Національний університет цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОНДРАТЕНКО ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 504.064.4 : 621.431 : 389.14 : 528.088

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМИ ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

21.06.01 – екологічна безпека (технічні науки)
21 – національна безпека
Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ О.М. Кондратенко
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант: Андронов В.А., доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Кондратенко О.М. Науково-методологічні основи захисту атмосферного повітря від техногенного впливу енергоустановок з поршневими двигунами внутрішнього згоряння. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека (технічні науки) (21 – національна безпека). Національний університет цивільного захисту України, ДСНС України, Харків, 2021.

Метою роботи є розробка науково-методологічних основ системи комплексного оцінювання рівнем екологічної безпеки (ЕБ) технології захисту атмосферного повітря (АП) при безаварійній експлуатації енергоустановок (ЕУ) з поршневим ДВЗ (ПДВЗ) з високим ступенем фізичного зносу та впровадження її в управління технології захисту навколишнього середовища (ТЗНС).

Об'єктом дослідження є комплексні системи технічних рішень та управління екологічно безпечною для атмосферного повітря експлуатацією енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу.

Предметом дослідження є науково-методологічні основи розробки комплексної системи захисту атмосферного повітря від негативного впливу енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу на етапі його життєвого циклу (ЖЦ) «безаварійна експлуатація» для забезпечення дотримання вимог ЕБ.

Ідея дослідження полягає у розробці комплексу технологічних і технічних рішень з організації та впровадження екобезпечних робочих процесів безаварійної експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, що забезпечують заданий рівень екологічної безпеки, та комплексної системи екологічного управління процесом експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких **задач**:

1. Надати системний аналіз науково-методологічних розробок щодо визначення екологічно ефективних процесів роботи енергоустановок з поршневим ДВЗ на етапі життєвого циклу «безаварійна експлуатація» для захисту атмосферного повітря від фізичних чинників впливу та викиду еконебезпечних речовин на базі аналізу науково-технічної, довідникової, патентної та нормативної літератури.

2. Розробити наукові засади для обґрунтування методологічних положень комплексного дослідження негативного впливу енергоустановок з поршневим ДВЗ на атмосферне повітря для удосконалення процесу їх безаварійної експлуатації при впровадженні нових технічних рішень з метою побудови системи управління екологічною безпекою таких енергогенеруючих об'єктів.

3. Розробити наукові основи та методологічні засади для розробки систем комплексної оцінки рівня екологічної безпеки та управління безаварійною експлуатацією енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу.

4. Розробити комплекс технологічних і технічних рішень з організації та впровадження екобезпечних робочих процесів «безаварійної експлуатації» енергоустановок з поршневим ДВЗ, що забезпечують заданий рівень екологічної безпеки, та комплексну систему екологічного управління процесом при їх експлуатації.

5. Надати результати підвищення рівня екологічної безпеки в ЕУ з поршневим ДВЗ із високим рівнем зносу при застосуванні комплексу технологічних і технічних рішень щодо роботи ТЗНС стосовно очищення відпрацьованих газів від твердих частинок на конструктивно удосконаленому фільтрі. Встановити індикаторну функцію ефективності роботи фільтру твердих частинок до досягнення нормативних вимог безпеки для поршневого ДВЗ тривалої експлуатації.

6. Визначити переваги застосування комплексної системи управління екологічно безпечною експлуатацією енергоустановок з поршневим ДВЗ відповідно до розробленої функції оцінювання їх безпечності у вигляді інтегративного показника рівня екологічної безпеки в умовах негативного впливу таких енергогенеруючих об'єктів на атмосферне повітря.

