



**Oleksandr
V. Nester**
Нестер
Олександр
Васильович

УДК. 621.436:665.75

ANALYSIS OF METHODS FOR IMPROVING EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE BY ADDING HYDROGEN-CONTAINING GAS TO TRADITIONAL FUEL

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОСТІ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ШЛЯХОМ ДОДАВАННЯ ВОДНЕВМІСНОГО ГАЗУ ДО ТРАДИЦІЙНОГО ПАЛИВА

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2025.2\(21\).08](https://doi.org/10.15589/smi2025.2(21).08)

Oleksandr V. Nester Нестер Олександр Васильович,
аспірант
anester95@gmail.com
ORCID: 0009-0003-3447-2858

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв

Abstract. *Aim.* To investigate the prospects of using hydrogen-containing gas as an alternative fuel for internal combustion engines, considering its impact on fuel efficiency and environmental performance. *Methodology.* To achieve this goal, the method of systems analysis was used to identify interrelations between the composition of the fuel-air mixture and engine performance indicators. A critical review of scientific literature was conducted to identify technical solutions, and a comparative analysis of motor characteristics of conventional and alternative fuels was carried out. *Results.* Modern scientific approaches to the use of hydrogen-containing gas in internal combustion engines were summarized. It was demonstrated that internal mixture formation provides increased efficiency and reduces the risk of backfire. Dependencies were established between the air excess coefficient, ignition timing, compression ratio, and the formation of harmful components in exhaust gases. *Scientific novelty.* A systematic analysis of the influence of the specific composition of hydrogen-containing gas on combustion parameters and environmental performance of the engine was conducted, which allows the justification of optimal mixture formation conditions for achieving maximum efficiency. *Practical significance.* The obtained results can be used for the modernization of existing piston internal combustion engines of small-tonnage vessels to reduce pollutant emissions and improve efficiency through the use of alternative fuels.

Key words: hydrogen-containing gas; internal combustion engines; alternative fuel; emission reduction.

Анотація. *Мета.* Дослідити перспективи застосування водневмісного газу як альтернативного палива для двигунів внутрішнього згоряння з урахуванням його впливу на паливну економічність та екологічність. *Методика.* Для досягнення мети використано метод системного аналізу для визначення взаємозв'язків між складом паливно-повітряної суміші та показниками ефек-

тивності двигуна, метод критичного огляду наукових джерел для виявлення технічних рішень і метод порівняльного аналізу моторних характеристик традиційного й альтернативного палива. *Результати.* Узагальнено сучасні наукові підходи до використання водневмісного газу в двигунах внутрішнього згоряння. Показано, що застосування внутрішнього сумішоутворення забезпечує підвищену ефективність і знижує ризик зворотних спалахів. Встановлено залежності між коефіцієнтом надлишку повітря, кутом випередження запалення, ступенем стискання та рівнем утворення шкідливих компонентів у відпрацьованих газах. *Наукова новизна.* Проведено системний аналіз впливу конкретного складу водневмісного газу на параметри згоряння й екологічні показники двигуна, що дає змогу обґрунтувати оптимальні умови сумішоутворення для забезпечення максимальної ефективності. *Практична значимість.* Отримані результати можуть бути використані для модернізації конструкцій існуючих поршневих двигунів внутрішнього згоряння малотоннажних суден із метою зниження викидів забруднювальних речовин та підвищення ефективності завдяки застосуванню альтернативного палива.

Ключові слова: водневмісний газ; двигуни внутрішнього згоряння; альтернативне паливо; зменшення викидів.

References

- [1] Babu, M. K. G. & Subramanian, K. A. (2013). *Alternative transportation fuels: Utilisation in combustion engines*. CRC Press.
- [2] Srinivasa Naik, M., Sudhakar, T. V. V., & Balunaik, B. (2015). Bio-fuels as alternative fuels for internal combustion engines. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(12), 531–536.
- [3] Shudo, T., Tsuga, K., & Nakajima, Y. (2001, March 5–8). Combustion characteristics of H₂–CO–CO₂ mixture in an IC engine. *SAE Technical Paper Series*, 105–115.
- [4] Vizcaino, A. J. et al. (2008). Ethanol steam reforming on Ni/Al₂O₃ catalysts: Effect of Mg addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 3489–3492.
- [5] Mytrofanov, O. S. (2010). *Efektivnist dyguna vnutrishn'oho zghoryannya 4Ch 8.2/7.0, shcho pratsyuye na syntez-hazi*. Zbirnyk naukovykh prats' NUK, 3 (432), 122–126.
- [6] Ma, J., Su, Y., Zhou, Y., & Zhang, Z. (2003). Simulation and prediction on the performance of a vehicle's hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, 77–83.
- [7] Hosseini, S. A., Abdolah, R., & Khani, A. (2008, July 2–4). Developed quasi-dimensional combustion model in spark-ignition engines. In *World Congress on Engineering*. London.
- [8] Hermanns, R. T. E. (2007). *Laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures*. Veenendaal: Universal Press.
- [9] Fiveland, S. B., & Assanis, D. N. (2001). Development of a two-zone HCCI combustion model accounting for boundary layer effects. *SAE International*, 1, 51–66.
- [10] Lindström, F. (2005). *Empirical combustion modelling in SI engines* (Master's thesis). Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [11] Etheridge, J., Mosbach, S., Kraft, M., Wu, H., & Collings, N. (2008). *Investigating cycle to cycle variations in an SI engine through experiments and a new computational model*. University of Cambridge, Department of Chemical Engineering.
- [12] Stępień, Z. (2024). Analysis of the prospects for hydrogen-fuelled internal combustion engines. *Combustion Engines*, 197 (2), 32–41. <https://doi.org/10.19206/CE-174794>
- [13] Gupta, M. (2024). Analysis on using hydrogen gas as a fuel in internal combustion engines with the production of hydrogen through electrolysis. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 13. <https://doi.org/10.21275/SR24912000303>
- [14] Gunasekaran, A. (2024). Analysis of the performance, combustion and emission of hydrogen induction in a CRDI engine. *Global NEST Journal*, 26(8). <https://doi.org/10.30955/gnj.06256>
- [15] Gnanamoorthi, V., & Vimalananth, V. T. (2020). Effect of hydrogen fuel at higher flow rate under dual fuel mode in CRDI diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(33), 16874–16889.

