



УДК 621.43.001.42

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-8

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИМНОСТІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО  
ЗГОРЯННЯ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА ДИЗЕЛЬНОМУ ПАЛИВІ З ЕЛЕМЕНТАМИ БІОПАЛИВА**

**Паладійчук Юрій Богданович**, к.н.т., доцент  
**Телятник Інна Анатоліївна**, асистент  
**Буздиган Максим Віталійович**, студент  
Вінницький національний аграрний університет

**Yuriy Paladiychuk**, Ph.D., Associate Professor  
**Inna Telyatnuk**, Assistant  
**Maksym Buzdyhan**, Student  
Vinnytsia National Agrarian University

Наймасовішим транспортним засобом у світі являється автомобіль, щорічно їх кількість безупинно збільшується. На заміну застарілим автомобілям приходять удосконалені моделі при цьому розробляються і впроваджуються нові конструкції та системи автомобіля. До напрямків вдосконалення конструкції автомобіля, крім підвищення безпеки, паливної економічності та комфортності, відносять підвищення екологічної безпеки, так як автомобіль є джерелом забруднення навколишнього середовища.

Двигуни внутрішнього згорання є основним джерелом техногенних забруднень атмосфери. Робота двигуна внутрішнього згорання супроводжується утворенням викидів сірчистого газу й оксидів азоту, що є причиною утворення кислотних опадів. Неминучим є утворення смогу та парникового ефекту через викиди вуглеводнів, а тверді частинки пилу й сажі спричиняють зміну погоди (похолодання, тумани й дощі). Усі ці чинники разом із викидами промислових підприємств призводять до глобальної зміни клімату Землі. Паливне випаровування, картерні й відпрацьовані гази відносяться до основних явищ шкідливого впливу двигуна внутрішнього згорання на довкілля та становлять до 78%.

Дана стаття містить дослідження з визначення димності відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згорання, які працюють на дизельному паливі з елементами біопалива. Розглянуто групи хімічних елементів, які входять у склад відпрацьованих газів. Проаналізовано існуючі напрямки зменшення токсичності відпрацьованих газів. Прослідковано вплив різного виду палива на токсичність відпрацьованих газів та сажоутворення. Відображено кількісний склад дизельного палива з біопаливом. Охарактеризовано принцип роботи сажового фільтра під час фільтрації та регенерації. Описано види регенерації та принцип їх дії. Досліджено димність сажових фільтрів при різному пробігу та відсотковому відношенню дизельного палива з біопаливом. Описано принцип використання димоміра «Інфракар Д». Проведено експериментальне дослідження очищення сажового фільтра ультразвуком. З врахуванням отриманої інформації, зроблені висновки.

**Ключові слова:** двигун внутрішнього згорання, відпрацьовані гази, біопаливо, дизельне паливо, сажа, фільтр, регенерація.

**Ф. 4. Рис. 9. Табл. 11. Літ. 15**

---

### **1. Постановка проблеми**

---

Парк автомобільного транспорту на сьогодні, перевищує 400 млн. автомобілів, вони є великим споживачем паливно-енергетичних ресурсів. Частка світової енергії яку споживає дорожній транспорт становить близько 80%. Загальна потужність двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) перевищує в даний час потужність всіх електростанцій у 8 разів [1, 2].

Споживання пального автомобільним парком у світі щорічно складає близько 2,1 млрд. т. Перетворення автомобільними двигунами хімічної енергії палива в механічну роботу від згорання такої кількості палива супроводжується виділенням у навколишнє середовище:

- ✓ 700 млн. т оксиду вуглецю;
- ✓ 190 млн. т вуглеводнів;
- ✓ 56 млн. т оксидів від азоту;
- ✓ 600 т свинцю.



Викиди картерних газів і випаровування з системи живлення, що містять токсичні вуглеводневі з'єднання, становлять 140 млн. т.

Постає значна загроза екологічній рівновазі на світовому рівні. Помітно, що найближче десятиліття ДВЗ залишаться основними типами силових установок автомобілів. Це призводить до зниження ресурсів та забруднення навколишнього середовища, а від так стоїть завдання з пошуку альтернативних рішень з точки зору економії та екології. Прогрес не стоїть на місці вирішення даної проблеми знаходить своє відображення в наступному:

По-перше це підвищення економічного та технічного рівня ДВЗ. По-друге удосконалення конструктивних особливостей, застосування нейтралізаторів та сажових фільтрів. По-третє перехід на нові, більш ефективні види палива в рамках потенційних енергетичних та сировинних ресурсів, технологічної готовності і виробничих можливостей [1-3].

Основним джерелом забруднення довкілля автомобілями є викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами (ВГ) двигунів.

ВГ це – складна суміш газів, що підпорядковується багатьом чинникам, зокрема залежить від конструктивних особливостей та режиму роботи автомобіля та його двигуна.

Хімічні сполуки які містяться у ВГ поділяють на групу:

1. нетоксичні речовини – (азот, кисень, водень, вода та діоксид вуглецю);
2. токсичні компоненти – (оксид вуглецю, оксиди азоту);
3. вуглеводні – (парафіни, олефіни, ароматики та інші речовини);
4. альдегіди – (неорганічні речовини – сірчистий ангідрид та сірководень);
5. канцерогенні поліциклічні вуглеводні – (активний бенз(а)пірен).

