



**Вимірювання фізико-механічних
параметрів речовин**

Прийнято 06.04.2026. Прорецензовано 23.04.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 349.6:340.1

DOI: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-55-69

**ЕКОЛОГІЧНІ СТАНДАРТИ ЄС STAGE V:
СТРУКТУРА, ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ТА ГЛОБАЛЬНІ НАСЛІДКИ****Защепкіна Н. М.**

Доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»

03056, Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-9397-6632>

e-mail: nanic1604@gmail.com

Примірський І. В.

Аспірант

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»

03056, Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-5157-4870>

e-mail: aep@aep.kiev.ua

Анотація. У статті представлено аналіз екологічного стандарту Європейського Союзу Stage V для двигунів позашляхової мобільної техніки (Non-Road Mobile Machinery, NRMM), який став новим етапом розвитку системи екологічного регулювання промислових і транспортних викидів. У роботі розглянуто передумови запровадження стандарту Stage V, особливості його нормативної структури та відмінності від попередніх екологічних стандартів Stage IIIA, Stage IIIB і Stage IV. На відміну від попередніх стандартів, Stage V не лише суттєво знижує допустимі рівні викидів оксидів азоту та твердих частинок, а й уперше вводить нормування кількості твердих частинок (PN), що потребує використання сучасних систем очищення вихлопних газів та модернізації двигунів внутрішнього згоряння. У роботі проаналізовано структуру стандарту Stage V, його основні технічні вимоги та механізми реалізації. Розглянуто вплив стандарту на розвиток машинобудування, впровадження систем селективного каталітичного відновлення (SCR), дизельних сажових фільтрів (DPF) та електронних систем керування двигунами. Визначено, що впровадження Stage V стимулює підвищення паливної ефективності техніки, зниження екологічного навантаження та розвиток інтелектуальних систем моніторингу викидів. Особливу увагу приділено впливу стандарту на трансформацію енергетичних і виробничих стратегій у промисловості. Обґрунтовано, що Stage V виконує не лише регуляторну, а й інноваційну функцію, стимулюючи перехід до гібридних та електрифікованих силових установок, а також інтеграцію сучасних цифрових технологій у системи керування технікою. Отримані результати можуть бути використані при розробленні

Запропоноване посилання: Защепкіна, Н. М. & Примірський, І. В. (2026). Екологічні стандарти ЄС Stage V: структура, технічні вимоги та глобальні наслідки. *Методи та прилади контролю якості*, 1(56), 55-69. doi: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-55-69

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

екологічних стратегій модернізації техніки, удосконаленні систем очищення вихлопних газів, адаптації виробничих процесів до сучасних міжнародних вимог та формуванні напрямів подальших наукових досліджень у сфері екологічно безпечних енергетичних систем.

Ключові слова: екологічне регулювання; позашляхова техніка; норми викидів; дизельні двигуни; системи очищення.

Вступ

Проблема зниження негативного впливу промислових і транспортних викидів на довкілля залишається однією з ключових у глобальній екологічній політиці. Значну частку забруднення атмосферного повітря формують двигуни внутрішнього згоряння, встановлені на позашляховій мобільній техніці, яка широко використовується в будівництві, сільському господарстві, енергетиці та промисловості. На відміну від дорожнього транспорту, сектор NRMM тривалий час залишався менш жорстко регульованим, що зумовлювало високі рівні локального забруднення повітря [1].

Запровадження стандарту EU Stage V стало відповіддю Європейського Союзу на необхідність системного скорочення викидів дрібнодисперсних частинок та оксидів азоту, які мають доведений негативний вплив на здоров'я населення та клімат [2]. Водночас Stage V суттєво вплинув на технологічні підходи у машинобудуванні, змусивши виробників інтегрувати складні системи очищення вихлопних газів і переглянути конструктивні рішення двигунів.

Метою статті — є аналіз особливостей структури стандарту EU Stage V, характеру його технічних вимог та глобальні наслідки його впровадження для промисловості й екологічної політики.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Проблематика екологічного регулювання двигунів позашляхової мобільної техніки (NRMM) у міжнародній літературі розглядається як багатовимірне завдання, що поєднує нормативно-правові механізми, інженерні технології зниження викидів, методи випробувань і моделювання впливу на якість повітря. Найбільш цілісний нормативний вимір забезпечують матеріали Європейської комісії, що описують логіку законодавства Stage V, його сферу

застосування та пов'язані імплементаційні акти (делеговані й імплементаційні регламенти, зокрема щодо типового схвалення та моніторингу в експлуатації) [3, 4]. У цьому корпусі документів NRMM трактується як значущий джерельний сектор забруднення, для якого ключовими є інтегровані вимоги до лімітів та адміністративних процедур контролю відповідності.

Другий потужний напрям — екологічно-інвентаризаційні та атмосферно-екологічні дослідження, в яких NRMM описується через вклад у формування концентрацій забруднювачів (NO_x, PM, інші прекурсори вторинного аерозолі) на регіональному рівні та в містах. У цьому контексті значимими є методичні матеріали ЕЕА (зокрема інвентаризаційні підходи), де прямо наголошується, що Stage V підсилює контроль за твердими частинками і вводить ліміти за кількістю частинок (PN), як інструмент обмеження ультрадисперсних фракцій [5]. Для наукового аналізу це важливо тим, що PN-метрика відображає ризики для здоров'я точніше, ніж лише маса PM, і пояснює зміщення регуляторного акценту Stage V.

Третій блок міжнародних досліджень — політико-технологічні огляди та аналітика впливу стандартів на ринок і техніку. Тут суттєву роль відіграють публікації ICCT, які розглядають Stage V як фактор технологічного «форсування»: нові вимоги та запровадження PN очікувано ведуть до масового застосування DPF у широкому діапазоні потужностей, а також змінюють дизайн ланцюжка aftertreatment (DOC–DPF–SCR) [6,7]. У термінах індустріальної політики ці роботи демонструють, що Stage V — це не лише «жорсткі ліміти», а й механізм структурної модернізації, що уніфікує технічні рішення та наближає NRMM до практик дорожнього сектору.

Четвертий напрям — інженерно-технологічні дослідження систем зниження

викидів. У працях Johnson T. узагальнюється еволюція технологій контролю викидів дизельних двигунів, зокрема розвиток каталізаторних систем, комбінованих конфігурацій DPF+SCR, підходів до керування регенерацією фільтрів і досягнення стабільності екологічних показників упродовж ресурсу [8, 9]. Цей пласт літератури важливий для аргументації того, що Stage V «технічно реалізований» лише за умови інтеграції aftertreatment як системи, а не набору окремих модулів, з узгодженням термодинаміки, керування двигуном, якості палива і реальних режимів навантажень.

