

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ВИХЛОПНИХ ГАЗІВ МАЛОПОТУЖНИХ БЕНЗИНОВИХ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Анотація. У роботі досліджено проблемне завдання очищення вихлопних газів бензинових генераторів потужністю порядку 1 кВт. Проведено аналіз відомих методів сухої фільтрації, мокрою барботажу крізь вапняне молоко та їх комплексного застосування. Обґрунтовано ефективність синтезованого методу, заснованого на використанні зволжених волокнистих матриць, що поєднує механічне уловлювання сажі та хемосорбцію токсичних газів. Запропонована технологія очистки вихлопних газів дозволяє досягти прийняттого рівня екологічної безпеки автономних джерел енергії для людських помешкань при збереженні їх мобільності у надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: екологічна безпека, бензинові генератори, волокнисті фільтри-матриці, хемосорбція, автономне енергозабезпечення.

Вступ. В умовах дефіциту централізованого енергопостачання, зокрема під час надзвичайних ситуацій мобільні бензинові генератори малої потужності (порядку 1 кВт) стали критично важливим елементом життєзабезпечення. Проте їх експлуатація супроводжується, разом з вихлопними газами, значними викидами в атмосферу токсичних сполук, що в умовах обмеженого повітрообміну при тривалій роботі на одному місці, наприклад на балконі багатоповерхівки, суттєво знижує рівень екологічної безпеки прилеглих територій та являє пряму загрозу здоров'ю людей. Технологія очищення вихлопів таких генераторів потребує не лише високої ефективності газоочистки, але й збереження їх мобільності, пов'язаною з масогабаритними характеристиками [1]. Мета роботи – розроблення ефективного методу очищення вихлопних газів мобільних бензогенераторів від екологічно небезпечних речовин на основі синтезу механічних та хемосорбційних методів фільтрування.

Процес ефективної очистки вихлопних газів пропонується за рахунок поєднання певних методів фільтрації.

Механічна фільтрація. Для її реалізації пропонується застосування високотемпературних волокнистих матриць, виготовлених на основі базальтового або супертонкого скляного волокна, що розглядається як базовий метод первинного очищення відпрацьованих газів бензинового двигуна генератора. Вибір саме таких матеріалів обумовлений їхньою високою термічною стабільністю та здатністю зберігати структурну цілісність при постійному впливі розпечених потоків газу. Завдяки хаотичному просторовому переплетенню волокон утворюється складна тривимірна пориста структура, яка характеризується високим показником відкритої порожнечості. Така архітектура фільтрувального шару дозволяє поєднати відносно низький початковий аеродинамічний опір із великою активною площею осадження

твердих часток і крапель рідини, що є критично важливим для мобільних бензогенераторів.

Фізика процесу вловлювання твердих часток сажі, які зазвичай представлені екологічно небезпечними фракціями пилу PM2.5 та PM10, базується на складному поєднанні декількох механізмів сепарації [2]. Для часток більшого діаметра основним фактором виступає інерційне зіткнення, коли через велику масу та швидкість частка не здатна, в силу інерції, змінити траєкторію руху слідом за лінією току газу, що огинає волокно, і внаслідок зіткнення з волокном утримується на його поверхні силами адгезії. Паралельно діє механізм динамічного зачеплення, тобто торкання, що спрацьовує для часток, траєкторія яких проходить на відстані, меншій за їхній радіус від поверхні волокна. Для найбільш небезпечних субмікронних часточок (менше 0,1 мкм) домінуючим стає дифузійне осадження, зумовлене інтенсивним броунівським рухом, що значно підвищує ймовірність їхнього контакту з фільтрувальним елементом при зниженні локальної швидкості потоку всередині матриці. Проте, слід зазначити, що впровадження сухих волокнистих систем для бензинових двигунів об'ємом 50...80 см³, притаманним генераторам потужністю близько 1 кВт, стикається з певними технічними обмеженнями. Найбільш критичним параметром у цьому контексті є динамічне зростання зворотного тиску у вихлопному тракті. Через малий робочий об'єм циліндра такі двигуни мають обмежений запас вільної енергії на випуску, тому будь-яке підвищення опору фільтра миттєво погіршує якість продувки камери згоряння. Накопичення залишкових газів призводить до небажаного розбавлення свіжої паливно-повітряної суміші, що провокує падіння потужності, перегрів клапанного механізму та суттєве зростання питомої витрати палива з відповідним збільшенням викидів. Отже, хоча суха механічна фільтрація демонструє високу ефективність у затриманні твердої фази викидів, вона залишається функціонально обмеженою, оскільки не здатна нейтралізувати основні газоподібні токсиканти, такі як чадний газ та оксиди азоту, що робить цей метод лише допоміжною ланкою в комплексній схемі очистки вихлопних газів.

