

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Руднік Дмитро Іванович

УДК 621.436

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ МЕХАНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ
ПРОЦЕСІВ В АПК

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Руднік Д.І.

Керівник роботи

Куликівський В.Л.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Руднік Дмитро Іванович. Обґрунтування методів і засобів забезпечення екологічної безпеки при механізації виробничих процесів в АПК. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

В магістерській роботі розроблено склад шихти з додаванням природного шунгіту для виготовлення каталітичних блоків нейтралізаторів.

Зразки каталітичних блоків, виготовлені із запропонованим складом шихти, дали змогу забезпечити якісне каталітичне очищення відпрацьованих газів двигунів мобільних машин і знизити вміст CO на 80-83%, NO_x на 54-62%, C_xH_y на 58-61%, ТЧ на 89-92%, підвищити стійкість до динамічних та статичних навантажень, знизити собівартість і матеріаломісткість каталітичних нейтралізаторів.

Встановлено, що регулюваннями кута випередження початку подачі палива, у межах збереження паливної економічності, можна домогтися зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище на 9 – 10 %.

Виявлено, що застосування комплексних методів - застосування каталітичного очищення відпрацьованих газів і застосування регулювань кута випередження початку подачі палива, дає змогу підвищити безпеку праці працівників АПК і поліпшити екологічну обстановку. Ефективність очищення за використання багатоступеневого нейтралізатора та додатковими малотоксичними регулюваннями становила $\eta_{\text{KH}} = 0,698$.

Ключові слова: механізація, нейтралізатор, паливо, екологічна безпека, процес.

ANNOTATION

Rudnik Dmytro Ivanovych. Substantiation of methods and means of ensuring environmental safety in the mechanization of production processes in agriculture. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.
– Polissya National University, Zhytomyr, 2024.

The master's thesis developed a charge composition with the addition of natural shungite for the manufacture of catalytic converters.

Samples of catalytic converters made with the proposed composition of the charge made it possible to provide high-quality catalytic purification of exhaust gases from mobile machinery engines and reduce the content of CO by 80-83%, NO_x by 54-62%, C_xH_y by 58-61%, PM by 89-92%, increase resistance to dynamic and static loads, reduce the cost and material consumption of catalytic converters.

It has been established that by adjusting the angle of advance of fuel supply, within the limits of maintaining fuel efficiency, it is possible to reduce the technogenic load on the environment by 9-10 %.

It has been found that the use of complex methods - the use of catalytic cleaning and the use of adjustments to the angle of advance of the start of fuel supply - makes it possible to increase the safety of agricultural workers and improve the environmental situation. The purification efficiency with the use of a multistage neutralizer and additional low-toxic adjustments was $\eta_{kn} = 0.698$.

Keywords: mechanization, neutralizer, fuel, environmental safety, process.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Трактори та мобільні машини з дизельними двигунами широко використовуються на різноманітних технологічних операціях у рослинництві, тваринництві, кормовиробництві та викидають в атмосферне повітря значну кількість шкідливих речовин, які негативно впливають на стан повітряного середовища, що призводить до зниження працездатності, погіршення стану здоров'я працівників АПК, спричиняють зниження врожайності сільськогосподарських культур і продуктивності тваринництва.

Аналіз результатів проведених досліджень засвідчив, що після проведення енергоємних технологічних операцій спостерігається перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони операторів МТА в кілька разів. Це не тільки впливає на стан здоров'я працівників, а й призводить до значних матеріальних втрат, зниження ефективності рослинництва і тваринництва за рахунок зниження якості та кількості виробленої продукції.

Актуальність теми цього дослідження полягає у розв'язанні важливої екологічної проблеми зменшення шкідливих викидів дизелів мобільних машин, що використовуються на технологічних операціях в АПК.

Застосування мобільних машин із дизелями під час проведення технологічних операцій в АПК дає багато переваг, однак і спричиняє багато ризиків, пов'язаних із забрудненням довкілля, що може негативно позначитися на здоров'ї працівників галузі, рості рослин, врожайності культур, якості кормів і продуктивності тваринництва.

Основними забруднювачами, що викидаються дизельними двигунами, є оксиди азоту (NO_x), оксид вуглецю (CO), вуглеводні (C_xH_y) і тверді частинки (ТЧ). Необхідне застосування комплексних заходів щодо зниження викидів цих забруднювачів у навколишнє середовище.

Об'єкт досліджень – процес утворення та нейтралізації шкідливих речовин у складі відпрацьованих газів дизельного двигуна мобільної машини під час виконання технологічних операцій в АПК.

Предмет досліджень – вплив малотоксичних регулювань паливної апаратури та матеріалів у складі СВС-блоку каталітичного нейтралізатора на вміст шкідливих речовин у складі відпрацьованих газів дизельного двигуна мобільної машини під час виконання технологічних операцій в АПК.

Мета роботи полягає в підвищенні екологічної безпеки шляхом зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище за рахунок скорочення рівня шкідливих викидів застосуванням малотоксичних регулювань і каталітичного очищення відпрацьованих газів дизелів мобільних машин, що застосовуються на технологічних операціях в АПК.

У зв'язку з поставленою метою визначено **завдання досліджень**:

- визначити рівні шкідливих речовин на робочому місці оператора МТА та в навколишньому середовищі після проведення технологічних операцій у тваринницькому приміщенні з приготування та механізованої роздачі кормів і в польових умовах на технологічних операціях з обробітку ґрунту і навантаження зерна;

- розробити методику вибору каталітичних матеріалів і застосувати її при створенні нових матеріалів для каталітичних нейтралізаторів;

- розробити склад шихти для отримання СВС-блоків нейтралізаторів без використання благородних і рідкоземельних металів;

- провести випробування пристроїв з каталітичними СВС-блоками з розробленим складом шихти.

Методи наукового дослідження. У роботі застосовано інженерні та експериментальні методи дослідження. У теоретичних дослідженнях використовувалися методи системного аналізу, елементи теорії систем, факторний метод, метод математичного моделювання процесів. Експериментальні дослідження проводилися в польових умовах і на лабораторних стендах з використанням сучасної виміральної апаратури, галузевих методик, методів планування і спостережень. Обробку експериментальних даних здійснювали методами статистичного аналізу, відповідно до ДСТУ та з використанням комп'ютерних програм Microsoft Office Excel.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Куликівський В.Л., **Руднік Д.І.** Наявні технології забезпечення екологічної безпеки під час використання мобільної техніки з дизельними двигунами. Сучасні вектори розвитку аграрної науки: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (ХДАЕУ, 17-18 вересня 2024 року). Херсон: ХДАЕУ, 2024. С. 372-375.

2. Куликівський В. Л., **Руднік Д.І.** Основні напрями забезпечення екологічної безпеки в системі «людина-машина-середовище». Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 34-36.

3. **Руднік Д. І.** Розроблення та обґрунтування критеріїв оцінки та вибору матеріалів для каталітичної конверсії відпрацьованих газів дизелів. Студентські читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 27-28.

Практичне значення одержаних результатів. Практичний інтерес для аграрного виробництва представляє розроблений склад шихти з додаванням природного шунгіту для виготовлення каталітичних блоків нейтралізаторів.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 13 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 51 сторінка комп'ютерного тексту, містить 12 рисунків та 3 таблиці.

РОЗДІЛ 1

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ МЕХАНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ В АПК

1.1 Наявні технології забезпечення екологічної безпеки під час використання мобільної техніки з дизельними двигунами [2]

Фактори, що впливають на викиди дизельних двигунів, включають 2 основні типи [2]:

1. Фактори, пов'язані з самим двигуном, такі як конструкція двигуна, тип палива, використання джерела живлення і термін служби двигуна;
2. Зовнішні об'єктивні чинники, такі як якість доріг; рельєф місцевості; густота руху, метеорологічні чинники – температура, вологість і швидкість руху повітря тощо.

Для зниження викидів дизельних двигунів можуть застосовуватися такі заходи:

Щодо зовнішніх факторів: технічна підготовка – допомагає водіям мати найбільш підходящу і стабільну поведінку під час водіння; поліпшення якості доріг, забезпечення рівної місцевості для транспорту, зниження щільності руху; зменшення впливу метеорологічних умов на роботу автотранспортних засобів; використання методів охолодження для двигунів і паливних баків, коли двигун працює за високих температур навколишнього середовища [2].

Що стосується елементів самого дизельного двигуна, можуть бути застосовані такі технічні напрями: удосконалення конструкції двигуна; використання екологічно чистого палива та енергії; очищення відпрацьованих газів та інші [2].

Модифікація системи впорскування палива. Час і швидкість впорскування палива в камеру згоряння дизельного двигуна впливає на викид забруднювальних речовин в атмосферу NO_x і твердих частинок. Уповільнення часу розпилення може знизити викиди NO_x за рахунок зниження тиску і температури згоряння. Однак затримка часу розпилення збільшує кількість частинок і може знизити економічність. Збільшення швидкості розпилення може компенсувати обмеження часу розпилення із затримкою, оскільки припинення впорскування палива не затримується. Тому дедалі більше досліджень спрямовано на те, щоб найкращим чином поєднувати тиск упорскування, час упорскування та місце розташування розпилення, даючи змогу двигуну ефективно спалювати пальне, не спричиняючи стрибків температури, які збільшують викиди NO_x [2].

Застосування регулювань у системі впорскування палива, таких як рівень та управління тиском впорскування, регулювання швидкості впорскування та управління часом впорскування, зазвичай пропонується одна стратегія – використання пускових впорскувань для зменшення викидів NO_x без збільшення викидів твердих частин (ТЧ) та витрати палива. Це управління швидкістю впорскування палива засноване на впорскуванні невеликої кількості палива на початку впорскування, щоб обмежити початкову швидкість тепловиділення і отже, щоб підтримувати утворення NO_x на низькому рівні [2].

Щоб знизити викиди ТЧ, можуть бути вжиті заходи для підвищення тиску впорскування палива. Сучасні системи впорскування палива під високим тиском нагнітають паливо в камеру згоряння через отвори меншого діаметру за більш високого тиску, що перевищує 25 000 фунтів на квадратний дюйм. Це призводить

до того, що паливо розпадається на дрібні краплі, покращуючи тим самим повітряно-паливну суміш для досягнення більш повного згорання [2].

Нині розроблено електронну систему впорскування палива для дизельних двигунів, що сприяє зниженню вмісту ТЧ і NO_x .

Електронна система регулювання впорскування палива ґрунтується на основі інформації від електронних датчиків, які контролюють роботу двигуна та активність автомобіля. Вони використовуються як для забезпечення більш повного згорання палива з метою зниження ТЧ, так і для контролю температури з метою зменшення викидів NO_x .

Рециркуляція відпрацьованих газів (EGR). Рециркуляція відпрацьованих газів (EGR) – це метод повторного використання частини відпрацьованих газів у певній пропорції, щоб повернути її назад до повітрязабірної труби, а потім змішати її з сумішшю пального та повітря в камері згорання, що зменшує кількість O_2 , яка подається на спалювання пального і сприяє зниженню температури газової суміші, що призводить до зниження викидів NO_x [2].

Нині рециркуляція відпрацьованих газів (EGR) вважається основним методом зниження викидів оксиду азоту (NO_x) для дизельних двигунів. Однак застосування рециркуляції відпрацьованих газів призводить до збільшення викидів твердих частинок і може збільшити кількість викидів C_xH_y і CO , при цьому зменшуючи потужність двигуна, що обмежує використання рециркуляції для двигунів середнього і низького навантаження. Рециркуляція відпрацьованих газів також може збільшити питому витрату пального, знизити якість змащення та довговічність двигуна [2].