Окремо виділяються дослідження, присвячені частинкам та PN-нормуванню. Аналітика щодо PN робить акцент на тому, що регуляторний перехід від «масового» PM до комбінованого PM+PN пов'язаний із контролем ультрадисперсних частинок, для зниження яких критичною стає ефективність фільтрації та коректність вимірювань [5–7]. Додаткові наукові огляди по фільтрах твердих частинок (DPF/GPF) систематизують механізми уловлювання, режими роботи та проблеми довговічності/регенерації, які напряду визначають реальну екологічну ефективність вимог Stage V у полі експлуатації [10]. Важливо, що сучасна література дедалі частіше переходить від «сертифікаційних лімітів» до аналізу стійкості ефекту (durability) і відхилень у реальних сценаріях, особливо для малих потужностей і техніки зі змінними режимами роботи [11].

Щодо вітчизняного наукового поля, то українські публікації переважно концентруються на двох лініях. Перша — гармонізація регуляторної бази та адаптація до норм ЄС, де Stage V згадується як частина ширшого комплексу технічного регулювання і зближення з європейським ринком. У цій площині є роботи, що аналізують саме регуляторну логіку ЄС у секторі NRMM та підкреслюють роль гармонізованих технічних вимог для промислової політики [12]. Друга лінія — прикладні інженерні праці з удосконалення випускних систем дизельних двигунів (DOC, DPF та ін.), де Stage V часто виступає як зовнішній «цільовий орієнтир», що задає рівень вимог

до конструкції та експлуатаційної надійності систем очищення [13].

Водночас слід зазначити, що в українській літературі недостатньо представлені: системні порівняльні огляди Stage IV - Stage V з прив'язкою до методів випробувань та in-service monitoring; емпіричні дані щодо PN/PM для реального парку NRMM в Україні; комплексні оцінки економічного впливу (CAPEX/OPEX) Stage V на операторів техніки. Саме ці прогалини обґрунтовують потребу подальших досліджень Stage V як цілісної регуляторно-технологічної системи, а не тільки набору лімітів.

Невирішені аспекти проблеми

Незважаючи на значну кількість наукових і аналітичних публікацій, присвячених екологічному регулюванню двигунів позашляхової мобільної техніки, низка принципово важливих аспектів стандарту EU Stage V залишається недостатньо дослідженою. Насамперед це стосується системного впливу Stage V на глобальні виробничі та постачальні ланцюги, включно з трансформацією структури машинобудівних підприємств, уніфікацією компонентної бази та залежністю виробників від постачальників високотехнологічних систем очищення вихлопних газів.

Обмежено висвітленими залишаються також довгострокові технологічні наслідки впровадження Stage V для двигунобудування, зокрема з позицій еволюції архітектури двигунів внутрішнього згорання, зміни підходів до теплового менеджменту, керування робочими процесами та забезпечення стабільності екологічних показників упродовж повного життєвого циклу техніки. Більшість наявних робіт зосереджуються на досягненні сертифікаційних лімітів, тоді як питання експлуатаційної стійкості екологічних характеристик (durability) та їх збереження в реальних умовах роботи NRMM аналізуються фрагментарно.

Окремої уваги потребує проблема взаємодії екологічних стандартів із процесами електрифікації та гібридизації позашляхової техніки. У сучасній літературі Stage V здебільшого розглядається як фінальний

етап розвитку норм для двигунів внутрішнього згоряння, однак недостатньо досліджено його роль як каталізатора переходу до альтернативних силових установок та змішаних енергетичних систем. Відсутні комплексні оцінки того, якою мірою жорсткі екологічні вимоги прискорюють або, навпаки, стримують інноваційні процеси у секторі NRMM.

Крім того, науково недостатньо обґрунтованими залишаються економічні та соціально-екологічні ефекти впровадження Stage V, зокрема співвідношення між витратами на модернізацію техніки та очікуваними вигодами у вигляді зниження забруднення повітря, скорочення медико-санітарних витрат і покращення якості життя населення. Це обмежує можливості комплексної оцінки стандарту як інструменту екологічної та промислової політики.

Зазначені обставини зумовлюють необхідність комплексного аналізу стандарту EU Stage V не лише як набору граничних норм викидів, а як багаторівневої регуляторно-технологічної системи, що впливає на структуру галузі, напрями інноваційного розвитку та довгострокові екологічні результати.

Постановка задачі та методи дослідження

Виходячи з виявлених наукових прогалин, у статті поставлено завдання проаналізувати стандарт EU Stage V як цілісну регуляторну систему, що поєднує нормативні, технічні та технологічні компоненти та визначає напрями розвитку сектору позашляхової мобільної техніки.

Для досягнення поставленої мети в роботі використано такі методи дослідження:

- порівняльний аналіз екологічних стандартів Stage IV та Stage V з метою виявлення ключових відмінностей у структурі вимог, методах нормування та технічних наслідках для двигунів NRMM;
- системний аналіз нормативно-правових актів Європейського Союзу, включно з базовими регламентами та імплементаційними документами, що регламентують процедури типового схвалення,

контролю відповідності та експлуатаційного моніторингу;

- узагальнення результатів експериментальних і прикладних досліджень, присвячених ефективності систем селективного каталітичного відновлення (SCR), сажових фільтрів (DPF) та дизельних окиснювальних каталізаторів (DOC) у контексті досягнення вимог Stage V;

- аналітичне прогнозування технологічних тенденцій у секторі NRMM, зокрема щодо розвитку гібридних та електрифікованих силових установок під впливом жорстких екологічних стандартів;

- логіко-структурний аналіз, що дозволив сформулювати узагальнену модель впливу стандарту Stage V на екологічну, технологічну та виробничу складові галузі.

Застосування зазначених методів забезпечило комплексний підхід до дослідження та дало змогу розкрити стандарт EU Stage V як інструмент довгострокової трансформації позашляхового машинобудування та екологічної політики.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

1. Стандарт EU Stage 5 як етап еволюції екологічного регулювання NRMM. Аналіз еволюції екологічних стандартів для двигунів позашляхової мобільної техніки свідчить, що запровадження EU Stage V є логічним завершенням поетапного посилення вимог, започаткованого ще стандартами Stage I–Stage III (рис. 1). На відміну від попередніх етапів, які зосереджувалися переважно на зниженні масових викидів оксидів азоту та твердих частинок, Stage V формує якісно нову модель регулювання, орієнтовану на контроль дрібнодисперсних і ультрадисперсних частинок, що мають найбільший негативний вплив на здоров'я людини [3–5].

