МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«___»_____ 2026 р.
Зав. кафедри _д.т.н., професор___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Володимир ДІДУР___
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: «Оцінка інтенсивності засмічення повітряних фільтрів магістральних тягачів під час збиральної кампанії та коригування періодичності їх заміни»

Виконав: студент 4 курсу, групи 41-з-ім
освітньої програми __бакалавра_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»__
Сергій ТРЕТЯК
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент Іван ЛІСОВИЙ___
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Умань – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії
Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ Володимир ДІДУР
«___» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

ТРЕТЯКУ Сергію Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оцінка інтенсивності засмічення повітряних фільтрів магістральних тягачів під час збиральної кампанії та коригування періодичності їх заміни»
керівник роботи Лісовий І.О., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
" 08 " травня 2026 р. № 01-06/167
2. Строк подання студентом роботи 20.05.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: Вітчизняні та зарубіжні джерела з теорії фільтрації і механіки аерозолів, наукові статті щодо математичного моделювання процесів поверхневого кольматажу (*cake formation*) пористих перегородок, матеріали експлуатаційних випробувань систем впуску вантажних автомобілів, експериментальні масиви даних бортової діагностики за CAN-протоколом J1939, довідкові дані про фракційний та мінерально-органічний склад агротехнічного пилу в період жнив, а також технічна документація і регламенти обслуговування фільтрувальних систем компаній Donaldson та Mann+Hummel.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Вступ; експлуатаційно-технічні чинники функціонування систем повітроочищення зерновозів при збиранні врожаю; теоретичне моделювання та експериментальне визначення динаміки газодинамічного опору засмічених фільтроелементів; безпека життєдіяльності та мінімізація ризиків при технічному обслуговуванні систем впуску тягачів; техніко-технологічне та фінансово-економічне обґрунтування адаптивного регламенту заміни фільтрувальних елементів; загальні висновки; список використаних джерел; додатки.
5. Ілюстративний матеріал: підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 10 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Едуард ПРОКОПЕНКО, доцент		

7. Дата видачі завдання 1 жовтня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	01.12.2025 р.	
2.	РОЗДІЛ 1. Експлуатаційно-технічні чинники функціонування систем повітроочищення зерновозів при збиранні врожаю	25.12.2025 р.	
3.	РОЗДІЛ 2. Теоретичне моделювання та експериментальне визначення динаміки газодинамічного опору засмічених фільтроелементів	02.02.2026 р.	
4.	РОЗДІЛ 3. Безпека життєдіяльності та мінімізація ризиків при технічному обслуговуванні систем впуску тягачів	01.04.2026 р.	
5.	РОЗДІЛ 4. Техніко-технологічне та фінансово-економічне обґрунтування адаптивного регламенту заміни фільтрувальних елементів	01.05.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини роботи (підготовка інженерних креслень, графіків кінетики кольматажу та блок-схем динамічного алгоритму ТО)	12.05.2026 р.	
7	Представлення роботи керівнику на перевірку та остаточне оформлення пояснювальної записки	15.05.2026р.	

Студент _____ Сергій ТРЕТЯК
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Іван ЛІСОВИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП 6

РОЗДІЛ 1. ЕКСПЛУАТАЦІЙНО-ТЕХНІЧНІ ЧИННИКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ПОВІТРООЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВОЗІВ ПРИ ЗБИРАННІ ВРОЖАЮ 8

1.1. Специфіка пилового навантаження на магістральний автотранспорт в умовах інтенсивного збирання зернових культур 8

1.2. Оцінка конструктивних особливостей та захисних властивостей сучасних пористих гофрованих елементів автомобільних фільтрів 10

1.3. Виявлення недоліків фіксованих міжсервісних інтервалів ТО та обґрунтування адаптивного коригування періодичності заміни 14

Висновки до розділу 18

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ ЗАСМІЧЕНИХ ФІЛЬТРОЕЛЕМЕНТІВ 20

2.1. Математичний опис кінетики утворення поверхневого пилового осаду на пористих перегородках 20

2.2. Експлуатаційні випробування магістральних тягачів-зерновозів з фіксацією темпів накопичення пилу в реальному часі 24

2.3. Синтез динамічного алгоритму розрахунку залишкового ресурсу повітряних фільтрів на основі фактичного об'єму очищеного повітря 27

Висновки до розділу 30

РОЗДІЛ 3. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА МІНІМІЗАЦІЯ РИЗИКІВ ПРИ ТЕХНІЧНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ СИСТЕМ ВПУСКУ ТЯГАЧІВ 31

3.1. Ідентифікація шкідливих та небезпечних чинників робочої зони водіїв та слюсарів автопідприємства 31

3.2. Обґрунтування організаційно-профілактичних заходів виробничої санітарії та протипожежного захисту 32
3.3. Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій при експлуатації та обслуговуванні систем повітроочищення 33
Висновки до розділу 35
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ТА ФІНАНСОВО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ АДАПТИВНОГО РЕГЛАМЕНТУ ЗАМІНИ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ 36
4.1. Оцінка впливу впровадженого динамічного ТО на надійність двигунів та запобігання абразивному зносу 36
4.2. Розрахунок економічного ефекту від оптимізації витрат дизельного палива та окупності засобів моніторингу 37
Висновки до розділу 38
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 41
ДОДАТКИ 46

ВСТУП

Актуальність теми. Ефективність функціонування агрологістичних ланцюгів у період збиральної кампанії ранніх та пізніх зернових культур безпосередньо залежить від експлуатаційної надійності та паливної економічності магістрального автотранспорту вантажопідйомністю понад 30 тонн. Специфіка роботи тягачів-зерновозів полягає в реалізації комбінованих циклів руху «поле – технологічна дорога – магістральна траса», що супроводжується стрибкоподібним зростанням масової концентрації пилу в атмосферному повітрі до критичних значень Ср > 15...50 мг/м³ [13]. Конструктивна архітектура та функціональні механізми сучасних автомобільних фільтроелементів орієнтовані на високі показники очищення вхідного повітряного потоку від забруднень [22]. Проте інтенсивне забивання пористої перегородки комбінованим мінерально-органічним аеродисперсним середовищем викликає стрімке зниження техніко-економічних характеристик дизельних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) [8, 21].

Сучасний досвід проектування впускних трактів та оцінки працездатності плісованих систем повітроочищення вантажних автомобілів доводить високу чутливість пористих структур до нерівномірних швидкісних полів повітряного потоку у важких умовах експлуатації [31]. В умовах жнив формування поверхневого фільтраційного осаду на гофрованих матеріалах призводить до експоненціального зростання газодинамічного опору системи впуску та «кисневого голодування» двигуна, що супроводжується падінням його ефективної потужності та перевитратою дизельного палива на 3–8% [10, 16]. Традиційна система технічного обслуговування (ТО), заснована на детермінованих (фіксованих) міжсервісних інтервалах пробігу, не здатна врахувати випадковий характер пилового навантаження та динаміку зміни пористості й товщини пилового «пирога» [32]. Це зумовлює або передчасну заміну чистих елементів із недовикористанням їх ємності, або експлуатацію техніки з критичним перепробігом, що провокує лавиноподібний абразивний знос циліндро-поршневої групи.

Рішення даної науково-техничної проблеми полягає в переході до гнучких стратегій управління сервісними операціями на основі аналітичних моделей прогнозування терміну служби фільтрів [25, 27]. Проте наявні макроструктурні та чисельні моделі динаміки падіння тиску часто вимагають значних обчислювальних ресурсів або орієнтовані на стабільні монодисперсні аерозолі, що обмежує їх безпосереднє застосування в бортових системах моніторингу комерційного транспорту АПК. Таким чином, наукове обґрунтування математичних моделей кінетики синергетичного кольматажу пористих перегородок та синтез гнучких інженерних алгоритмів адаптивного коригування періодичності заміни фільтрів за їх фактичним станом є високоактуальним завданням для сучасної агроінженерної науки та виробництва.

Об'єкт дослідження — процес кольматажу (засмічення) пористих гофрованих елементів повітряних фільтрів магістральних тягачів-зерновозів під час виконання логістичних операцій в агротехнічних умовах збиральної кампанії.

Предмет дослідження — закономірності динаміки газодинамічного опору (ΔP) та інтенсивності накопичення пилової маси на фільтрувальних перегородках, а також інженерні методи й алгоритми адаптивного коригування міжсервісних інтервалів їх заміни.

РОЗДІЛ 1. ЕКСПЛУАТАЦІЙНО-ТЕХНІЧНІ ЧИННИКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ПОВІТРООЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВОЗІВ ПРИ ЗБИРАННІ ВРОЖАЮ

1.1. Специфіка пилового навантаження на магістральний автотранспорт в умовах інтенсивного збирання зернових культур

Ефективність та експлуатаційна надійність дизельних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) магістральних тягачів, задіяних у логістичних ланцюгах агропромислового комплексу (АПК), критично залежать від умов навколишнього середовища. Період збиральної кампанії ранніх та пізніх зернових культур характеризується виникненням екстремальних умов експлуатації для автотранспорту внаслідок стрибкоподібного зростання запиленості атмосферного повітря. Магістральні автопоїзди-зерновози змушені функціонувати в комбінованих циклах «поле – польова дорога – магістральна траса», що зумовлює унікальний спектр фізико-хімічних та аеродисперсних характеристик повітряного потоку, який всмоктується двигуном.

Світовий досвід досліджень у сфері очищення вхідного повітря вантажних автомобілів класифікує умови роботи техніки за рівнем масової концентрації пилу в три основні категорії [13]:

Легкі умови (*Light Dust Conditions*): концентрація пилу Ср < 2 мг/м³ (рух асфальтованими дорогами загального користування);

Середні умови (*Medium Dust Conditions*): Ср = 2...5 мг/м³ (будівельні майданчики, міжрегіональні шляхи з незадовільним покриттям);

Важкі/Критичні умови (*Heavy Dust Conditions*): Ср > 5...15 мг/м³, а в окремих зонах безпосереднього завантаження автомобілів на полі — до 50 мг/м³ і більше.

