й відкладень на форсунках, клапанах, поршнях і стінках циліндрів. Це змінює геометрію проточних каналів, порушує структуру факела розпилення та погіршує турбулентність паливовоздушної суміші. У результаті зменшується повнота згоряння, знижується індикаторний ККД і зростає рівень токсичних викидів [4].

Біологічні забруднення, характерні переважно для дизельних палив, утворюють слизові та кислотні відкладення, що призводять до швидкого засмічення фільтрів і нестабільної подачі пального. Це особливо небезпечно для двигунів із системами Common Rail [6].

Таким чином, шкідливі домішки в паливі зумовлюють зниження ефективної потужності двигуна, зростання питомої витрати палива, погіршення екологічних показників і скорочення ресурсу його основних вузлів. У сукупності це підтверджує необхідність не лише нормативного контролю якості палива, а й подальшого вдосконалення методів оперативного оцінювання його складу в умовах експлуатації. Негативний вплив домішок має комплексний і кумулятивний характер, оскільки одночасно прискорює знос паливної апаратури, погіршує процеси сумішоутворення та підвищує інтенсивність нагароутворення. Наочні практичні наслідки такого впливу наведено на рисунках нижче (рис. 2–5).

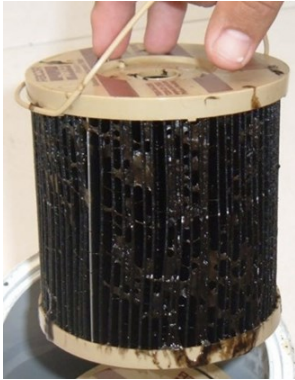


Рис. 2. Забруднений паливний фільтр



Рис. 3. Нагароутворення та відкладення на елементах циліндро-поршневої групи



Рис. 4. Порівняння “чистої” та “забрудненої/пошкодженої” форсунки



Рис. 5. Забруднений (закоксований) каталізатор

Практичні наслідки використання палива з підвищеним вмістом нижче перерахованих домішок та забруднень наочно проявляються у стані паливних фільтрів (рис. 2.). Засмічення фільтрувальних елементів механічними частинками, водою та біологічними утвореннями знижує пропускну здатність паливної системи, спричиняє падіння тиску та призводить до перебоїв у роботі двигуна, особливо на перехідних режимах. Для систем високого тиску (зокрема Common Rail та GDI).

Наслідком порушення фільтрації та погіршення якості палива є прискорене забруднення і деградація форсунок (рис. 4.): утворення відкладень на розпилювачі змінює форму факела, погіршує дисперсність палива та сумішоутворення, підвищує нерівномірність подачі по циліндрах. Це супроводжується нестабільністю згоряння, зростанням димності та токсичності відпрацьованих газів, а також збільшенням питомої витрати палива внаслідок відхилення від оптимальних режимів горіння [13].

У камері згоряння та на деталях циліндро-поршневої групи (рис. 3.) при згорянні палива з підвищеним вмістом смолистих речовин, сірки та важких фракцій інтенсивно формуються вуглецеві відкладення. Це погіршує теплообмін, підвищує термічні навантаження на поршні й клапани, сприяє закоксовуванню поршневих кілець, зниженню компресії та, як наслідок, падінню ефективної потужності й паливної економічності двигуна [3].

Погіршення процесів згоряння безпосередньо впливає і на працездатність систем нейтралізації. На рис. 5 показано забруднення (часткове “забивання”) стільникової структури каталізатора продуктами неповного згоряння та зольними/сажовими відкладеннями. Зменшення активної площі поверхні та зростання опору у випускній системі знижують ефективність перетворення CO, HC і NOx та підвищують протитиск вихлопу. Наслідком можуть бути погіршення динаміки, зростання температурних навантажень на елементи випуску та збільшення викидів, що ускладнює виконання вимог Euro-5/6 [14, 15].

Слід зазначити, що лабораторні методи контролю якості моторних палив, попри високу точність, не забезпечують оперативного виявлення змін складу палива під час транспортування та експлуатації. Це обумовлює актуальність розроблення експрес-методів контролю, здатних швидко оцінювати наявність шкідливих домішок безпосередньо в умовах роботи двигуна [7].

Висновки

Встановлено, що шкідливі домішки в моторних паливах (сірковмісні сполуки, вода, механічні частинки/зола, смолисті речовини, важкі фракції, ПАВ та біологічні забруднення) діють комплексно й кумулятивно, змінюючи фізико-хімічні властивості палива та порушуючи процеси сумішоутворення і згоряння у сучасних бензинових і дизельних ДВЗ. Це призводить до погіршення розпилення, нестабільності горіння, інтенсивного утворення відкладень і нагару, корозійного та абразивного зношування елементів паливної системи й циліндро-поршневої групи, що в підсумку спричиняє втрату потужності, зростання питомої витрати палива та підвищення токсичності викидів. Найбільш чутливими до забруднення є системи Common Rail і GDI через високі тиски та високоточні елементи дозування, тому навіть незначні відхилення якості палива можуть викликати засмічення фільтрів, деградацію форсунок, нагароутворення й зниження ефективності систем нейтралізації, що наочно продемонстровано на рисунках (рис. 2–5). Узагальнення вимог Euro-5/6 та ДСТУ 7687:2015 і ДСТУ 7688:2015 підтверджує критичну важливість дотримання обмежень щодо сірки, води та механічних домішок для забезпечення надійності й екологічних показників. Водночас лабораторний контроль не забезпечує оперативного виявлення змін складу палива під час транспортування та експлуатації, що обґрунтовує потребу розвитку експрес-методів і засобів швидкого моніторингу якості палива в реальних умовах роботи двигуна.