Зміна конструкції камери згорання. Конструктори та виробники двигунів нині проводять безліч досліджень для зміни конструкції камери згорання двигуна та її оптимізації, забезпечуючи краще змішування палива та повітря для зниження викидів ТЧ. Сучасна конструкція камери згорання відображає велике моделювання декількох конструктивних елементів, включно з формою і глибиною камери згорання і поршня (невелика площа у верхній частині поршня,

в яку впорскується паливо); спіральні впускні отвори, які спричиняють завихрення повітря під час його входження в камеру; кількість клапанів циліндрів і розміщення паливних форсунок у камері згоряння [2].

У деяких роботах вказується, що у зв'язку з подальшим посиленням норм ЄВРО щодо викидів NO_x , з огляду на обмежені можливості підвищення якості палива, під час форсування передбачається встановлення форсунок у центрі та на периферії камер згоряння з різними кутами конусів паливних факелів [2].

Перспективи розв'язання проблеми і розвитку пов'язуються і з удосконаленням систем газотурбінного наддуву з охолодженням надувного повітря. Цим шляхом просуваються фірми «Комацу» (Японія), «Каммінс», «Катерпіллер», «Алліс Чалмерс» (США), MTU (ФРН) та інші [2].

1.2 Основні напрями забезпечення екологічної безпеки в системі «людина-машина - середовище»

Забезпечення екологічної безпеки під час проведення технологічних операцій в АПК із використанням мобільних машин із дизельними двигунами може здійснюватися за кількома напрямками [1, 4, 5].

Один із напрямів пов'язаний із вибором видів мобільних машин. Під вибором мобільних машин необхідно розуміти підбір техніки необхідної потужності, мобільності, операційної забезпеченості, з найменш токсичними двигунами [4, 5].

Дизельні двигуни як енергетичні установки мобільної техніки дають змогу використовувати їх як універсальні, що є важливою обставиною в умовах сільськогосподарського виробництва. Мобільні машини з дизельними двигунами мають високу автономність [1, 3, 6].

Найменш токсичними з усіх ДВЗ є чотиритактні дизелі. Вирішення ж основного завдання не дає змоги в умовах сільськогосподарського виробництва займатися переукомплектацією чинного парку мобільних машин. Тому, якщо в

умовах виробництва мобільних машин завдання зводиться до підбору ДВЗ, то в умовах сільськогосподарського виробництва - до підбору машин із малотоксичними дизелями [2, 7, 6].

Оскільки рівні шкідливих викидів із відпрацьованими газами багато в чому визначаються навантаженням, то доводиться розв'язувати задачі агрегування або укомплектації мобільних машин і вибору найоптимальніших режимів їхньої експлуатації [1, 4, 9].

Результати оцінки перевищення допустимих норм викидів та оцінка техногенного навантаження на навколишнє середовище, дають змогу розв'язувати задачі в цьому напрямі.

На перший погляд широкі можливості здійснення добору мобільних машин, двигунів, агрегування та оснащення машин, технологічних режимів можуть обмежуватися вже тим, що в умовах селянсько-фермерських господарств неможливо утримувати велику номенклатуру машин і забезпечити малотоксичні технологічні режими експлуатації [9, 11, 12].

Другий напрям пов'язаний здебільшого із забезпеченням безпечних умов праці. У зв'язку з тим, що окремі види сільськогосподарської продукції, з одного боку, піддаються впливу шкідливих речовин, що містяться у відпрацьованих газах, з іншого – виділяють в атмосферу виробничих приміщень шкідливі речовини. У зв'язку з цим необхідно організувати вентиляцію, з тим, щоб підтримувати певний мікроклімат. Підтримання оптимальних і допустимих параметрів мікроклімату та чистоти повітряного середовища необхідне як для забезпечення безпечних умов праці працівників, так і умов утримання тварин і зберігання сільськогосподарської продукції [10, 13].

Машини, що працюють, мають бути обладнані пристроями, які забезпечують пожежо- та вибухобезпечність. Це пояснюється тим, що під час зберігання, збирання сіна, соломи, зерна та іншої продукції необхідно забезпечити пожежну безпеку шляхом недопущення займання від іскор, гарячих випускних газів, іскріння електричного обладнання мобільних машин [3, 4].

Забезпечення безпечних умов праці передбачає відсутність шуму на робочих місцях, що перевищує санітарні норми.

Третій напрямок представляється створенням оптимальних умов для підвищення продуктивності праці за рахунок механізації технологічних процесів, що дають змогу скоротити час роботи мобільних машин у приміщеннях і кількість шкідливих викидів із відпрацьованими газами ДВЗ. Ці варіанти можуть здійснюватися шляхом раціонального планування виробничих приміщень, що дає змогу підтримувати маневреність машин і скорочувати терміни технологічних режимів обробки вантажів. Розроблення нових технологій обробки вантажів дає змогу також скоротити кількість одночасно використовуваної техніки [12, 5, 7].

Використання спеціальної тари, пакування продукції дає можливість скорочувати час, що витрачається на навантажувально-розвантажувальних роботах, і сприяє зниженню собівартості перероблення вантажів і розв'язанню задачі забезпечення екологічної безпеки під час використання мобільних машин для механізації технологічних процесів в АПК [4, 7, 9].

Основним є четвертий напрям – це розробка методів і засобів зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище. Його можна вважати активним, зважаючи на те що він безпосередньо спрямований на зменшення шкідливих викидів двигунів мобільних машин [3, 6, 8].

Розроблення методів і засобів для зниження техногенного навантаження від мобільних машин необхідно проводити за кількома напрямками, оскільки рух в одному напрямку не дає можливості ефективно впливати на розв'язання проблеми в цілому. Це пояснюється насамперед тим, що одночасно необхідно розв'язати двоєдине завдання - зниження шкідливих викидів із підвищенням або збереженням паливної економічності [13].

Застосування альтернативних палив несе безліч невирішених питань і, в цілому ряді випадків, - необхідність змін у конструкції двигуна. Це неприйнятно в умовах сільськогосподарського виробництва [3, 6, 8].

Під час застосування газового палива постає необхідність обладнання дизелів додатковою апаратурою та організації заправки машин.

Використання антидимних присадок у паливо дизелів привабливіше, не потребує внесення конструктивних змін.

Привабливим є і застосування каталітичної нейтралізації відпрацьованих газів, що не потребує зміни конструкції двигуна, дає змогу знижувати викиди шкідливих речовин і рівень шуму.

Найбільш доступним заходом є малотоксичні регулювання паливної апаратури дизелів. Однак, наприклад, регулювання, спрямовані на збільшення повноти згоряння, призводять до збільшення викидів NO_x , тому їх рекомендовано застосовувати в комплексних заходах.

Використання регулювань ТА і застосування каталітичної нейтралізації відпрацьованих газів, що не потребує втручань у конструкцію дизеля, дає змогу знижувати шкідливі викиди з ОГ до необхідних норм [6, 7].

Таким чином, розробка методів і засобів зниження шкідливих викидів дизелів в умовах сільськогосподарського виробництва може бути обмежена заходами, які не потребують модернізації дизелів [6, 8].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТА ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ КОНВЕРСІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛІВ У КАТАЛІТИЧНИХ НЕЙТРАЛІЗАТОРАХ

2.1 Розроблення та обґрунтування критеріїв оцінки та вибору матеріалів для каталітичної конверсії відпрацьованих газів дизелів

Оцінку і підбір матеріалів для конверсії відпрацьованих газів дизелів можна проводити різними методами. Основними вимогами до методу оцінювання є: достовірність даних, простота проведення операцій, всебічність і зрозумілість критеріїв оцінювання, можливість перевірки результатів вибору іншими методами і застосування їх у підсумковому виборі. У літературі є приклади неоднозначної оцінки за необґрунтованими групами критеріїв [6, 8].

Однією з провідних груп критеріїв стали функціональні критерії, пов'язані з оцінкою забруднень, що спричиняють небажані для екосистем антропогенні зміни. Види забруднень екосистем представлені: інгредієнтними, параметричними, біоценотичними та ландшафтними [8].

З огляду на те, що, законодавствами провідних промислових країн встановлені рівні допустимих викидів шкідливих речовин, то було визначено в якості критеріїв використовувати рівні перевищення норм викидів оксиду вуглецю (CO), оксиду азоту (NO_x), вуглеводнів (C_xH_y), твердих частинок (ТЧ).

Додатково до числа критеріїв можливе включення рівня викидів 3,4 бенз - а - пірену (БАП) або (ПАВ).

Інші речовини у складі відпрацьованих газів умовно не враховуються, оскільки наявність їх різновидів доходить до 1200 найменувань [5, 8, 10] і містяться вони в незначних кількостях. Водночас включення до числа критеріїв 3,4 бенз - а - пірену пояснюється тим, що він є найбільш небезпечною канцерогенною речовиною, що входить до складу відпрацьованих газів дизелів, міститься в малих кількостях і накопичується в сажових частинках.

У результаті добору критеріїв з оцінки способів підвищення ефективності каталітичного очищення відпрацьованих газів дизелів.

Розроблено групи критеріїв, зокрема, функціональних, структурно-фізичних, експлуатаційних, технологічних, ресурсно-технологічних.

Групи критеріїв були представлені в такому вигляді:

1. Функціональні: забезпечення нейтралізації оксидів азоту – Φ_{NOx} ; забезпечення нейтралізації оксиду вуглецю – Φ_{CO} ; забезпечення нейтралізації вуглеводнів (сумарно) – Φ_{CH} ; забезпечення уловлювання твердих частинок – Φ_{TC} ;

2. Структурно-фізичні: розвиненості питомої поверхні матеріалу – $C_{\text{уп}}$; пористості матеріалу – $C_{\text{пм}}$; проникності матеріалу – $C_{\text{п}}$; звивистості пір у матеріалі – $C_{\text{сп}}$; температуростійкості матеріалу – $C_{\text{тс}}$.

3 Експлуатаційні: нижньої межі робочих температур – $E_{\text{нп}}$; верхньої межі робочих температур – $E_{\text{вп}}$; стійкості до агресивного середовища – $E_{\text{ас}}$; вібростійкості – $E_{\text{вс}}$; ударостійкості – $E_{\text{ус}}$.

4) Технологічні: технологічності виробів – $T_{\text{ТВ}}$; трудомісткості виробів – $T_{\text{ТТ}}$; матеріаломісткості виробів – $T_{\text{МІ}}$; металомісткості виробів – $T_{\text{МЕ}}$; енергомісткості процесів – $T_{\text{ЕЕ}}$.

5. Ресурсно-економічні: використання благородних металів – $R_{\text{БМ}}$; використання рідкоземельних металів – $R_{\text{РЗМ}}$; використання місцевої сировини – $R_{\text{МС}}$; використання відходів металообробки – $R_{\text{МО}}$; використання наноматеріалів – $R_{\text{НМ}}$.

Використовуючи результати оцінок за даними літературних джерел, власних досліджень, експертних оцінок і використовуючи метод теорії операції та математичної логіки [2], було розроблено алгоритм розв'язання задачі оцінки та вибору каталітичних матеріалів для очищення відпрацьованих газів дизелів.