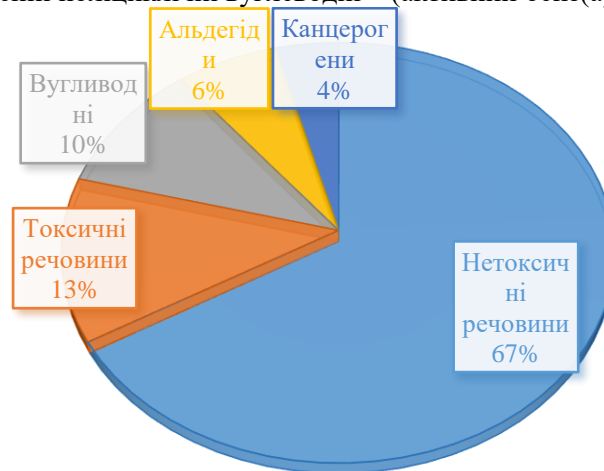


Рис. 1. Групи хімічних елементів ВГ [2]

Подальша робота щодо вдосконалення природоохоронної системи на планеті, відтворюється в законодавствах більшості розвинутих країн Положення про захист довкілля викладені й в Основному Законі нашої держави – Конституції України. Розвиненні країни мають велику кількість нормативно-технічних документів (НТД), національних і міжнародних стандартів, які регламентують потенційну кількість шкідливих викидів автомобілів та їх двигунів. Автомобільні виробники керуючись вимогами НТД щодо зниження вмісту шкідливих речовин у ВГ, зосереджують свою увагу на методах комплексного вирішенні проблеми екологічної безпеки автомобільного транспорту [3, 4].

Розгляд небезпечних речовин що знаходяться у ВГ, а також методів їх знешкодження, допускає можливість вибору більш вагомому напрямку для вирішення проблеми забруднення навколишнього середовища.

## 2. Мета і задачі дослідження

Метою даного дослідження є визначення димності ДВЗ, які працюють на дизельному паливі з елементами біопалива.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі завдання:

- дослідження нагароутворення на сажових фільтрах при використанні різного виду палива;
- визначити показник впливу ультразвукової очистки на сажовий фільтр випускної системи двигуна;
- з врахуванням отриманої інформації, зробити висновки.

**3. Аналіз останніх досліджень**

Аналіз останніх досліджень виявив основні напрямки зі зниження токсичності ВГ автомобілів (таблиця 1).

Таблиця 1

**Напрямки зниження токсичності ВГ [4]**

№	Напрямок	Характеристика
1	Застосування новітніх типів силового устаткування.	Даний напрямок характеризується розробкою газотурбінних автомобільних двигунів, адіабатних дизелів, двигунів Стирлінга, електричних силових агрегатів, що приводяться в дію акумуляторами, паливними та іншими джерелами електроенергії і використання двигунів з низькою токсичністю.
2	Удосконалення конструкції, робочих процесів, заміна технології виробництва автомобілів.	Забезпечення низької токсичності ВГ, досягається шляхом підвищення стійкості займання і швидкості згоряння збіднених паливно-повітряних сумішей. Застосування вдосконалених камер згоряння і впускних трактів, дозволяє забезпечити турбулізацію паливно-повітряної суміші в процесі згоряння. Застосування мікропроцесорної техніки підвищує економічність керування складом паливно-повітряної суміші і кутом випередження запалювання.
3	Використання додаткового обладнання для очищення або нейтралізації ВГ.	Бензинові двигуни оснащують каталітичними нейтралізаторами потрібної дії, вони спричиняють окислення вуглецю та вуглеводнів і відновлюють оксиди азоту. Дизельні двигуни укомплектовують сажовими фільтрами, які очищають ВГ від сажі.
4	Використання альтернативного палива або зміна характеристик традиційного пального.	Застосування альтернативного палива (водень, спирти, біопаливо, стиснений природний газ, зріджений нафтовий газ) забезпечує зниження токсичності ВГ.
5	Законодавче обмеження	Проведення податкової політики, яка стимулює зниженню викиду шкідливих речовин.
6	Розробка нормативів, процедур контролю, а також технологій	Забезпечення технічного стану автомобілів на рівні, який гарантує викид шкідливих речовин, не вищий за нормативний.
7	Вдосконалення процесів керування автомобілем	Поліпшення дорожніх умов, а також вдосконалення і організація перевезення вантажів.

Україна має досить обмежені ресурси нафти, яка є сировиною для виготовлення автомобільного палива, її висока вартість та значний вплив на довкілля при згорянні в ДВЗ, спонукає до використання альтернативного пального [4].

Біопаливо сьогодні є одним із альтернативних видів палива для автомобільного транспорту. Енергетичну незалежність України можна вирішити шляхом власного виробництва біопалива із своєї сировини, при цьому зменшити потребу у імпортному паливі. Споживання біопалива надає змогу знизити вміст токсичних компонентів у ВГ.

Біопаливо виготовляють з рослинних олій та тваринних жирів, у тому числі нехарчового призначення. Паливо рослинного походження, являється поновлювальним природним ресурсом, під час його використання знижуються витрати палива нафтового походження та зберігається баланс вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>). Вміст кисню у складі біопалива дозволяє збільшити повноту його згоряння у циліндрах дизелів та істотно знизити викиди токсичних продуктів неповного згоряння. Використання біопалива не потребує кардинальних змін у конструкції двигуна, крім того може змішуватися зі стандартним дизельним паливом у будь якій пропорції від 0 до 100 %. [5, 6].

Біопаливо являється екологічним видом пального, крім того його можуть застосовувати, як паливну добавку до нафтового дизельного палива. За хімічним складом це пальне являє собою суміш метилових та/або етилових моноалкілових ефірів довголанцюжкових жирних кислот (насичених і ненасичених) [5, 6].

Особливістю біопалива є його густина, що дорівнює 0,86 г/см<sup>3</sup>, відносно малий вміст сірки у випускній системі – 0,001% проти 0,05% в мінеральному дизельному паливі.

В'язкість біопалива та звичайного дизельного пального однакова.



Використання біопалива можливе як самостійного виду палива так і в суміші із звичайним дизельним паливом.

Для маркування палива, що містить біопаливо використовується літера «В»: В100 – 100% біопалива; В20 – 20% біопалива і 80% звичайного (нафтового) дизельного пального.

З 1 липня 2018 року встановлено обов'язковий вмісту біопалива в дизельному паливі, одержаному з нафтової сировини, що реалізуються на митній території України: не менш як 3% від загального об'єму.