Література

1. Білинський Й. Й., Городецька О. В., Кротевич Я. В. Огляд методів визначення вмісту сірки в нафтопродуктах. *Наукові праці ВНТУ*, 2015. С. 1–7.
2. Крайнюк О. В., Буц Ю. В., Барбашин В. В. Контроль якості моторних палив з метою забезпечення відповідності вимогам екологічної безпеки. *Вісник ХНАДУ*, 2019. С. 80–89.
3. Мітков Б. В. Вплив якості палива, що реалізується АЗС України, на роботу двигунів внутрішнього згоряння. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2013. № 3. С. 40–50.
4. Zhao H., Ladommatos N. Engine performance and emissions with varying fuel quality. *Fuel*, 2013, Vol. 107, P. 656–668.
5. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 2018. 1085 p.
6. Eastwood C. *Emissions Control in Internal Combustion Engines*. London: Professional Engineering Publishing, 2000. 250 p.
7. Капустян О. Є. Якість моторних палив та їх вплив на надійність двигунів внутрішнього згоряння. Київ: НТУ, 2012. 210 с.
8. Stone R. *Introduction to Internal Combustion Engines*. 4th ed. London: Palgrave Macmillan, 2012. 450 p.
9. EN 228:2012. Automotive fuels. Unleaded petrol. Requirements and test methods. Brussels: European Committee for Standardization, 2012. 24 p.
10. EN 590:2013. Automotive fuels. Diesel. Requirements and test methods. Brussels: European Committee for Standardization, 2013. 28 p.
11. ДСТУ 7687:2015 Бензини автомобільні євро. Технічні умови На заміну ДСТУ 4839:2007. [Чинний від: 01.01.2016]. Київ: К.: Держспоживстандарт України, 2015. 20 с.
12. ДСТУ 7688:2015 Паливо дизельне євро. Технічні умови. На заміну ДСТУ 4840:2007. [Чинний від: 01.01.2016]. Київ: Держспоживстандарт України, 2015. 18 с.
13. ISO 12205:2018. Petroleum products. Determination of oxidation stability of middle distillate fuels. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 18 p.
14. Kalghatgi G. Fuel/Engine Interactions. *SAE International Journal of Engines*, 2014. Vol. 7(1). P. 1–23.
15. Turns S. R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012. 752 p.

References

1. Bilynskiy Y. Y., Horodetska O. V., Krotevych Ya. V. Ohliad metodiv vyznachennia vmistu sirky v naftoproduktakh. *Naukovi pratsi VNTU*, 2015. S. 1–7.
2. Krainiuk O. V., Buts Yu. V., Barbashyn V. V. Kontrol yakosti motornykh palyv z metoiu zabezpechennia vidpovidnosti vymoham ekolohichnoi bezpeky. *Visnyk KhNADU*, 2019. S. 80–89.
3. Mitkov B. V. Vplyv yakosti palyva, shcho realizuietsia AZS Ukrainy, na robotu dvyhunyiv vnutrishnoho zghoriannia. *Naukovyi visnyk TDAU*, 2013. № 3. S. 40–50.
4. Zhao H., Ladommatos N. Engine performance and emissions with varying fuel quality. *Fuel*, 2013, Vol. 107, P. 656–668.
5. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 2018. 1085 p.
6. Eastwood C. *Emissions Control in Internal Combustion Engines*. London: Professional Engineering Publishing, 2000. 250 p.
7. Kapustian O. Ye. Yakist motornykh palyv ta yikh vplyv na nadiinist dvyhunyiv vnutrishnoho zghoriannia. Kyiv: NTU, 2012. 210 s.
8. Stone R. *Introduction to Internal Combustion Engines*. 4th ed. London: Palgrave Macmillan, 2012. 450 p.
9. EN 228:2012. Automotive fuels. Unleaded petrol. Requirements and test methods. Brussels: European Committee for Standardization, 2012. 24 p.

-
10. EN 590:2013. Automotive fuels. Diesel. Requirements and test methods. Brussels: European Committee for Standardization, 2013. 28 p.
 11. DSTU 7687:2015 Benzyny avtomobilni yevro. Tekhnichni umovy Na zaminu DSTU 4839:2007. [Chynnyi vid: 01.01.2016]. Kyiv: K.: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2015. 20 s.
 12. DSTU 7688:2015 Palyvo dyzelne yevro. Tekhnichni umovy. Na zaminu DSTU 4840:2007. [Chynnyi vid: 01.01.2016]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2015. 18 s.
 13. ISO 12205:2018. Petroleum products. Determination of oxidation stability of middle distillate fuels. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 18 p.
 14. Kalghatgi G. Fuel/Engine Interactions. SAE International Journal of Engines, 2014. Vol. 7(1). P. 1–23.
 15. Turns S. R. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012. 752 p.