2.2. Алгоритм оцінки та вибору каталітичних матеріалів для очищення газів у засобах наступної обробки відпрацьованих газів (ЗНОВГ)

Алгоритм розв'язання задач оцінки та вибору каталітичних матеріалів для очищення газів у ЗНОВГ являє собою послідовність і зміст дій, що мають такий вигляд:

1. Відбираються характеристики відомих матеріалів, які використовуються в ЗНОВГ;
2. Визначаються критерії оцінки матеріалів і відбираються найбільш значущі та визначальні;
3. Критерії розбиваються на групи;
4. Шляхом експертних оцінок визначається вага критеріїв залежно від обраної системи оцінки;
5. На основі характеристик за пунктом 1 усі відібрані види матеріалів ранжуються за кожним з обраних критеріїв;
6. Проводиться приведення критеріїв шляхом множення їх на коефіцієнти вагомості;
7. Для кожного з порівнюваних матеріалів знаходяться добутки наведених критеріїв;
8. Обчислюється значення середнього геометричного з добутків наведених критеріїв, і отримуються наведені значення узагальненого критерію;
9. Проводиться оцінка за максимальним критерієм Вальда;
10. Проводиться оцінка за мінімальним критерієм Севіджа;
11. Проводиться оцінка за критерієм песимізму – оптимізму Гурвіца;

12. Дані оцінок за пунктами 8,9,10,11 порівнюють і ухвалюють рішення, які ранжуються.

Таким чином, визначаються базові рішення для поліпшення матеріалів і технологій.

2.3 Результати попередньої оцінки та вибору матеріалів для очищення відпрацьованих газів

Результати попередньої оцінки, проведеної на підставі опублікованих даних, наведені в таблиці 2.1, засвідчили, що, якщо судити за величинами узагальненого критерію $K_{об}$, можна відмітити переваги застосування в ЗНОВГ від шкідливих речовин (у порядку першочерговості) таких матеріалів:

- композитів на основі окалини сталі, отриманих із застосуванням СВС-технологій;
- пористих проникних матеріалів на основі пінометалу з монелю;
- пористих проникних матеріалів на основі пентаксиду ванадію, отриманих із застосуванням гарячого пресування;
- композитних матеріалів на основі кордієриту і карбїду кремнію;
- пористих проникних матеріалів на основі стовпчастих глин, природного шунгіту, діатоміту, отриманих із застосуванням СВС-технологій.

Таблиця 2.1 – Результати попередньої оцінки та вибору матеріалів для очищення відпрацьованих газів

$K_{об}$	Оцінки по критеріям			Переважні матеріали
	Вальда	Севіджа	Гурвіца H_G	
5,44	2,30	10,64	5,64	
7,32	2,41	13,12	6,70	xx
3,98	1,27	12,30	5,68	
4,98	1,45	13,50	6,25	xxxx
3,22	1,06	14,25	6,34	xxx
6,01	0,96	12,60	5,62	
3,58	0,55	9,84	4,27	
5,28	1,66	12,00	5,20	
5,37	1,88	12,45	6,12	xxxxx
3,88	0,56	12,35	5,28	

4,41	0,58	14,40	6,12	xxxxx
8,24	3,61	15,20	8,25	x
2,42	0,67	10,08	4,44	
3,25	0,43	10,80	4,58	
2,83	0,36	10,08	4,25	
2,02	0,38	11,52	4,85	

Порівнювані матеріали були оцінені за максимальним критерієм Вальда. Цей критерій дає уявлення про максимальний ризик при оцінці за мінімальними значеннями критеріїв. Було визначено, що переваги мають (у порядку першочерговості) такі матеріали:

- композити на основі окалини сталі, отримані із застосуванням СВС-технологій; пористі проникні матеріали на основі пінометалу з монеля - ніздрюватих кордієритних матеріалів з просочуванням каталізаторами;
- пористі мікрокристалічні матеріали, отримані порошковою металургією;
- матеріали на основі спечених сумішей активованих оксидів металів і рідкісноземельних елементів (РЗМ).

Далі порівнювані матеріали були оцінені за мінімальним критерієм Севіджа. Критерій Севіджа дає уявлення про мінімальний ризик під час оцінювання за максимальними значеннями критеріїв. У результаті проведеного оцінювання було визначено, що переваги мають такі (у порядку першочерговості) матеріали:

- композити на основі окалини сталі, отримані із застосуванням СВС-технологій;
- композити на основі оксидів металів і платини;
- пористі мікрокристалічні матеріали, отримані порошковою металургією;
- пористі проникні метали на основі пенометалла з монеля.

Оцінка порівнюваних матеріалів за критерієм Гурвіца, що враховує частку песимізму (у нашому випадку $\eta=0.6$), засвідчила, що перевагами (у порядку першочерговості) володіють такі матеріали: композити на основі окалини сталі, отримані із застосуванням СВС-технологій; - пористі проникні матеріали на основі пінометалу з монеля; матеріали зі спечених тугоплавких неорганічних

оксидів; - пористі мікрокри-сталеві матеріали, отримані порошковою металургією; - композитні матеріали на основі кордієриту і карбїду кремнію; - композитні спечені матеріали на основі оксидів металів і платини.

Для того, щоб визначити кращі матеріали, оцінку було проведено за узагальненим наведеним критерієм K_{OB} , критеріїв Вальда, Севіджа і Гурвіца. У результаті аналізу збігу оцінок було зроблено висновок про те, що для очищення газів переважно застосовувати такі матеріали:

- композити на основі окалини сталі, отримані із застосуванням СВС-технології;
- пористі проникні матеріали на основі пінометалу;
- пористі мікрокристалічні матеріали, отримані за технологіями порошкової металургії.

Таким чином, у результаті проведеного аналізу було виявлено та визначено основні напрямки використання матеріалів для очищення газів від шкідливих речовин. Слід зазначити, що найкращим напрямком розвитку композитних матеріалів є їх створення на основі окалини сталі із застосуванням СВС-технологій.

Удосконалення матеріалів передбачається за рахунок зміни складу, технологій одержання, використання нових методів і ефектів під час формування структури та їхніх властивостей.

Методика, що використовується в роботі, дає можливість оцінювати порівнювані матеріали за окремими групами критеріїв і за вибірками критеріїв, що розширює можливості у визначенні найкращих з урахуванням низки висунутих вимог.

З метою виявлення напрямів вдосконалення окремих матеріалів було ухвалено рішення про проведення оцінки за «набігаючою» низкою критеріїв. Це дає можливість відстежити слабкі ланки у формуванні узагальненого наведеного показника K_{OB} .

У лідери за результатами оцінювання за всіма видами критеріїв вийшли: - композитні матеріали на основі окалини сталі, отримані із застосуванням СВС-технологій; - пористі проникні матеріали на основі пінометалу зі сплаву монеля; - спечені тугоплавкі неорганічні оксиди; - пористі мікрокристалічні матеріали, отримані із застосуванням порошкової металургії.

Практично у всіх порівнюваних матеріалів значення функціональних критеріїв Φ_{CH} і $\Phi_{TЧ}$ відносно низькі. З цього випливає, що до складу матеріалів, з одного боку, необхідно вводити елементи, що сприяють доокисненню вуглеводнів, а з іншого - покращувати фільтраційні властивості за рахунок зміни структури матеріалів.

Таким чином, покроковий аналіз формування узагальненого наведеного критерію вибору дає можливість рекомендувати можливі напрямки підвищення якості матеріалу як за окремими критеріями, групами, так і загалом за узагальненим критерієм

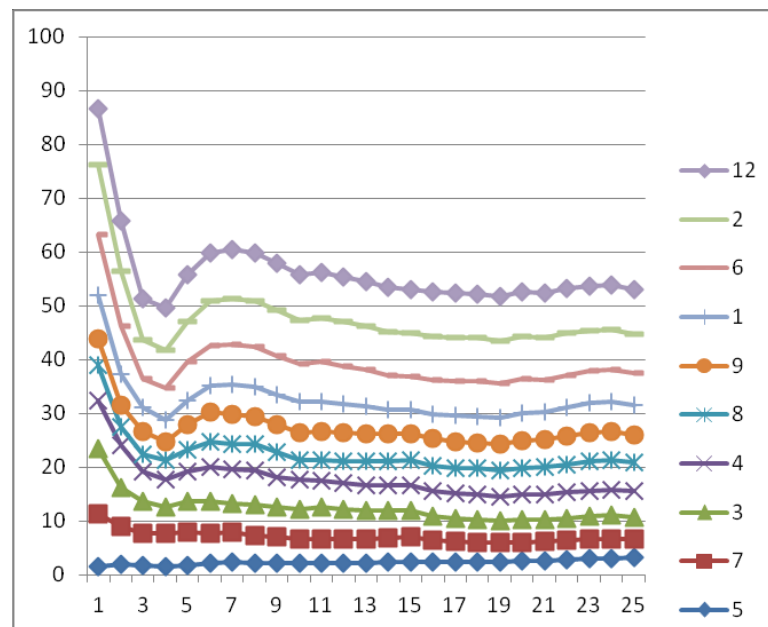


Рис. 2.1. Формування узагальненого наведеного критерію оцінки

Якщо порівнювати матеріали 2 і 12, то можна відзначити, що матеріал із пінометалу сплаву монеля (2) поступається композиту (12) за структурно-фізичними та ресурсно-економічними критеріями, і якщо структурно-фізичні якості можна регулювати через зменшення технологій виготовлення, то

ресурсно-економічні якості, включно з використанням благородних і рідкісноземельних металів, місцевої сировини, відходів металообробки та наноматеріалів, можна регулювати обмежено.

За результатами розроблення методології оцінювання та вибору каталітичних матеріалів для очищення газів у нейтралізаторах можна зробити такі висновки:

1 Обґрунтовано метод оцінювання та вибору каталітичних матеріалів в умовах неповної визначеності, що ґрунтується на теорії операцій і математичній логіці та дає змогу в умовах неповної визначеності виокремлювати провідні напрями в розвитку;

2. визначено критерії оцінки та вибору матеріалів для каталітичного очищення відпрацьованих газів і виділено п'ять груп критеріїв: - функціональні; - структурно-фізичні; - експлуатаційні; - технологічні; - ресурсно-економічні;

3. Розроблено алгоритм розв'язання задач оцінки та вибору матеріалів для очищення газів від шкідливих речовин;

4. Виконано попередню оцінку та вибір матеріалів для очищення газів за розробленою методологією, яка визначила провідні напрямки у використанні наступних:

- композитних матеріалів на основі окалини сталі, отриманих із застосуванням СВС-технологій;

- пористих проникних матеріалів з пінометалу сплаву монеля;

- пористих мікрокристалічних матеріалів, отриманих технологією порошкової металургії;

- спечених тугоплавких неорганічних оксидів із пористою структурою;

5. Визначено, що найбільш перспективним є напрям створення СВС-матеріалів на основі окалини сталі.

2.4 Склад матеріалу для виготовлення пористих проникних блоків нейтралізаторів СВС-технологією

Використання шунгіту для отримання композитних каталітичних матеріалів високотемпературним синтезом не знайшло відображення в науково-технічній літературі. Привабливість застосування розмелу природного мінералу шунгіту в пористих проникних каталітичних матеріалах полягає в тому, що минаючи цілу низку процесів збагачення, металургії, очищення, можна забезпечити присутність у шихті кальцію, калію, магнію, натрію, марганцю та інших компонентів, що забезпечує комплексні оксидні сполуки, які визначають каталітичні властивості матеріалів.

Встановлено, що при використанні розмелу породи шунгіту в складі шихти для отримання пористих проникних каталітичних матеріалів, достатньо додавання її в кількості 30-50% за масою. Шляхом регулювання складу шихти за рахунок кількості шунгіту можна виготовляти як окислювальні, так і відновлювальні блоки для нейтралізаторів відпрацьованих газів дизелів.

Склад, фізичні, фізико-механічні та функціональні властивості розроблених каталітичних матеріалів, отриманих із застосуванням саморозповсюджувального високотемпературного синтезу, були попередньо вивчені на зразках стандартних розмірів. Інформацію про функціональні властивості отриманих СВС-каталітичних матеріалів наведено в таблиці 2.2.