Принциповою особливістю Stage V є поєднання екологічних лімітів із жорсткими адміністративними та технічними вимогами до типового схвалення, сертифікації та контролю відповідності двигунів. Це дозволяє розглядати стандарт не як сукупність граничних значень, а як інтегровану регуляторну систему, що охоплює весь

Emission Regulations for CI Engines

		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
		(NO _x or NO ₂)									
USA	0kW ≤ 8kW						Tier 4 7.5/8.0/0.40[G2+NRTC]				
	8kW ≤ 19kW						Tier 4 7.5/6.6/0.40[G2+NRTC]				
	19kW ≤ 37kW						Tier 4 4.7/5.5/0.03[C1+NRTC]				
	37kW ≤ 56kW						Tier 4 4.7/5.0/0.03[C1+NRTC]				
	56kW ≤ 75kW						Tier 4 0.40/0.19/5.0/0.02[C1+NRTC]				
	75kW ≤ 130kW						Tier 4 0.40/0.19/5.0/0.02[C1+NRTC]				
	130kW ≤ 560kW						Tier 4 0.40/0.19/3.5/0.02[C1+NRTC]				
	(EPA APU)					Phase 1 (optional) PM=0.15g/kWh			Phase 1 PM=0.15g/kWh		
*APU: Auxiliary Power Unit (not to power truck)											
(CARB TRU)	(in-use reg.)7yrs after vehicle MY ULETRU(PM=0.02g/kWh)										
*TRU: Transport Refrigeration Unit											
EU	0kW ≤ 8kW						Stage V 7.50/8.00 /0.40 [G2 or C1]				
	8kW ≤ 19kW						Stage V 7.50/6.60/0.40 [G2 or C1]				
	19kW ≤ 37kW	Stage IIIA 7.5/5.5/0.6 [C1]					Stage V 4.70/5.00/0.015, 1×10 ¹² [C1+NR]				
	37kW ≤ 56kW	Stage IIIB 4.7/5.0/0.025 [C1+NRTC]					Stage V 4.70/5.00/0.015, 1×10 ¹² [C1+NR]				
	56kW ≤ 75kW	Stage IV 0.4/0.19/5.0/0.025 [C1+NRTC]					Stage V 0.40/0.19/5.00/0.015, 1×10 ¹²				
	75kW ≤ 130kW	Stage IV 0.4/0.19/5.0/0.025 [C1+NRTC]					Stage V 0.40/0.19/5.00/0.015, 1×10 ¹²				
	130kW ≤ 560kW	Stage IV 0.4/0.19/3.5/0.025 [C1+NRTC]					Stage V 0.40/0.19/3.50/0.015, 1×10 ¹² [C1+NRTC]				

Рисунок 1 – Еволюція екологічних стандартів для NRMP [15]

Europäische Abgasgesetzgebung für NRMM: Grenzwerte und Einführungszeitpunkte* für die Stufen 3B bis 5

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020 ff
Leistungsklassen	Abgasstufen und Grenzwerte für CO, HC, NO_x und PM in g/kWh sowie für PN in #/kWh									
0 kW < P < 8 kW	keine Reglementierung								Stufe 5 CO 8.0 / HC+NO _x 7.5 / PM 0.4 /PN -	
8 kW ≤ P < 19 kW	keine Reglementierung								Stufe 5 CO 6.6 / HC+NO _x 7.5 / PM 0.4 /PN -	
19 kW ≤ P < 37 kW	Stufe 3A CO 5.5 / HC+NO _x 7.5 / PM 0.6								Stufe 5 CO 5.0 / HC+NO _x 4.7 / PM 0.015 / PN 1x10 ¹²	
37 kW ≤ P < 56 kW	Stufe 3A		Stufe 3B CO 5.0 / HC+NO _x 4.7 / PM 0.025						Stufe 5 CO 5.0 / HC+NO _x 4.7 / PM 0.015 / PN 1x10 ¹²	
56 kW ≤ P < 75 kW			Stufe 3B CO 5.0 / HC 0.19 NO _x 3.3 / PM 0.025		Stufe 4 (ab 01.10.2014) CO 5.0 / HC 0.19 NO _x 0.4 / PM 0.025			Stufe 5 CO 5.0 / HC 0.19 / NO _x 0.4 PM 0.015 / PN 1x10 ¹²		
75 kW ≤ P < 130 kW			Stufe 3B** NO _x 2.0 / PM 0.025		Stufe 4 CO 3.5 / HC 0.19 / NO _x 0.4 / PM 0.025			Stufe 5 CO 3.5 / HC 0.19 / NO _x 0.4 / PM 0.015 / PN 1x10 ¹²		
130 kW ≤ P < 560 kW			Stufe 3B** NO _x 2.0 / PM 0.025		Stufe 4 CO 3.5 / HC 0.19 / NO _x 0.4 / PM 0.025			Stufe 5 CO 3.5 / HC 0.19 / NO _x 0.4 / PM 0.015 / PN 1x10 ¹²		
P ≥ 560 kW	keine Reglementierung								Stufe 5 CO 3.5 / HC 0.19 / NO _x 3.5 / PM 0.345 / PN -	

* Einführungszeitpunkte gelten für Inverkehrbringung ** Grenzwerte CO und HC: 3.5 / 0.19

CO: Kohlenmonoxid / HC: Kohlenwasserstoff / NO_x: Stickoxide / PM: Partikelmasse / PN: Partikelanzahl

Рисунок 2 – Еволюція екологічних стандартів ЄС для позашляхової мобільної техніки (Stage I–Stage V) [16]

життєвий цикл техніки — від проектування до експлуатації.

Рисунки 1 та 2 ілюструють послідовне посилення вимог до викидів NRMM, кульмінацією якого стало впровадження Stage V. Саме на цьому етапі відбулося принципове розширення підходів до оцінки екологічності двигунів.

2. Структура стандарту EU Stage V. Стандарт EU Stage V поширюється на широкий спектр двигунів NRMM, класифікованих за призначенням, потужністю та умовами експлуатації. Такий підхід дозволяє адаптувати екологічні вимоги до спе-

цифіки різних видів техніки — від портативних агрегатів і генераторів до важкої будівельної та сільськогосподарської техніки [2].

Ключовою інновацією структури Stage V є обов'язкове нормування кількості твердих частинок (PN) для більшості категорій дизельних двигунів. Це принципово змінює методологію оцінювання екологічності, оскільки маса частинок (PM) більше не розглядається як єдиний репрезентативний показник забруднення. Введення PN-метрики забезпечує більш точний контроль ультрадисперсних фракцій, які практично

Engines of categories IWP & IWA

⁽¹⁾ inclusive of after-treatment (if applicable)