Основна сировина для виробництва біопалива це рапсова, соняшникова, пальмова та інші рослинні масла, а також свинячий жир. Неперероблені оливи не бажано застосовувати в якості сировини, оскільки вони мають підвищену в'язкість, порівняно низьку теплову потужність, що зменшує потужність двигуна в середньому на 15%. Характеризуються поганими пусковими властивостями за низької температури, наявність вільних кислот впливає на конструкційні особливості і ущільнювальні матеріали, під час зберігання може виникати окислення. Продукти алкілування характеризуються кращими низькотемпературними властивостями і зниженою в'язкістю. Цетанове число при цьому підвищується з 30 – 40 до 50 – 80 одиниць [4-6].

Найбільш розповсюдженим типом даного палива є ріпакметиловий ефір (РМЕ), який в великій кількості використовується в Швеції, Німеччині, Франції та інших країнах. Ефір використовують в концентрації 30% в поєднанні з дизельним паливом без додаткового регулювання двигуна.

До сировини для виготовлення біопалива ставлять жорсткі вимоги: вміст вільних кислот не повинен перевищувати 0,5%; кислотне число – не більше 1 мг КОН/г, за відсутності води. Не виконання цих умов призводить до розчинення милоутворення, яке збільшує витрати луку і перешкоджає відділенню гліцерину від реакційної маси [5,6].

Метанол або етанол (в якості рослинної сировини) в даному процесі застосовують в якості агента переестерифікації. Важливими умовами є: тиск вище 300 атм, температура – 350°C. Надкритичний стан метанолу дозволяє не висувати жорстких вимог до сировини, адже сам процес протікає протягом декількох хвилин і може бути здійснений в безперервному вигляді. Складність технологічного процесу, робить цей метод мало поширеним, але перспективним.

Світове виробництво біопалива за останні роки сягнуло близько 1,7 млн. т, в тому числі, в Євросоюзі – 1,5; в Східній Європі – 0,1; в США – 0,07.

Виробництво біопалива на території України теж має свій інтерес, перш за все, з ініціативи сільськогосподарських виробників. Основними джерела постачання сировини розглядаються ріпак, соя, а в деяких регіонах – соняшник. Основна складність полягає в низькій врожайності, різних термінах збору і переробки насіння, але разом з тим при внутрішньогосподарському виробництві і застосуванні біопалива економічний ефект може виявитися досить великим [5].

Двигун який працює на біопаливі має значно менші показники шкідливих викидів продуктів згоряння: сірки – на 98%, сажі – від 50 до 61%, гідрокарбонатів та вуглекислих монооксидів – на 30-34%.

Склад дизельного палива, біодизельного палива і їх сумішей наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

**Відсотковий вміст елементів у дизельному паливі, дизельному біопаливі та їх сумішах [6]**

Тип палива	С,%	Н,%	О,%
Дизельне паливо (літнє)	87	12,6	0,4
Дизельне паливо + 25% біопалива	84,675	12,525	2,8
Дизельне паливо + 75% біопалива	80,025	12,375	7,6
Дизельне біопаливо	77,3	12,3	10

Недоліки біопалива:

- потужним розчинником, який викликає не лише розбухання гумових деталей, а й розчиняти забруднення в паливній системі є залишковий метанол, якого згідно зі стандартом в паливі повинно бути не більше 0,2%.

- з моменту переходу на біопаливо рекомендується заміна паливних фільтрів, адже при використанні звичайного дизельного палива у двигуні та паливних трубках утворюється наліт, а при переході на використання біопалива цей наліт руйнується, засмічує паливні фільтри.

- зберігати біодизель понад три місяців не рекомендується, оскільки він розкладається.

• відносно низька теплота згоряння в порівнянні з дизельним паливом, даний недолік вирішують збільшенням максимальної циклової подачі палива та змінюється залежно від вмісту біопалива у суміші з дизельним паливом [5-6].

Альтернативні види палива з підвищеним вмістом водню (природний газ, спиртові палива), а також біопаливо (на основі рослинної сировини) є в даний час і на найближчий період ефективними заміниками нафтового палива, що забезпечують не тільки зниження споживання нафтового палива, але й одночасне підвищення екологічної безпеки енергоустановок [4-6].

Одним із найнебезпечніших канцерогенів, які містяться у ВГ дизельних двигунів є сажа. При неповному згорянні палива у дизельних двигунах відбувається утворення сажі. Розмір частинок сажі дуже малий (від 10 нм до 1 мкм), у складі кожна частинка містить вуглецеве ядро, з яким пов'язані вуглеводні, оксиди металів, сірка і вода. Від режиму роботи двигуна та складу палива залежить певний склад сажі [7, 10].

Для боротьби із частинками сажі у випускній системі дизельного двигуна вбудовують спеціальний пристрій (фільтр сажі) який очищає ВГ від сажевих частинок, що виходять в навколишнє середовище. Фільтр дозволяє досягти зменшення кількості сажі у ВГ майже на 99,9%. Найпершим завданням фільтруючого елемента є вловлювання сажі під час роботи випускної системи двигуна.

Фільтр сажі не слід плутати з каталізатором, так як головною задачею фільтра є боротьба тільки з сажею, яка є в дизельному паливі, а каталізатор безпосередньо бореться із шкідливими речовинами. У ВГ дизельного двигуна також присутні: чадний газ, оксиди азоту та незгорілі вуглеводні, тому каталізатор також необхідний [9].

Сажовий фільтр в системі випуску може являти собою окремий блок, що встановлюється після каталізатора, а може бути суміщений з ним в один – так, наприклад як в Volkswagen (рис.2.).