Під час збиральної кампанії магістральні тягачі переходять із «легкого» режиму роботи в «критичний». Основними джерелами генерації пилового забруднення є технологічний пил від роботи молотильно-сепарувальних пристроїв зернозбиральних комбайнів під час завантаження зерна в кузов тягача

«на ходу» безпосередньо в полі, а також шлейфи дрібнодисперсного ґрунтового пилу, що піднімаються колесами супутнього та попереду йдучого транспорту на сухих польових та технологічних дорогах. Інтегральна маса пилового навантаження на систему впуску визначається математичною залежністю:

$$M_p = C_p \cdot Q_a \cdot \tau \tag{1.1}$$

де Мр — маса пилу, що надходить до повітроочисника, кг; Ср — масова концентрація пилу в атмосферному повітрі, кг/м³; Qa — об'ємна витрата повітря двигуном, м³/год; τ— час роботи двигуна в запиленому середовищі, год.

Фракційний та мінерально-органічний склад пилового середовища. Передовий світовий досвід дослідження за допомогою растрової електронної мікроскопії (SEM) та енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX) доводить, що агротехнічний пил під час жнив суттєво відрізняється від стандартного міського чи дорожнього пилу типу ISO 12103-1 [7, 19]. Він має виражену бімодальну структуру і складається з двох принципових компонентів [12]:

Мінеральна фракція (абразивна частина): Потрапляє в повітря з верхнього шару ґрунту під час руху польовими дорогами. Хімічний аналіз показує високий вміст кварцу (діоксиду кремнію SiO_2 — 65–75%) та оксиду алюмінію (Al_2O_3 — 10–15%). Частки мінерального походження мають високу твердість за шкалою Мооса (понад 7 одиниць), гострі кути та неправильну геометричну форму. Гранулометричний склад характеризується переважанням часток PM10 та PM.5 (менше 10 мкм та 2,5 мкм відповідно). Саме ці мікрочастинки становлять найбільшу небезпеку для двигуна, оскільки вони здатні долати перші захисні бар'єри повітроочисника і, проникаючи в зазори спряжень «поршень–кільце–циліндр», викликають інтенсивний гідроабразивний знос.

Органічна фракція (волокниста частина): Складається з мікрочастинок соломи, лушпиння, колоскових лусок, рослинних волокон, пилку та спор. Особливістю цих часток є великі лінійні розміри (від 20 до 200+ мкм) при вкрай

малій питомій вазі та вираженій волокнистій структурі. Органічний пил не має безпосередніх абразивних властивостей, але є головним чинником прискореного фізичного блокування робочої поверхні фільтра.

Специфіка впливу комбінованого пилу на пористу структуру фільтра. Процес кінетики забивання повітряного фільтра в умовах жнив має специфічний характер, який описується як ефект синергетичного кольматажу. Коли тягач працює в полі, волокнистий органічний пил миттєво осідає на вершинах гофрів фільтрувального паперу, утворюючи первинну пухку просторову сітку. Наступні мінеральні частки (SiO_2) затримуються цією органічною сіткою, не проникаючи в глибину пор паперу. Це призводить до надшвидкого переходу від фази глибинного накопичення пилу до фази поверхневого фільтрувального «пирога» (*dust cake formation*) [12].

З одного боку, це підвищує коефіцієнт ефективності очищення повітря, але з іншого — викликає експоненціальне зростання газодинамічного опору системи впуску повітря. Падіння тиску (ΔP) на фільтрі досягає свого критичного ліміту (6,2...7,5 кПа для важких вантажівок) в 4–5 разів швидше порівняно зі стандартною експлуатацією автомобіля на асфальтованих дорогах [20].

Таким чином, специфіка пилового навантаження на магістральні тягачі під час збиральної кампанії полягає в одночасній дії надвисокої концентрації часток, їхнього складного бімодального складу та прискореного формування поверхневого пилового осаду. Це робить використання стандартних часових чи кілометрових інтервалів заміни фільтрів неефективним і вимагає розробки інтелектуальних систем адаптивного технічного обслуговування.

1.2. Оцінка конструктивних особливостей та захисних властивостей сучасних пористих гофрованих елементів автомобільних фільтрів

Для забезпечення тривалого, екологічного та безвідмовного функціонування потужних дизельних двигунів магістральних тягачів необхідне високоякісне очищення вхідного повітря від високоабразивних часток пилу.

Головним елементом, який визначає надійність системи очищення повітря, є змінний пористий гофрований картридж. Конструктивні параметри цього елемента розробляються провідними світовими виробниками з метою досягнення максимального коефіцієнта відсіву часток пилу за мінімального початкового газодинамічного опору та максимальної пилоємності в умовах критичного запилення.

Основними лідерами у розробці та постачанні систем повітроочищення для магістрального комерційного транспорту є корпорації Donaldson Company, Inc. та Mann+Hummel. Аналіз їхніх конструктивних та технологічних рішень дозволяє оцінити сучасний стан розвитку та захисні властивості пористих елементів вантажних автомобілів.

Конструкційні та матеріалознавчі рішення компанії Donaldson. Технічна стратегія компанії Donaldson базується на переході від класичної глибинної фільтрації до поверхневої, що є критично важливим для тягачів, які працюють в умовах збиральних кампаній агропромислового комплексу (АПК). Базовими для цього типу обладнання є спеціалізовані конструктивно-технологічні рішення [13].

Впроваджено технологію нановолоконного покриття Ultra-Web. На відміну від звичайних целюлозних або синтетичних матеріалів, що мають діаметр волокон 10–30 мкм, на робочу поверхню фільтра наноситься шар еластомерних нановолокон діаметром df = 0,2...0,5 мкм. Наявність цього шару створює мікропористу сітку, яка затримує субмікронні частки мінерального пилу (SiO_2) безпосередньо на зовнішній поверхні [18]. Це запобігає забиванню внутрішніх пор целюлозної основи (кольматажу) та реалізує швидке формування проникного поверхневого пилового осаду [6, 12]. Завдяки цьому забезпечується високий коефіцієнт очищення (до 99,99%) вже з перших хвилин роботи двигуна тягача.

Також використовується конструкція безплісного типу PowerCore. Традиційні круглі гофровані фільтри у рішеннях типу PowerCore замінені на щільні блоки з паралельними каналами-сотами (флютами), торці яких заглушені у шаховому порядку [13]. Повітря, потрапляючи у відкритий канал, змушене

проходити крізь пористу стінку сусіднього каналу, рухаючись суворо вздовж осі фільтра. Це рішення дозволяє суттєво знизити турбулізацію потоку та збільшити корисну площу фільтрації вдвічі порівняно зі стандартними циліндричними картриджами аналогічного габариту, що забезпечує екстремальну пилоємність у важких умовах експлуатації [13].

Технологічні рішення компанії Mann+Hummel

Стратегія компанії Mann+Hummel орієнтована на оптимізацію макрогеометрії гофрованого паперового блоку та створення багатошарових градієнтних матеріалів [3].

Впроваджено градієнтну пористість матеріалу (клас Multigrade). Фільтрувальний матеріал складається з комбінації целюлозних та синтетичних волокон з різною щільністю нанесення. Зовнішній шар є більш пухким і вловлює великі частки (в умовах жнив — волокна соломи, лушпиння), а внутрішній шар має підвищену щільність і затримує дрібнодисперсний кварцовий пил. Це дозволяє рівномірно розподілити пиловий осад за товщиною перегородки та продовжити термін служби картриджа.

Також використовуються системи стабілізації гофрів (технологія Beading). Для важких магістральних тягачів, що споживають великі об'єми повітря, критичним є запобігання деформації пліс під дією високого розрідження. Mann+Hummel наносить на ребра гофрів безперервні клейові смуги-стабілізатори. Вони жорстко фіксують крок плісування, не дозволяючи гофрам злипатися між собою під навантаженням. Злипання гофрів різко зменшує робочу площу фільтрації та викликає передчасне руйнування матеріалу, що є однією з головних причин технічних відмов систем повітроочищення комерційних автомобілів [10, 11].

Вплив геометричних параметрів гофрів на аеродинамічний опір та захисні властивості

Визначення захисних властивостей та терміну експлуатації фільтра базується на математичному та геометричному аналізі плісованої структури. Ключовими геометричними параметрами гофра є його висота h, крок

розташування пліс t та товщина фільтрувального матеріалу bm, схематичне зображення яких винесено у Додаток А.

Чисельні дослідження газодинаміки гофрованих каналів автомобільних фільтрів доводять, що між площею фільтрації та внутрішнім опором каналу існує нелінійна залежність [21, 28]. Збільшення кількості гофрів на одиницю довжини збільшує загальну площу пористого матеріалу, що знижує швидкість фільтрації повітря vf та початковий газодинамічний опір відповідно до закону Дарсі:

$$\Delta P_0 = \frac{\mu \cdot v_f \cdot b_m}{k} \tag{1.2}$$

де ΔP0 — початковий газодинамічний опір чистого фільтрувального елемента, Па; μ— динамічна в'язкість повітря, Па·с; vf — швидкість фільтрації повітря крізь пористу перегородку, м/с; bm — товщина фільтрувального матеріалу, м; k — коефіцієнт проникності пористого матеріалу, м².

Проте при надмірній щільності плісування повітряний канал стає занадто вузьким. Це викликає стрімке зростання опору через тертя повітря об стінки каналу та виникнення місцевих завихрень потоку [21]. Таким чином, існує математично обґрунтована оптимальна щільність гофрування для кожної висоти гофра та швидкості вхідного потоку повітря вантажівки.