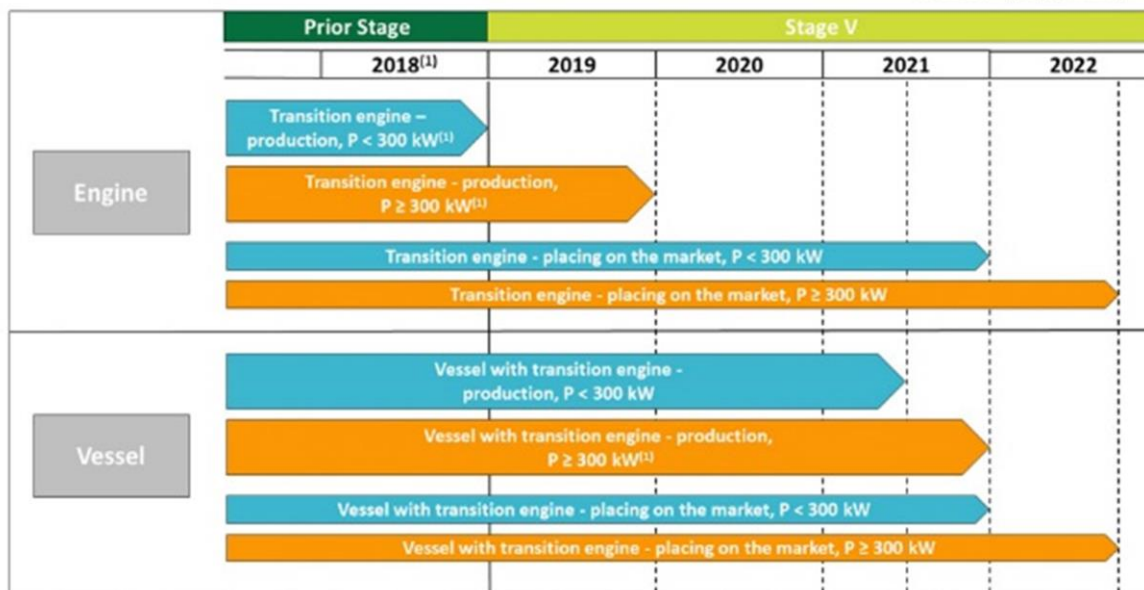


Рисунок 3 – Офіційний часовий графік (timeline) впровадження екологічного стандарту EU Stage V для двигунів та суден категорій IWP та IWA (внутрішньоводні суднові двигуни) відповідно до регламенту ЄС [17]

не вловлюються традиційними методами вимірювання.

На рисунку 3 представлено часову схему поетапного впровадження екологічного стандарту Європейського Союзу Stage V для двигунів та суден категорій IWP та IWA відповідно до положень Регламенту (EU) 2016/1628. Схема відображає перехід від попереднього стандарту (Prior Stage) до Stage V у період 2018–2022 років із чітким розмежуванням етапів виробництва та введення продукції в обіг. Для двигунів внутрішнього згоряння показано граничні строки дозволеного виробництва перехідних двигунів (transition engines) та їх розміщення на ринку залежно від номінальної потужності. Зокрема, для двигунів потужністю менше 300 кВт встановлено більш стислий перехідний період виробництва порівняно з двигунами потужністю 300 кВт і більше, для яких законодавством передбачено подовжені строки адаптації. Водночас строки введення в обіг для обох потужнісних категорій перевищують строки завершення виробництва, що забезпечує можливість реалізації вже виготовленої продукції без порушення вимог регламенту.

Аналогічний підхід застосовано до суден, оснащених перехідними двигунами категорій IWP та IWA. Схема демонструє, що законодавець ЄС диференціює строки завершення виробництва та введення в обіг суден залежно від потужності встановленого двигуна, надаючи довші перехідні періоди для більш потужних установок. Така регуляторна модель дозволяє узгодити екологічні вимоги з технологічними та виробничими циклами суднобудівної галузі.

Загалом рисунок 3 ілюструє принцип поступової імплементації стандарту Stage V, спрямований на мінімізацію економічних ризиків для виробників за одночасного забезпечення переходу до більш жорстких екологічних вимог. Після завершення визначених перехідних строків будь-яке виробництво та введення в обіг двигунів і суден відповідних категорій допускається виключно за умови повної відповідності стандарту Stage V, включно з використанням систем доочищення відпрацьованих газів, якщо це передбачено регламентом.

Stage V охоплює широкий спектр двигунів, класифікованих за потужністю та функціональним призначенням. Така стру-

Stage V emission standards for engines in inland waterway vessels (IWP & IWA)

Category	Net Power	Date	CO	HC ^a	NOx	PM	PN
	kW						
IWP/IWA-v/c-1	19 ≤ P < 75	2019	5.00	4.70 ^b	2.10	0.30	-
IWP/IWA-v/c-2	75 ≤ P < 130	2019	5.00	5.40 ^b	2.10	0.14	-
IWP/IWA-v/c-3	130 ≤ P < 300	2019	3.50	1.00	2.10	0.10	-
IWP/IWA-v/c-4	P ≥ 300	2020	3.50	0.19	1.80	0.015	1×10 ¹²

^a A = 6.00 for gas engines
^b HC + NOx

Рисунок 4 – Класифікація двигунів NRMP у стандарті EU Stage V [17]

ктура забезпечує універсальність стандарту та його застосовність до різних галузей промисловості. На рисунку 4 представлено граничні значення викидів забруднювальних речовин відповідно до екологічного стандарту EU Stage V для двигунів, що встановлюються на внутрішньоводних суднах категорій IWP та IWA. Таблиця систематизує нормативні вимоги залежно від категорії двигуна, його номінальної корисної потужності та дати набуття чинності стандарту. Двигуни поділено на чотири категорії (IWP/IWA-v/c-1 – IWP/IWA-v/c-4) залежно від діапазону потужності: від 19 кВт до понад 300 кВт. Для кожної категорії встановлено окремі граничні значення масових викидів оксиду вуглецю (CO), вуглеводнів (HC або сумарно HC+NOx), оксидів азоту (NOx), твердих частинок (PM), а також, для найпотужніших двигунів, – кількості твердих частинок (PN).

Рисунок 4 демонструє, що для двигунів малої та середньої потужності (19 ≤ P < 130 кВт) нормативні вимоги Stage V не передбачають окремого ліміту PN, тоді як для двигунів потужністю 130–300 кВт значно знижуються допустимі значення NOx і PM порівняно з попередніми стандартами. Найжорсткіші вимоги встановлено для двигунів потужністю 300 кВт і більше, для яких, окрім істотного зменшення граничного значення PM (до 0,015 г/кВт·год), уперше вводиться обмеження за кількістю твердих частинок на рівні 1×10¹² 1/кВт·год.