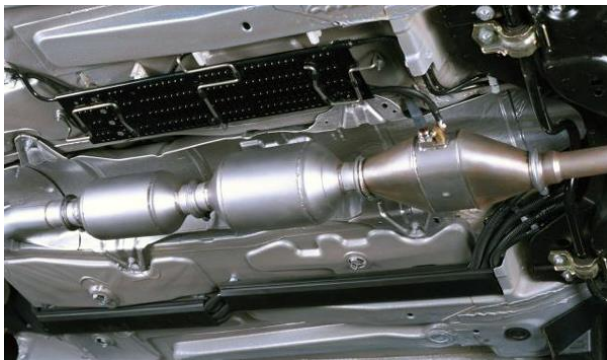


Рис. 2. Фільтр сажі на автомобілі Volkswagen [9]

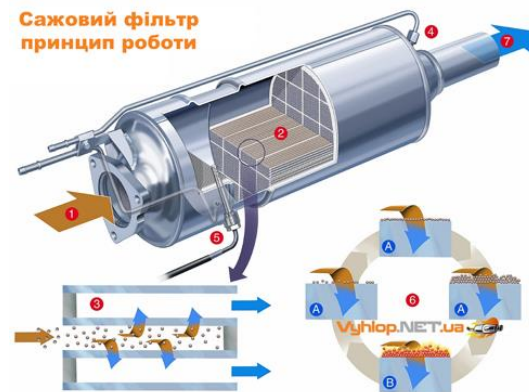


Рис. 3. Схематичний принцип роботи сажового фільтра [9]:

1 – ВГ; 2 – фільтрувальний елемент у розрізі; 3 – фільтрування ВГ; 4 – датчик тиску; 5 – датчик температури; 6 – цикл фільтрації; 6 А – фаза фільтрації; 6 В – фаза регенерації

#### Принцип роботи сажового фільтра:

Керамічна матриця яка складається з трубок спеціальної конструкції, розташована всередині вузла, під час проходження через них дрібні частинки сажі затримуються тим самим газу очищаються від домішок. Одного етапу фільтрації в даному плані замало, адже блок має здатність до забивання, це б створювало значну перешкоду для газів, а від так двигун втрачав би свою потужність. Тому передбачена, ще одна операція – регенерація.

Робота фільтра сажі складається з двох послідовних етапів: фільтрація і регенерація сажі. У процесі фільтрації відбувається захоплення частинок сажі та осідання на стінках фільтра. Велику складність для затримання являють собою частинки сажі малого розміру (від 0,1 до 1 мкм), їх кількість становить лише 5%, але це найнебезпечніші для людини викиди. Сучасні конструкції фільтра сажі дозволяють вловлювати і такі частинки.

У сажових фільтрах передбачено цикл регенерації, адже при експлуатації крипти фільтра швидко забиваються сажею, заміна його кожні 600 – 2000 км пробігу недоцільна.



У сучасних фільтрах розрізняють такі види регенерації (табл. 3):

- пасивна;
- активна;
- автоматична.

Таблиця 3

**Види регенерації сажі [9,10]**

Вид регенерації	Характеристика процесу
Пасивна регенерація	При конструктивному об'єднанні сажового фільтра з нейтралізатором, можливий метод пасивної регенерації. Головною умовою для процесу є висока температура (приблизно 300-500 градусів), при якій частинки сажі беруть участь в хімічних реакціях каталізатора та в результаті перетворюються у вуглекислий газ. Даний метод буде дієвий лише при частому користуванні автомобілем, якщо ж експлуатація відбувається досить рідко, то тоді двигун не буде встигати розігріватися до потрібних температур, і сажа не зможе догоріти у фільтрі. Для подібних ситуацій існує активна регенерація.
Активна регенерація	У процесі знешкодження сажі бере участь електроніка, яка за допомогою датчиків слідкує за наповненням фільтра. При недостатній температурі для очищення, у двигун примусово впорскується більше палива, знижується кількість повітря в циліндрах, в результаті відбувається підвищення температури у випускній системі.
Автоматична регенерація	У конструкціях випускних систем з розділним каталізатором і фільтром сажі можна часто зустріти застосування автоматичної регенерації. Спеціальна присадка для палива, що містить церій, яка зберігається в окремій ємності та впорскується автоматично по команді електроніки, і є основою автоматичної регенерації. В результаті температура фільтра на деякий час може підвищуватися до 700 С°, завдяки чому сажа догорає і вузол очищається.

Процес регенерації відбувається за допомогою електронного блоку управління, який слідкує за показниками диференціального тиску та температури на вході та виході вузла випускної системи. Процес регенерації запускається, коли різниця показників досягає певного рівня, система «розуміє», що фільтр забитий.

Умови для регенерації:

1. температура двигуна – 800° С;
2. швидкість автомобіля – 80 км/год;
3. час – від 2 до 15 хвилин;

При не виконанні даних умов, процес так званої регенерації неможливий.

Регенерація фільтра полягає у випалюванні сажі, що накопичилася, це відбувається за допомогою електричного нагрівального елемента або впорскування певних порцій палива у випускную систему.

Регенерацію можна проводити стаціонарно, на спеціальних стендах у сервісних центрах, але через значні температури вдаватися до неї небезпечно. Слід зазначити, що промивання фільтрів не є альтернативою регенерації. Коли автоматична регенерація не виконує своїх функцій, то фільтр потрібно замінити.

Робота сажового фільтра спрямована на очищення ВГ від канцерогенних частиннок сажі, завдяки своїм ефективним фільтруючим властивостям [9-11].

**4. Виклад основного матеріалу**

Якість дизельного палива, конструкційні особливості, технічний стан і режими роботи двигуна впливають на нагароутворення. Утворення відкладень відбувається через фізико-хімічні властивості палива, такі як фракційний склад, в'язкість, наявність сірчистих сполук, смолистих речовин (фактичних смол), ненасичених вуглеводнів тощо.

Великий вплив на нагароутворення чинить сірка, чим більший вміст сірки в паливі, тим більше нагару і лаку утворюється при його згорянні. Сірка впливає не тільки на кількість утворення нагару, а також і на його властивості, тому що сірчисті сполуки підвищують щільність нагару. Враховуючи все це, вміст сірки в дизельних паливах обмежується [12,13].