Для розв'язання поставлених задач застосовувались **методи**: системологічний аналіз науково-технічної, довідникової, нормативної та патентної літератури; синтез класифікацій і класифікаторів; синтез систем управління екологічною безпекою та технологій захисту навколишнього середовища; методи системного аналізу, багаторівнева декомпозиція, метод ієрархій та десятинного поділу; стандартизовані методики аналізу даних моторних стендових випробувань, розрахунку середньоексплуатаційних значень техніко-економічних і екологічних показників роботи ПДВЗ за

стандартизованими стаціонарними випробувальними циклами; методи дослідження динаміки руху аерозольних реальних текучих середовищ, розрахунку робочого процесу ПДВЗ; методи визначення метрологічних характеристик експериментальних установок і засобів вимірювальної техніки; математичні апарати комплексного паливно-екологічного критерію, інтегрального індексу еколого-хімічного оцінювання та узагальненої функції бажаності; математичні апарати формул перерахунку показників димності у показники токсичності відпрацьованих газів; математичний апарат сімейства кривих Пірсона (β-розподілу); метод експериментального проектування, метод SWOT-аналізу; ліцензійні версії програмних застосунків Micrisoft Exel 2003, MathCAD 14 Express, T-Flex CAD 3D V8 Education та розроблений у середовищі Borland Pascal застосунок Applied Beta-Distribution.

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету і завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, наведено наукову новизну та розкрито практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію щодо впровадження, публікації та апробації матеріалів дослідження.

У **першому розділі** роботи ***«Системний аналіз науково-методологічних основ екологічної безпеки роботи енергоустановок з поршневим двигуном щодо захисту атмосферного повітря»*** на основі результатів аналітичного аналізу науково-технічної, довідникової, нормативної та патентної літератури за темою дисертаційного дослідження вдосконалено систему класифікацій способів роботи і конструкції фільтрів твердих частинок (ФТ) та систему класифікацій засобів реалізації процесу їх регенерації як складових ТЗНС від негативного впливу ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу. Встановлено неможливість використання існуючих систем класифікації пристроїв ТЗНС в ЕУ, в яких технічний стан ПДВЗ не відповідає чинним вимогам екологічної безпеки. Це дозволило звернути увагу на додаткові чинники техногенного впливу на АП відпрацьованих газів (ВГ) ЕУ з фізично зношеними ПДВЗ, зокрема підвищену димність ВГ. У роботі для уникнення прояву цього чинника запропоновано конструкцію і спосіб роботи ФТЧ. Сформульовано мету, об'єкт, предмет і задачі дослідження.

Другий розділ роботи «***Наукові засади для обґрунтування методологічних***

положень комплексного дослідження негативного впливу енергоустановок з поршневим двигуном на атмосферне повітря» містить результати розвитку методологічних засад побудови ТЗНС при експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, які не відповідають чинним вимогам екологічної безпеки і не можуть бути виведені з експлуатації. Здійснено аналіз існуючих методологічних розробок з комплексного оцінювання техногенного впливу на стан АП таких ПДВЗ, за яким встановлено, що існують додаткові чинники негативної дії на екологічний стан АП, зумовлені розбіжністю вимог законодавчих екологічних обмежень щодо якості моторного палива та екологічних вимог до складу ВГ. Це дозволили обґрунтувати впровадження інтегративного принципу побудови системи оцінювання екологічної якості експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, а саме надання окремої оцінки безпечності роботи ПДВЗ і ТЗНС у складі енергоустановки.

В **третьому розділі** роботи «***Методологічні основи розробки систем комплексної оцінки рівня екологічної безпеки експлуатацією енергоустановок з поршневим двигуном»*** наведено дані щодо результатів наукового обґрунтування структуру інтегративного показника рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу. Розроблений показник враховує особливості та повний перелік чинників негативного впливу на АП технічного об'єкту, що не відповідає чинним вимогам екологічної безпеки, на етапі його ЖЦ «безаварійна експлуатація». Відповідно до прийнятої концепції оцінювання окремо екологічної безпеки роботи ПДВЗ і ТЗНС у ЕУ запропоновано до інтегративної оцінки включити комплексний паливно-екологічний критерій у якості окремого самостійного чинника техногенного впливу на стан АП. Наведено результати дослідження метрологічних аспектів критеріального оцінювання та особливості вдосконалення лабораторного обладнання і методик отримання набору вихідних даних для комплексного критеріального оцінювання.