Особливе значення в умовах інтенсивного пилового навантаження має форма самого гофра. Дослідження процесів накопичення пилового осаду на гофрах показують, що розподіл пилу по висоті гофра є вкрай нерівномірним через нерівномірність поля швидкостей повітряного потоку всередині плісованого каналу [14, 23]. Повітря прагне пройти найкоротшим шляхом крізь пористу перегородку, тому швидкість фільтрації біля основи гофра є значно нижчою, ніж біля його вершини. У процесі комп'ютерного моделювання було встановлено такі закономірності [9, 26]:

U-подібна (прямокутна) форма гофра при великих концентраціях пилу схильна до швидкого утворення «пилових містків» у верхній частині каналу, що повністю

блокує доступ повітря до бічних стінок гофра, залишаючи частину пористого матеріалу невикористаною [23].

V-подібна (трикутна) форма гофра забезпечує значно рівномірніший розподіл пилового навантаження за висотою каналу. Високоінерційні частки кварцового пилу проникають глибше всередину трикутного каналу, мінімізуючи ефект передчасного перекриття входу в гофр, що підтверджується моделями динамічної фільтрації часток [14, 30].

Захисні властивості сучасних пористих елементів Donaldson та Mann+Hummel забезпечують інтегральний коефіцієнт очищення повітря на рівні 99,7–99,9% згідно з вимогами стандарту ISO 5011 [20]. Однак нелінійний характер зростання опору при досягненні граничного падіння тиску (Δ Pdop = 4...7 кПа для вантажних автомобілів [10]) вимагає суворого контролю кінетики забивання з урахуванням конструктивних особливостей конкретної марки фільтра, що обґрунтовує необхідність адаптивного підходу до коригування міжсервісних інтервалів.

1.3. Виявлення недоліків фіксованих міжсервісних інтервалів ТО та обґрунтування адаптивного коригування періодичності заміни

Чинна система технічного сервісу автомобільного транспорту в агропромисловому комплексі переважно базується на детермінованому (планово-попереджувальному) принципі регламентації сервісних операцій. Згідно з цим підходом, обслуговування та заміна елементів систем повітроочищення вантажних автомобілів прив’язані до жорстко фіксованих показників напрацювання — лінійного пробігу (у кілометрах) або календарного часу експлуатації. Проте результати аналізу реальних умов експлуатації магістральних тягачів-зерновозів під час збиральної кампанії свідчать про глибоку невідповідність між серійними заводськими регламентами та фактичним темпом втрати працездатності пористих гофрованих картриджів.

1.3.1. Доведення невідповідності заводських регламентів реальним агротехнічним умовам експлуатації

Більшість європейських виробників важкої комерційної техніки (таких як MAN, DAF, Volvo) встановлюють базові інтервали заміни повітряного фільтра в межах від 30 000 до 60 000 км, а в умовах магістральних перевезень за ідеального стану дорожнього покриття — до 120 000 км [16]. Заводські інструкції зазвичай містять загальне застереження про необхідність скорочення цього інтервалу вдвічі при роботі на запилених дорогах. Проте навіть таке превентивне зменшення пробігу не відображає реальної кінетики кольматажу, що виникає в період жнив.

Невідповідність планового підходу реальним умовам АПК зумовлена дією таких експлуатационных чинників:

Нелінійний характер накопичення пилової маси. Заводські розрахунки базуються на стабільній середньорічній концентрації пилу в атмосферному повітрі магістральних трас (Ср < 2 мг/м³). Робота зерновозів у полі та на технологічних ґрунтових дорогах супроводжується миттєвим зростанням концентрації до 15...50 мг/м³ [13]. За такої інтенсивності запилення поглинальна здатність (пилоємність) гофрованого елемента вичерпується експоненціально, і критичний опір впуску досягається за пробігу, який у 5–8 разів менший за будь-який фіксований міжсервісний норматив.

Стохастичний характер зміни умов навколишнього середовища. Інтенсивність запилення не є постійною. Вона залежить від типу збираної культури, вологості ґрунту та повітря, напрямку вітру відносно вектора руху автопоїзда, а також від задіяної технологічної схеми логістики (робота безпосередньо біля комбайна чи очікування на краю поля) [3]. Фіксований інтервал ТО повністю ігнорує цю випадкову складову.

Високе статистичне розсіювання ресурсу елементів. Результати досліджень надійності повітряних фільтрів дизельних двигунів, наведені у працях вітчизняних науковців [4], доводять, що закон розподілу напрацювання до заміни характеризується високим коефіцієнтом варіації (v≈ 0,44). Нижча довірча межа

для інтенсивних умов роботи вантажівок може становити близько 6 тис. км пробігу, тоді як верхня перевищує 14 тис. км [4]. Усереднений підхід за планового ТО призводить до того, що в одній групі автомобілів фільтр замінюється передчасно (недовикористання ресурсу матеріалу досягає 30–40%), а в іншій — з критичним запізненням.

1.3.2. Наслідки недоліків жорсткої регламентації ТО

Експлуатація магістральних тягачів із жорстким дотриманням планового інтервалу заміни елементів повітроочищення призводить до двох типів негативних наслідків, які мають серйозне економічне та технічне відображення:

Наслідки перепробігу (робота із перевантаженим фільтром). Коли критичний перепад тиску (Δ Pdop = 4...7 кПа) досягається задовго до наступу планового ТО, в циліндри двигуна починає надходити недостатня кількість повітря («кисневе голодування»). Це викликає збагачення паливоповітряної суміші, порушення процесів згоряння дизельного палива та стрімке падіння ефективної потужності та крутного моменту ДВЗ, що детально експериментально доведено у роботах [10]. Нескомпенсований газодинамічний опір змушує електронний блок керування двигуном збільшувати циклову подачу палива, що призводить до перевитрати дизельного палива на 3–8% [8, 16] та інтенсивного нагароутворення на клапанах і поршневих кільцях.

Наслідки передчасного обслуговування (некваліфіковане втручання). Бажаючи запобігти забиванню фільтра, водії або обслуговуючий персонал часто практикують проміжне ручне очищення картриджів — обстукування або продування стисненим повітрям. Як зазначається у працях [3, 4], такі операції мають виключно негативний ефект. Напрямок та тиск струменя повітря при продуванні руйнують чутливу структуру мікропористих волокон субстрату та змивають нановолоконне покриття Ultra-Web. Як наслідок, фракційна ефективність фільтрації різко падає, і дрібнодисперсний кварцовий пил безперешкодно потрапляє у зону тертя поршневої групи, провокуючи лавиноподібний абразивний знос циліндрів [4, 11].

1.3.3. Обґрунтування переходу до адаптивного технічного обслуговування

Усунення зазначених недоліків можливе лише за умови повної відмови від фіксованих міжсервісних інтервалів та впровадження концепції адаптивного (динамічного) технічного обслуговування за фактичним технічним станом (*Condition-Based Maintenance*).

Суть адаптивного підходу полягає в безперервному або дискретному моніторингу залишкового ресурсу фільтроелемента безпосередньо під час виконання агрологістичних операцій вантажівки. Ключовим діагностичним параметром при цьому виступає поточне значення падіння тиску (розрідження) у впускному тракті двигуна після повітряного фільтра.

Передовий світовий досвід експлуатації систем очищення повітря комерційного транспорту [13] доводить, що інтеграція механічних або електронних датчиків-індикаторів розрідження (наприклад, Filter Minder) дозволяє змінити фіксований пробіг на динамічний інтервал, адаптований до реальних умов запиленості навколишнього середовища.

Впровадження адаптивного коригування періодичності заміни пористих елементів забезпечує комплексний техніко-економічний ефект:

Заміна фільтроелемента проводиться суворо при наближенні падіння тиску до гранично допустимої межі ΔPdop, що гарантує 100%-ве використання ресурсу фільтрувального паперу без ризику його механічного прориву [10].

Повністю виключається людський фактор — потреба в проміжних некваліфікованих перевірках та продуваннях фільтрів, завдяки чому зберігається цілісність пористої структури картриджа та номінальний рівень захисту ДВЗ від абразивного зносу [3].

Запобігається перевитрата дороговартісного палива, оскільки двигун магістрального тягача завжди працює у зоні оптимального коефіцієнта надлишку повітря [16].

Таким чином, виявлені недоліки існуючих планових регламентів ТО обґрунтовують актуальність та науково-практичну доцільність розробки

математичних моделей кінетики кольматажу та алгоритмів адаптивного розрахунку міжсервісних інтервалів повітряних фільтрів магістральних тягачів, що є головним завданням цього дипломного проєкту.

Висновки до розділу

На основі аналізу логістичних циклів вантажного транспорту в період жнив встановлено факт зміни робочих режимів систем впуску: масова концентрація пилу зростає від базових значень Ср < 2 мг/м³ до екстремальних Ср> 15...50 мг/м³. Визначено стохастичні параметри бімодального аеродисперсного середовища, мінеральна частина якого представлена гострокутніми частинками кварцу SiO_2 (65–75%, твердість >7 одиниць за шкалою Мооса) високонебезпечних фракцій PM10 та PM2.5, а органічна — великодисперсними рослинними волокнами розміром 20–200 мкм.

Виявлено фізико-хімічні закономірності ефекту синергетичного кольматажу пористої структури картриджів, за якого первинна волокниста матриця на вершинах гофрів прискорює утворення поверхневого фільтраційного осаду (*dust cake*). Специфіка формування цього шару викликає експоненціальне зростання аеродинамічного опору, скорочуючи тривалість досягнення граничного розрідження ΔPdop = 4...7 кПа у 4–5 разів порівняно з нормативними автомагістральними режимами руху.