- [16] Montoya, J. P., Gómez, A. A., Amell, D. B., Olsen, D. B., & Amador Diaz, G. J. (2018). Strategies to improve the performance of a spark ignition engine using fuel blends of biogas with natural gas, propane and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(46), 21592–21602.
- [17] Vadlamudi, S., Gugulothu, S. K., Panda, J. K., Deepanraj, B., & Vijaya Kumar, P. R. (2023). Paradigm analysis of performance and exhaust emissions in CRDI engine powered with hydrogen and hydrogen/CNG fuels: A green fuel approach under different injection strategies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(96), 38059–38076.
- [18] Babu, M. K. G., & Subramanian, K. A. (2013). *Alternative transportation fuels: Utilisation in combustion engines*. CRC Press.
- [19] Srinivasnaik, M., Sudhakar, T. V. V., & Balunaik, B. (2015). Bio-fuels as alternative fuels for internal combustion engines. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(12), 531–536.
- [20] Hilbert, D. (2011). *A study of the effects of running gasoline with 15 % ethanol concentration in current production outboard four-stroke engines and conventional two-stroke outboard marine engines*. National Renewable Energy Laboratory. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52909.pdf>
- [21] Mytrofanov, O. S., Proskurin A. Y., Poznanskyi A. S., (2018) Analysis of the piston engine operation on etha nol with the synthesis-gas additives. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1(94)), 14–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.136380>

Постановка завдання. Вичерпність запасів викопного палива стимулює активний пошук альтернативних енергоносіїв у сфері транспортної енергетики, зокрема в судновому та морському машинобудуванні, де споживається значна частка світових нафтових ресурсів. У найближчі десятиліття двигуни внутрішнього згоряння залишатимуться базовими силовими установками для малих і середніх транспортних суден, що актуалізує завдання підвищення їхньої ефективності й екологічності шляхом застосування альтернативних палив.

Одним із перспективних варіантів є водневмісний газ, застосування якого потребує вирішення кількох ключових питань: адаптація двигунів, оптимізація сумішоутворення, покращення подачі палива, вдосконалення систем зберігання й оцінка його екологічного впливу. Дослідження зосереджені на використанні газу як основного або допоміжного пального, хоча технічні труднощі переобладнання поршневих ДВЗ залишаються актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками проблема використання водню та водневмісного газу як альтернативного палива в транспортній енергетиці активно вивчається у вітчизняних і зарубіжних наукових колах. У роботах [1–3] розглянуто вплив коефіцієнта надлишку повітря, ступеня стискування та режимів

сумішоутворення на ефективність робочого циклу двигуна. Зокрема, встановлено, що внутрішнє сумішоутворення забезпечує вищу ефективність порівняно із зовнішнім завдяки уникненню зворотних спалахів та можливості точного регулювання моменту займання [4, 5].

У працях [6–8] досліджується вплив кута випередження запалення на розподіл тиску в камері згоряння, а також його вплив на термодинамічну ефективність циклу. Публікації [9–11] містять аналіз впливу коефіцієнта α на індикаторний ККД та склад відпрацьованих газів, зокрема вміст оксидів азоту за різного вмісту водню в суміші. Зазначено, що в разі збіднених сумішей ($\alpha > 2,2$) рівень NO_x у відпрацьованих газах істотно знижується [12].

Окрему увагу приділено термічному навантаженню камери згоряння під час роботи на водневмісному газі, що пов'язано з високою швидкістю згоряння та температурою полум'я. У роботах [13–15] досліджуються питання теплообміну, впливу на стінки камери, а також можливості зниження пікових температур шляхом рециркуляції відпрацьованих газів. У публікаціях [16–17] окреслено проблеми реалізації подачі водневмісного газу під високим тиском у системах внутрішнього сумішоутворення та запропоновано технічні рішення для вдосконалення систем впорскування.

Незважаючи на активні дослідження, більшість з них мають переважно теоретичний характер або виконані в умовах лабораторних випробувань, що підкреслює потребу в подальшій практичній реалізації отриманих результатів у серійних конструкціях ДВЗ.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених використанню водневмісного газу в ДВЗ, ряд аспектів залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, потребує подальшого дослідження вплив високого вмісту водню у складі пального на довговічність елементів кривошипно-шатунного та газорозподільного механізмів у зв'язку з явищем водневої дифузії та корозії.

Також не до кінця з'ясовані оптимальні параметри кута випередження запалення й ступеня стискання за змінних умов сумішоутворення й різного складу водневмісного газу. Відсутня уніфікована методика регулювання подачі газоподібного пального з урахуванням низької густини та швидкої дифузії водню, особливо в умовах високих обертів двигуна.

Крім того, недостатньо досліджено вплив застосування внутрішнього сумішоутворення на теплове навантаження компонентів двигуна, особливо за умов збіднених сумішей ($\alpha > 2,0$), що є критично важливим для забезпечення ефективності та безпеки роботи.

Метою дослідження є аналіз перспектив та ефективності застосування водневмісного газу як альтернативного палива для двигунів внутрішнього згоряння з урахуванням фізико-хімічних властивостей пального, особливостей сумішоутворення, режимів згоряння та впливу основних конструктивних і експлуатаційних параметрів на паливну економічність і екологічну безпеку роботи двигуна.

У межах поставленої мети передбачено: визначення впливу коефіцієнта надлишку повітря, кута випередження запалення та ступеня стискання на показники ефективності ДВЗ; порівняльний аналіз зовнішнього та внутрішнього сумішоутворення в разі використання водневмісного газу; оцінка теплових і токсичних характеристик відпрацьованих газів; виявлення технічних обмежень і невирішених аспектів, пов'язаних із

подачею та згорянням водневмісного пального в циліндрах ДВЗ.

Методи, об'єкт і предмет дослідження.