Складність боротьби з викидами сажових часток на сьогодні полягає в необхідності поліпшення повноти згоряння палива, пов'язаної зі збільшенням температури в камері згоряння дизельного двигуна, що веде до росту викидів оксидів азоту  $N_{ox}$ . При зменшенні температури для зниження оксидів азоту, відбувається неповне згоряння палива й утворення твердих часток.

Димність ВГ дизельного двигуна – це показник, що характеризує ступінь поглинання світлового потоку, який проsvічує ВГ двигуна [13].

Показниками димності є: натуральний показник ослаблення світлового потоку; коефіцієнт ослаблення світового потоку.

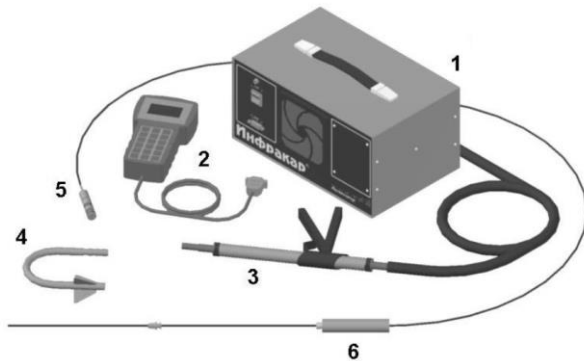
Натуральний показник ослаблення світлового потоку – це величина, обернена товщині шару відпрацьованих газів, проходячи який потік випромінювання від джерела світла димоміра ослаблюється в  $e$  разів [13].

Коефіцієнт ослаблення світлового потоку - це ступінь ослаблення світлового потоку внаслідок поглинання і розсіювання світла відпрацьованими газами під час проходження ними робочої труби димоміра [13].

*Аналіз димності ВГ.* Вимірювання димності ВГ дизельних двигунів, проводилося димоміром «Інфракар Д».

Застосування приладу можливе при наступних робочих умовах [14]:

- ✓ живлення приладу: від бортової мережі автомобіля напругою (12+2,8/-1,2); від мережі змінного струму напругою 220 В (- 15/+10) % та частотою 50 Гц  $\pm 1$  Гц;
- ✓ температура навколишнього повітря від 0 до 35°C;
- ✓ діапазон відносної вологості навколишнього середовища до 80% при 30° С;
- ✓ атмосферний тиск 92...105 кПа;
- ✓ споживана потужність у режимі вимірювання не більше 40 Вт;
- ✓ час прогрівання робочої камери не повинен перевищувати 10 хв.



**Рис. 4. Димомір «Інфракар Д» [14]:**

**1 – оптичний блок; 2 – пульт управління;  
3 – газозабірний зонд з пробовідбірним шлангом; 4 – зонд для вертикально розташованої випускної системи; 5 – датчик частоти обертання колінчастого валу; 6 – датчик температури масла; 7 – блок керування**

За результатами дослідження було визначено:  
середнє значення:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

де  $\sum_{i=1}^n x_i$  – сума  $i$ -того дослідів;  $n$  – кількість дослідів.  
середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

помилка середнього арифметичного:

$$m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

та враховувався показник точності експерименту

$$\varepsilon = \frac{t \cdot m}{\bar{x}} 100\% \quad (4)$$

Тиск ВГ в камері димоміра не має відрізнятися від атмосферного тиску більш ніж на 735 Па (75 мм вод.ст.). Час спрацьовування, не повинен перевищувати 0,4с.

В основі димоміра лежить оптичний блок, пульт управління та пробо-добрний устрій (рис.4.).

Щоб вимірювання димності було правильним слід пам'ятати, що вхідний отвір зонда слід розташовувати у напрямку осі випускної труби, де розподіл газів, що відпрацьовали, є найбільш рівномірним.

Вимірювання димності було проведено на випускній системі з сажовими фільтрами, які мали різний пробіг (3 тис. км, 6 тис. км, 9 тис. км), а також новим фільтром без пробігу. Газозабірний зонд з пробовідбірним шлангом розміщувався у випускній трубі автомобіля.



де  $t$  – критерій Стьюдента (Коефіцієнт Стьюдента  $t_{P,N}$  обраний з таблиці 4 згідно з кількістю вимірювань  $N = 3$  та довірчої ймовірності  $P(0,6)$ ).

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів Стьюдента  $t_{P,N}$

$N \setminus P$	0,9	0,95	0,98	0,99
2	6,3	13	32	64
3	2,9	4,3	7,0	9,9
4	2,4	3,2	4,5	5,8

Таблиця 5

Показники димності випускної системи двигуна на дизельному паливі та з відсотком біопалива

Фільтр в залежності від пробігу	Показники димності (дизельне паливо)	Показники димності дизельне паливо 75% з біопаливом 25%
Новий фільтр	0,48	0,48
3 тис. км.	1,25	1,027
6 тис. км.	1,213	0,986
9 тис. км.	1,974	1,84

На рисунку 5 показано результати контролю димності.

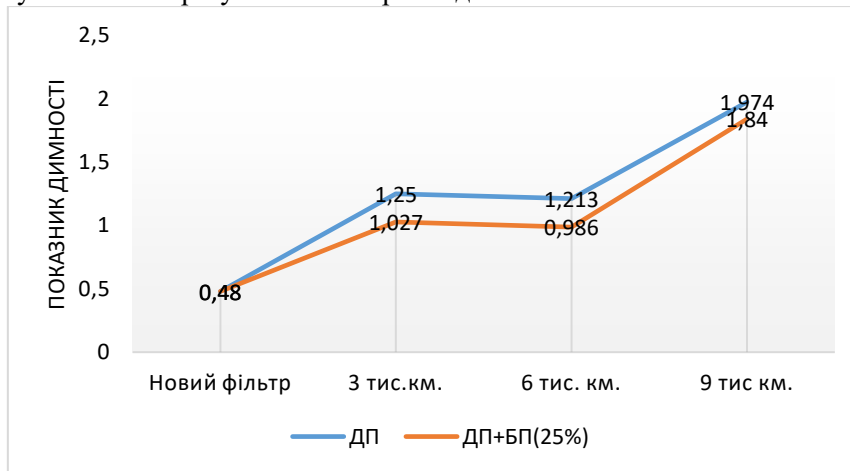


Рис. 5. Результати контролю димності

При проведенні досліджень не виявлено різниці в показниках димності дизеля в залежності від використання фільтра з тим чи іншим пробігом.