Наступним логічним методом підвищенні рівня екологічної безпеки автономних бензогенераторів є перехід від інертного механічного утримання часток до активного хімічного впливу на склад вихлопних газів. Найбільш розповсюдженим методом у промисловій екології для вирішення подібних завдань є барботажне очищення, яке в контексті малопотужних генераторів доцільно реалізовувати через систему мокрого гасіння із застосуванням суспензії гідроксиду кальцію, відомої як вапняне молоко. Фізична сутність такого процесу полягає у диспергуванні потоку відпрацьованих газів у об'ємі рідкої фази. Під час проходження бульбашок газу крізь шар реагенту відбувається інтенсивний дифузійний масообмін на межі розділу фаз. Це забезпечує не лише ефективне «змивання» дрібнодисперсної сажі, яка виступає ядрами конденсації у вологому середовищі, а й пряму хімічну взаємодію з газоподібними компонентами вихлопу. Ключовим реакційним процесом у даному випадку є хемосорбція діоксиду вуглецю (CO₂), що супроводжується утворенням нерозчинного осаду карбонату кальцію: $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 \downarrow + H_2O$ [3]

Окрім нейтралізації вуглекислоти, вапняне молоко активно зв'язує сполуки сірки, перетворюючи їх на стабільні сульфіти та сульфати, що значно знижує корозійну активність викидів та їхній специфічний запах, що викликає алергічні

реакції у людей при перевищенні їх максимальних і разових ГДК (гранично допустимих концентрацій). Важливим супутнім ефектом є радикальне зниження температури вихлопних газів за рахунок високої теплоємності води та витрат енергії на її часткове випаровування. Це мінімізує пожежні ризики при експлуатації генераторів у безпосередній тимчасовій близькості до людських помешкань або укріттів.

Незважаючи на високу екологічну ефективність, пряме впровадження барботажних систем для бензинових двигунів малого об'єму стикається із суттєвими інженерними викликами. Головним дестабілізуючим фактором є гідростатичний опір шару рідини. Для того, щоб вихлопні гази подолали тиск стовпа суспензії висотою h , двигун повинен створити додатковий тиск, що визначається класичною формулою $P = \rho gh$. У цьому контексті параметр ρ відображає густину робочої суспензії, яка у випадку вапняного молока є певною мірою вищою за густину чистої води через наявність і концентрацію завислих часточок указанного реагенту. Величина g відповідає градієнту сили тяжіння (прискоренню вільного падіння), а параметр h позначає висоту стовпа рідини над точкою виходу газу, тобто глибину занурення барботажної трубки. Отже, для поршневої групи двигуна потужністю до 1 кВт, що має малий робочий об'єм ($50 \dots 80 \text{ см}^3$), сумарний тиск P стає критичним «гальмом» на такті випуску. Оскільки такий двигун має обмежений крутний момент, необхідність подолання опору стовпа рідини призводить до виникнення надмірного зворотного тиску. Це провокує порушення газообміну в циліндрі: відпрацьовані гази не виводяться у повному об'ємі, розбавляючи свіжу паливно-повітряну суміш, що призводить до падіння термічного ККД, перегріву двигуна та його потенційної зупинки. Додатковим обмеженням є значна маса реактора, зумовлена необхідним об'ємом рідини для підтримання ефективної висоти h , що суперечить вимогам мобільності автономних систем енергозабезпечення. Саме ці фізичні обмеження зумовлюють необхідність переходу до синтезованих рішень, які б дозволили зберегти високу реакційну здатність хемосорбенту (ρ), але звели б до мінімуму вплив гідростатичного стовпа (h) на роботу двигуна.