Для досягнення поставленої мети у роботі використано такі **методи дослідження**: метод системного аналізу – для виявлення закономірностей впливу складу паливно-повітряної суміші на ефективність та екологічність роботи ДВЗ; метод критичного огляду літературних джерел – для аналізу існуючих теоретичних і експериментальних досліджень щодо використання водню та його сумішей як моторного палива; метод порівняльного технічного аналізу – для співставлення показників згоряння бензину, водню та водневмісного газу, включно з теплою згоряння, температурою займання та ін. Застосовані методи дали змогу здійснити комплексну оцінку можливостей підвищення паливної економічності й екологічності ефективності ДВЗ шляхом додавання водневмісного газу до традиційного пального.

Об'єктом дослідження є процеси згоряння паливно-повітряної суміші в двигунах внутрішнього згоряння за умов використання водневмісного газу як альтернативного палива. **Предметом дослідження** виступають закономірності впливу складу паливної суміші, коефіцієнта надлишку повітря, ступеня стискання та режимів сумішоутворення на ефективність, токсичність і стійкість роботи ДВЗ, зокрема на індикаторні показники, температуру займання та швидкість поширення фронту полум'я.

Основний матеріал. У зв'язку з вичерпністю запасів нафтових палив постає питання широкого впровадження альтернативних енергоносіїв. Останнім часом намітилися три основні напрями в розвитку й розробці малотоксичних і високоефективних робочих процесів суднових енергетичних установок з ДВЗ: 1 – подальше вдосконалення традиційних способів організації робочого циклу двигуна; 2 – розробка нових модифікацій робочих процесів і систем раціонального управління їх параметрами; 3 – формування робочих процесів з використанням альтернативних видів палива, за згоряння яких мінімізуються викиди токсичних продуктів. Останній напрям – один із найперспективні-

ших, оскільки пов'язаний із заощадженням ресурсів традиційного палива й забезпеченням ефективної роботою двигунів, що працюють на альтернативному паливі [18, 19].

У найближчій перспективі дизельні двигуни та двигуни внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням залишатимуться домінуючими серед силових установок для малих і середніх транспортних суден. У цьому контексті особливої актуальності набуває завдання забезпечення високої ефективності й екологічності роботи двигунів, адаптованих до використання альтернативних палив.

До альтернативних джерел енергії, придатних для використання у двигунах внутрішнього згоряння, належать етиловий і метиловий спирти, рослинні масла, водень, а також водневмісний газ – суміш, що зазвичай містить 40...70 % водню й оксиду вуглецю.

Для малотоннажних суден етанол має ряд переваг – менш токсичний, ніж бензин, легко піддається біологічному розкладанню, є відновлювальним паливом, що підвищує його екологічну стійкість. Однак застосування спиртів як палива супроводжується підвищенням зносом циліндро-поршневої групи двигуна, викликаним попаданням крапель на стінки циліндра й руйнуванням змащувальної масляної плівки.

Незважаючи на ряд переваг, етанол має істотні недоліки, які стримують його широке застосування в поршневих двигунах. Основні недоліки пов'язані з відмінністю від нафтових палив за фізико-хімічними властивостями, що робить необхідним внесення в конструкцію двигуна істотних змін. Також етанол здатний поглинати воду, особливо солону для морського транспорту, що призводить до корозії паливної системи та деталей двигуна [20].

Одним із перспективних способів застосування етанолу в поршневих ДВЗ, який може усунути більшість недоліків, є використання етанолу у вигляді водневмісного газу (суміш горючих газів, основними компонентами якого є CO , H_2 , CH_4) шляхом термохімічного перетворення палива.

Існує кілька технологічних підходів до отримання водневмісного газу, які залежать від типу сировини та використовуваних процесів. Основні методи такі:

Електроліз води процес розщеплення води на водень і кисень за допомогою електричного струму. Він відбувається у спеціальних електролізерах, де позитивно заряджені іони (катіони) рухаються до катода, а негативно заряджені (аніони) – до анода. Електроліз широко застосовується для отримання чистого водню, особливо в екологічно чистих технологіях.

Конверсія природного газу – передбачає парову конверсію метану, що міститься в природному газі. Високотемпературна реакція з водяною парою призводить до утворення водню та вуглекислого газу. Процес часто використовують у промисловості для виробництва водню у великих масштабах.

Газифікація вугілля – це високотемпературний процес взаємодії вуглецю вугільного палива з окисниками, що дає змогу отримати суміш горючих газів (H_2 , CO , CH_4). Вона може здійснюватися різними методами, залежно від виду дуття, тиску та температури.

Гідротермальна конверсія бурого вугілля – передбачає газифікацію водних суспензій бурого вугілля за надкритичних умов. Цей метод дає змогу отримати водневмісний газ із високим вмістом водню (60–82 %) за значно нижчих температур (330–500 °C), ніж традиційні процеси.

Парціальне окиснення вуглеводнів – це процес, за якого вуглеводні піддаються неповному термічному окисненню за температури понад 1300 °C. Цей метод дає змогу конвертувати будь-які вуглеводні, проте в промислових умовах він найчастіше використовується для обробки мазуту –висококиплячої нафтової фракції.

Біотехнологічне виробництво водню передбачає ферментацію біомаси, біофотоліз та біоелектрохімічні методи. Наприклад, мікроорганізми можуть виробляти водень шляхом темної ферментації або фотоферментації. Це перспективний напрям, що дає можливість отримувати водень з органічних відходів.

Водневмісний газ може бути отриманий із широкого спектра сировини, зокрема з деревини, соломи, відходів сільського та лісового господарства, побічних продуктів цукрової, спиртової та харчової промисловості, а також, що особливо актуально, з твердих побутових

відходів (ТПВ). Наприклад, у префектурі Чіба (Японія) ТПВ використовуються для отримання водневмісного газу, який потім застосовується на металургійному підприємстві. У місті Фондотц (Італія) функціонує електростанція, що працює на водневмісному газі, виробленому з побутових відходів [17].

На відміну від викопного палива, водневмісний газ, отриманий з біомаси, не сприяє збільшенню загального обсягу парникових газів в атмосфері. Діоксид вуглецю, що утворюється під час його згоряння, є частиною природного кругообігу, оскільки походить із рослин, які його попередньо поглинули в процесі фотосинтезу.