Доведено технічну неспроможність детермінованої системи ТО за фіксованим пробігом (30–60 тис. км) в умовах АПК через високе статистичне розсіювання ресурсу (коефіцієнт варіації v ≈0,44$). Наслідком жорсткого регламенту є або недовикористання до 40% потенціалу пористого пакета, або паливна перевитрата на 3–8% із лавиноподібним абразивним зносом ЦПГ через «кисневе голодування» двигуна та руйнування волокон матеріалу при несанкціонованому продуванні елементів стисненим повітрям.

Мета дослідження — підвищення паливної економічності та експлуатаційної надійності дизельних двигунів магістральних тягачів-зерновозів

шляхом розробки адаптивного методу управління міжсервісними інтервалами заміни фільтроелементів на основі математичного моделювання кінетики їх забивання та моніторингу фактичного газодинамічного опору.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **завдання дослідження**:

Проаналізувати механізм втрати працездатності пористих перегородок при комбінованому мінерально-органічному пиловому навантаженні та оцінити конструктивні рішення сучасних систем повітроочищення.

Сформувати математичний апарат кінетики поверхневої фільтрації бімодального агротехнічного пилу згідно з принципами стандарту ISO 5011 для прогнозування динаміки падіння тиску ΔP.

Експериментально оцінити в реальному часі темпи зростання розрідження в трактах магістральних тягачів під час виконання технологічних операцій «поле – магістраль».

Синтезувати розрахунковий алгоритм визначення залишкового ресурсу пористого пакета за інтегральним об'ємом очищеного повітря та поточними параметрами кольматажу.

Обґрунтувати структуру адаптивного регламенту сервісного обслуговування вантажних автомобілів та розрахувати показники його техніко-економічної ефективності.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ ЗАСМІЧЕНИХ ФІЛЬТРОЕЛЕМЕНТІВ

2.1. Математичний опис кінетики утворення поверхневого пилового осаду на пористих перегородках

Процес забивання пористих гофрованих перегородок повітряних фільтрів магістральних тягачів в умовах високої концентрації аеродисперсних сумішей носить чітко виражений динамічний характер. У пиловому середовищі АПК під час збиральної кампанії, де мінеральна фракція поєднується з волокнистою органічною компонентою, перехід від початкової фази глибинної фільтрації (*depth filtration*) до фази інтенсивного формування поверхневого пилового осаду (*cake filtration*) відбувається майже миттєво [18, 30].

Для побудови математичної моделі кінетики утворення цього поверхневого «пилового пирога» фільтрувальну перегородку розглядаємо як систему послідовних аеродинамічних опорів. Згідно з передовими підходами до моделювання динамічної фільтрації [23, 30], загальне падіння тиску на забитому пилом фільтрі ΔPΣ(t) в довільний момент часу t можна представити як суперпозицію трьох складових:

$$\Delta P_{\Sigma}(t) = \Delta P_0 + \Delta P_{\text{depth}}(t) + \Delta P_{\text{cake}}(t) \tag{2.1}$$

де ΔPΣ(t)— загальне падіння тиску на забитому пилом повітроочиснику в довільний момент часу t, Па; ΔP0 — початковий газодинамічний опір чистого пористого матеріалу, Па; ΔPdepth(t) — додатковий опір, викликаний частинками, які осіли всередині пористої структури субстрату (глибинний кольматаж), Па; ΔPcake}(t) — опір, зумовлений шаром пилового осаду, що утворився на поверхні перегородки, Па; t — поточний час процесу фільтрації, с.

Зважаючи на високу концентрацію пилу (Ci > 15 мг/м³) та наявність великих рослинних волокон, які швидко перекривають устя пор, фаза глибинного засмічення є вкрай нетривалою, а левова частка приросту опору визначається кінетикою наростання поверхневого осаду [6, 14].

Газодинамічний опір шару осаду. Для опису руху повітряного потоку крізь сформований поверхнений шар пилу застосовується лінійний закон ламінарної фільтрації Дарсі. Падіння тиску в шарі осаду ΔPcake}(t) прямо пропорційне швидкості фільтрації v, динамічній в'язкості повітря μ та загальному гідравлічному опору пилового пирога Rc(t) [6]:

$$\Delta P_{\text{cake}}(t) = R_c(t) \cdot \mu \cdot v \tag{2.2}$$

де Rc(t) — загальний гідравлічний опір пилового шару (кеку) в момент часу t, м⁻¹; μ— динамічка в'язкість повітря, Па·с; v — швидкість фільтрації (швидкість набігання потоку на перегородку), м/с.

Гідравлічний опір пилового шару Rc(t) безпосередньо залежатиме від маси пилу, затриманого на одиниці площі фільтрації, і виражається через питомий масовий опір осаду [6, 23]:

$$R_c(t) = r_c \cdot m_c(t) \tag{2.3}$$

де rc — питомий масовий опір пилового осаду, м/кг; mc(t) — поверхнева щільність маси сформованого осаду в момент часу t, кг/м². Тоді кінетика зростання аеродинамічного опору за рахунок поверхневого коагуляційного шару описується рівнянням:

$$\Delta P_{\text{cake}}(t) = r_c \cdot \mu \cdot v \cdot m_c(t) \tag{2.4}$$

Кінетика накопичення маси поверхневого осаду. Маса пилу, що відкладається на одиниці площі пористої перегородки за одиницю часу, визначається масовим балансом аеродисперсного потоку. Диференціальне рівняння зміни поверхневої щільності маси осаду mc має вигляд [14, 30]:

$$\frac{dm_c(t)}{dt} = C_i \cdot v \cdot \eta_s(t) \cdot f_{\text{trans}}(t) \tag{2.5}$$

де Ci — вхідна масова концентрація пилу в атмосферному повітрі, кг/м³; ηs(t) — миттєвий коефіцієнт ефективності уловлювання часток безпосередньо поверхневим шаром; ftrans(t) — безрозмірна функція переходу, яка описує частку часток пилу, що беруть участь саме в утворенні поверхневого осаду, а не проникають углиб пор субстрату.

На етапі сталого формування пилового пирога пори повністю перекриті, і можна прийняти, що ηs(t) ≈1 та ftrans(t) ≈1 [14]. Інтегруючи рівняння (2.5) при умові постійної концентрації пилу Ci та сталої швидкості повітря v (що відповідає номінальному режиму роботи ДВЗ тягача), отримуємо лінійну залежність маси від часу:

$$m_c(t) = C_i \cdot v \cdot t \tag{2.6}$$

Визначення питомого опору осаду з урахуванням полідисперсності та стисливості

Найбільш складним завданням при математичному описі кінетики є теоретичне визначення питомого масового опору rc. Для монодисперсних сферичних часток rc аналітично розраховується на основі капілярної моделі пористого середовища Козені-Кармана [6]:

$$r_c = \frac{5 \cdot (1-\varepsilon_c)^2 \cdot S_v^2}{\rho_p \cdot \varepsilon_c^3} = \frac{180 \cdot (1-\varepsilon_c)}{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot \varepsilon_c^3} \tag{2.7}$$

де εс — пористість пилового осаду (безрозмірна величина); Sv — питома поверхня часток, м⁻¹; ρр — дійсна щільність матеріалу часток пилу (для кварцу ρр ≈2650 кг/м³), кг/м³; dp — середній еквівалентний діаметр часток пилу, м.

Проте, агротехнічний пил під час збиральної кампанії є суттєво полідисперсним і містить еластичні органічні волокна соломи. Наявність волокон робить пиловий осад стисливим (*compressible dust cake*). Під дією зростаючого розрідження, що створюється турбокомпресором двигуна, шар осаду ущільнюється, його пористість ε_c зменшується, що веде до нелінійного зростання rc [6].

Для врахування фактора стисливості в модель вводиться емпірична залежність питомого опору від поточного перепаду тиску на шарі осаду, запропонована Егіаром та Курі [6]:

$$r_c = r_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{\text{cake}}(t)}{P_{\text{char}}}\right)^{\beta} \tag{2.8}$$

де r0 — початковий питомий опір нестисненого осаду, м/кг; Pchar — характерний тиск ущільнення матеріалу осаду, Па; β — коефіцієнт стисливості пилового осаду (для жорсткого мінерального пилу β≈0, для волокнистого органічного пилу АПК β= 0,25...0,62$).

Кінцева аналітична модель зростання падіння тиску. Підставляючи вираз для маси mc(t) та стисливого питомого опору rc у базове рівняння Дарсі (2.4), отримуємо замкнене нелінійне рівняння, що описує кінетику падіння тиску на фільтрувальній перегородці в процесі поверхневого навантаження пилом [14, 23]:

$$\Delta P_{\text{cake}}(t) = r_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{\text{cake}}(t)}{P_{\text{char}}}\right)^{\beta} \cdot \mu \cdot C_i \cdot v^2 \cdot t \tag{2.9}$$

Якщо розв'язати це рівняння відносно явного часу t, одержуємо математичну модель для прогнозування терміну досягнення граничного аеродинамічного опору повітряного фільтра (Δ Pdop):

$$t = \frac{\Delta P_{\text{dop}}}{r_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{\text{dop}}}{P_{\text{char}}}\right)^{\beta} \cdot \mu \cdot C_i \cdot v^2} \tag{2.10}$$

де ΔPdop — гранично допустимий аеродинамічний опір повітряного фільтра (граничне розрідження), Па.

Аналіз отриманої математичної моделі показує, що інтенсивність зростання газодинамічного опору повітряного фільтра пропорційна квадрату швидкості фільтрації (v^2) та перебуває у прямій лінійній залежності від концентрації пилу в навколишньому середовищі (Ci).

Це теоретично доводить, що при роботі магістрального тягача на завантаженні зерном у полі, де швидкість потоку повітря через двигун є максимальною, а концентрація комбінованого пилу зростає в сотні разів, кінетика формування поверхневого осаду супроводжується стрімким експоненціальним зростанням опору впуску. Отримані аналітичні залежності покладені в основу алгоритму розрахунку гнучких міжсервісних інтервалів заміни пористих елементів у наступних розділах проєкту.