#### Ультразвукова очистка фільтра сажі

Для оцінки ефективності очищення сажевого фільтра ультразвуковим методом, були проведені наступні дослідження 3 фільтрів, які працювали на чистому дизельному паливі та з додаванням біопалива (25%), з пробігом 3 тис. км., 6 тис. км., 9 тис. км. було вилучено фільтруючі елементи і поміщені в ємності з безпосереднім розміщенням ультразвукового обладнання "Ретона" (рис. 6.).



Рис. 6. Ультразвукова машинка «Ретона» [15]

Кожний фільтруючий елемент піддавався ультразвуковій обробці протягом 60 хвилин.

Після обробки фільтруючого елемента, що працював на дизельному паливі, ультразвуком отримали такі результати:

1. маса фільтруючого елемента, що піддавався ультразвуковій обробці, зменшилася від частинок сажі в середньому на 4,3 г порівняно з контрольним елементом;

2. коефіцієнт пружності фільтруючого елемента, що зазнав ультразвукової обробки не змінився.





Таблиця 6.

**Показники фільтруючого елемента на дизельному паливі, з пробігом 3 тис. км.**

№	Частота (МГц)	Маса очищення (г)	Зменшення корисного об'єму (м <sup>3</sup> )
1	60	3,043	0
2	80	4,89	0,00009
3	100	5,073	0,00016

Похибка вимірювань становить 3,17 %.

Таблиця 7.

**Показники фільтруючого елемента на дизельному паливі, з пробігом 6 тис. км.**

№	Частота (МГц)	Маса очищення (г)	Зменшення корисного об'єму (м <sup>3</sup> )
1	60	2,24	0
2	80	4,15	0,00011
3	100	6,45	0,00019

Похибка вимірювань становить 2,8 %.

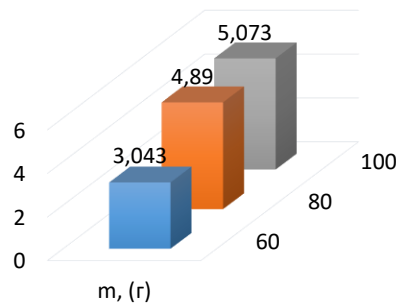
Таблиця 8.

**Показники фільтруючого елемента на дизельному паливі, з пробігом 9 тис. км.**

№	Частота (МГц)	Маса очищення (г)	Зменшення корисного об'єму (м <sup>3</sup> )
1	60	2,01	0
2	80	4,087	0,00017
3	100	6,93	0,00023

Похибка вимірювань становить 2,4 %.

На рисунку 7 наведено графік зміни очищення фільтра, який працював на дизельному паливі, в залежності від частоти впливу ультразвуку.



**Рис. 7. Очищення фільтра, який працював на дизельному паливі в залежності від частоти впливу ультразвуку**

Обробка фільтруючого елемента, що працював на дизельному паливі з додаванням біопалива (25%), ультразвуком отримали такі результати:

1. маса фільтруючого елемента, що піддавався ультразвуковій обробці, зменшилася від частинок сажі в середньому на 2,53 г порівняно з контрольним елементом;
2. коефіцієнт пружності фільтруючого елемента, що зазнав ультразвукової обробки не змінився.

Таблиця 9

**Показники фільтруючого елемента із відсотком біопалива (25%), з пробігом 3 тис. км.**

№	Частота (МГц)	Маса очищення (г)	Зменшення корисного об'єму (м <sup>3</sup> )
1	60	1,78	0
2	80	2,6	0,00004
3	100	2,4	0,00009

Похибка вимірювань становить 2,15 %.

Таблиця 10

**Показники фільтруючого елемента із відсотком біопалива (25%), з пробігом 6 тис. км.**

№	Частота (МГц)	Маса очищення (г)	Зменшення корисного об'єму (м <sup>3</sup> )
1	60	1,32	0
2	80	2,98	0,00006
3	100	2,79	0,00010

Похибка вимірювань становить 1,98 %.



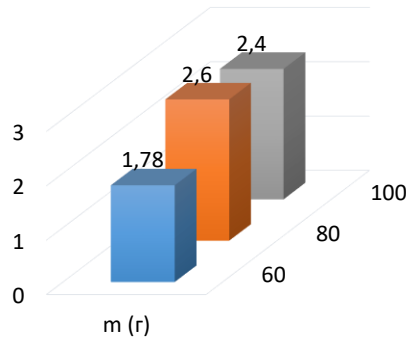
Таблиця 11

**Показники фільтруючого елемента із відсотком біопалива (25%), з пробігом 9 тис. км.**

№	Частота (МГц)	Маса очищення (г)	Зменшення корисного об'єму (м <sup>3</sup> )
1	60	0,974	0
2	80	3,12	0,0008
3	100	2,95	0,00011

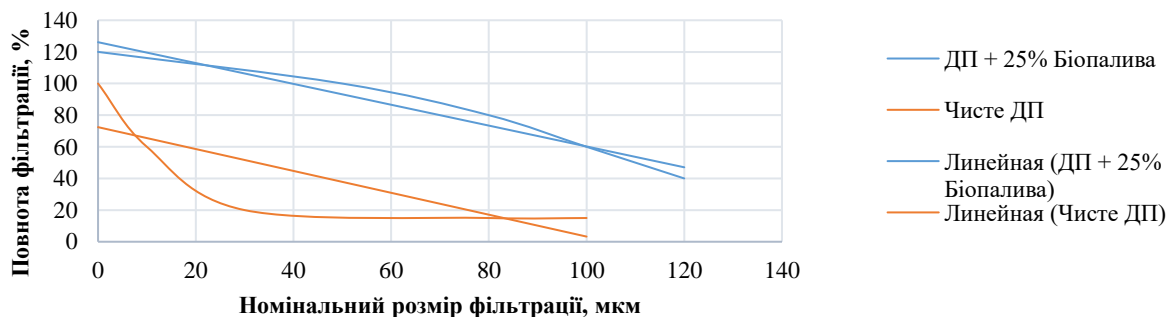
Похибка вимірювань становить 1,84 %.