Одним із найефективніших методів виробництва водневмісного газу є парова конверсія, що може здійснюватися з використанням термохімічної регенерації теплоти (ТХР). У цьому процесі тепло для реакції забезпечується енергією відпрацьованих газів (ВГ) [16]. Таким чином, утворене паливо має вищу енергетичну цінність, ніж вихідна сировина, завдяки повторному використанню теплової енергії [11].

Для адаптації існуючих конструкцій поршневих ДВЗ до використання водневмісного газу як основного пального потрібно внести конструктивні зміни, зокрема, у систему подачі палива [16, 17].

Застосування зовнішнього сумішоутворення обмежує подачу свіжого окиснювача до циліндра, що знижує наповнення двигуна, а отже, і потужність – у деяких випадках до 40 %. Це зумовлено низькою густиною і високою летючістю водню.

У разі використання внутрішнього сумішоутворення енергоємність заряду може зростати до 12 % або може бути забезпечена на рівні, що відповідає роботі двигуна на традиційному вуглеводневому паливі. Особливості процесу згоряння водневмісного газу в ДВЗ залежать від фізико-хімічних властивостей паливно-повітряної суміші, передусім від високого вмісту водню. До ключових параметрів, що визначають роботу двигуна, належать: межа займання суміші; температура й енергія займання; швидкість розповсюдження фронту полум'я; відстань гасіння полум'я.

Аналіз сучасних вітчизняних і зарубіжних джерел свідчить про високу перспективність використання водневмісного газу, отриманого за допомогою ТХР, як ефективного пального для підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) двигунів внутрішнього згоряння.

Значний вміст водню у складі такого газу зумовлює потребу в поглибленому вивченні процесів згоряння та впливу на ключові параметри робочого циклу двигуна. Крім того, актуальним є дослідження впливу водню на конструкційні матеріали двигуна, зокрема на деталі та моторне масло. В умовах високих температур і тиску водень може спричиняти водневу корозію, що проявляється у зневуглецюванні металевих поверхонь. За низьких температур водень має здатність до дифузійного проникнення в кристалічну ґратку металу, що призводить до накопичення водню та зміни механічних властивостей матеріалу [11].

Однією з характерних особливостей водню як пального є його висока швидкість згоряння в камері згоряння двигуна. За даними низки експериментальних досліджень, швидкість поширення полум'я водню може у 8–10 разів перевищувати аналогічний показник для традиційних вуглеводневих палив і досягати значень у межах 100–115 м/с [15]. Така інтенсивність процесу згоряння обумовлює схильність до виникнення детонаційного режиму горіння. У цьому випадку характерною особливістю є практична відсутність індукційного періоду згоряння: хвиля тиску формується майже миттєво після іскрового розряду в зоні електродів свічки запалювання [16].

Результати експериментальних індикаторних діаграм свідчать, що зміна коефіцієнта надлишку повітря α істотно впливає на процес згоряння в двигуні. Зокрема, зі зменшенням значення α спостерігається зсув максимального тиску згоряння в напрямку верхньої мертвої точки (ВМТ), що спричиняє підвищену жорсткість роботи двигуна та зниження його індикаторних показників [14]. Таким чином, у процесі дослідження робочого циклу ДВЗ особливої уваги потребує врахування як вмісту водню у складі водневмісного газу, так і значення коефіцієнта

надлишку повітря, оскільки обидва параметри мають істотний вплив на характеристики згоряння й ефективність роботи двигуна.

Переведення ДВЗ із системою зовнішнього сумішоутворення на роботу з водневмісним газом супроводжується зменшенням коефіцієнта наповнення. Це зумовлено передусім низькою густиною водню, що є основною складовою водневмісного газу. Згідно з даними досліджень, для двигунів, які функціонують на чистому водні, коефіцієнт наповнення може зменшуватися до 15 % [12].

Серед ключових характеристик водневмісного газу як пального є температура займання – температура, за якої паливно-повітряна суміш зазнає самозаймання під дією зовнішнього впливу та підтримує процес горіння. Значний внесок у вивчення цього параметра зробили Діксон і Крофт, які досліджували температуру займання воднево-повітряної суміші методом адіабатичного стиску. Встановлено, що зі зниженням концентрації водню в суміші відповідно зменшується і температура займання [5].

Температура займання воднево-повітряної суміші значною мірою залежить не лише від її складу, а й від тиску, за якого вона перебуває. Як показали результати досліджень Діксона, проведені методом змішування попередньо підігрітих газів у концентричних трубах, зі зниженням тиску нижче за 0,1 МПа температура займання різко зменшується. З подальшим зниженням тиску до 0,01 МПа процес займання практично не відбувається [5].

Ще одним важливим параметром, що впливає на ефективність згоряння у двигунах, які працюють на водневмісному газі, є відстань гасіння полум'я. Цей показник визначає товщину пристінкового шару паливно-повітряної суміші, у межах якого відбувається припинення ланцюгових реакцій окиснення через дезактивацію активних центрів на поверхні камери згоряння [5]. Величина цієї відстані прямо впливає на об'єм зон неповного згоряння, а отже, і на рівень викидів незгорілих вуглеводнів у відпрацьованих газах. Для бензинових двигунів вона становить приблизно 2,5 мм, тоді як для двигунів на чистому водні – лише 0,6 мм [5]. Зменшення відстані гасіння сприяє зна-

чному скороченню зон неповного згоряння, забезпечуючи горіння навіть у витіснювачах та у вузькому зазорі між поршнем і циліндром над першим компресійним кільцем, що загалом підвищує ефективність процесу згоряння в двигуні.

Також варто відзначити те, що велика кількість водню у складі водневмісного газу дає змогу витрачати значно менше енергії на займання суміші. Критична енергія займання, згідно з теорією іскрового займання Я. Б. Зеледовича [6], являє собою енергію, необхідну для критичного об'єму до критичної температури. Критерієм порівняння для різних палив може бути значення мінімальної енергії займання $Q_{кр}$, яка має зв'язок із нормальною швидкістю розповсюдження полум'я w_n , найбільшу нормальну швидкість має водень, що дорівнює 160...180 см/с [13]:

$$Q_{кр} \approx w_n^{-(2...3)}.$$

Встановлено, що на w_n суттєво впливає коефіцієнт надлишку повітря α , який визначає якісний склад паливно-повітряної суміші та інтенсивність протікання реакцій згоряння.