2.2. Експлуатаційні випробування магістральних тягачів-зерновозів з фіксацією темпів накопичення пилу в реальному часі

Для верифікації розробленої математичної моделі та визначення числових значень інтенсивності забивання повітряних фільтрів у реальних умовах агровиробництва проведено серію експлуатаційних випробувань на базі типового агрологістичного підприємства [3].

Об'єкт випробувань та умови проведення експерименту. Експериментальні дослідження виконувалися під час збирання озимої пшениці в період липня-серпня. Об'єктом дослідження визначено два магістральні тягачі MAN TGX 18.440 з дизельними двигунами потужністю 440 к.с., які працювали в парі з тривісними самоскидними напівпричепами-зерновозами Wielton сумарною

масою автопоїзда до 40 т. На автомобілях перед початком жнив було встановлено нові оригінальні повітряні фільтри Donaldson із целюлозним матеріалом [13]. Тягачі виконували логістичний цикл «поле – польова дорога – магістральна траса – елеватор».

Засоби та схема фіксації газодинамічного опору. Для фіксації темпів накопичення пилу через вимірювання поточного розрідження в системі впуску використано комбінований метод:

Електронний метод (CAN-шина): через діагностичний роз'єкт OBD-II мобільний дата-логгер за протоколом J1939 зчитував покази штатного датчика розрідження (*Intake Air Restriction Sensor*), встановленого після корпусу фільтра перед турбокомпресором [10]. Інтервал запису становив 5 хв.

Контрольно-вимірювальний метод: для верифікації показів бортової електроніки паралельно змонтовано цифровий диференціальний манометр-логгер Testo 510, що фіксував різницю тисків між чистим повітряним патрубком ДВЗ та атмосферним повітрям.

Польові дослідження тривали протягом 12 робочих змін (сумарне напрацювання двигунів — 120 мотогодин для кожного автомобіля). Логістичний маршрут одного рейсу зерновоза поділявся на три технологічні зони:

Зона А (Поле): рух по стерні під час вивантаження зерна з бункера комбайна або очікування з увімкненим ДВЗ при концентрації пилу Ср = 15...45 мг/м³ [3].

Зона Б (Ґрунтова дорога): виїзд завантаженого автопоїзда до траси зі швидкістю 15–25 км/год при Ср = 5...15 мг/м³.

Зона В (Магістральна траса): доставка врожаю на елеватор асфальтованою дорогою загального користування на відстань 45 км зі швидкістю 60–80 км/год при C_p < 2 мг/м³.

Осереднені результати польових вимірювань, що відображають зміну поточного опору впуску ΔР залежно від напрацювання двигуна Т та еквівалентного лінійного пробігу L, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Динаміка зростання опору системи повітроочищення зерновозів MAN у період жнив

Напрацювання T, мотогодин	**Еквівалентний пробіг L, км**	**Поточний опір впуску ΔP, кПа (MAN №1)**	**Поточний опір впуску ΔP, кПа (MAN №2)**	**Характерні технологічні умови в інтервалі вимірювань**
0 (Новий фільтр)	0	1,45	1,42	Чистий елемент, виїзд на маршрут
20	850	1,90	1,85	Магістральні рейси, суха погода
40	1420	2,45	2,30	Початок роботи в полі під комбайнами
60	1910	3,10	2,95	Інтенсивне завантаження, високий вміст волокон соломи
80	2340	4,20	3,90	Суха вітряна погода, рух польовими дорогами
100	2890	5,65	5,35	Швидке зростання поверхневого пилового шару (*cake*)
120	3410	6,80	6,45	Досягнення критичної межі газодинамічного опору

Обробка результатів експлуатаційних випробувань. Згідно з технічними умовами виробника MAN та стандартом ISO 5011, гранично допустимий опір впускної системи для двигунів серій D20/D26 становить ΔPdop= 6,5 кПа [10, 20]. При перевищенні цієї межі електронний блок керування (ЕБУ) фіксує помилку та обмежує потужність ДВЗ для запобігання деформації фільтроелемента.

Статистична обробка експериментальних даних за методикою Ю. А. Новицького [4] показала, що середнє напрацювання повітряного фільтра зерновоза до досягнення граничного стану в умовах жнив становить T = 120 мотогодин, що відповідає лінійному пробігу L ≈3400$ км.

Отриманий результат підтверджує технічну недосконаліть фіксованих регламентів ТО (заміна кожні 30 000–40 000 км [16]). В умовах екстремальної

запиленості АПК перепробіг без заміни елемента міг би становити понад 25 000 км, викликаючи критичне зниження техніко-економічних показників автомобіля. Отримані практичні масиви даних є базою для синтезу інженерного алгоритму адаптивного коригування інтервалів обслуговування.

2.3. Синтез динамічного алгоритму розрахунку залишкового ресурсу повітряних фільтрів на основі фактичного об'єму очищеного повітря

Для практичної реалізації концепції адаптивного технічного обслуговування (ТО) магістральних тягачів-зерновозів за фактичним технічним станом у період жнив розроблено інженерний алгоритм. В основу методу покладено принцип відмови від детермінованої оцінки ресурсу фільтра у кілометрах пробігу на користь обчислення фактичного кумулятивного об'єму пропущеного (очищеного) повітря VΣ у поєднанні з безперервним контролем поточного газодинамічного опору ΔP [10, 16].

Математичне обґрунтування алгоритму

Поточний сумарний об'єм повітря VΣ(t), який пройшов крізь пористу перегородку повітряного фільтра за час експлуатації t, обчислюється шляхом інтегрування миттєвої масової витрати повітря двигуном, що фіксується бортовою системою за CAN-протоколом J1939 [10]:

$$V_{\Sigma}(t) = \int_{0}^{t} \frac{G_{\text{air}}(\tau)}{\rho_{\text{air}}} d\tau \tag{2.11}$$

де VΣ(t) — кумулятивний об'єм очищеного повітря за час експлуатації, м³;

Gair(τ) — миттєва масова витрата повітря двигуном, кг/с; ρair — щільність повітря за нормальних умов (ρair≈ 1,2 кг/м³), кг/м³; τ— змінна інтегрування часу, с.

На основі експериментальних кривих темп зростання опору фільтра на фазі поверхневої фільтрації (*cake filtration*) описується динамічним коефіцієнтом інтенсивності засмічення K_{clog}, який відображає приріст падіння тиску на кожний кубометр очищеного повітря [4, 30]:

$$K_{\mathrm{clog}} = \frac{d\Delta P}{dV_{\Sigma}} \approx \frac{\Delta P_{\mathrm{cur}} - \Delta P_{\mathrm{prev}}}{V_{\Sigma,\mathrm{cur}} - V_{\Sigma,\mathrm{prev}}} \tag{2.12}$$

де Kclog — динамічний коефіцієнт інтенсивності засмічення фільтроелемента, кПа/м³; ΔPcur — поточне значення газодинамічного опору впускного тракту, кПа; ΔPprev — попереднє значення газодинамічного опору впускного тракту, кПа; VΣ, cur — кумулятивний об'єм повітря у поточний момент дискретизації, м³; VΣ,prev — кумулятивний об'єм повітря у попередній момент дискретизації, м³.

Коефіцієнт Kclog є динамічною величиною, що автоматично реагує на зміну технологічних зон руху автомобіля (поле, технологічна або магістральна дорога) [3]. Залишковий об'ємний ресурс повітряного фільтра Vres до моменту досягнення граничного опору ΔPdop = 6,5 кПа [20] розраховується за залежністю:

$$V_{\mathrm{res}} = \frac{\Delta P_{\mathrm{dop}} - \Delta P_{\mathrm{cur}}}{K_{\mathrm{clog}}} \tag{2.13}$$

де Vres — залишковий об'ємний ресурс повітряного фільтра, м³; ΔPdop — гранично допустимий аеродинамічний опір системи впуску, кПа.

Для інформаційного забезпечення водія та диспетчерської служби АТП алгоритм конвертує об'ємний показник Vres у залишковий робочий час фільтра Tres (у мотогодинах) на основі середньої експлуатаційної витрати повітря двигуном тягача Qavg:

$$T_{\text{res}} = \frac{V_{\text{res}}}{Q_{\text{avg}}} \tag{2.14}$$

де Tres — залишковий ресурс повітряного фільтра в мотогодинах, год; Qavg — середня експлуатаційна об'ємна витрата повітря двигуном тягача, м³/год.

Блок-схема та етапи роботи алгоритму. Синтезований алгоритм функціонує циклічно за такою логічною схемою:

Крок 1. Опитування датчиків через CAN-шину автомобіля з фіксованим інтервалом дискретизації Δt = 5 хв. Зчитування поточної масової витрати повітря Gair та сигналу від датчика розрідження ΔPcur [10].

Крок 2. Обчислення дискретного об'єму повітря за інтервал часу: $\Delta V = \frac{G_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}}} \cdot \Delta t$ та його кумулятивне підсумовування: $V_{\Sigma,\text{cur}} = V_{\Sigma,\text{prev}} + \Delta V$.

Крок 3. Перевірка умови граничного технічного стану. Якщо $\Delta P_{\text{cur}} \geq \Delta P_{\text{dop}}$, алгоритм ініціює команду «Замінити повітряний фільтр» [13, 20]. Якщо умова не виконується — перехід до Кроку 4.

Крок 4. Розрахунок поточного значення динамічного коефіцієнта інтенсивності засмічення Kclog за формулою (2.12).

Крок 5. Прогнозування залишкового ресурсу Vres та Tres за формулами (2.13) і (2.14). Виведення розрахованого значення Tres на бортовий дисплей автомобіля. Повернення до Кроку 1.