На рисунку 8 наведено графік зміни очищення фільтра, який працював на дизельному паливі з додаванням біопалива, в залежності від частоти впливу ультразвуку.



**Рис. 8. Очищення фільтра, який працював на дизельному паливі з додаванням біопалива, в залежності від частоти впливу ультразвуку**

Одержані результати показали, що досягнути повного очищення фільтруючого елемента ультразвуковим методом не можливо, адже елементи конструкції фільтра повинні бути стійкими до руйнуючого впливу ультразвуку при більшій частоті, також на процес очищення буде впливати вид палива та його хімічний склад.



**Рис. 9. Залежність повноти очистки фільтра**

Експлуатація сажових фільтрів за періодичної заміни фільтруючих елементів повинна становити не менше ресурсу та терміну служби експлуатації дизельних двигунів, для яких вони призначені. Терміни заміни фільтрів регламентуються відповідно до їх призначення та умов експлуатації.

## 5. Висновки

Важливе місце в єдиній транспортній системі займає автомобільний транспорт. Рівень розвитку транспортної системи в державі – одна з найважливіших ознак її технологічного процесу. Потреба у високорозвинутій транспортній системі дедалі посилюється, за умови інтеграції до європейської та світової економіки. Сьогодні стан транспортної системи України не є задовільним. Інфраструктура транспортної системи є застарілою та не відповідає сучасним вимогам щодо виконання своїх основних функцій. Головним чинником є автомобільний транспорт.

Доцільність вирішення проблеми зменшення негативного впливу автотранспорту на довкілля потребує кардинальних заходів щодо підвищення екологічної безпеки ДВЗ. Рівень проблеми визначається, в першу чергу, ефективністю паливо-використанням та рівнем забруднення середовища.



Це призводить до пошуку ефективних методів удосконалення паливної економічності, енергетичної незалежності та екологічних показників. Вибір основних чинників повинен ґрунтуватися на основі їх всебічного аналізу та оцінки. Дієвим напрямком підвищення екологічної безпеки вважається, застосування способів, спрямованих на зменшення витрати палива та забруднюючих викидів шляхом удосконалення систем живлення і випуску, регулювання робочих процесів двигуна, застосування біопалива та контроль за виконанням на законодавчому рівні.

### Список використаних джерел

1. Відпрацьовані гази: веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/> (дата звернення 20.04.22).
2. Навчальні матеріали онлайн. Способи зниження токсичності відпрацьованих газів: веб-сайт. URL: <https://pidruchniki.com/> (дата звернення 22.04.22).
3. Навчальні матеріали онлайн. Шляхи зменшення шкідливості викидів автомобільного транспорту: веб-сайт. URL: <https://pidruchniki.com/> (дата звернення 24.04.22).
4. Джигерей В. С. Екологія та охорона навколишнього природного середовища: навч. посіб. 4 вид. К: Знання. КОО. 2006. 319 с.
5. Калетнік Г. М., Пришляк В. М. Біопаливо: ефективність його виробництва та споживання в АПК України: навч. посіб. К.: «Хай-Тек Прес». 2010. 312 с.
6. Калетнік Г. М., Токарчук Д. М., Скорук О. П. Організація і економіка використання біоресурсів: підручник: 2-ге видання, перероблене і доповнене. Вінниця: ТОВ «Друк». 2020. 372 с.
7. Анісімов В. Ф., Пришляк В. М., П'ясецький А. А., Бурлака С. А. Експериментальне дослідження відпрацьованих газів дизельних двигунів. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2013. Вип. 12. С. 56–66.
8. Пальне для дизельних двигунів веб-сайт. URL: [https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2084/1/Artuh\\_V.Pal\\_mast\\_2016.pdf](https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2084/1/Artuh_V.Pal_mast_2016.pdf) (дата звернення 24.04.22).
9. Сажовий фільтр (DPF): веб-сайт. URL: <https://topik.ru/> (дата звернення 28.04.22).
10. Причинита та наслідки утворення сажі: веб-сайт. URL: <https://yar-legenda.ru/uk/proper-nutrition/chernaya-sazha-iz-glushitelya-chnyi-dym-iz-vyhlopnoi-truby/> (дата звернення 26.04.22).
11. Загальна схема ДВЗ, як об'єкту дослідження процесів нейтралізації відпрацьованих газів: веб-сайт. URL: <https://sites.google.com/site/yakavoska/articles/shema-dvz> (дата звернення 30.04.22).
12. Сухина А. Техника и оборудование. Екологічні норми «Євро». *Журнал «Пропозиція»*. 2012: веб-сайт. URL: <https://propozitsiya.com/ekologichni-normi-ievro> (дата звернення 03.05.21).
13. Паладійчук Ю. Б., Телятник І. А. Обґрунтування параметрів зниження токсичності відпрацьованих газів дизельних двигунів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 1 (108). С. 44–62.
14. Димомір «ИНФРАКАР Д»: веб-сайт. URL: <https://tenzor.ua/products/professionalnye-pribory-dlya-sto-i-avtoparkov/dymomer-infrakar-d-1-302-ltk/> (дата звернення 03.05.22).
15. Ультразвукове діагностичне обладнання: веб-сайт. URL: <https://galp.com.ua/ultrazvukove-diahnostychno-obladnannya> (дата звернення 05.05.22).