У разі збідненої суміші водневмісного газу та повітря необхідна енергія займання збільшується. Так, наприклад, енергія займання для чистого водню та метану однакова, якщо $\alpha_{H_2} = 4,5$ і $\alpha_{CH_4} = 1,0$ [4]. Для бензину вона становить $0,25 \cdot 10^{-3}$ Дж, для природного газу – $0,28 \cdot 10^{-3}$ Дж, для водню – $0,02 \cdot 10^{-3}$ Дж [8]. Це дає змогу покращити пуск двигуна (особливо в зимовий період).

Низька енергія займання водневмісного газу є чинником, що підвищує імовірність виникнення зворотних спалахів у системі впуску під час реалізації зовнішнього сумішоутворення. Ініціація займання може відбуватись унаслідок контакту паливно-повітряної суміші з локальними джерелами тепла в камері згоряння, як-от перегріті елементи (свічка запалення, випускний клапан), а також нагарові відкладення. Крім того, зворотні спалахи можуть спричинятися частковим перекриттям клапанів, що створює умови для контакту свіжого заряду з гарячими відпрацьованими газами.

Такий характер зміни межі виникнення зворотних спалахів у впускному тракті залежно від частоти обертання колінчастого вала обумовлений зростанням термічного навантаження камери згоряння та підвищенням температури відпрацьованих газів у кінці такту випуску. Для мінімізації імовірності виникнення зворотних спалахів доцільним є використання паливно-повітряної суміші з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 1,6$.

У двигунах, що працюють на чистому водні, додатковим засобом запобігання передчасному займанню є рециркуляція відпрацьованих газів у межах 10–20 % від загального об'єму паливного заряду [3]. У випадках, коли водневмісний газ містить значну частку неконверсованих вуглеводнів або інертних компонентів, присутність баластних газів виконує подібну функцію до рециркуляції, знижуючи ризик зворотного займання під час впуску. Водночас як рециркуляція відпрацьованих газів, так і наявність баластних компонентів за зовнішнього сумішоутворення спричиняють зменшення наповнення циліндра, а отже, зниження ефективної потужності двигуна.

Під час дослідження процесів згоряння водневмісного газу важливо враховувати специфіку формування осередку займання та подальшого поширення активної зони фронту полум'я. Відомо, що швидкість розповсюдження полум'я у таких умовах суттєво перевищує нормальні значення, характерні для традиційних вуглеводневих палив.

У двигунах із примусовим запаленням доцільним є поділ процесу згоряння на три основні фази, який вважається найбільш адекватним з погляду опису фізико-хімічної природи процесу [6]:

перша фаза – утворення початкового осередку полум'я від електричної іскри та розвиток турбулентного фронту полум'я;

друга фаза – період швидкого згоряння, коли полум'я розповсюджується практично по всій камері згоряння й досягає стінок циліндра, фаза закінчується за досягнення максимального тиску або температури в циліндрі;

третья фаза – період догоряння, починається від моменту максимального тиску та закінчується з припиненням згоряння палива.

На тривалість першої фази згоряння істотний вплив справляють фізико-хімічні характеристики палива, а також рівень дрібномасштабної турбулізації паливно-повітряного заряду. Зокрема, для водню ця фаза становить приблизно 1° кута повороту колінчастого вала (п. к. в.), тоді як для бензину – близько 16° п. к. в. [1]. Зі збільшенням α або зростанням частки оксиду вуглецю у складі водневмісного газу спостерігається тенденція до подовження тривалості першої фази. Це зумовлено зниженням нормальної швидкості поширення полум'я.

Варто зауважити, що порівняно з бензином, для якого діапазон тривалості першої фази зазвичай становить $16...21^\circ$ п. к. в., для водню цей показник є набагато ширшим і може змінюватися в межах $1...20^\circ$ п. к. в. [1], що свідчить про високу чутливість водню до умов запалювання та турбулентності середовища.

Характер згоряння в двигуні значною мірою визначається кутом випередження запалення Θ , який впливає на динаміку формування тиску в камері згоряння. Залежно від вибраного значення Θ максимум тиску згоряння може зміщуватися у бік ВМТ або, навпаки, від неї, що істотно позначається на ефективній потужності двигуна та його паливній економічності. Згідно з рекомендованими значеннями, оптимальне положення піка тиску згоряння повинно припадати на $12...15^\circ$ після проходження ВМТ [4]. Отже, визначення оптимального кута випередження запалення з урахуванням складу паливно-повітряної суміші є важливою умовою для забезпечення ефективної роботи двигуна.

Крім того, істотний вплив на процес згоряння водневмісного газу справляє ступінь стискання (ϵ), який визначає термодинамічні умови формування горючої суміші та її займання.

Вплив ϵ на роботу двигуна різними авторами описаний досить неоднозначно. Деякі дослідники зазначають можливість виникнення ознак детонаційного згоряння вже за значень $\epsilon \approx 3,8$ у двигунах, що працюють на чистому водні. Водночас більшість науковців вважають, що стабільне бездетонаційне

згоряння можливе навіть за умов підвищених значень ступеня стискання – $\varepsilon \geq 8$ [1].

Здатність двигунів витримувати високі значення α частково пояснюється відсутністю нагарових відкладень у камері згоряння в разі роботи на водні, які у випадку традиційних палив можуть стати джерелами локального перегріву й передчасного займання суміші.

Крім того, підвищення допустимого ступеня стискання можливе шляхом інтенсифікації теплообміну в камері згоряння, зокрема, завдяки ефективнішому відведенню теплоти згоряння до систем охолодження та змащування двигуна [3].

Середній індикаторний тиск двигуна є функціонально залежним від α і зростає зі збагаченням паливно-повітряної суміші, досягаючи максимального значення, якщо $\alpha \approx 1,3$ [3]. Подальше збагачення призводить до незначного зниження середнього індикаторного тиску внаслідок погіршення умов згоряння.