Виявлені в процесі досліджень каталітичні властивості пояснюються наявністю у складі пористого проникного матеріалу каталізаторів, таких як магній, натрій, марганець та інших, що забезпечують комплексні оксидні властивості, що значно знижують енергії активації в реакціях окиснення та відновлення.

Необхідні фізичні та фізико-механічні властивості отриманого матеріалу обумовлено вибором технологічного процесу, що базується на саморозповсюджувальному високотемпературному синтезі.

Фізичні властивості шунгіту: густина – 2,25-2,84 г/см³; пористість – 0,5-5%; міцність на стиск 100-276 МПа; електропровідність – (1-3)×10³ см/м;

теплопровідність – 3,8 Вт/м-К, середнє значення коефіцієнта теплового розширення в інтервалі температур від +20 до +600 °С становить 12×10^{-6} К⁻¹. Теплотвірна здатність 7500 ккал/кг.

Таблиця 2.2 – Дані про склад шихти, функціональні властивості СВС-матеріалів з використанням природного шунгіту

Склад, фізичні характеристики, фізико-механічні та функціональні властивості зразків каталітичного матеріалу, отриманого шляхом саморозповсюдженого високотемпературного синтезу (СВС) з природним шунгітом					
Окремі характеристики	Зразки матеріалів, отриманих шляхом СВС				
	Ш-1	Ш-2	Ш-3	Ш4	Ш-5
Вміст компонентів шихти, у відсотках за масою					
Залізна окалина	41,20	31,89	22,6	12,91	3,59
Оксид хрому (III)	12,1	11,6	11,2	10,6	10,2
Оксид хрому (IV)	-	-	-	-	-
Хром	6,8	6,86	6,79	6,69	6,69
Нікель	6,1	5,8	5,8	5,6	5,5
Алюміній	12,9	12,7	12,6	12,5	12,3
Шунгіт	31	41	51	61	71
Мідь	1,18	1,19	1,20	2,1	2,03
Фізичні характеристики:					
Середній приведений діаметр пор, мкм	188	185	178	175	186
Звивистість пор при $\delta_{ст}=10$ мм	1,13	1,16	1,20	1,25	1,33
Питома поверхня, м ² /г	134	119	108	127	133
Пористість	0,48	0,46	0,43	0,46	0,37
Функціональні властивості					
Механічна міцність при стисненні, МПа	13,59	11,89	10,39	10,79	10,09
Механічна міцність при згині, МПа	3,8	3,6	3,4	3,3	2,8
Ударна в'язкість, Дж/м ²	0,32	0,248	0,226	0,253	0,149
Корозійна стійкість, %	12,3	13,5	15,2	16,6	16,2
Зниження концентрацій CO, %	81	82	84	84	81
Зниження концентрацій NO _x , %	57	55	61	63	61

Зниження концентрацій C_xH_y , %	59	61	58	60	58
Зниження концентрацій твердих частинок, %	90	93	93	92	91

Виходячи з умов існування стійкого горіння систем, було визначено концентрацію кожного з компонентів запропонованої шихти для отримання пористого проникного каталітичного матеріалу.

Використовуючи розроблену методику визначення та вибору матеріалу за безпосередньої участі автора цієї роботи було розроблено склад шихти з додаванням діатоміту.

Склад шихти з додаванням діатоміту подано в табл. 2.3.

Формування структури пористого проникного каталітичного матеріалу відбувається на основі процесу горіння суміші, до якої входить d-елементи періодичної системи елементів, а саме: залізо, хром, нікель, мідь та низка інших.

Таким чином, застосування запропонованої шихти з додаванням природного шунгіту та діатоміту дало змогу одержати вироби, виготовлені на основі одержуваного пористого проникного матеріалу, які забезпечують якісне каталітичне очищення відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згорання, підвищити стійкість до динамічних та статичних навантажень, знизити собівартість і матеріаломісткість цих виробів.

Таблиця 2.3 – Дані про склад шихти, функціональні властивості СВС-матеріалів з використанням діатоміту.

Склад, фізичні характеристики, фізико-механічні та функціональні властивості зразків пористого проникного каталітичного матеріалу, отриманого на основі розробленої шихти шляхом саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС)					
Окремі характеристики	Зразки матеріалів, отриманих шляхом СВС				
	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5
Вміст компонентів шихти, у відсотках за масою					
Залізна окалина	47,8	47,7	47,6	47,5	47,4
Оксид хрому (III)	12,0	11,5	11,0	10,5	10,0

Оксид хрому (IV)	-	-	-	-	-
Хром	5,8	5,6	5,4	5,2	5,0
Нікель	6,0	5,9	5,7	5,5	5,4
Алюміній	12,8	12,6	12,5	12,4	12,2
Діатоміт ТУ 5712-003-97641349-2015	14	15	16	17	18
Мідь	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
Фізичні характеристики:					
Середній наведений діаметр пор, мкм	170	162	155	159	164
Звивистість пор при $\delta_{ст}=10$ мм	1,20	1,22	1,24	1,27	1,30
Питома поверхня, м ² /г	133	118	107	126	132
Пористість	0,42	0,47	0,45	0,46	0,37
Проникність по повітрю $\times 10^{-12}$, м ²	1,44	1,47	1,51	1,54	1,57
Функціональні властивості					
Механічна міцність при стисненні, МПа	10,7	11,8	12,2	12,0	10,8
Механічна міцність під час вигину, МПа	2,9	3,1	3,2	3,3	2,8
Ударна в'язкість, Дж/м ²	0,31	0,31	0,28	0,27	0,22
Корозійна стійкість, %	13,2	13,8	14,0	14,2	13,8
Функціональні властивості:					
Зниження концентрацій СО, %	78	80	81	80	78
Зниження концентрацій NO _x , %	58	62	61	62	60
Зниження концентрацій С _x Н _y , %	56	58	59	59	57
Зниження концентрацій твердих частинок, %	90	92	92	94	90

Висновки по розділу

1. Розроблено й апробовано методику оцінювання та вибору матеріалів, що ґрунтується на теорії операцій і математичній логіці та дає змогу за умов неповної визначеності виокремлювати провідні напрями в розвитку;

2. Розроблено склади шихти з додаванням природного шунгіту і з діатомітом для виготовлення каталітичних блоків нейтралізаторів.

3. Зразки каталітичних блоків, виготовлені із запропонованими складами шихти, дали змогу забезпечити якісне каталітичне очищення відпрацьованих газів двигунів мобільних машин, підвищити стійкість до динамічних і статичних

навантажень, знизити собівартість і матеріаломісткість каталітичних нейтралізаторів.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Експериментальна установка з дизелем Д – 245

Експериментальна установка була призначена для визначення впливу складу каталітичних блоків нейтралізаторів відпрацьованих газів дизелів на ефективність зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище тваринницького приміщення.

На рис. 3.1 представлена схема експериментальної установки з дизелем Д-245. Д-245.

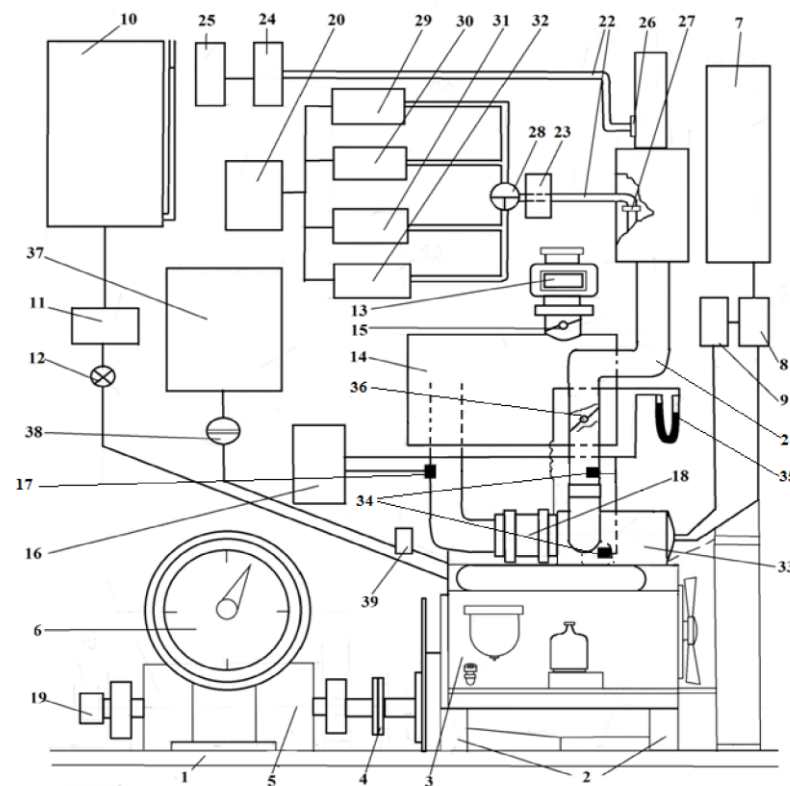


Рис. 3.1. Схема експериментальної установки з дизелем Д-245.

Підмоторна рама 1 на стійках 2, де змонтовано дизель 3, з'єднаний через муфту 4 з гальмівним пристроєм 5 марки SAK-670 з вимірювальною головкою 6 марки «Rapido». Система охолодження води і мастила містить напірний бак 7, водоводяний 8 і водооливний 9 холодильники, з'єднані з системою змащення і системою охолодження, що дають змогу підтримувати задані температури мастила і охолоджувальної рідини під час випробувань. Від паливного бака 10 здійснювалося живлення паливом через витратомір палива діафрагмовий 11 марки КИ-8940 і електромагнітний клапан 12.

Повітропостачання з боксу здійснювалося через газовий лічильник 13 марки РГ-1000 і ресивер 14. Розрідження повітря на впуску регулювалося заслінкою 15 у впускному трубопроводі. Контролювання температури повітря на впуску здійснювали за показаннями електропотенціометра 16 марки ЕПП-09, з'єданого з термопарою 17, встановленою між ресивером 14 і впускним турбокомпресором 18 дизеля. Контроль частоти обертання колінчастого вала здійснювався за допомогою тахометра 19, встановленого на валу гальмівного пристрою. Дані вимірювань виводилися на прилади 20 пульту керування.

У випускній трубі 21 встановлено зонд 22 для відбору відпрацьованих газів для аналізу вмісту твердих частинок. Зонд через холодильник 23 був з'єднаний з димоміром 24 марки EFAW-65 A (виробництво фірми «Bosch»), з вимірювальним приладом 25.

Газовідбірники 26 і 27 за допомогою трубопроводів і триходового крана 28 були з'єднані з двокомпонентним газоаналізатором 29 з інфрачервоним недесперсним детектором NDIR марки MEHA-321E (виробництва компанії «Horiba», Японія) для визначення концентрації оксиду вуглецю (CO) в об'ємних відсотках і вуглеводнів (до C₆H₁₄) у ppm (чмн), газоаналізатором 30 хемілюнісцентним детектором HCLD марки RS-325L (виробництво фірми «Riken Keiki», Японія) для визначення концентрації оксидів азоту NO і NO_x в ppm у відпрацьованих газах, газоаналізатором 31 «Hartridge-904» (Великобританія) для визначення концентрацій CO в ppm, оптичним димоміром 32 марки «Hartridge».

Контроль температури відпрацьованих газів на вході і виході з нейтралізатора 33 здійснювався термопарою 34 типу ХА. Тиск газів на вході і виході з нейтралізатора вимірювали за показаннями манометра 35, протитиск на випуску імітували заслінкою 36.