Четвертий розділ роботи «***Розробка комплексної системи екологічного управління системою захисту атмосферного повітря при експлуатації енергоустановок з поршневим двигуном»*** містить результати розробки наукових основ системи управління екологічною безпекою (СУЕБ) процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ з

високим рівнем фізичного зносу на етапі їх ЖЦ «безаварійна експлуатація». СУЕБ дозволяє врахувати пріоритетність екологічних показників роботи ЕУ з ПДВЗ над техніко-економічними на цьому етапі ЖЦ. У розділі також набули подальшого розвитку методологічні засади побудови системи моніторингових заходів щодо встановлення стану АП. Відповідно до результатів дослідження особливостей функціонування СУЕБ, запропонованого виконавчого пристрою ТЗНС нетрадиційної конструкції, а саме ФТЧ, визначено доцільним заправадити інтегративну основу оцінювання екологічної якості роботи систем ЕУ.

У **п'ятому розділі** роботи «***Практична реалізація комплексних систем техніко-технологічних рішень і оцінювання рівня екологічної безпеки при роботі енергоустановок з поршневим двигуном***» викладено інформацію щодо результатів наукового обґрунтування методологію побудови та використання індексу ефективності функціонування ФТЧ, що є частиною ТЗНС в ЕУ з ПДВЗ. Отримано результати щодо підвищення рівня екологічної безпеки при застосуванні комплексу технологічних і технічних рішень у разі сумісної роботи ПДВЗ тривалої експлуатації і ТЗНС. Це дозволило отримати синергетичний ефект у забезпеченні екологічно безпечного функціонування ПДВЗ і ТЗНС у складі ЕУ, а таким чином знизити техногенне навантаження на АП на 42 % та наблизити показники такої ЕУ до виконання вимог екологічних нормативів рівня EURO III.

До складу **шостого розділу** роботи «***Результати впровадження системи управління екологічно безпечною експлуатацією енергоустановок з поршневим двигуном відповідно до інтегративного показника ефективності***» увійшли результати розвитку науково-методологічних основ побудови схеми комплексної технології захисту АП при експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, що не відповідають чинним вимогам екологічної безпеки і не можуть бути виведені з неї на етапі ЖЦ «безаварійна експлуатація». Це дозволило отримати синергетичний ефект від комплексу природозахисних технологічних заходів – охолодження, очищення і рециркуляції ВГ, утилізації їх теплової енергії, переведення двигуна на споживання альтернативного моторного палива і раціоналізації структури моделі його експлуатації. На основі запропонованого інтегративного показника рівня екологічної

безпеки D_{RICE} в умовах негативного впливу енергогенеруючих об'єктів на АП реалізовано взаємоузгоджений принцип роботи складових СУЕБ, заснований на комплексному врахуванні чинників техногенного навантаження на АП.

Результати роботи систематизовано за допомогою логічного апарату SWOT-аналізу. Практичне значення роботи підтверджено актами впровадження у виробничу, господарчу і науково-дослідну діяльність підприємств і організацій та навчальний процесс.

Ключові слова: екологічна безпека, комплексне критеріальне оцінювання, енергоустановка, поршневий двигун внутрішнього згоряння, фізичний знос, процес експлуатації, технологія захисту навколишнього середовища, система управління.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації (всього – 70, з них: 5 монографій, 4 статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародної науко-метричної бази Scopus, 27 статей у наукових фахових виданнях України, 7 статей у наукових виданнях України, 3 статті у наукових виданнях інших країн та 24 наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації, з яких: 21 одноосібно, 11 у закордонних виданнях).

Монографії *(всього – 5, з яких 1 видана у Республіці Польщі, 1 – одноосібно):*

1. Вамболь С.О., Строков О.П., Вамболь В.В., **Кондратенко О.М.** Сучасні способи підвищення екологічної безпеки експлуатації енергетичних установок: монографія. Харків: Стиль-Іздат, 2015. 212 с. ISBN 978-617-7256-09-9.

Здобувачу особисто належать аналіз літературних джерел, класифікації конструкції ФТЧ та способів їх регенерації, структура і описання СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

2. Vambol S.O., Vambol V.V., Suchikova Y.O., Mishchenko I.V., **Kondratenko O.M.** Scientific and practical problems of application of ecological safety management systems in technics and technologies: Monograph. Opole: Academy of Management and Administration, 2017. 205 p. ISBN 978-83-62683-42-0.