Слід зазначити, що в разі роботи двигуна на водні максимальні значення індикаторного тиску в середньому на 20...25 % нижчі порівняно з відповідними показниками для бензину. Це зумовлено фізико-хімічними особливостями водню, зокрема його низькою густиною та меншим тепловим вмістом у розрахунку на одиницю об'єму.

Аналіз впливу навантажувального режиму на індикаторний ККД двигуна свідчить про зростання ефективності термодинамічного циклу зі збільшенням α . Для двигунів, що працюють на водні, максимальне значення індикаторного ККД досягається, якщо $\alpha \approx 2,0\text{--}2,5$ [3]. У випадку використання водневмісного газу оптимальний діапазон α для досягнення пікових значень індикаторного ККД становить 1,7–2,0 [16].

Зростання ефективності зі збільшенням α пояснюється, з одного боку, зниженням теплоємності робочого тіла, а з іншого – збільшенням його молекулярного коефіцієнта змінення, що сприяє підвищенню термодинамічної ефективності використання теплоти згоряння.

Разом із тим варто враховувати, що за високої концентрації водню у складі паливної суміші або в разі використання чистого водню

за невеликих значень α (до 1,5) відбувається зростання пікових температур у циклі, що сприяє інтенсивному утворенню оксидів азоту (NO_x) [15]. Згідно з даними [12], під час роботи двигуна на чистому водні за умов $\alpha > 2,2$ концентрація NO_x у відпрацьованих газах є незначною, що підтверджує екологічну ефективність збіднених сумішей у таких режимах.

За умов збільшення α понад 1,5 для двигунів, що працюють на водневмісному газі, вміст шкідливих компонентів у відпрацьованих газах наближається до мінімального рівня, що дає змогу вважати їх практично нетоксичними [5]. У таких режимах згоряння концентрація залишкового водню в продуктах згоряння є незначною або відсутня зовсім, що додатково підтверджує ефективність процесу окиснення за надлишкового повітря.

Застосування зовнішнього сумішоутворення за використання водневмісного газу виявляється малоперспективним через істотне зниження потужності двигуна порівняно з рідким паливом. Це обумовлено необхідністю подачі значно більшого об'єму паливно-повітряної суміші для досягнення еквівалентного теплового ефекту. Натомість внутрішнє сумішоутворення, що передбачає впорскування стисненого газоподібного палива безпосередньо в циліндр за закритих впускних і випускних клапанів, демонструє значно вищу ефективність [15].

Зокрема, для двигунів з однаковим робочим об'ємом теплової енергії, що подається до циліндра за внутрішнього сумішоутворення на чистому водні, перевищує відповідний показник для бензину на 17,5 %, а для зовнішнього сумішоутворення на водні – на 30 % [11]. Важливою перевагою цієї технології є також повна відсутність зворотних спалахів під час горіння водневмісного газу [15].

Однак внутрішнє сумішоутворення має підвищені технічні вимоги, зокрема щодо швидкості формування однорідної горючої суміші, яка має бути досягнута в межах приблизно 1 мс на такті стиску. Високий вміст водню у складі пального сприяє інтенсивній дифузії, що, зі свого боку, створює складнощі в точному погодженні моменту впорскування палива з моментом запалення. Крім того, технічно складною залишається реалізація висо-

коточного впорскування за високого тиску через низьку густину та стисливість водню [15].

Серед ключових проблем, пов'язаних із використанням альтернативних видів палива, особливу увагу приділяють питанням їхнього зберігання й ефективної подачі до камери згоряння. Найбільший інтерес у цьому контексті викликає подача водневмісного газу безпосередньо в робочий циліндр двигуна, що зумовлено його специфічними фізико-хімічними властивостями – низькою густиною та мінімальною енергією займання. Ці характеристики сприяють виникненню зворотного спалаху у впускному колекторі, що ускладнює організацію робочого процесу.

У двигунах з іскровим запаленням можливе застосування як зовнішнього, так і внутрішнього сумішоутворення за використання водневмісного газу. Найбільш поширеним на практиці є зовнішнє сумішоутворення, перевагою якого є простота реалізації системи живлення. Водночас більш перспективною вважається система внутрішнього сумішоутворення, коли паливо подається безпосередньо до циліндра наприкінці впуску або в процесі стискання. Такий підхід забезпечує підвищення потужності двигуна та практично повністю усуває ризик виникнення зворотних спалахів.

Утім, реалізація внутрішнього сумішоутворення супроводжується певними технічними труднощами, зокрема необхідністю забезпечення подачі значної кількості газу за короткий проміжок часу, а також складністю конструкції системи дозування та керування подачею водню [5].

Регулювання витрати водню здійснюється шляхом варіації тривалості впорскування в межах 8–10 мс і зміни тиску палива від 3 до 8 МПа. Додатковою перевагою цієї системи є можливість оптимізації моменту впорскування.

Загалом наведені варіанти подачі водню є технічно придатними для використання водневмісного газу, однак саме внутрішнє сумішоутворення викликає більший інтерес завдяки своїм потенційним перевагам над традиційним зовнішнім методом.

Придатність палива для ДВЗ визначається його моторними властивостями,

як-от, наприклад, енергія, температура та межі займання, швидкість розповсюдження полум'я, нижча теплота згоряння й інші. Використання водневмісного газу як палива для ДВЗ дає змогу змінити підходи до організації робочого циклу, а отже, суттєво підвищити паливну економічність та знизити кількість шкідливих викидів з ВГ. Унаслідок малого стехіометричного співвідношення водневмісний газ – повітря та досить низької щільності ($0,63 \text{ кг/м}^3$) водневмісного газу теплотворна здатність паливної суміші стехіометричного складу буде нижча, ніж паливоповітряної суміші традиційного палива. Це, зі свого боку, призведе до зниження потужності двигуна. Порівняльну оцінку питомої потужності двигуна, що працює на водневмісному газі та звичайному паливі, можна провести за енергоємностями заряду. У табл. 1 наведено порівняння деяких моторних властивостей моторних палив, водневмісного газу та його компонентів. Згідно з наведеними даними енергоємність заряду циліндра можна підвищити примусовою подачею водневмісного газу до циліндра за закритих клапанів, тим самим вирішити проблему зниження потужності двигуна.