Експериментальна установка дозволила виконати повну програму експериментальних досліджень.

3.2 Визначення рівнів шкідливих викидів МТА на робочому місці оператора під час виконання технологічних операцій

Оцінка загазованості робочих місць операторів містила в собі питання вивчення складу відпрацьованих газів дизелів мобільних машин залежно від зовнішніх умов експлуатації засобів механізації сільського господарства, завантаження і швидкостей пересування техніки, технологій обробітку в рослинництві та тваринництві.

Програма передбачала відбір газів за розробленою методикою при проведенні сільськогосподарських робіт: оранці, приготуванні та роздачі кормів у тваринницькому приміщенні та при виконанні навантажувальних робіт.

Методика проведення роботи передбачала розбивку внутрішнього простору кабін на окремі об'єми, проведення вимірювання концентрацій шкідливих речовин у цих об'ємах та отримання числової характеристики індексу екологічної безпеки $K_{eб}$.

Умовою безпеки є $K_{eб} \leq 1$.

Щодо умов експлуатації техніки в сільськогосподарському виробництві пропонується розгляд трьох випадків:

$K_{eб} < 1$ – продовжувати експлуатацію без загрози порушення екологічної безпеки та стану повітряного середовища;

$K_{eб} = 1$ – необхідне проведення заходів щодо поліпшення стану повітряного середовища;

$K_{\text{сб}} > 1$ – необхідне проведення заходів щодо зменшення рівнів шкідливих викидів для забезпечення екологічної безпеки.

Було встановлено, що в різних частинах кабін тракторів існують об'єми з приблизно рівними концентраціями окремих токсичних речовин і твердих частинок. Це пов'язано з низкою конструктивних особливостей, наявністю нещільностей, технологічних отворів, отворів виходу педалей, важелів тощо.

За допомогою газоаналізатора МАГ-6 П-Т було визначено вміст оксиду вуглецю (CO), вуглеводнів (C_xH_y), оксидів азоту (NO_x). Система відбору проб газів для визначення концентрацій твердих частинок представлена на рис. 4.1. Так само визначали мікрокліматичні параметри приміщення (температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря за ДСТУ).

Димність реєстрували димоміром Еraw 65/68 Bosch.

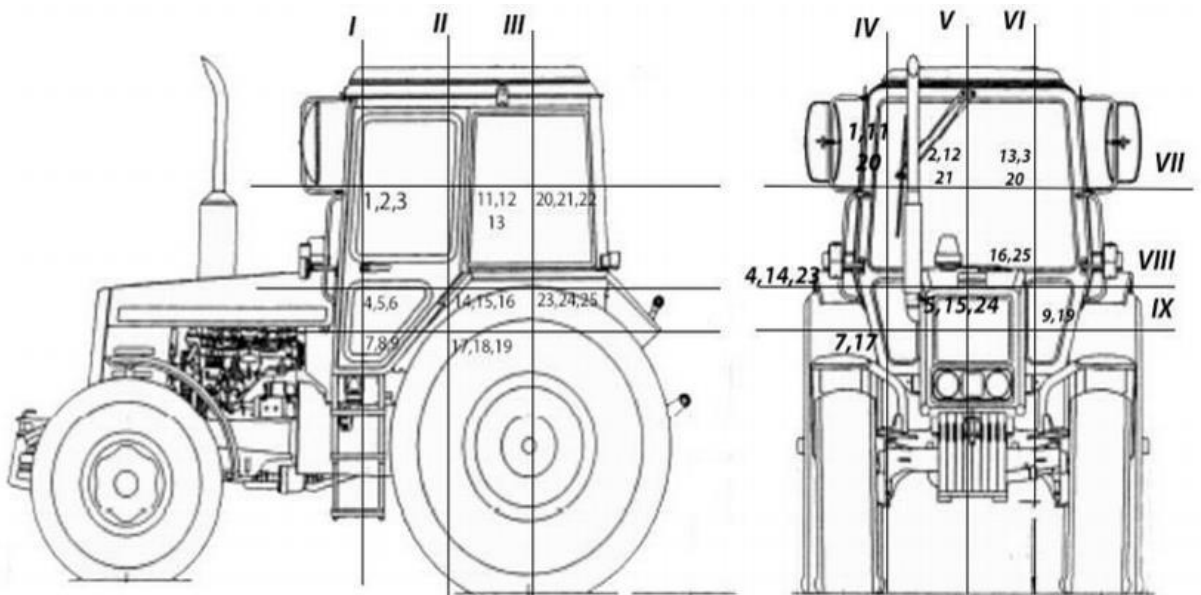


Рис. 4.1. Положення точок відбору проб повітря в кабіні трактора МТЗ-82.

Було виявлено, що рівні індексів безпеки, які комплексно характеризують атмосферу кабін тракторів, значною мірою змінюються при різних видах агрегування з сільськогосподарськими машинами, залежать від виду виконуваних робіт, гакових навантажень тощо. такі дані наведено в таблиці 26.

Таблиця 3.1 – Результати дослідження загазованості кабін тракторів і визначення індексу екологічної безпеки

Марка трактора та агрегатованої машини	Вид сільськогосподарських робіт, умови	Концентрації шкідливих речовин у зоні дихання механізатора, мг/м ³				<i>K_{еб}</i>
		NO _x	CO	C _x H _y	ТЧ	
Трактор МТЗ-82 з дизелем Д-245 і ИСРК-12	Приготування, транспортування та роздача кормів	8,12	32,8	477,2	3,49	9,89
		4,15*	3,10*	1,19*	1,47*	
		34,20**	29,19**	25,20**	11,50**	
Трактор МТЗ-82 з дизелем Д-245, плуг ПЛН-3,5	Оранка парів, 6-я передача T ₀ = 304 К	8,59	49,49	630	0,57	11,19
		12,8*	3,79*	2,69*	0,25*	
		65,7**	19,4**	14,12**	0,75**	
Трактор МТЗ-82 з дизелем Д-245, завантажувач	Завантаження зерна	6,82	36,7	488,9	3,8	10,40
		4,2*	2,86*	2,16*	1,25*	
		39,44**	27,45**	20,91**	12,19**	
ГДК для робочої зони		3	25	320	4,0	-
Коефіцієнти збільшення токсичності речовин у присутності односпрямованих		3,10	1,56	1,4	1,4	-

* - приведені концентрації речовин.

** - частка компонента в індексі безпеки, %.

Під час виконання польових робіт спостерігається підвищене пилоутворення, що спричиняється як робочими органами сільськогосподарських машин, так і роботою колісних і гусеничних рушіїв. Автором цієї роботи було проведено дослідження запиленості кабін тракторів у складі МТА під час проведення різних сільськогосподарських робіт. Результати зведено в таблиці 4.2.

Таблиця 3.2 – Запиленість кабін тракторів під час виконання сільськогосподарських робіт

Вид сільськогосподарських робіт	Склад МТА	Запиленість у кабіні трактора мг/м ³
Оранка	Трактор МТЗ-82, плуг ПЛН-3,5	8,3
Посів зернових	Трактор МТЗ-82, сівалка Астра 6	0,48

Окремий інтерес становлять дані про наслідки механізації процесів у тваринництві з використанням тракторів в агрегатах з різними машинами.

Тваринний світ є невід'ємною частиною екосистем, що включають і сільськогосподарське виробництво. Вплив мобільної техніки на організми тварин пов'язаний з необхідністю подачі в зону працюючих машин додаткової кількості чистого повітря до 20 м³.

На рис. 3.2 показано технологічний процес роздавання та приготування кормів із використанням трактора МТЗ-82 в агрегаті з кормороздавачем.



Рис. 3.2. Роздача кормів із використанням трактора МТЗ-82.

Розрахунково-експериментальне дослідження з вивчення складу відпрацьованих газів дизелів мобільних машин та оцінки загазованості повітряного середовища було проведено у тваринницькому приміщенні. Трактор МТЗ-82 з дизелем Д-245 агрегувався з подрібнювачем-змішувачем-роздавальником кормів і здійснював приготування та роздавання кормів. Швидкість МТА становила 4,14 км/год.

Важливим показником повітряного середовища є склад повітря. Від мікроклімату тваринницького приміщення залежить здоров'я тварин та їхня продуктивність.

Тваринницьке приміщення для утримання великої рогатої худоби було нетиповим на 350 голів. Середня жива маса тварин у господарстві становила 500 кг, продуктивність корів 6200 л на 1 голову на рік. Система вентиляції теплообмінна плівкова. Розміри приміщення в плані – 120,0×27,0 м. висота стін із керамзитових блоків – 3,4 м, у центрі до перекриття – 4,4 м; кількість вікон - 36, зі звичайним виконанням у дерев'яних рамах та одинарним заскленням, додатково закриті стільниковим полікарбонатом, загальною площею світлових прорізів 120 м². Воріт зовнішніх – 7, із них торцеві (3×3 м) – 6 шт, бічні (2,15×1,2

м) – 1 шт. Ворота утеплені, стан задовільний, закриваються щільно. Підлоги під тваринами з пиломатеріалу, технологічні проїзди та проходи бетоновані. Стеля із залізобетонних плит, укладених на ригелі. Припливні та витяжні пристрої забезпечені тягами ручного регулювання клапанів.

Було обстежено рівні загазованості зон тваринницьких приміщень (рис. 4.3). В-1, В-2, В-3, В-4, В-5 - вертикальні зони обстеження, а Г-1, Г-2, Г-3, Г-4, Г-5 – горизонтальні площини. Зона В-3 являє собою центр проходу машинотракторного агрегату (МТА) – 4,75 м від стіни; В-2, В-4 – це зони дихання тварин – 2,95 м від стіни; В-1 і В-5 – зони над каналами гноєвидалення. Горизонтальна площина Г-1 розташована в зоні вентиляції; Г-2 – рівень викидів газів із труби МТА – 2,8 м від підлоги; Г-3 - зона дихання людини – 1,7 м; Г-4 – площина дихання тварин – 1,1 м від рівня підлоги; Г-5 – зона над каналами гноєвидалення, розташована на 40 см від підлоги.

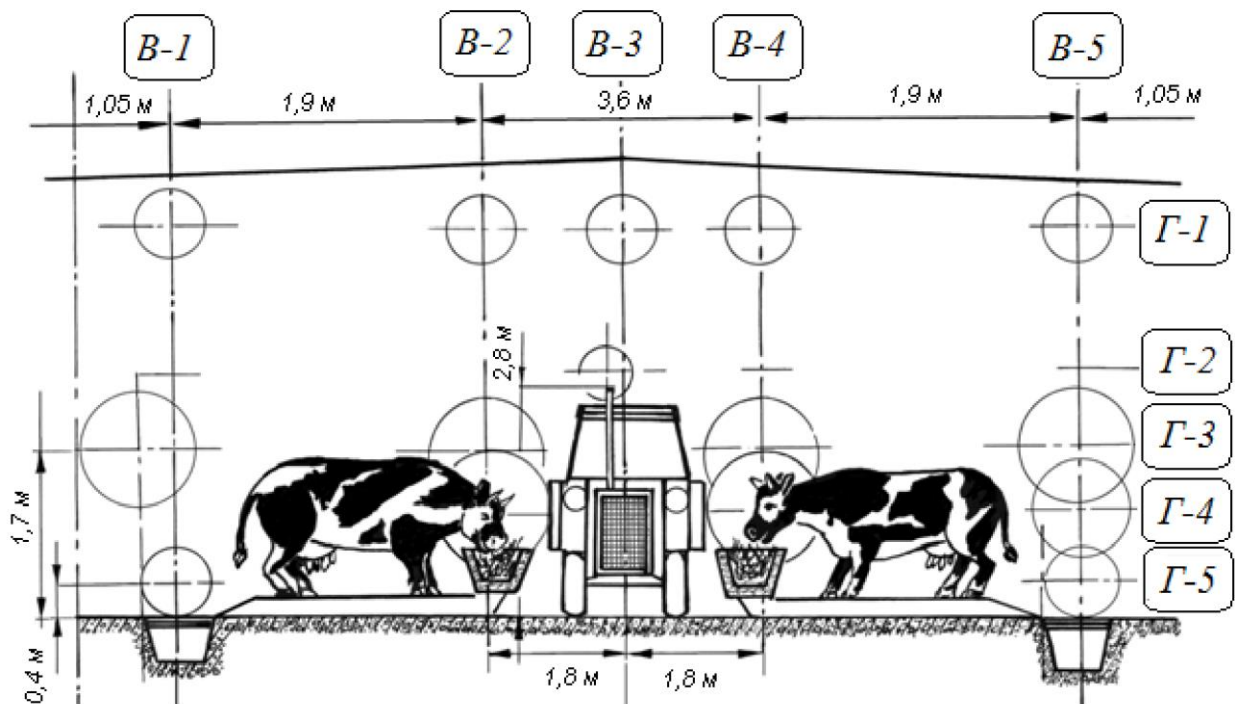


Рис. 3.3. Схема розташування зон обстеження у тваринницьких приміщеннях

Як видно з малюнка, зона дихання людини і тварини знаходяться поруч із зоною викидів МТА, що негативно впливає на організми обслуговуючого персоналу і тварин.