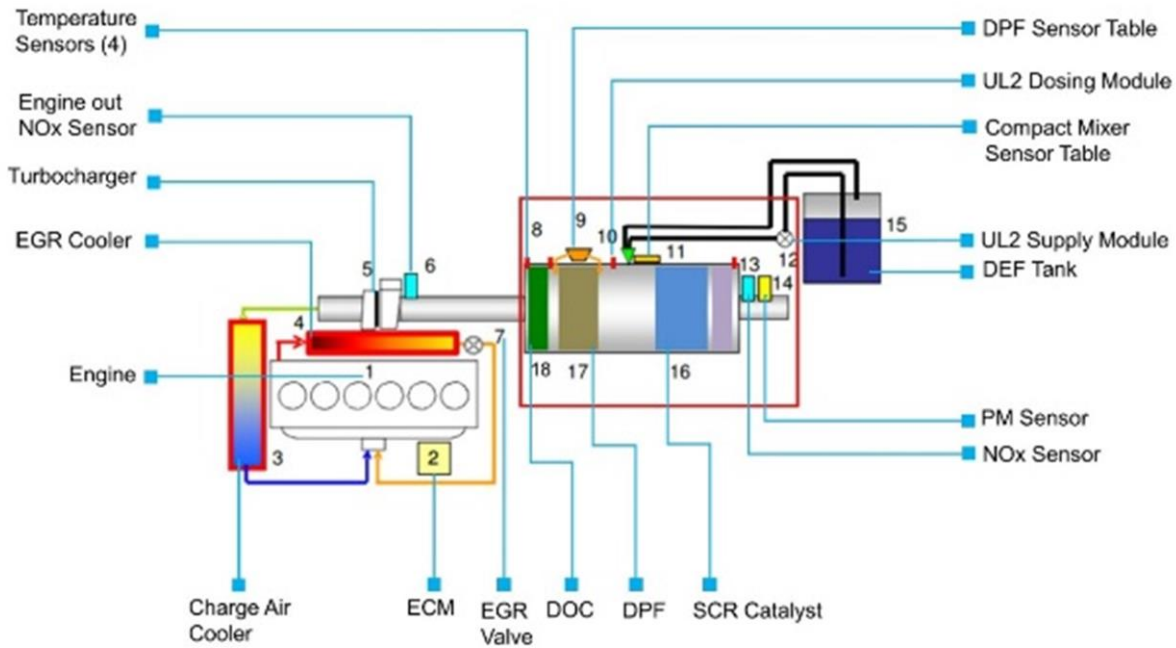
Окремі примітки до таблиці уточнюють, що для газових двигунів застосовується альтернативне граничне значення HC (Hydrocarbons / Вуглеводні), а також що в

окремих категоріях використовується сумарний показник HC+NOx. Таким чином, таблиця відображає диференційований підхід стандарту Stage V до нормування викидів внутрішньоводних суднових двигунів з урахуванням їх потужності, типу палива та екологічного впливу.

3. Технічні вимоги та їх інженерне обґрунтування. Аналіз граничних значень викидів, встановлених стандартом Stage V, показує суттєве зниження допустимих рівнів NOx та PM порівняно зі Stage IV, а також принципове розширення спектра контрольованих параметрів [3, 5]. У більшості категорій двигунів досягнення таких показників є технічно неможливим без застосування складних систем очищення вихлопних газів.

Результати узагальнення експериментальних і прикладних досліджень підтверджують, що комбіноване використання систем SCR, DPF та DOC є базовою технологічною умовою відповідності вимогам Stage V [6–8]. Система SCR забезпечує ефективно зниження оксидів азоту, тоді як сажовий фільтр DPF відповідає за уловлювання твердих і ультрадисперсних частинок, включно з нанофракціями. Окиснювальний каталізатор DOC виконує допоміжну функцію зниження викидів CO та незгорілих вуглеводнів, а також сприяє оптимізації режимів регенерації DPF.

Інженерний аналіз свідчить, що Stage V змінює підхід до проектування двигунів: aftertreatment-системи перестають бути «додатковими модулями» і стають структурною частиною силової установки, що потребує узгодження термодинамічних, електронних та паливних параметрів.



- 1 – Engine (Двигун); 2 – ECM (Блок керування двигуном); 3 – Charge Air Cooler (Охолоджувач надвугневого повітря); 4 – EGR Cooler (Охолоджувач рециркуляції відпрацьованих газів); 5 – Turbocharger (Турбокомпресор); 6 – Engine Out NOx Sensor (Датчик NOx на виході двигуна); 7 – EGR Valve (Клапан рециркуляції відпрацьованих газів); 8 – Temperature Sensors 4 (Датчики температури, 4 шт); 9 – DPF Sensor Table (Таблиця датчиків DPF); 10 – UL2 Dosing Module (Модуль дозування UL2); 11 – Compact Mixer Sensor Table (Компактний стіл датчиків змішувача); 12 – UL2 Supply Module (Модуль живлення UL2); 13 – NOx Sensor (Датчик NOx); 14 – PM Sensor (Датчик твердих частинок); 15 – DEF Tank (Бак DEF); 16 – SCR Catalyst (Каталізатор SCR); 17 – DPF (Сажовий фільтр); 18 – DOC (Diesel Oxidation Catalyst) (Дизельний окиснювальний каталізатор)

Рисунок 5 – Система нейтралізації вихлопних газів [18]

4. Технології очищення вихлопних газів. Важливою складовою стандарту Stage V є вимоги до стабільності екологічних характеристик упродовж ресурсу двигуна. На відміну від попередніх стандартів, Stage V акцентує увагу на необхідності збереження ефективності систем очищення в реальних умовах експлуатації, з урахуванням змін навантаження, режимів роботи та технічного стану [4, 9].

На рисунку 5 подана схема відображає комплексну архітектуру системи зниження викидів дизельного двигуна, яка поєднує внутрішньодвигунні методи зменшення утворення забруднювачів та багатоступеневу післяобробку відпрацьованих газів із використанням систем DOC–DPF–SCR. Робота системи координується електронним блоком керування двигуном (ECM) на основі даних численних датчиків температури, концентрації NOx і твердих частинок.

Після процесу згорання паливно-повітряної суміші у циліндрах двигуна відпрацьовані гази надходять у випускний тракт. Частина цих газів відбирається системою рециркуляції відпрацьованих газів (EGR), проходить через охолоджувач EGR та повторно подається у впускний колектор. Зниження температури згорання за рахунок EGR сприяє зменшенню утворення оксидів азоту (NOx) на внутрішньодвигунному етапі.

Одночасно свіже повітря після компресії турбокомпресором охолоджується у охолоджувачі надвугневого повітря, що підвищує щільність заряду та стабільність процесу згорання.

Основний потік відпрацьованих газів після турбокомпресора надходить до дизельного окиснювального каталізатора (DOC). На цьому етапі відбувається:

- окиснення оксиду вуглецю (CO) до CO₂;
- зменшення концентрації незгорілих вуглеводнів (HC);
- часткове окиснення NO до NO₂, що є важливим для ефективної роботи наступного елемента — сажового фільтра.

Температура газів у зоні DOC постійно контролюється температурними датчиками, дані з яких використовуються ЕСМ для керування режимами регенерації. Після DOC гази надходять у сажовий фільтр (DPF), призначений для уловлювання твердих частинок (PM), включно з ультрадисперсними фракціями, нормування яких передбачене стандартом Stage V.

У процесі експлуатації в DPF накопичується сажа, що потребує періодичної регенерації фільтра. Регенерація може здійснюватися:

- пасивно — за рахунок високої температури газів;
- активно — шляхом керованого підвищення температури через зміну режимів роботи двигуна або додаткове окиснення у DOC.

Контроль ступеня заповнення DPF здійснюється за допомогою датчиків температури та датчика твердих частинок (PM sensor).

Після фільтрації твердих частинок відпрацьовані гази надходять до системи SCR, де здійснюється хімічне відновлення оксидів азоту. У випускний тракт дозується водний розчин сечовини (DEF) із бака через модуль дозування (UL2 dosing module).

Речовина розкладається з утворенням аміаку, який у присутності каталізатора SCR реагує з NO_x, утворюючи молекулярний азот (N₂) та воду (H₂O). Для забезпечення рівномірного розподілу реагенту використовується компактний змішувач.