Одним з основних напрямів удосконалення ДВЗ на сучасному етапі розвитку є зниження токсичності ВГ та підвищення паливної економічності.

Досвід закордонних учених і досліджень, що виконувалися на базі лабораторії перспективних енергетичних технологій Національного університету кораблебудування, зокрема Тимошевським Б. Г., Ткачем М. Р., Митрофановим О. С., Проскуріним А. Ю. та іншими, показує, що всі традиційні методи зниження токсичності зазвичай знижують економічні показники двигуна. Токсичність ВГ та паливна економічність двигунів з іскровим запаленням визначається насамперед складом паливо-повітряної суміші, тобто коефіцієнтом надлишку повітря α , який за використання звичайних палив, наприклад бензину, перебуває в межах $\alpha = 0,8 \dots 1,2$. Також на токсичність ВГ суттєвий вплив має хімічний склад палива. Так, наприклад, використання спирту з додаванням водневмісного газу замість звичайного бензину як

Таблиця 1. Моторні властивості бензину та водневмісного газу

№ з.п.	Властивість	Бензин		Водень		Оксид вуглецю		Водневмісний газ (67 % H ₂ , 33 % CO)		Водневмісний газ (43 % H ₂ , 34 % CO, 23 % CH ₄)	
1	Теплота згоряння, кДж/кг	43 961		120 000		10 096		24 083		28 790	
2	Кількість повітря, кг/кг	14,95		34,2		2,46		6,52		8,27	
3	Кількість повітря, м ³ /м ³	50,06		2,38		2,38		2,38		4,02	
4	Густина, кг/м ³	750		0,089		1,25		0,472		0,629	
5	Сумішоутворення	Зовнішнє	Внутрішнє	Зовнішнє	Внутрішнє	Зовнішнє	Внутрішнє	Зовнішнє	Внутрішнє	Зовнішнє	Внутрішнє
		3553	3624	3190	4530	3733	5302	3368	4784	3425	4617
	Енергоємність заряду, кДж/м ³	3553		3190		3733		3368		3425	

моторного палива покращує процес згоряння палива завдяки утворенню радикалів, які активують цепні реакції окиснення.

На рис. 1 представлено залежності зміни питомої ефективної витрати на різних режимах роботи залежно від добавки водневмісного газу. З графіків чітко видно зниження питомої витрати палива на всіх режимах роботи.

Характер змінення концентрації основних токсичних компонентів обумовлений реакційно-кінетичними закономірностями. У зонах багатих сумішей спостерігається значний ріст концентрацій CO та CH унаслідок нестачі кисню для повного окиснення палива, водночас цей факт сприяє зниженню викидів оксидів азоту NO_x. Навпаки, у зонах бідних сумішей доля CO та CH незначна, а концентрація NO_x збільшується. У разі використання звичайного палива з подальшим підвищенням коефіцієнта надлишку повітря $\alpha > 1,1$ збільшується концентрація CH у ВГ унаслідок уповільненого та неповного згоряння сильно збіднених сумішей. Однак зниження температури циклу зі збідненням суміші сприяє зниженню концентрації оксидів азоту. Отже, ні збагачення, ні збіднення

суміші в разі використання звичайного палива не дає змогу досягти зниження всіх шкідливих компонентів одночасно. Реалізація діапазону змін коефіцієнта надлишку повітря, вигідного з погляду зниження концентрації токсичних компонентів і забезпечення паливної економічності двигуна, можлива в разі використання палив із широкими межами займання та високою швидкістю згоряння в умовах значного збіднення суміші. Таким паливом може бути чистий водень або водневмісний газ. Причому ці гази можна використовувати як самостійне паливо або як добавки для покращення екологічних показників та згоряння стандартного моторного палива (бензину, дизеля, етилового або метилового спирту тощо).

Обговорення отриманих результатів.

Аналіз експериментальних і теоретичних джерел свідчить про те, що використання водневмісного газу як пального для двигунів внутрішнього згоряння має значний потенціал підвищення паливної ефективності й екологічності. Результати досліджень демонструють, що індикаторний ККД зростає зі збільшенням коефіцієнта надлишку повітря

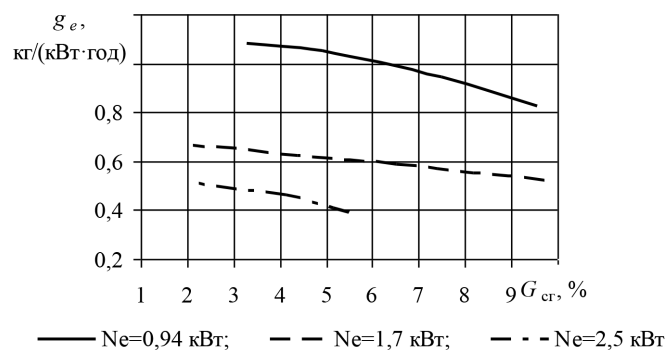


Рис. 1. Зміна питомої ефективної витрати палива на різних режимах роботи двигуна ДВЗ 1Ч 6,8/5,4 від добавки водневмісного газу [21]

α , досягаючи максимальних значень у межах 1,7...2,5 залежно від типу паливної суміші.

Встановлено, що внутрішнє сумішоутворення забезпечує кращу термодинамічну ефективність, ніж зовнішнє, завдяки зменшенню ймовірності зворотних спалахів і підвищенню ступеня наповнення. Параметри займання й поширення полум'я значною мірою залежать від α та наявності баластних газів у складі суміші. За високого вмісту водню та низького α спостерігається зростання температури згоряння, що сприяє інтенсивному утворенню оксидів азоту (NO_x), тоді як за умови $\alpha > 2,2$ вміст NO_x у відпрацьованих газах зменшується до мінімального рівня.

Крім того, встановлено залежність ефективності згоряння від кута випередження запалення, а також вплив ступеня стискання на стабільність процесу згоряння. Результати свідчать, що допустиме підвищення ступеня стискання можливе завдяки відсутності нагару та застосуванню систем тепловідведення. Проте використання водневмісного газу потребує точного контролю параметрів подачі палива через його низьку густину та високу швидкість дифузії.