Підсумовуючи недоліки механічної фільтрації та барботажних систем, найбільш раціональним методом очищення для генераторів потужністю до 1 кВт є синтез обох підходів у формі воложеної хемосорбційної волокнистої матриці. В основі цієї концепції лежить використання інертного волокнистого каркаса не лише як механічного бар'єра для сажі, а передусім як носія для тонкої плівки рідкого хімічного реагенту. Таке конструктивне рішення дозволяє кардинально змінити фізику масообмінних процесів, переводячи їх із об'ємного барботажу у площинну плівкову абсорбцію [4]. Завдяки цьому вдається зберегти хімічну активність реагенту, притаманну «мокрому» методу, але реалізувати її в межах компактної структури, характерної для «сухих» фільтрів.

Головною перевагою синтезованого методу є радикальне зниження аеродинамічного опору вихлопної системи при збереженні високої реакційної здатності. Оскільки рідкий реагент утримується на поверхні волокон капілярними силами та силами поверхневого натягу, потік відпрацьованих газів проходить крізь розгалужені канали матриці, контактуючи з великою сумарною площею рідкої фази, але не долаючи при цьому значний гідростатичний тиск. Таким чином, параметр h у формулі $P = \rho gh$ фактично нівелюється, оскільки замість подолання опору

суцільного стовпа рідини газ взаємодіє лише з тонкими плівками абсорбенту. Це дозволяє експлуатувати систему з бензиновими двигунами малого об'єму без ризику критичного зростання зворотного тиску, що гарантує стабільність циклів газорозподілу та збереження номінальної потужності енергоустановки.

Висока ефективність нейтралізації газоподібних токсикантів, зокрема оксидів азоту (NO_x) та залишків неповного згоряння палива, досягається за рахунок великої питомої поверхні контакту фаз, яку формує волокниста структура. Кожне окреме волокно, змочене хемосорбційним розчином (наприклад, на основі карбаміду для селективної нейтралізації NO_x або лужних сполук для зв'язування кислих газів), перетворюється на мініатюрний реактор. Одночасно з цим волога поверхня матриці набагато ефективніше утримує дрібнодисперсну сажу порівняно з сухим методом. Рідина в даному випадку діє як зв'язуючий агент, що надійно фіксує частки на волокнах, запобігаючи їх вторинному винесенню швидкісним потоком газів та забезпечуючи стабільно високу якість очищення протягом всього робочого циклу.

З експлуатаційної точки зору запропонований метод дозволяє реалізувати концепцію модульних картриджних систем, що є ключовим фактором для автономного екологічно безпечного енергозабезпечення людських помешкань у надзвичайних ситуаціях і у польових умовах. Користувач отримує можливість здійснювати швидко заміну відпрацьованих фільтрувальних елементів або їх повторне просочення реагентом (після оперативної регенерації матриці, наприклад, промиванням у чистій воді) без необхідності роботи з громіздкими резервуарами та без ризику вилливу рідкого шламу. Це робить запропоновану систему раціональним технологічним рішенням, яке забезпечує необхідний рівень екологічної безпеки при збереженні високої мобільності та надійності малопотужних генераторів.

Висновки. Проведений аналіз та синтез комплексного методу очищення вихлопних газів мобільних побутових генераторів потужністю порядку 1 кВт, заснованих на використанні зволоженої хемосорбційної волокнистої матриці дозволяє очікувати низку вагомих переваг порівняно з традиційними однокомпонентними системами, які, до того ж, складно реалізувати на практиці для забезпечення необхідної ефективності без втрати мобільності. Запропонований метод дозволяє досягти синергії між високою сорбційною здатністю рідких реагентів та низьким аеродинамічним опором пористих структур, що є вирішальним фактором для забезпечення екологічної безпеки в умовах автономного енергопостачання, зокрема під час надзвичайних ситуацій.

Список використаної літератури

1. Екологічна безпека та економіка : монографія / М. І. Сокур, В. М. Шмандій, В. С. Бахарев, І. М. Сокур. – Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2020. – 240 с.
2. Смирнов О. П., Левченко В. І. Фільтрація аерозолів у волокнистих матеріалах : навч. посіб. – Харків : НТУ «ХП», 2019. – 112 с.
3. Kohl, A. L., & Nielsen, R. V. (1997). *Gas purification* (5th ed.). Gulf Publishing Company. Екологія та природокористування : зб. наук. пр. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. – Вип. 28.