До та після SCR-каталізатора встановлені NO_x-датчики, які забезпечують контроль ефективності зниження NO_x у реальному часі. Дані з усіх датчиків (температури, NO_x, PM) передаються до ЕСМ, який:

- коригує подачу DEF;
- керує режимами регенерації DPF;

- оптимізує роботу EGR і турбонаддуву.

Таким чином реалізується замкнена система керування, що забезпечує стабільну відповідність екологічним вимогам Stage V у різних режимах експлуатації.

Подана схема ілюструє інтегрований підхід до зниження викидів, у якому поєднуються:

- внутрішньодвигунні методи (EGR);
- каталізаторні системи (DOC, SCR);
- механічна фільтрація (DPF);
- розвинена сенсорна та електронна система керування.

Саме така багатоступенева архітектура є технічною основою досягнення граничних значень викидів NO_x, PM та PN, встановлених стандартом EU Stage V.

Рисунок 6 ілюструє базову конфігурацію системи після обробки відпрацьованих газів дизельного двигуна, яка лежить в основі більш складної архітектури очищення, описаної на попередньому рисунку. На відміну від попередньої схеми, де детально показано взаємодію сенсорів, електронного керування та допоміжних систем (EGR, ЕСМ, датчики NO_x і PM), дана схема узагальнює функціональну послідовність основних елементів aftertreatment та фізико-хімічні процеси, що відбуваються у випускному тракті.

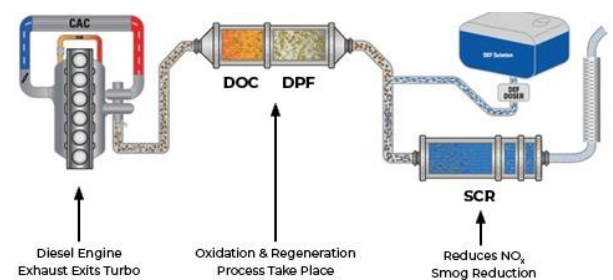


Рисунок 6 – Типова система очищення вихлопних газів двигуна Stage V [19]

Відпрацьовані гази після виходу з дизельного двигуна та турбокомпресора надходять у дизельний окиснювальний каталізатор (DOC). На цьому етапі відбувається окиснення оксиду вуглецю та незгорілих вуглеводнів, а також часткове перетворення оксиду азоту NO в NO₂. Саме цей про-

цес створює необхідні умови для ефективної роботи наступного елемента системи — сажового фільтра. У попередньо розглянутій розширеній схемі ці процеси контролюються датчиками температури та коригуються електронним блоком керування.

Далі газовий потік надходить у сажовий фільтр (DPF), де здійснюється механічне уловлювання твердих частинок (PM), включно з ультрадисперсними фракціями, нормування яких є ключовою вимогою стандарту EU Stage V. У DPF відбуваються процеси окиснення накопиченої сажі та її регенерації, що на базовій схемі позначено як зона «oxidation and regeneration». У реальній системі, показаній на попередньому рисунку, ці процеси відбуваються під контролем ECM із використанням температурних і PM-датчиків.

Після фільтрації твердих частинок відпрацьовані гази надходять у зону селективного каталітичного відновлення (SCR). Перед SCR-каталізатором у потік газів дозується водний розчин сечовини (DEF), який зберігається в окремому баку та подається через дозувальний модуль. Після термічного розкладу DEF утворюється аміак, який у каталізаторі SCR реагує з оксидами азоту з утворенням молекулярного азоту та води. Саме на цьому етапі досягається основне зниження NOx, що безпосередньо відповідає граничним вимогам Stage V щодо цього забруднювача.

Таким чином, поданий рисунок 6 відображає функціональне ядро системи очищення відпрацьованих газів, яке у попередньо розглянутій схемі доповнюється розвиненою сенсорною системою, рециркуляцією відпрацьованих газів, електронним керуванням та зворотними зв'язками. Обидві схеми описують один і той самий принцип роботи aftertreatment, але на різних рівнях деталізації: базовому (функціональному) та розширеному (системному). У сукупності вони демонструють інтегрований підхід до зниження викидів NOx, PM і PN, який є технічною основою відповідності дизельних двигунів вимогам стандарту EU Stage V.

5. Технологічні та галузеві наслідки впровадження Stage V. Комплексний ана-

ліз наукових і аналітичних джерел свідчить, що стандарт EU Stage V має довгостроковий трансформаційний вплив на сектор позашляхової мобільної техніки (NRMM), який виходить за межі безпосереднього зниження шкідливих викидів. З одного боку, впровадження Stage V призводить до уніфікації технічних рішень у галузі двигунобудування та систем після обробки відпрацьованих газів, а з іншого — формує нові бар'єри входу на ринок, пов'язані з високою складністю та вартістю відповідних технологій [8], [11].

З технологічної точки зору Stage V стимулює структурну перебудову силових установок NRMM. Обов'язкове застосування складних систем aftertreatment (DOC, DPF, SCR), жорсткі вимоги до стабільності екологічних показників та контроль кількості твердих частинок (PN) зумовлюють перехід від традиційного підходу «двигун як автономний агрегат» до інтегрованих енергетичних систем, у яких двигун внутрішнього згоряння працює в тісному зв'язку з електронними та електромеханічними компонентами.

На галузевому рівні це призводить до концентрації виробництва та посилення ролі великих машинобудівних концернів і постачальників систем aftertreatment, здатних інвестувати у складні сертифікаційні процедури та дослідно-конструкторські роботи. Водночас для малих і середніх виробників Stage V створює значні виклики, що стимулює кооперацію, ліцензування технологій або вихід з ринку окремих сегментів NRMM.

Важливим технологічним наслідком впровадження Stage V є прискорення переходу до гібридних та електрифікованих конфігурацій силових установок. Посилення екологічних вимог робить економічно та технічно доцільним використання електричних приводів для допоміжних і робочих органів машин, а також застосування гібридних схем, у яких двигун внутрішнього згоряння працює в оптимізованих режимах або виконує допоміжну функцію. У цьому контексті Stage V доцільно розглядати не лише як фінальний етап розвитку екологічних стандартів для дизель-

них двигунів, а як перехідний регуляторний механізм до нової парадигми енергетичних систем у NRMM [19].

На рисунку 7 представлено дві концептуальні електричні архітектури енергопостачання трактора та навісного обладнання — архітектуру з передачею постійного струму (DC Architecture) та архітектуру з передачею змінного струму (AC Architecture), які є типовими прикладами технологічних рішень, що набувають поширення в умовах дії Stage V. Обидві архітектури реалізують електричний відбір потужності від двигуна внутрішнього згорання та призначені для живлення електрифікованих виконавчих механізмів навісних агрегатів.