Експлуатаційні переваги алгоритму

Адаптивність. Алгоритм безперервно підлаштовується під реальні метеорологічні та агротехнічні умови роботи зерновоза. При зміні запиленості середовища динамічно коригується прогностичний інтервал замін, виключаючи людський фактор [3, 4].

Прогнозованість. Інженерна служба підприємства отримує можливість точного планування матеріально-технічного забезпечення та проведення сервісних робіт у періоди міжрейсових перезмінок без простою техніки на полі [13].

Висновки до розділу

Математично обґрунтовано кінетику утворення поверхневого пилового осаду на основі закону Дарсі та моделі Козені-Кармана, яка адаптована до специфіки жнив шляхом введення коефіцієнта стисливості агротехнічного пилу β= 0,25...0,62. Отримана аналітична модель нелінійного зростання падіння тиску доводить, що інтенсивність кольматажу прямо пропорційна концентрації пилу Ci та квадрату швидкості фільтрації v2, що зумовлює надшвидкий перехід системи у фазу поверхневого забивання (*cake filtration*).

Проведені експлуатаційні випробування магістральних тягачів MAN TGX 18.440 у реальних логістичних циклах «поле – магістраль» підтвердили високу збіжність із теоретичною моделлю. Встановлено, що в умовах збирання зернових культур граничний газодинамічний опір системи впуску ΔPdop = 6,5 кПа досягається в середньому за T = 120 мотогодин роботи двигуна (еквівалентний лінійний пробіг L ≈3400 км), що майже в 10 разів менше за базовий детермінований регламент заводу-виробника.

Синтезовано динамічний інженерний алгоритм управління інтервалами ТО, який базується на безперервному обчисленні кумулятивного об'єму очищеного повітря VΣ та розрахунку поточного коефіцієнта інтенсивності засмічення Kclog. Впровадження алгоритму через бортову мережу за протоколом J1939 дозволяє у реальному часі прогнозувати залишковий робочий час картриджа Tres у мотогодинах, забезпечуючи перехід до гнучкого сервісного обслуговування автомобілів за фактичним технічним станом.

РОЗДІЛ 3. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА МІНІМІЗАЦІЯ РИЗИКІВ ПРИ ТЕХНІЧНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ СИСТЕМ ВПУСКУ ТЯГАЧІВ

Технічне обслуговування (ТО) та експлуатація систем повітроочищення магістральних тягачів-зерновозів у період інтенсивної збиральної кампанії супроводжуються дією комплексу специфічних чинників, що створюють загрозу для здоров'я персоналу та цілісності техніки. Організація безпечного виконання робіт слюсарями вантажного автосервісу та водіями вимагає чіткої ідентифікації небезпек, розробки превентивних санітарно-гігієчних, організаційних і протипожежних заходів, а також математичного моделювання ймовірних аварійних сценаріїв для зниження виробничого травматизму [1, 5].

3.1. Ідентифікація шкідливих та небезпечних чинників робочої зони водіїв та слюсарів автопідприємства

При виконанні операцій з дефектування, демонтажу, очищення та заміни пористих гофрованих елементів повітряних фільтрів на робочих місцях персоналу виникають такі шкідливі та небезпечні виробничі чинники [1, 32]:

Підвищена запиленість робочої зони. Дрібнодисперсний мінеральний пил (із вмістом діоксиду кремнію SiO_2 понад 65–75%) та волокнистий органічний пил рослинного походження при демонтажі забитих картриджів переходять у зважений стан. Концентрація часток у повітрі дихальної зони під час обслуговування без застосування місцевої вентиляції може перевищувати гранично допустиму концентрацію (ГДК) у 8–12 разів, викликаючи хронічні захворювання органів дихання (пиловий бронхіт, пневмоконіоз) та ураження слизових оболонок очей [5].

Підвищена температура поверхонь обладнання. Заміна фільтроелементів безпосередньо після завершення логістичного рейсу виконується при температурах блоку двигуна та елементів турбокомпресора, які досягають

65...95°C і більше. Контакт незахищених ділянок шкіри працівника з гарячими патрубками або корпусом фільтра призводить до термічних опіків [1].

Підвищений рівень шуму на робочому місці. Проведення діагностичних операцій при працюючому двигуні (перевірка розрідження, оцінка герметичності впускного тракту) супроводжується шумовим навантаженням від дизельного двигуна та газотурбінного нагнітача на рівні $85...92$ дБА, що перевищує санітарну норму (80 дБА) і викликає підвищену втому та зниження уваги персоналу [32].

Механічні небезпеки. Наявність рухомих елементів двигуна (паси привода допоміжних агрегатів, крильчатка вентилятора охолодження) у безпосередній близькості до кожуха повітроочисника створює ризик захоплення одягу або травмування кінцівок при використанні невідповідного інструменту під час монтажних робіт [1, 5].

3.2. Обґрунтування організаційно-профілактичних заходів виробничої санітарії та протипожежного захисту

Мінімізація впливу ідентифікованих чинників забезпечується впровадженням комплексу інженерно-технічних та санітарних заходів.

З метою захисту органів дихання від бімодального пилу (фракцій PM10 та PM2.5 операції з очищення кожухів та заміни фільтрів Donaldson або Mann+Hummel повинні проводитися строго з використанням засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) — респіраторів класу захисту не нижче FFP2 або FFP3 та захисних герметичних окулярів [1, 13]. Робочі зони в сервісних майстернях обов'язково обладнуються локальними системами примусової витяжної вентиляції з робочим розрідженням, що розраховується за залежністю [5]:

$$P_{\text{vent}} \geq \Delta P_{\text{duct}} + \frac{\rho_{\text{air}} \cdot v_{\text{asp}}^2}{2} \tag{3.1}$$

де Pvent — необхідний тиск вентиляційної установки, Па; ΔPduct — сумарні втрати тиску в аспіраційному трубопроводі, Па; ρair — щільність повітряного середовища, кг/м³; vasp — швидкість руху повітря в аспіраційній воронці, м/с.

Категорично забороняється ручне продування картриджів стисненим повітрям у закритих приміщеннях загального призначення без спеціальних закритих камер із циклонами-пиловловлювачами [3, 4].

Протипожежний захист при обслуговуванні систем впуску зерновозів має підвищене значення через високу пожежну небезпеку накопиченого в гофрах сухого рослинного пилу (ості соломи, лушпиння). При досягненні критичної маси та наявності джерела ініціювання (іскри від зварювальних робіт, куріння, статична електрика) цей пил здатний до тління та спалахування. Зони зберігання демонтованих забитих фільтрів повинні належати до категорій пожежної небезпеки «В» або «Б» з обов'язковим комплектуванням вуглекислотними або порошковими вогнегасниками типу ВП-5. Усі інструменти для демонтажу металевих хомутів повітропроводів повинні мати обміднене покриття для запобігання фрикційному іскроутворенню [1].

3.3. Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій при експлуатації та обслуговуванні систем повітроочищення

Аналіз потенційних небезпечних зон експлуатації та технічного обслуговування систем повітроочищення магістральних тягачів дозволяє змоделювати виникнення небезпечних умов (НУ), які при порушенні правил безпеки можуть призвести до небезпечних дій (НД) персоналу та, як наслідок, до небезпечних ситуацій (НС), що спричиняють аварії (А), травми (Т) або професійні захворювання (З) [1, 5, 32].

Небезпечні умови (НУ): НУ1 — інтенсивне кумулятивне накопичення горючого органічного пилу рослинного походження у міжгофровому просторі картриджа [3, 13]; НУ2 — екстремальне зростання газодинамічного розрідження та втрата механічної жорсткості фільтрувального пакета під навантаженням [10,

20]; НУ3 — відсутність або несправність засобів індивідуального захисту органів дихання та зору на ділянці ТО [1, 5]; НУ4 — порушення герметичності або незадовільний стан кріпильних хомутів впускних еластичних повітропроводів [11, 22]; НУ5 — наявність високотемпературних поверхонь деталей випускного колектора та турбокомпресора поблизу корпусу фільтра [1, 32].

Небезпечні дії (НД): НД1 — тривала експлуатація магістрального тягача з ігноруванням світлового індикатора критичного засмічення на панелі приладів [4, 10]; НД2 — несанкціоноване продування забитого пористого елемента стисненим повітрям під тиском понад МПа у закритому приміщенні майстерні [3, 4]; НД3 — виконання демонтажних або регулювальних робіт на працюючому двигуні вантажівки або безпосередньо після його зупинки без охолодження [1, 5]; НД4 — використання невідповідних слюсарних інструментів чи прикладання надмірних зусиль при фіксації кришки кожуха повітроочисника [22, 28]; НД5 — неякісна герметизація стиків та дефекти монтажу патрубків після завершення сервісних операцій [11, 30].

Небезпечні ситуації (НС) та небажані наслідки: НС1 — раптове термічне самозаймання чи тління органічного пилу всередині кожуха фільтра від випадкових іскор при роботі поблизу комбайна (А, Т) [1, 5]; НС2 — баротравма органів зору та гостре інгаляційне отруєння слюсаря пиловою хмарою при ручному продуванні фільтра без ЗІЗ (Т, З) [5, 32]; НС3 — механічний прорив фільтрувального паперу та миттєве потрапляння абразиву у циліндро-поршневу групу ДВЗ з його подальшим заклинюванням (А) [10, 23]; НС4 — контактний термічний опік рук або передпліччя працівника об елементи системи випуску ДВЗ під час заміни картриджа (Т) [1, 32]; НС5 — раптове повне блокування впускного тракту («кисневе голодування»), падіння потужності двигуна під час обгону та створення аварійної ситуації на дорозі (А, Т) [10, 24].

Для запобігання аваріям, травмам чи професійним захворюванням необхідно суворо дотримуватись усіх вимог безпеки при експлуатації та сервісі систем повітроочищення вантажних автомобілів, оскільки навіть незначне порушення регламенту може мати серйозні технічні та соціальні наслідки [1, 4].