### References

- [1] Exhaust gases: website. URL: <https://uk.wikipedia.org/> (access date 20.04.22). [in Ukrainian].
- [2] Online learning materials. Ways to reduce the toxicity of exhaust gases: website. URL: <https://pidruchniki.com/> (access date 22.04.22). [in Ukrainian].
- [3] Online learning materials. Ways to reduce emissions from road transport: website. URL: <https://pidruchniki.com/> (access date 24.04.22). [in Ukrainian].
- [4] Jigerey, V. (2006). *Ecology and environmental protection: textbook. allowance 4 species*. K: Knowledge. COO. [in Ukrainian].
- [5] Kaletnik, G., Prishlyak, V. (2010). *Biofuels: the efficiency of its production and consumption in the agro-industrial complex of Ukraine: a textbook*. K.: "High-Tech Press". [in Ukrainian].
- [6] Kaletnik, G., Tokarchuk, D., Skoruk, O. (2020). *Organization and economics of bioresources use: textbook: 2nd edition, revised and supplemented*. Vinnytsia: Druk LLC. [in Ukrainian].
- [7] Anisimov, V., Pryshlyak, V., Pyasetsky, A., Burlaka, S. (2013). Experimental study of exhaust gases of diesel engines. *Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical Sciences*, 12, 56–66. [in Ukrainian].
- [8] Diesel Fuel Website. URL: [https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2084/1/Artuh\\_V.Pal\\_mast\\_2016.pdf](https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2084/1/Artuh_V.Pal_mast_2016.pdf) (accessed 24.04.22). [in Ukrainian].
- [9] Soot Filter (DPF): website. URL: <https://topik.ru/> (access date 28.04.22). [in Ukrainian].



- [10] Causes and consequences of soot formation: website. URL: <https://yar-legenda.ru/uk/proper-nutrition/chernaya-sazha-iz-glushitelya-chernyi-dym-iz-vyhlopnoi-truby/> (accessed 26.04.22). [in Ukrainian].
- [11] General scheme of the internal combustion engine as an object of study of the processes of neutralization of exhaust gases: website. URL: <https://sites.google.com/site/yakavoska/articles/shema-dvz> (accessed 30.04.22). [in Ukrainian].
- [12] Sukhina A. Machinery and equipment. Euro environmental standards. Proposal Magazine. 2012: website. URL: <https://propozitsiya.com/ekologichni-normi-ievro> (application date 03.05.21). [in Ukrainian].
- [13] Paladiychuk, Yu., Telyatnyk, I. (2020). Substantiation of parameters of reduction of toxicity of exhaust gases of diesel engines. *Engineering, energy, transport of agro-industrial complex, 1 (108)*, 44–62. [in Ukrainian].
- [14] Dimomir "INFRACAR D": website. URL: <https://tenzor.ua/products/professionalnye-pribory-dlya-sto-i-avtoparkov/dymomer-infrakar-d-1-302-ltk/> (access date 03.05.22). [in Ukrainian].
- [15] Ultrasound diagnostic equipment: website. URL: <https://galp.com.ua/> ultrazvukove-diahnostychno-obladnannya (access date 05.05.22). [in Ukrainian].

### STUDY OF SMOKE OF EXHAUST GASES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES OPERATING ON DIESEL FUEL WITH BIOPLE ELEMENTS

*The most popular vehicle in the world is the car, their number is constantly increasing. Older cars are being replaced by improved models, and new car designs and systems are being developed and implemented. Areas of improving the design of the car, in addition to improving safety, fuel economy and comfort, include improving environmental safety, as the car is a source of environmental pollution.*

*Internal combustion engines are the main source of man-made air pollution. The operation of the internal combustion engine is accompanied by the formation of emissions of sulfur dioxide and nitrogen oxides, which is the cause of acid precipitation. Smog and the greenhouse effect due to hydrocarbon emissions are inevitable, and solid dust and soot particles cause weather changes (cold, fog and rain). All these factors, together with industrial emissions, are leading to global climate change. Fuel evaporation, crankcase and exhaust gases are among the main phenomena of harmful effects of the internal combustion engine on the environment and account for up to 78%.*

*This article highlights the problem of soot formation in the soot filters of the car exhaust system. Groups of chemical elements that are part of exhaust gases are considered. The existing directions of reducing the toxicity of exhaust gases are analyzed. The influence of different types of fuel on the toxicity of exhaust gases and soot formation is determined. The principle of soot filter operation during filtration and regeneration is described. Types of regeneration and the principle of their action are described. Smoke of soot filters at different mileage was studied. The principle of using the Infracar D smoke meter is described. An experimental study of ultrasonic soot filter cleaning was performed. Based on the information received, conclusions are drawn.*

**Key words:** internal combustion engine, exhaust gases, biofuel, diesel fuel, soot, filter, regeneration.

**F. 4. Fig. 9. Table. 11. Ref. 15**

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Паладійчук Юрій Богданович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Агроінженерії та технічного сервісу» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [rewet@vsau.vin.ua](mailto:rewet@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0003-4257-9383>).

**Телятник Інна Анатоліївна** – магістр зі спеціальності «208 Агроінженерії», Інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [inna201098@gmail.com](mailto:inna201098@gmail.com)).

**Буздиган Максим Віталійович** – студент 3 курсу спеціальності «208 Агроінженерії», Інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [bart24309@gmail.com](mailto:bart24309@gmail.com)).

**Yuriy Paladiychuk** – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Agroengineering and Technical Service of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, e-mail: [rewet@vsau.vin.ua](mailto:rewet@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0003-4257-9383>).

**Inna Telyatnyk** – Assistant of the Department of “Technological Processes and Equipment of Processing and Food Productions”, Vinnitsia National Agrarian University (3, Solnychna st., Vinnitsia, 21008, Ukraine, e-mail: [inna201098@gmail.com](mailto:inna201098@gmail.com)).

**Maksym Buzdygan** – a second-year student specialty «208 Agroengineering», Faculty of Engineering and Technology of Vinnitsia National Agrarian University ((3, Solnychna st., Vinnitsia, 21008, Ukraine, e-mail: [bart24309@gmail.com](mailto:bart24309@gmail.com)).