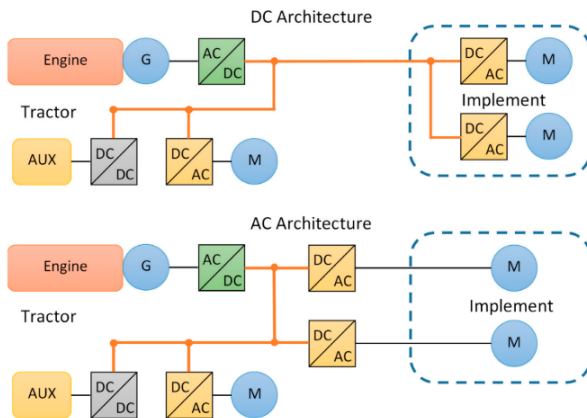


Рисунок 7 – Вплив стандарту Stage V на технологічний розвиток NRMP [20]

У конфігурації DC Architecture двигун внутрішнього згорання приводить у дію електрогенератор, після чого формується спільна DC-шина, яка використовується як універсальне джерело електроживлення для систем трактора та навісного обладнання. Такий підхід забезпечує високий рівень модульності та гнучкості системи, однак супроводжується перенесенням значної частини силової електроніки в агрегати, що підвищує їх конструктивну складність і вартість. Натомість AC Architecture передбачає централізацію перетворювальних і керуючих функцій у складі трактора, що спрощує навісне обладнання, але потребує більш складної та потужної електричної інфраструктури базової машини.

Таким чином, впровадження стандарту Stage V має системний технологічний і га-

лузевий ефект, що проявляється у зміні архітектури силових установок, трансформації виробничих ланцюгів, посиленні ролі електрифікації та формуванні нових інженерних підходів до побудови NRMM. У довгостроковій перспективі Stage V виступає не лише інструментом екологічного регулювання, а й каталізатором технологічної еволюції позашляхового машинобудування.

Висновки

1. Stage V сформував інтегровану регуляторну модель, що поєднує граничні значення викидів, обов'язкове нормування кількості твердих частинок (PN), уніфіковані процедури типового схвалення та вимоги до стабільності екологічних показників протягом життєвого циклу двигуна. Це дозволяє розглядати стандарт не як сукупність окремих норм, а як цілісну регуляторно-технологічну систему.

2. Введення PN-нормування стало ключовою інновацією Stage V, яка принципово змінила підходи до проектування та оцінювання екологічності дизельних двигунів NRMM. Контроль ультрадисперсних частинок обумовив практично повсюдне застосування сажових фільтрів (DPF) та перехід до багатоступеневих систем aftertreatment.

3. Технічні вимоги Stage V зумовили інтеграцію систем очищення вихлопних газів у структуру силової установки, що призвело до зміни інженерної парадигми: системи DOC, DPF та SCR перестали бути допоміжними елементами й стали функціонально пов'язаними з процесами згорання, теплового менеджменту та електронного керування двигуном.

4. Стандарт Stage V має виражений галузевий ефект, сприяючи уніфікації технічних рішень, концентрації виробництва та посиленню ролі великих машинобудівних компаній і постачальників високотехнологічних компонентів. Водночас він створює значні бар'єри входу на ринок для малих виробників, що змінює структуру конкуренції у секторі NRMM.

5. Stage V виконує роль каталізатора електрифікації та гібридизації позашляхо-

вої техніки. Жорсткі екологічні вимоги стимулюють перехід до електричних та гібридних архітектур, у яких двигун внутрішнього згоряння працює в оптимізованих режимах або виконує допоміжну функцію. Розглянуті DC- та AC-архітектури електропостачання тракторно-агрегатних систем ілюструють напрями цієї трансформації.

6. У довгостроковій перспективі Stage V слід розглядати як перехідний регулято-

рний механізм, що готує сектор NRMM до нової парадигми енергетичних систем, орієнтованих на зниження вуглецевого сліду, інтеграцію електроприводів та підвищення загальної енергоефективності машин.

Подяки

Відсутні.

Конфлікти інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. European Environment Agency. Air quality and emissions from non-road mobile machinery. Luxembourg. 2020. No. 9. URL: <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/36559.pdf>

2. European Parliament and Council. Regulation (EU) 2016/1628 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. Official Journal of the European Union. 2016. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj/eng>

3. European Commission. Non-road mobile machinery (NRMM) emissions – overview / Stage V context. Brussels. 2020. URL: <https://ec.europa.eu/newsroom/growth/items/683574/en>

4. European Commission. Emissions from non-road mobile machinery: legislation and implementing acts (type-approval, monitoring in-service). Single Market Economy. 2025. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/environmental-protection/non-road-mobile-machinery_en

5. European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Non-road mobile machinery. 2023. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-bsectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-non-road/%40%40download/file>

6. Dallmann, T. Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicles and equipment. Stage V PN introduction. International Council on Clean Transportation. 2020. URL: <https://theicct.org/publication/technology-pathways-for-diesel-engines-used-in-non-road-vehicles-and-equipment/>

7. International Council on Clean Transportation. European Stage V non-road emission standards – policy update. 2025. URL: <https://theicct.org/publication/european-stage-v-non-road-emission-standards/>

8. Johnson, T. V. Review of diesel emissions and control technologies. SAE Technical Paper 2010-01-0301. 2010. URL: <https://www.sae.org/articles/review-diesel-emissions-control-2010-01-0301>

9. Meyer, M., Bernard, Y. Real-world NOx emissions from diesel pickup trucks in the United States: a 2023 update. ICCT Report. 2024. URL: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/10/ID-241-Pickup-trucks-TRUE-Initiative-final-4-2.pdf>

10. Dong, R., Liu, Z., Wang, Y. та ін. Review of particle filters for internal combustion engines. Processes. 2022. Vol. 10, No. 5. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/5/993>

11. McCaffery, C., Yang, J., Karavalakis, G., Yoon, S., Johnson, K. C., Miller, J. W., Durbin, T. D. Evaluation of small off-road diesel engine emissions and aftertreatment feasibility. Energy. 2022. Vol. 251. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v251y2022ics0360544222008064.html>

12. Івасенко, В. М., Приміський, І. В. Питання адаптації європейських стандартів автомобільних викидів в Україні. Технічна інженерія. 2025. № 1 (95).