Отримані результати підтверджують ефективність використання водневмісного газу як перспективного пального для модернізації існуючих ДВЗ, однак потребують подальших досліджень у частині практичної реалізації систем подачі й управління процесом згоряння.

Висновки

1. Проведене систематичне дослідження джерел дало змогу узагальнити сучасні підходи до підвищення ефективності й еко-

логічності двигунів внутрішнього згоряння шляхом додавання водневмісного газу до традиційного палива.

2. На основі аналізу наукової літератури встановлено, що водневмісний газ завдяки наявності водню забезпечує поліпшення запалювання та зниження викидів CO , CH та сажі під час роботи ДВЗ. Це дає змогу підвищити екологічні показники двигуна без значного ускладнення конструкції.

3. Порівняно з іншими альтернативними паливами (рослинними оліями, спиртами, біогазом) водневмісний газ має кращу реакційну здатність, широку сировинну базу та знижені вимоги до модифікації ДВЗ, що робить його більш придатним для транспорту, зокрема, морського призначення.

4. Визначено, що більшість доступних досліджень не приділяють достатньої уваги впливу конкретного складу водневмісного газу та його пропорцій до базового палива на зміну викидів. Це створює наукову нішу для подальших робіт у напрямі точного моделювання впливу таких факторів на екологічну ефективність двигуна.

5. Результати статті підтверджують потребу в розширенні практики використання водневмісного газу як добавки до традиційного палива в умовах часткових навантажень. Це є важливим кроком у напрямі зниження вуглецевого сліду в транспортній енергетиці.

6. У подальших дослідженнях доцільно зосередитися на експериментальному вивченні впливу режимів роботи ДВЗ на показники токсичності за змінного складу водневмісного газу.

Список літератури

- [1] Babu M. K. G. & Subramanian K. A. *Alternative transportation fuels: Utilisation in combustion engines*. CRC Press, 2013.
- [2] Srinivasa Naik M., Sudhakar T. V. V., & Balunaik B. Bio-fuels as alternative fuels for internal combustion engines. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2015. Vol. 5(12). P. 531–536.
- [3] Shudo, T., Tsuga, K., & Nakajima, Y. Combustion characteristics of H_2 -CO- CO_2 mixture in an IC engine. *SAE Technical Paper Series*. 2001, March 5–8. P. 105–115.
- [4] Vizcaino A. J. et al. Ethanol steam reforming on $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalysts: Effect of Mg addition. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008. Vol. 33. P. 3489–3492.
- [5] Митрофанов О. С. Ефективність двигуна внутрішнього згоряння 4Ч 8,2/7,0, що працює на синтез-газі. *Збірник наукових праць НУК*. 2010. № 3(432). С. 122–126.

- [6] Ma J., Su Y., Zhou Y., & Zhang Z. Simulation and prediction on the performance of a vehicle's hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2003. Vol. 28. P. 77–83.
- [7] Hosseini S. A., Abdolah R., & Khani A. Developed quasi-dimensional combustion model in spark-ignition engines. In *World Congress on Engineering*. 2008, July 2–4. London.
- [8] Hermanns R. T. E. *Laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures*. Veenendaal: Universal Press, 2007.
- [9] Fiveland S. B. & Assanis D. N. Development of a two-zone HCCI combustion model accounting for boundary layer effects. *SAE International*. 2001. Vol. 1. P. 51–66.
- [10] Lindström F. *Empirical combustion modelling in SI engines* (Master's thesis). Royal Institute of Technology, Stockholm, 2005.
- [11] Etheridge J., Mosbach S., Kraft M., Wu H., & Collings N. *Investigating cycle to cycle variations in an SI engine through experiments and a new computational model*. University of Cambridge, Department of Chemical Engineering, 2008.
- [12] Stępień Z. Analysis of the prospects for hydrogen-fuelled internal combustion engines. *Combustion Engines*. 2024. Vol. 197(2). P. 32–41. <https://doi.org/10.19206/CE-174794>
- [13] Gupta M. Analysis on using hydrogen gas as a fuel in internal combustion engines with the production of hydrogen through electrolysis. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2024. Vol. 13. <https://doi.org/10.21275/SR24912000303>
- [14] Gunasekaran A. Analysis of the performance, combustion and emission of hydrogen induction in a CRDI engine. *Global NEST Journal*. 2024. Vol. 26 (8). <https://doi.org/10.30955/gnj.06256>
- [15] Gnanamoorthi V., Vimalananth V.T. Effect of hydrogen fuel at higher flow rate under dual fuel mode in CRDI diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45(33). P. 16874–16889.
- [16] Montoya J. P., Gómez A. A., Amell D. B., Olsen D. B., & Amador Diaz G. J. Strategies to improve the performance of a spark ignition engine using fuel blends of biogas with natural gas, propane and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43(46). P. 21592–21602.
- [17] Vadlamudi S., Gugulothu S. K., Panda J. K., Deepanraj B., & Vijaya Kumar P. R. Paradigm analysis of performance and exhaust emissions in CRDI engine powered with hydrogen and hydrogen/CNG fuels: A green fuel approach under different injection strategies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48(96). P. 38059–38076.
- [18] Babu M. K. G. & Subramanian K. A. *Alternative transportation fuels: Utilisation in combustion engines*. CRC Press, 2013.
- [19] Srimi-vasnaik M., Sudhakar T. V. V., & Balunaik B. Bio-fuels as alternative fuels for internal combustion engines. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2015. Vol. 5 (12). P. 531–536.
- [20] Hilbert D. *A study of the effects of running gasoline with 15 % ethanol concentration in current production outboard four-stroke engines and conventional two-stroke outboard marine engines*. National Renewable Energy Laboratory, 2011. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52909.pdf>
- [21] Mytrofanov O. S., Proskurin A. Y., Poznanskyi A. S. Analysis of the piston engine operation on ethanol with the synthesis-gas additives. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4. No. 1(94). P. 14–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.136380>

© Нестер О. В.

Дата надходження статті до редакції: 23.04.2025

Дата затвердження статті до друку: 19.05.2025

Дата публікації статті: 04.11.2025