Дані експериментальної оцінки за індексом екологічної безпеки у тваринницькому приміщенні наведено в табл. 3.3.

З отриманих даних видно, що спостерігається перевищення індексу екологічної безпеки для всіх компонентів і необхідне проведення заходів щодо поліпшення стану повітряного середовища.

Таблиця 3.3 – Результати дослідження стану повітряного середовища та визначення індексу екологічної безпеки у тваринницькому приміщенні

Марка трактора та агрегатованої машини	Технологічна операція	Концентрації шкідливих речовин у тваринницькому приміщенні, мг/м ³				К _{еб}
		NO _x	CO	C _x H _y	ТЧ	
Трактор МТЗ-82 з дизелем Д-245 і розкидач	приготування, транспортування і роздача кормів	5,99	35,88	484,3	3,75	10,2
		3,89*	2,88*	1,97*	1,29*	
		43,10**	27,29**	20,01**	11,69**	

* - приведені концентрації речовин.

** - частка компонента в індексі безпеки, %.

Таким чином, механізації процесів у сільськогосподарському виробництві з використанням МТА призводить, з одного боку, до підвищення продуктивності праці та поліпшення низки показників продуктивності галузі, а з іншого - призводить до негативних впливів на навколишнє середовище та умови праці обслуговуючого персоналу.

У практиці польових випробувань важко реалізовуваним виявився підхід у визначенні оціночних викидів оксиду вуглецю, оксидів азоту, вуглеводнів і

твердих частинок, оскільки потрібне суворе встановлення частот обертання і навантажень дизелів. У зв'язку з цим подальші дослідження було проведено в стендових умовах.

3.3 Експериментальне дослідження рівнів шкідливих викидів дизеля Д-245

Експериментальне дослідження рівнів шкідливих викидів дизеля Д-245 (4ЧН 11,0/12,5) проведено на стенді відповідно до вимог ДСТУ в лабораторних умовах на стенді, описаному вище, обладнаному апаратурою відповідно до ДСТУ. Точність вимірювань контрольованих параметрів задовольняла вимогам стандартів.

Для отримання даних для порівняння перед проведенням серії експериментальних досліджень на дизелі, зібраному згідно із загальними технічними умовами підприємства-виготовлювача, проводили контрольні випробування на паливі за ДСТУ.

Використовували масло марки М-10-Д (м) згідно з вимогами інструкції з експлуатації. Умови випробувань були такими для описуваної серії досліджень: температура довкілля в боксі $T_0 = 292...296$ К, атмосферний тиск $B_0 = 757...765$ мм рт. стовпчика, відносна вологість повітря $W_0 = 65...80\%$.

Викиди шкідливих речовин із відпрацьованими газами і димність визначали за ДСТУ. Тривалість вимірювання витрати палива становила не менше 30 секунд. Вимірювання димності, токсичності, температури і тиску відпрацьованих газів проводили щонайменше шість разів на кожному з режимів одними і тими ж приладами через розподільні колонки.

На початку і наприкінці виконання програми випробувань знімали контрольні зовнішні швидкісні та навантажувальні характеристики, а також характеристики за 13-режимним випробувальним циклом.

Контрольні випробування проведено без каталітичного нейтралізатора. Вивчення рівнів шкідливих викидів дизеля обладнаного каталітичним нейтралізатором було проведено за швидкісною та навантажувальною характеристиками.

3.4 Дослідження впливу регулювань кута випередження початку подачі палива на рівні шкідливих викидів

Вплив регулювань кута випередження початку подачі палива в дизелях на рівні шкідливих викидів достатньо описано в літературі.

Слід зазначити, що оптимальне регулювання КВВ за питомою витратою палива відповідає мінімальним викидам із відпрацьованими газами CO , C_xH_y і ТЧ. Водночас рівні викидів оксидів NO_x можуть наблизитися до максимальних.

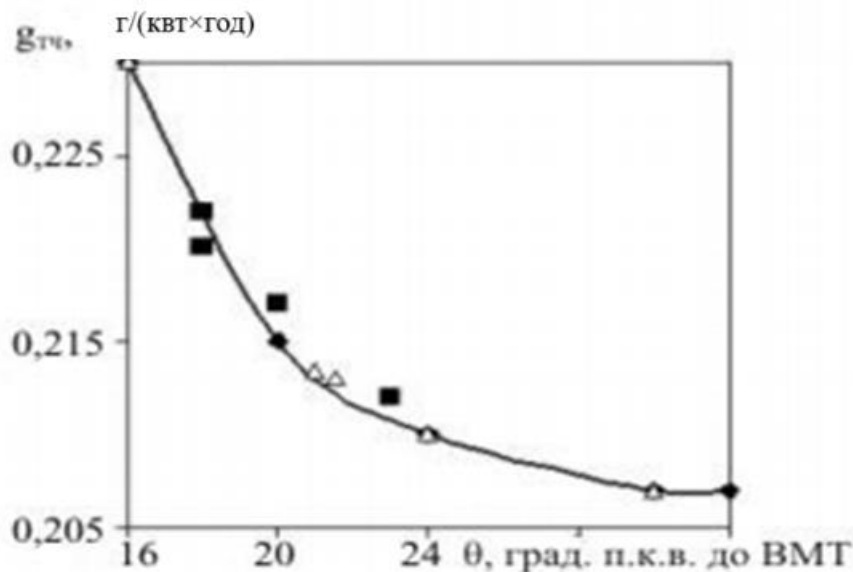


Рис. 3.4. Вплив регулювання кута випередження початку подачі палива з ПНВТ у дизелі 1ЧН15/18 на викиди твердих частинок з ОГ (1500 хв^{-1} , 48,4 кВт, РК = 0,228 МПа)

Це пояснюється високими температурами в циліндрах поблизу ВМТ і достатнім вмістом кисню у свіжому заряді та суміші. За даними (рис. 16), зі зростанням КВВ з 16 до 32 град п.к.в. питомі викиди ТЧ скорочуються на 13 %.

Цей випадок не характерний у тому плані, що тиск наддуву для випробуваного дизеля становив $P_K = 0,228$ МПа. Для дизелів без наддуву питомі викиди ТЧ значно вищі.

Таким чином, між величинами питомих викидів ТЧ і регулюваннями КВВ існує чітка залежність, і це дає змогу глибше вивчати питання щодо взаємозв'язку регулювань КВВ і рівнів шкідливих викидів із відпрацьованими газами.

При збільшенні кута випередження початку подачі палива збільшується час, відведений, залежно від частоти обертання колінчастого вала і подачі палива ВЦ, на сумішоутворення і згоряння, цим самим збільшується повнота згоряння: у складі відпрацьованих газів стає менше продуктів неповного згоряння: CO , C_xH_y , ТЧ.

Це видно на прикладі випробування дизеля 6Ч 13/14 за навантажувальною характеристикою за 1700 хв^{-1} . Тут верхня межа викидів ТЧ відноситься до регулювання КВВ, що дорівнює 18 град п. к. в. до ВМТ, нижня межа - до регулювання КВВ, що дорівнює 30 град п. к. в., а в поле розкиду даних потрапляють викиди ТЧ, що відносяться до регулювання КВВ, що дорівнює 28, 26, 24, 20 град п. к. в. до ВМТ (рис. 3.5).

Таким чином, між величинами питомих викидів ТЧ і регулюваннями КВВ існує чітка залежність, і це дає змогу глибше вивчати питання щодо взаємозв'язку регулювань КВВ і рівнів шкідливих викидів із відпрацьованими газами.

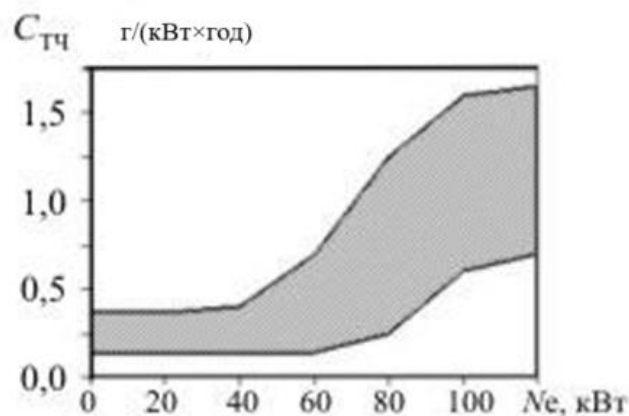


Рис. 3.5. Поле викидів ТЧ дизелем за навантажувальними характеристиками за 1700 хв^{-1}

Під час випробувань за зовнішньою швидкісною характеристикою дизеля 6Ч 13/14 картина викидів ТЧ має такий вигляд (рис. 4.6). Тут також верхня межа викидів ТЧ належить до регулювання КВВ – 18 град п. к. в., а нижня – до регулювання КВВ – 30 град п. к. в. до ВМТ, а в поле даних потрапляють викиди ТЧ, що належать до регулювання КВВ – 28, 26, 24, 22, 20 град п. к. в. до ВМТ

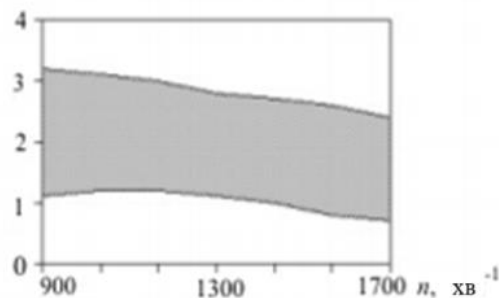


Рис. 3.6. Поле викидів ТЧ дизелем за зовнішньою і частотними характеристиками дизеля

Необхідно зазначити, що дизель 6Ч13/14 обладнано муфтою випередження початку подачі палива, яка встановлює залежно від частоти обертання колінчастого вала кут випередження початку подачі палива, виходячи з первинного його регулювання.

Нині муфти випередження початку подачі палива встановлено на більшості вітчизняних і зарубіжних автомобільних і транспортних дизелях.

Можливості зниження токсичності відпрацьованих газів дизеля шляхом регулювань кута випередження початку подачі палива (за паливним насосом високого тиску) відзначені низкою дослідників. Автором цієї роботи у складі колективу дослідників було вивчено ці можливості для різних модифікацій дизелів розмірності 15/18 за результатами стендових випробувань. Для отримання порівняльних даних відібрано результати випробувань за 13-режимним циклом.