13. Singh, N., Rutland, C., Foster, D., Narayanaswamy, K. et al. Investigation into Different DPF Regeneration Strategies Based on Fuel Economy Using Integrated System Simulation. SAE Technical Paper 2009-01-1275. 2009. <https://doi.org/10.4271/2009-01-1275>
14. Saxena, Harshit. Thermal Management and Engine Calibration Strategies for Enhanced Passive DPF Regeneration in CEV Stage V CI Engines. SAE Technical Paper. 2025. URL: <https://saemobilus.sae.org/papers/thermal-management-engine-calibration-strategies-enhanced-passive-dpf-regeneration-cev-stage-v-ci-engines-2026-26-0141>
15. Niftylift Ltd. Engines – EU Stage V compliance. Niftylift Blog. 2025. URL: <https://www.niftylift.com/uk/about-us/blog/articles/niftylift-engines-eu-stage-v-compliance>
16. SEV Stromerzeuger. Emission levels for power generators in the European Union. 2025. URL: <https://sev-stromerzeuger.com/en/pages/emissions-standards-for-power-generators-in-the-european-union>
17. Xeamos. Stage V engines of categories IWP & IWA. White Paper. 2025. URL: <https://xeamos.com/white-paper-stage-v/>
18. Cummins Inc. How an aftertreatment system works. 2025. URL: <https://www.cummins.com/components/aftertreatment/how-it-works>
19. EcoClean Advantage. Understanding aftertreatment technology: DPF technology. 2025. URL: <https://ecleanadvantage.com/dpf-technology/>
20. Lajunen, A., Sainio, P., Laurila, L., Pippuri-Mäkeläinen, J., Tammi, K. Overview of powertrain electrification and future scenarios for non-road mobile machinery. *Energies*. 2018. Vol. 11, No. 5. 1184. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/5/1184>

References

1. European Environment Agency. (2020). *Air quality and emissions from non-road mobile machinery* (No. 9). Luxembourg. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/36559.pdf>
2. European Parliament and Council. (2016). *Regulation (EU) 2016/1628 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery*. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj/eng>
3. European Commission. (2020). *Non-road mobile machinery (NRMM) emissions – overview / Stage V context*. Brussels. <https://ec.europa.eu/newsroom/growth/items/683574/en>
4. European Commission. (2025). *Emissions from non-road mobile machinery: legislation and implementing acts (type-approval, monitoring in-service)*. Single Market Economy. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/environmental-protection/non-road-mobile-machinery_en
5. European Environment Agency. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Non-road mobile machinery*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-bsectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-non-road/%40%40download/file>
6. Dallmann, T. (2020). *Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicles and equipment. Stage V PN introduction*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/technology-pathways-for-diesel-engines-used-in-non-road-vehicles-and-equipment/>
7. International Council on Clean Transportation. (2025). *European Stage V non-road emission standards – policy update*. <https://theicct.org/publication/european-stage-v-non-road-emission-standards/>
8. Johnson, T. V. (2010). *Review of diesel emissions and control technologies* (SAE Technical Paper 2010-01-0301). <https://www.sae.org/articles/review-diesel-emissions-control-2010-01-0301>

9. Meyer, M., & Bernard, Y. (2024). *Real-world NO_x emissions from diesel pickup trucks in the United States: a 2023 update* (ICCT Report). https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/10/ID-241-Pickup-trucks_TRUE-Initiative_final_4-2.pdf
10. Dong, R., Liu, Z., Wang, Y., & et al. (2022). Review of particle filters for internal combustion engines. *Processes*, 10(5). <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/5/993>
11. McCaffery, C., Yang, J., Karavalakis, G., Yoon, S., Johnson, K. C., Miller, J. W., & Durbin, T. D. (2022). Evaluation of small off-road diesel engine emissions and aftertreatment feasibility. *Energy*, 251. <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v251y2022ics0360544222008064.html>
12. Ivasenko, V. M., & Prymiskyi, I. V. (2025). Pytannia adaptatsii yevropeiskykh standartiv avtomobilnykh vykydiv v Ukraini [Issues of adaptation of European automobile emission standards in Ukraine]. *Technical Engineering*, (1), 95. (in Ukrainian)
13. Singh, N., Rutland, C., Foster, D., Narayanaswamy, K., & et al. (2009). *Investigation into different DPF regeneration strategies based on fuel economy using integrated system simulation* (SAE Technical Paper 2009-01-1275). <https://doi.org/10.4271/2009-01-1275>
14. Saxena, H. (2025). *Thermal management and engine calibration strategies for enhanced passive DPF regeneration in CEV Stage V CI engines* (SAE Technical Paper). <https://saemobilus.sae.org/papers/thermal-management-engine-calibration-strategies-enhanced-passive-dpf-regeneration-cev-stage-v-ci-engines-2026-26-0141>
15. Niftylift Ltd. (2025). *Engines – EU Stage V compliance*. Niftylift Blog. <https://www.niftylift.com/uk/about-us/blog/articles/niftylift-engines-eu-stage-v-compliance>
16. SEV Stromerzeuger. (2025). *Emission levels for power generators in the European Union*. <https://sev-stromerzeuger.com/en/pages/emissions-standards-for-power-generators-in-the-european-union>
17. Xeamos. (2025). *Stage V engines of categories IWP & IWA* (White Paper). <https://xeamos.com/white-paper-stage-v/>
18. Cummins Inc. (2025). *How an aftertreatment system works*. <https://www.cummins.com/components/aftertreatment/how-it-works>
19. EcoClean Advantage. (2025). *Understanding aftertreatment technology: DPF technology*. <https://ecleanadvantage.com/dpf-technology/>
20. Lajunen, A., Sainio, P., Laurila, L., Pippuri-Mäkeläinen, J., & Tammi, K. (2018). Overview of powertrain electrification and future scenarios for non-road mobile machinery. *Energies*, 11(5), 1184. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/5/1184>

EU STAGE V ENVIRONMENTAL STANDARDS: STRUCTURE, TECHNICAL REQUIREMENTS AND GLOBAL IMPACTS

Zashchepkina N. M.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of ICT
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
03056, 37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9397-6632>
e-mail: nanic1604@gmail.com

Prymirsky I. V.

Postgraduate student, Department of ICT
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
03056, 37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5157-4870>
e-mail: aep@aep.kiev.ua

Abstract. The article presents an analysis of the European Union Stage V environmental standard for engines of non-road mobile machinery (Non-Road Mobile Machinery, NRMM), which has become a new stage in the development of the system of environmental regulation of industrial and transport emissions. The paper considers the prerequisites for the introduction of the Stage V standard, the features of its regulatory structure and differences from the previous environmental standards Stage IIIA, Stage IIIB and Stage IV. Unlike previous standards, Stage V not only significantly reduces the permissible levels of emissions of nitrogen oxides and particulate matter, but also for the first time introduces the standardization of the number of particulate matter (PN), which requires the use of modern exhaust gas purification systems and the modernization of internal combustion engines. The paper analyzes the structure of the Stage V standard, its main technical requirements and implementation mechanisms. The impact of the standard on the development of mechanical engineering, the introduction of selective catalytic reduction (SCR) systems, diesel particulate filters (DPF) and electronic engine control systems is considered. It is determined that the implementation of Stage V stimulates the increase in fuel efficiency of equipment, the reduction of environmental load and the development of intelligent emission monitoring systems. Particular attention is paid to the impact of the standard on the transformation of energy and production strategies in industry. It is substantiated that Stage V performs not only a regulatory, but also an innovative function, stimulating the transition to hybrid and electrified power plants, as well as the integration of modern digital technologies into equipment control systems. The results obtained can be used in the development of environmental strategies for the modernization of equipment, the improvement of exhaust gas purification systems, the adaptation of production processes to modern international requirements and the formation of directions for further scientific research in the field of environmentally friendly energy systems.

Keywords: environmental regulation; off-road vehicles; emission standards; diesel engines; cleaning systems.