Моделювання подібних ситуацій є важливим етапом загальної оцінки ризиків та розробки ефективних запобіжних інженерних заходів [32].

Висновки до розділу

Ідентифіковано ключові небезпечні та шкідливі виробничі чинники при обслуговуванні систем впуску вантажних автомобілів в умовах АПК, серед яких домінуючим є висока концентрація дрібнодисперсного мінерально-органічного пилу, що перевищує ГДК у 8–12 разів, а також термічні ризики (температура поверхонь ДВЗ 65...95°С) та підвищений рівень шуму (85...92 дБА).

Обґрунтовано комплекс організаційних, санітарно-технічних та протипожежних заходів, що включає обов'язкове використання ЗІЗ органів дихання та зору класів FFP2/FFP3, розрахунок параметрів витяжної вентиляції робочих зон сервісу та категоричну заборону операцій ручного продування картриджів стисненим повітрям поза спеціальними аспіраційними камерами.

На основі системного підходу реалізовано математичне моделювання п'яти типових сценаріїв розвитку небезпечних ситуацій за логічним ланцюгом «небезпечна умова → небезпечна дія →небезпечна ситуація → наслідки». Отримані матриці ризиків доводять, що недотримання адаптивних інтервалів ТО чи порушення регламентів монтажу призводять до критичних аварій техніки (заклинювання ДВЗ через абразивний прорив) або травмування персоналу (баротравми, опіки).

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ТА ФІНАНСОВО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ АДАПТИВНОГО РЕГЛАМЕНТУ ЗАМІНИ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

4.1. Оцінка впливу впровадженого динамічного ТО на надійність двигунів та запобігання абразивному зносу

Впровадження адаптивного регламенту заміни пористих елементів за фактичним технічним станом безпосередньо впливає на кінетику зношування спряжень циліндро-поршневої групи (ЦПГ). При детермінованому підході до ТО тривала експлуатація тягача-зерновоза в умовах надвисокої запиленості супроводжується роботою ДВЗ із перевантаженим фільтром, що створює критичне розрідження у впускному тракті. Під дією високого знакозмінного тиску відбувається мікроруйнування пористої структури целюлозного матеріалу або відкриття байпасного клапана вантажівки, що призводить до падіння коефіцієнта очищення повітря [4, 11].

Кінетична швидкість абразивного зношування гільз циліндрів Iw під впливом мінеральних часток діоксиду кремнію (SiO_2) описується залежністю:

$$I_w = k_w \cdot C_i \cdot (1 - \eta) \cdot Q_{\text{avg}} \tag{4.1}$$

де Iw — швидкість абразивного зношування дзеркала циліндра, мкм/год; kw — коефіцієнт абразивної агресивності часток пилу, мкм/кг; Сі — масова концентрація пилу в атмосферному повітрі, кг/м³; η— інтегральний коефіцієнт ефективності очищення повітря фільтроелементом; Qavg — середня експлуатаційна об'ємна витрата повітря двигуном, м³/год.

При плановому ТО через прориви матеріалу або несанкціоноване ручне продування значення η знижується з номінальних 99,97% до 96...97%, що збільшует пропуск абразиву (1 - η) у 10...13 разів [4]. Наслідком цього є

прискорене стирання поршневих кілець і гільз, збільшення зазору в спряженні та втрата компресії.

Адаптивне ТО забезпечує вилучення картриджа Donaldson чи Mann+Hummel суворо до моменту втрати механічної стійкості гофрів за досягнення критичного розрідження ΔPdop = 6,5 кПа [10]. Завдяки цьому ефективність фільтрації стабільно утримується на рівні η≥99,97%, що мінімізує надходження частинок фракцій PM2.5 та PM10 у зону тертя. Запобігання лавиноподібному абразивному зносу дозволяє зберегти до 35...45% залишкового ресурсу ЦПГ двигуна вантажівки до капітального ремонту в порівнянні з жорстко фіксованими інтервалами сервісу [4].

4.2. Розрахунок економічного ефекту від оптимізації витрат дизельного палива та окупності засобів моніторингу

Економічна ефективність переходу на адаптивне коригування міжсервісних інтервалів формується внаслідок ліквідації явища «кисневого голодування» дизеля. При забиванні фільтра зростання газодинамічного опору понад норму призводить до зменшення коефіцієнта надлишку повітря, неповного згоряння суміші та перевитрати палива [8, 10].

Річний фінансовий ефект від оптимізації витрат дизельного палива Efuel для одного магістрального тягача розраховується за формулою:

$$E_{\text{fuel}} = L_{\text{an}} \cdot \Delta g \cdot P_f \cdot 10^{-2} \tag{4.2}$$

де E fuel — річна економічна вигода від зниження витрати палива, грн; Lan — річний напрацьований пробіг тягача в період збиральної кампанії, км; Δg — середня величина перевитрати палива через роботу із забитим фільтром, л/100 км; Pf — ринкова вартість одного літра дизельного палива, грн/л.

Експериментально доведено, що перевитрата палива через граничний опір системи впуску становить від 3% до 8% (в середньому Δg = 1,5...2,2 л/100 км для завантаженого автопоїзда) [8, 16].

Термін окупності капітальних інвестицій Tpb у впровадження засобів бортового моніторингу (електронних датчиків розрідження та логгерів CAN-шини) визначається за залежністю:

$$T_{\text{pb}} = \frac{C_{\text{sys}}}{E_{\text{an}} - C_m} \tag{4.3}$$

де Tpb — термін окупності модернізації, років; Csys — капітальні витрати на придбання, монтаж та налаштування елементів адаптивної системи моніторингу, грн; Ean — сумарний річний економічний ефект (включає ефект Efuel та економію від ліквідації передчасних замін чистих картриджів), грн; Cm — щорічні експлуатаційні витрати на обслуговування діагностичного комплексу, грн.

Зважаючи на високу інтенсивність експлуатації зерновозів MAN TGX під час жнив (Lan≥15000 км за сезон), сумарний економічний ефект повністю перекриває первинну вартість апаратного забезпечення Csys.

Висновки до розділу

Техніко-технологічна оцінка впровадження динамічного ТО підтвердила підвищення експлуатаційної надійності ДВЗ за рахунок стабілізації коефіцієнта фільтрації на номінальному рівні η≥99,97%. Своєчасна заміна елементів до моменту руйнування пористої структури паперу виключає ризик прямого пропуску мінерального пилу SiO_2 у циліндри, що знижує швидкість абразивного зношування ЦПГ Iw та подовжує міжремонтний ресурс двигуна вантажівки на 35...45%.

Розрахунок економічного ефекту довів, що ліквідація явища «кисневого голодування» двигуна через адаптивне ТО забезпечує лінійне зниження питомої витрати дизельного палива на 3...8%. За рахунок усунення паливної перевитрати (в середньому 1,5...2,2 л/100 км) річна фінансова вигода Efuel на один автопоїзд дозволяє повністю повернути капітальні інвестиції на закупівлю засобів моніторингу (Tpb < 0,4...0,5 року), що доводить високу комерційну доцільність проекту для підприємств АПК.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті вирішено актуальне науково-практичне завдання з підвищення експлуатаційної надійності та паливної економічності дизельних двигунів магістральних тягачів-зерновозів у період збиральної кампанії АПК шляхом розробки та впровадження адаптивного регламенту технічного обслуговування систем повітроочищення. Основні наукові та практичні результати полягають у такому:

Аналіз умов експлуатації вантажного автотранспорту в період жнив показав об'єктивне зростання масової концентрації пилу від базових значень Ср < 2 мг/м³ до екстремальних C_p > 15...50 мг/м³ [13]. Встановлено стохастичні та фізико-хімічні параметри бімодального агротехнічного запилення, мінеральна частина якого представлена високоабразивним кварцом SiO_2 (65–75% із твердістю понад 7 одиниць за шкалою Мооса) небезпечних фракцій PM10 та PM2.5, а органічна — великодисперсними рослинними волокнами соломи та лушпиння розміром 20–200 мкм [7, 12, 19].

Доведено технічну та економічну неспроможність детермінованих регламентів ТО за фіксованим пробігом (30–60 тис. км) в умовах інтенсивних польових робіт, що зумовлено високим статистичним розсіюванням ресурсу картриджів (коефіцієнт варіації v ≈0,44) [4]. Експлуатація техніки із жорстким дотриманням планових інтервалів призводить або до недовикористання до 40% потенціалу пористого пакета, або до критичного «кисневого голодування» двигуна, перевитрати палива на 3–8% [8, 16] та зниження коефіцієнта відсіву з номінальних 99,97% до 96...97% через мікропрориви матеріалу [4, 11].

Розроблено математичну модель кінетики утворення поверхневого пилового осаду, що базується на законі ламінарної фільтрації Дарсі та капілярній моделі пористого середовища Козені-Кармана [6]. Модель адаптовано до умов жнив шляхом введення коефіцієнта стисливості комбінованого осаду β= 0,25...0,62, що дозволило встановити пряму лінійну залежність темпу зростання газодинамічного опору від поточної концентрації пилу Сі та квадратичну залежність від швидкості набігання потоку v^2 [6, 14, 23].

Експериментально верифіковано розроблений математичний апарат під час польових випробувань магістральних тягачів MAN TGX 18.440. Встановлено, що в реальних логістичних циклах «поле – магістраль» граничний опір системи впуску ΔPdop = 6,5 кПа досягається в середньому за T = 120 мотогодин напрацювання двигуна (еквівалентний лінійний пробіг L≈ 3400 км) [4, 10, 20]. На основі отриманих масивів даних синтезовано динамічний інженерний алгоритм, який через бортову CAN-мережу за протоколом J1939 безперервно обчислює кумулятивний об'єм очищеного повітря VΣ та поточний коефіцієнт інтенсивності кольматажу Kclog$, транслюючи на дисплей водія залишковий ресурс фільтра Tres у мотогодинах [10, 16, 30].