Випробування проведено на паливі за ДСТУ Л-0,2-40, використовувалося масло МТ-16П. Умови випробувань були такими: температура навколишнього

середовища в боксі $T_0 = 294-296$ К, атмосферний тиск $B_0 = 747-749$ мм рт. ст., вологість повітря $W_0 = 72 - 78$ %. Годинна витрата відпрацьованих газів становила $V_{OI}=1150$ м³/год.

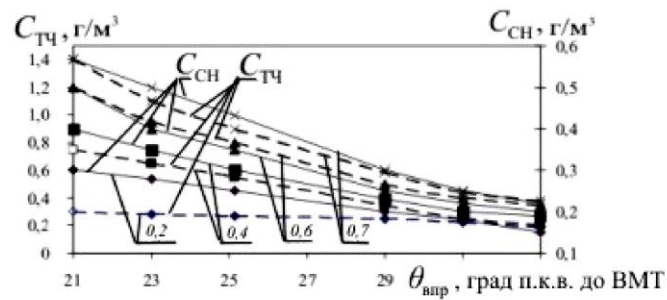
Під час випробувань на сталих режимах проводили відбір відпрацьованих газів дизеля на аналіз їхнього складу та визначення дисперсності твердих частинок за різних регулювань кута випередження початку подачі палива з ПНВТ.

У результаті випробування виявлено, що при зміні регулювань кута випередження початку подачі палива з 2 до 33 град п.к.в. до ВМТ відбувається збільшення викидів оксидів азоту майже в 5 разів. Водночас викиди всіх продуктів неповного згоряння знижуються, зокрема, СО майже в 2 рази, C_xH_y більш ніж у 2 рази, твердих частинок – у 3,5 рази.

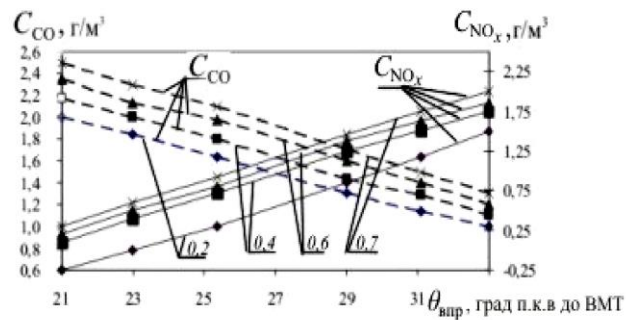
Спостерігається характер зміни викидів NO_x (рис. 4.7). Це можна пояснити тим, що при збільшенні кута випередження початку подачі палива, поблизу ВМТ, коли ймовірність зіткнення молекул кисню й азоту велика, збільшуються і середньомасові температури в циліндрі, що сприяє утворенню NO_x .

Зміна викидів при збільшенні кута θ пояснюється тим, що при ранніх кутах збільшується частка випаруваного до ВМТ палива, і згоряння відбувається більш повно.

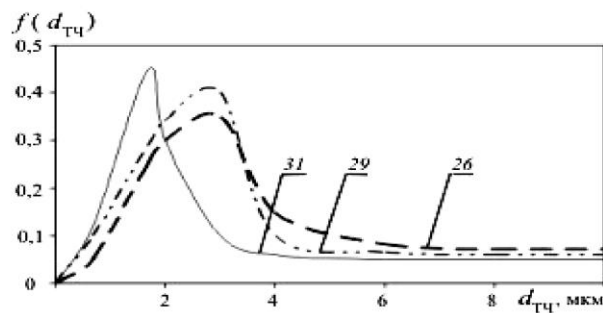
Викиди C_xH_y знижуються з тієї ж причини. Час, що відводиться на робочий процес, дещо збільшується і C_xH_y встигає більш повно окислюватися до відкриття випускних клапанів.



а)



б)



в)

Рис. 3.7. Вплив кута випередження початку подачі палива на токсичність відпрацьованих газів дизеля Д6Н-250 (6ЧН 15/18) залежно від навантаження за 1900 хв^{-1} .

Викиди твердих частинок із відпрацьованими газами за навантажень від 0,2 до 0,7 МПа знижуються при збільшенні Θ з 21 до 33 град п.к.в., до ВМТ, причому за умови зниження навантаження, за постійної частоти обертання інтенсивність скорочення викидів ТЧ знижується.

Викиди C_xH_y знижуються з тієї ж причини. Час, що відводиться на робочий процес, дещо збільшується і C_xH_y встигає більш повно окислюватися до відкриття випускних клапанів.

Викиди твердих частинок із відпрацьованими газами за навантажень від 0,2 до 0,7 МПа знижуються при збільшенні Θ з 21 до 33 град п.к.в., до ВМТ,

причому за умови зниження навантаження, за постійної частоти обертання інтенсивність скорочення викидів ТЧ знижується.

Аналіз даних показав, що при зміні кута випередження початку подачі палива з 33 до 25 град п.к.в. до ВМТ питомий оцінний показник $q_{oцN_{ox}}$ знижується на 24,5 %. При цьому $q_{oцCO}$ збільшується до 11,9 г/(кВт-год), або на 41 %. Питомий оцінний показник викидів $q_{oцTЧ}$ збільшується з 0,31 до 0,39 г/(кВт-год), або на 26 %. Результати оцінки засвідчили, що техногенне навантаження становить $K_{TH}=75,6$ ут/г при серійному регулюванні ПНВТ і $K_{TH}=68,59$ ут/г при $\Theta=29$ град п.к.в. до ВМТ, що свідчить про зниження техногенного навантаження на 9,3 %. Для оцінки можливості використання фільтрів твердих частинок у системі випуску вивчено дисперсність ТЧ при зміні кута випередження початку подачі палива.

Результати опрацювання фільтрів, отримані за допомогою димоміра BOSCH, представлено на графіках (рис. 3.8). При зменшенні Θ середній $d_{TЧ}$ збільшується, і розміри частинок досягають близько 2 мкм.

За результатами випробувань можна зробити такі висновки: - регулюваннями кута випередження початку подачі палива, в межах збереження паливної економічності, можна домогтися зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище на 9 – 10 %; - регулюванням Θ можна домогтися виконання норм ЄВРО-3 і Stage 2 тільки щодо викидів вуглеводнів.

3.5. Результати випробувань дослідних каталітичних нейтралізаторів із СВС-блоками з природним шунгітом

Основою функціонування ЗНОВГ є каталітичний блок, у зв'язку з чим розробка каталітичного блоку, його покриття і властивості мають першорядне значення під час розроблення конструкцій каталітичних нейтралізаторів.

Елементи конструкції та нейтралізатор у зборі наведено на рис. 3.8.

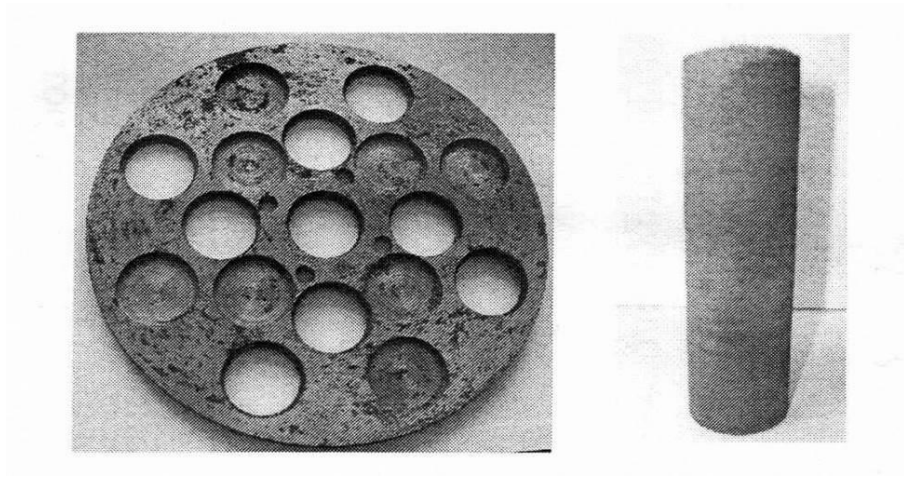


Рис. 3.8. Елементи конструкції нейтралізатора: а) диск касети; б) каталітичний блок.

Фото нейтралізатора в зборі наведено на рис. 3.9.

З метою вдосконалення конструкцій каталітичних нейтралізаторів і поліпшення якості очищення відпрацьованих газів дизелів, було проведено стендові випробування дослідних зразків нейтралізаторів. Конструкції дослідних каталітичних нейтралізаторів включали різні комбінації пористих каталітичних СВС-блоків. Були випробувані нейтралізатори з двома і трьома ступенями очищення. Перший ступінь – фільтр сажі з пористого проникного СВС-матеріалу, другий ступінь – окислювальний СВС-блок, третій ступінь – каталітичний відновлювальний СВС-блок.

Для отримання каталітичних блоків методом СВС було використано склад шихти, наведений у розділі 2. Отримані блоки мали проникну структуру і високу міцність. Стенди обладнали згідно з ДСТУ, випробування нейтралізаторів із дизелями, вони відповідали стандартам і пройшли випробування за навантажувальними та зовнішньою швидкісною характеристикою з кожним блоком окремо. Замість відсутніх блоків встановлювали сталеві перфоровані втулки.



Рис. 3.9. Каталітичний нейтралізатор у зборі.

З метою вдосконалення конструкцій каталітичних нейтралізаторів і поліпшення якості очищення відпрацьованих газів дизелів, було проведено стендові випробування дослідних зразків нейтралізаторів. Конструкції дослідних каталітичних нейтралізаторів включали різні комбінації пористих каталітичних СВС-блоків. Були випробувані нейтралізатори з двома і трьома ступенями очищення. Перший ступінь – фільтр сажі з пористого проникного СВС-матеріалу, другий ступінь – окислювальний СВС-блок, третій ступінь – каталітичний відновлювальний СВС-блок.

Для отримання каталітичних блоків методом СВС було використано склад шихти, наведений у розділі 2. Отримані блоки мали проникну структуру і високу

міцність. Стенди обладнали згідно з ДСТУ, випробування нейтралізаторів із дизелями, вони відповідали стандартам і пройшли випробування за навантажувальними та зовнішньою швидкісною характеристикою з кожним блоком окремо. Замість відсутніх блоків встановлювали сталеві перфоровані втулки.

Результати випробувань дослідного зразка нейтралізатора з СВС-блоками конструкції подано на графіках рис. 3.10.

Зазначено, що викиди NO_x за навантажувальною характеристикою дизеля за 2600 хв^{-1} знижуються за середніх ефективних тисків P_e , що дорівнюють 0,03; 0,55; 0,77 МПа, з 3,83...11,63...9,48 г/м³ відповідно до 3,24...6,53...4,62 г/м³ або приблизно на 14...45...54 %.

Таким чином, застосування каталітичних нейтралізаторів відпрацьованих газів з пористими проникними каталітичними блоками, отриманими методом СВС-технології з природним шунгітом, можна вважати доволі ефективним, а сумарний коефіцієнт очищення становив $\eta_{\text{кн}} = 0,58$.

При зміні кута випередження початку подачі палива з 33 до 25 град п.к.в. до ВМТ і застосуванні КН було встановлено поліпшення якості очищення до $\eta_{\text{кн}} = 0,698$. Однак через 360 год. якість очищення газів від ТЧ зменшилася з 55 до 45 %, від СО – з 58 до 46 %, від NO_x – з 65 до 44 %, що свідчить про початок дезактивації каталізаторів.

На рис. 3.11 показано ефективність зменшення шкідливих викидів дизеля за зовнішньою швидкісною характеристикою в разі використання багатоступеневого нейтралізатора та додатковими малотоксичними регулюваннями. Ефективність очищення досягла $\eta_{\text{кн}} = 0,661$.

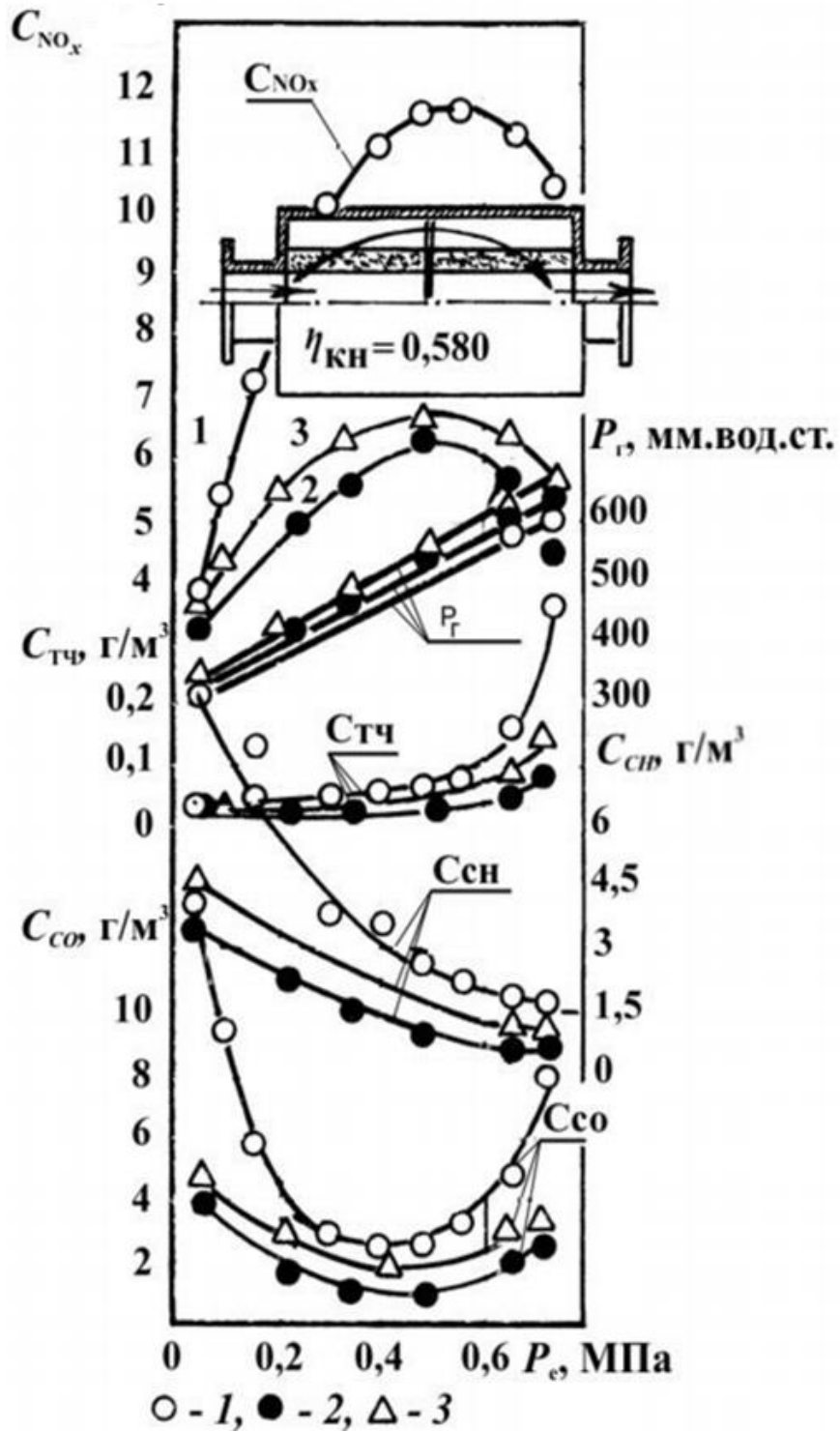


Рис. 3.10. Результати випробувань нейтралізатора БКН-1 з СВС-блоками для дизеля за навантажувальною характеристикою за 2600 хв⁻¹: 1 – без КН; 2 – один ступінь; 3 – два ступені.

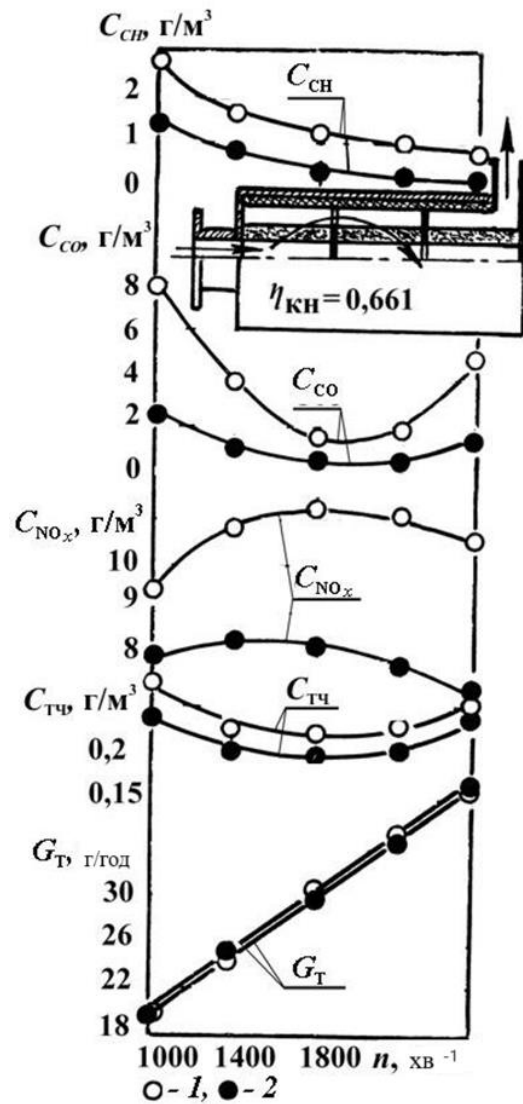


Рис. 3.11. Ефективність очищення газів дизеля КамАЗ-740 за зовнішньою швидкісною характеристикою: 1 – без КН; 2 – з КН БКН-1 і регулюванням.

Висновки по розділу

Ефективність очищення відпрацьованих газів у багатоступеневих нейтралізаторах підтверджено результатами стендових випробувань із дизелем за 13-режимним випробувальним циклом.

Особливо це стосується виконання вимог щодо викидів ТЧ. Одним зі шляхів розв'язання проблеми є застосування комбінованих систем очищення відпрацьованих газів дизелів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень щодо вирішення проблеми створення забезпечення екологічної безпеки під час механізації виробничих процесів з використанням мобільних машин зроблено такі висновки:

Вивчення складу повітряного середовища показало, що індекс безпеки, який характеризує екологічну обстановку в кабіні трактора, становив: на технологічній операції з приготування та роздачі кормів у тваринницькому приміщенні трактором МТЗ-82 з дизелем Д-245 та ИСРК-12 $K_{\text{еб}} = 9,98$, під час проведення оранки парів трактором плугом ПЛН-3,5 на 6 передачі, $K_{\text{еб}} = 11,23$, при навантаженні зерна з використанням трактора МТЗ-1523 з дизелем Д-260 і навантажувача ТУР-17 $K_{\text{еб}} = 10,39$. Результати дослідження стану повітряного середовища у тваринницькому приміщенні засвідчили, що індекс екологічної безпеки під час проведення технологічної операції з приготування, транспортування та роздавання кормів трактором МТЗ-82 з дизелем Д-245 та ИСРК-12 становив $K_{\text{еб}} = 10,10$. Що свідчить про необхідність розроблення інженерних методів і засобів щодо поліпшення стану повітряного середовища.

Розроблено склад шихти з додаванням природного шунгіту для виготовлення каталітичних блоків нейтралізаторів.

Зразки каталітичних блоків, виготовлені із запропонованим складом шихти, дали змогу забезпечити якісне каталітичне очищення відпрацьованих газів двигунів мобільних машин і знизити вміст СО на 80-83%, NO_x на 54-62%, C_xH_y на 58-61%, ТЧ на 89-92%, підвищити стійкість до динамічних та статичних навантажень, знизити собівартість і матеріаломісткість каталітичних нейтралізаторів.

Встановлено, що регулюваннями кута випередження початку подачі палива, у межах збереження паливної економічності, можна домогтися зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище на 9 – 10 %.

Виявлено, що застосування комплексних методів - застосування каталітичного очищення ОГ і застосування регулювань кута випередження початку подачі палива, дає змогу підвищити безпеку праці працівників АПК і поліпшити екологічну обстановку. Ефективність очищення за використання багатоступеневого нейтралізатора та додатковими малотоксичними регулюваннями становила $\eta_{ки} = 0,698$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rogovskii I. L., Titova L. L., Trokhaniak V. I., Borak K. V., Lavrinenko O. T., Bannyi O. O. (2021). Research on a grain cultiseeder for subsoil-broadcast sowing. *Agricultural Engineering*, Vol. 63(1), pp. 385–396. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-63-39>.
2. Куликівський В. Л., Руднік Д. І. Наявні технології забезпечення екологічної безпеки під час використання мобільної техніки з дизельними двигунами. Сучасні вектори розвитку аграрної науки: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (ХДАЕУ, 17-18 вересня 2024 року). Херсон: ХДАЕУ, 2024. С. 372-375.
3. Куликівський В. Л., Руднік Д. І. Основні напрями забезпечення екологічної безпеки в системі «людина-машина-середовище». Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 34-36.
4. Руднік Д. І. Розроблення та обґрунтування критеріїв оцінки та вибору матеріалів для каталітичної конверсії відпрацьованих газів дизелів Студентські читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 27-28.
5. Rogovskii I. L., Borak K. V., Maksimovich E. Yu., Smelik V. A., Voinash S. A., Maksimovich K. Yu., Sokolova V. A. Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes T-series. *Journal of Physics*. 2020. Vol. 1679. 042084.
6. Бондаренко С. О. Екологічна безпека в агропромисловому комплексі: навчальний посібник. Київ: Видавничий дім «Освіта», 2020. 352 с.

7. Гринько О. В., Коваленко Т. С. Методи зменшення негативного впливу сільськогосподарської техніки на довкілля. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика в агропромисловому комплексі. 2019. № 2. С. 45–50.
8. Жуковський, М. В. Основи механізації та автоматизації виробничих процесів у АПК. Харків: НТУ «ХП», 2018. 304 с.
9. Коваленко Т. С., Литвиненко А. М. Енергоефективність та екологічна безпека в сільському господарстві. Енергетика і автоматика. 2021. Т. 53, № 1. С. 68–75. DOI: 10.31520/energetics2021.53.1.5.
10. Мельничук Д. О. Технологічне забезпечення екологічної безпеки в сільському господарстві: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2021. 412 с.
11. Методичні рекомендації з оцінки впливу на довкілля в аграрному секторі. Під ред. В. І. Литовченко. Київ: Агропромвидав, 2017. 68 с.
12. Петров І. В. Вплив сучасних сільськогосподарських машин на навколишнє середовище. Харків: Основа, 2020. 294 с.
13. Шумейко, С. П. Екологічні аспекти механізації виробничих процесів у рослинництві. Аграрна техніка. 2021. № 3. С. 33–38.