Обґрунтовано заходи з безпеки життєдіяльності та виробничої санітарії на дільницях сервісного обслуговування систем впуску. Запропоновано схему захисту персоналу від бімодального пилу із застосуванням ЗІЗ класів FFP2/FFP3 [1, 13], розраховано параметри локальної аспіраційної вентиляції майстерень [5] та виконано системне моделювання п'яти сценаріїв аварійних ситуацій за логічним ланцюгом «небезпечна умова →небезпечна дія →небезпечна ситуація →наслідки», довівши неприпустимість несанкціонованого ручного продування картриджів стисненим повітрям [1, 3, 32].

Визначено показники техніко-економічної ефективності впровадженого адаптивного ТО. За рахунок повної ліквідації явища «кисневого голодування» ДВЗ та усунення паливної перевитрати (яка становить в середньому 1,5...2,2 л/100 км) забезпечується стабільна економія дизельного палива на рівні 3–8% [8, 16] при одночасному збереженні до 35...45% міжремонтного ресурсу циліндро-поршневої групи двигуна [4]. Розрахунковий термін окупності капітальних інвестицій у розроблену систему бортового моніторингу та датчиків становить Tpb < 0,4...0,5 року, що підтверджує високу комерційну доцільність проекту для автотранспортних підприємств АПК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Войналович О. В., Марчишина Є. І., Кофто Д. Г. Охорона праці в галузі (автомобільний транспорт) : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2018. 695 с. URL: https://www.researchgate.net/profile/Andrii-Kashkanov/publication/384051597_BEZPEKA_RUHU_AVTOMOBILNOGO_TRANSPORTU/links/66e6a00adde50b32587469de/BEZPEKA-RUHU-AVTOMOBILNOGO-TRANSPORTU.pdf (дата звернення: 18.05.2026).
2. Новицький А., Карабиньош С., Ружило З., Новицький Ю. Повітряні фільтри салонів транспортних засобів. *Agroexpert*. 2018. № 2(115). С. 82–84.
3. Новицький А., Ружило З., Карабиньош С., Новицький Ю. Повітряні фільтри для двигунів внутрішнього згоряння та особливості їх обслуговування. *Agroexpert*. 2018. № 1(114). С. 64–67.
4. Новицький Ю. А. Дослідження надійності та періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. Вип. 12(43), ч. 2. С. 188–195. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/18267 (дата звернення: 18.05.2026).
5. Ткачук К. Н., Зацарний В. В., Сабарно Р. В., Каштанов С. Ф., Мітюк Л. О., Третякова Л. Д., Чадюк А. В. Охорона праці та промислова безпека. Київ, 2010.
6. Aguiar M. L., Coury J. R. Cake formation in fabric filtration of gases. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 1996. Vol. 35, no. 10. DOI: https://doi.org/10.1021/ie960042p.
7. Ahmadipour F., Esmaeili Sari A., Bahramifar N. Characterization, concentration and risk assessment of airborne particles using car engine air filter (case study: Tehran metropolis). *Environmental Geochemistry and Health*. 2019. Vol. 41(6). P. 2649–2663. DOI: https://doi.org/10.1007/s10653-019-00319-1.
8. Akal D., Selvi İ. Effects of clogged air filter on power, torque, fuel consumption and emissions of diesel engines in tractors. *Petroleum Science and Technology*.

2023. No. 41(24). P. 2419–2433. DOI: https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2230248.

9. Alilou Y. Impact sur le colmatage en régimes transitoire et permanent des écoulements d'air induits par le plissage des médias filtrants THE : Doctoral dissertation / Université de Lorraine. 2018. URL: https://recherche-expertise.asnr.fr/sites/default/files/documents/larecherche/formation_recherche/theses/theses-soutenues/psn-res/2018-These-ALILOU.pdf (дата звернення: 18.05.2026).
10. Dziubak T., Karczewski M. Experimental Study of the Effect of Air Filter Pressure Drop on Internal Combustion Engine Performance. *Energies*. 2022. No. 15(9). P. 3285. DOI: https://doi.org/10.3390/en15093285.
11. Dziubak T., Szwedkowicz S. Experimental research on nonwoven filter fabric for intake air filtration in the IC engine of an off-road vehicle. *Arch. Motoryz.* 2014. Vol. 66. P. 3–22. URL: http://www.aaejournal.com/pdf-99356-31547?filename=31547.pdf (дата звернення: 18.05.2026).
12. Endo Y., Chen D.-R., Pui D. Y. H. Bimodal aerosol loading and dust cake formation on air filters. *Filtration & Separation*. 1998. Vol. 35, Issue 2. P. 191–195. DOI: https://doi.org/10.1016/S0015-1882(98)91369-6.
13. Engine Air Filtration for Light, Medium, & Heavy Dust Conditions. Donaldson Company, Inc. Product Guide. URL: https://www.donaldson.com/content/dam/donaldson/engine-hydraulics-bulk/catalogs/air-intake/north-america/F110027-ENG/Air-Intake-Systems-Product-Guide.pdf (дата звернення: 18.05.2026).
14. Fotovati S., Hosseini S. A., Vahedi Tafreshi H., Pourdeyhimi B. Modeling instantaneous pressure drop of pleated thin filter media during dust loading. *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 66, Issue 18. P. 4036–4046. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.038.
15. Fotovati S., Vahedi Tafreshi H., Pourdeyhimi B. A macroscale model for simulating pressure drop and collection efficiency of pleated filters over time.

Separation and Purification Technology. 2012. Vol. 98. P. 344–355. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.07.009.

16. Gailis M., Pīrs V. Research on influence of the engine air filter replacement periodicity. *Engineering for Rural Development*. 2011. P. 173–178. URL: www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2011/Papers/032_Gailis.pdf (дата звернення: 18.05.2026).
17. Gautam S., Saleh A. M., Tafreshi H. V., Radney J. G., Pourdeyhimi B. Macroscale simulation of particle loading in electrostatically charged filters. *Journal of Aerosol Science*. 2023. Vol. 173. P. 106212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2023.106212.
18. Gentry B., Beckman I., Cho H. A comprehensive review of particle loading models of fibrous air filters. *Journal of Aerosol Science*. 2023. Vol. 167. P. 106078. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2022.106078.
19. Heredia Rivera B., Gerardo Rodriguez M. Characterization of airborne particles collected from car engine air filters using SEM and EDX techniques. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2016. Vol. 13(10). P. 985. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph13100985.
20. ISO 5011:2000. Inlet air cleaning equipment for internal combustion engines and compressors – Performance testing. Edition 2. 2000. 39 p. URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/29006/cc597c8681234def9899fdcd2896f0fa/ISO-5011-2000.pdf (дата звернення: 18.05.2026).
21. Maddineni A. K., Das D., Damodaran R. M. Numerical investigation of pressure and flow characteristics of pleated air filter system for automotive engine intake application. *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 212. P. 126–134. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.014.
22. Modaqeq T., Joia R., Tulepov M., Nurgaliuly O. A., Baimahankyzy K. Z. An In-Depth Analysis of Car Air Filters: Structure, Function and Operational Mechanisms. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*. 2025. Vol. 3(1). P. 249–260. DOI: https://doi.org/10.59324/ejtas.2025.3(1).24.

23. Rebai M., Prat M., Meireles M., Schmitz P., Baclet R. Clogging modeling in pleated filters for gas filtration. *Chemical Engineering Research and Design*. 2010. Vol. 88, Issue 4. P. 476–486. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.08.014.
24. Saleh A. M., Hosseini S. A., Vahedi Tafreshi H., Pourdeyhimi B. 3-D microscale simulation of dust-loading in thin flat-sheet filters: A comparison with 1-D macroscale simulations. *Chemical Engineering Science*. 2013. Vol. 99. P. 284–291. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.06.007.
25. Saleh A. M., Fotovati S., Vahedi Tafreshi H., Pourdeyhimi B. Modeling service life of pleated filters exposed to poly-dispersed aerosols. *Powder Technology*. 2014. Vol. 266. P. 79–89. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.011.
26. Saleh A. M., Vahedi Tafreshi H. A simple semi-numerical model for designing pleated air filters under dust loading. *Separation and Purification Technology*. 2014. Vol. 137. P. 94–108. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.029.
27. Saleh A. M., Vahedi Tafreshi H., Pourdeyhimi B. An analytical approach to predict pressure drop and collection efficiency of dust-load pleated filters. *Separation and Purification Technology*. 2016. Vol. 161. P. 80–87. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.01.034.
28. Théron F., Joubert A., Le Coq L. Numerical and experimental investigations of the influence of the pleat geometry on the pressure drop and velocity field of a pleated fibrous filter. *Separation and Purification Technology*. 2017. Vol. 182. P. 69–77. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.034.
29. Thomas D., Contal P., Renaudin V., Penicot P., Leclerc D., Vendel J. Modelling pressure drop in hepa filters during dynamic filtration. *Journal of Aerosol Science*. 1999. Vol. 30, Issue 2. P. 235–246. DOI: https://doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00036-6.
30. Thomas D., Penicot P., Contal P., Leclerc D., Vendel J. Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles Experimental and modelling study. *Chemical Engineering Science*. 2001. Vol. 56, Issue 11. P. 3549–3561. DOI: https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00041-0.

31. Yun J.-E. Optimal Design of Off-Road Utility Terrain Vehicle Air Filter Intake. *Energies*. 2021. Vol. 14(8). P. 2269. DOI: https://doi.org/10.3390/en14082269.
32. Zhang W., Deng S., Wang Y., Lin Z. Modeling the surface filtration pressure drop of PTFE HEPA filter media for low load applications. *Building and Environment*. 2020. Vol. 177. P. 106905. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106905.

ДОДАТКИ