Здобувачу особисто належать розроблені концепції методологічної, технічної і метрологічної основ та результати критеріального комплексного оцінювання

ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ,а також обґрунтування застосування математичного апарату β-розподілу для описання процесів забезпечення рівня ЕБ.

3. Вамболь С.О., Вамболь В.В., **Кондратенко О.М.**, Міщенко І.В. Критеріальне оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергетичних установок: монографія. Харків: Стиль-Іздат, 2018. 320 с. ISBN 978-617-7555-60-4.

Здобувачу особисто належать класифікації критеріальних математичних апаратів для комплексного оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ та чинників ЕНБ, джерелом яких є такі технічні об'єкти; математичні моделі ефективності роботи та гідравлічного опору ФТЧ дизельного двигуна; постановка задачі та аналіз результатів застосування математичного апарату β-розподілу для описання викиду ТЧ у потоці ВГ дизельного двигуна; підходи до отримання порежимних значень комплексного паливно-екологічного критерію, складу його набору врахованих чинників ЕНБ, одиниць вираження вартісних еквівалентів паливної та екологічної складової критерію; результати застосування критерію для дизельного двигуна, що працює за різними моделями експлуатації.

4. **Кондратенко О.М.** Метрологічні аспекти комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки експлуатації поршневих двигунів енергетичних установок : монографія. Харків: Стиль-Іздат, 2019. 532 с. ISBN 978-617-7738-33-5.

Здобувачу особисто належать усі результати, виладені у монографії.

5. **Кондратенко О.М.**, Колосков В.Ю., Деркач Ю.Ф., Коваленко С.А. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія. Харків: Стиль-Іздат, 2020. 522 с. ISBN 978-617-7912-64-3.

Здобувачу особисто належать підходи до розробки методологічних, технічних і метрологічних основ для фізичного і математичного моделювання процесів у ФТЧ та здійснення стендових моторних випробувань; розроблена ТЗНС від негативного впливу чинників, джерелом яких є ПДВЗ у складі ЕУ, як технічна основа відповідної СУЕБ; математична модель впливу ГО у виконавчих пристроїв такої ТЗНС на показники паливної економічності дизельного двигуна; розробка і виготовлення виставкового зразка ФТЧ; постановка задач і аналіз результатів практичного

застосування вдосконаленого математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію.

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних науко-метричних баз:

6. **Кондратенко О.М.**, Строков О.П., Вамболь С.О., Авраменко А.М. Математична модель ефективності роботи фільтра твердих частинок дизеля. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015. № 6 (150). С. 55–61. (Scopus, Index Copernicus, Google Scholar).

Особисто здобувачем виконано розробку математичної моделі ефективності роботи ФТЧ дизеля, здійснено аналіз результатів її застосування.

7. Vambol S., Vambol V., **Kondratenko O.**, Suchikova Y., Hurenko O. Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arrangement of pollutants neutralization system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 3/10 (87). С. 63–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102314. (Scopus, Index Copernicus, Google Scholar).

Особисто здобувачем виконано планування, здійснення й аналіз результатів експериментальних досліджень на моторному стенді з автотракторним дизельним двигуном та визначення фізичного змісту і значень коефіцієнтів математичної моделі ефективності роботи ФТЧ дизеля, які враховують температуру потоку ВГ на вході у ФТЧ та його розміщення у випускному тракті двигуна.

8. **Kondratenko O.**, Mishchenko I., Chernobay G., Derkach Yu, Suchikova Ya. Criteria based assessment of the level of ecological safety of exploitation of electric generating power plant that consumes biofuels. «*2018 IEEE 3rd International International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS–2018)»:* Book of Papers. Kharkiv, 2018. С. 57-1–57-6. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559570. (Scopus, Index Copernicus, Google Scholar).

Особисто здобувачем виконано розробку та ранжування моделей експлуатації дизельного двигуна у складі електрогенеруючої установки для енергопостачання промислового підприємства та приватного домогосподарства, на основі аналізу результатів комплексного критеріального оцінювання, а також здійснено аналіз енергетичного, екологічного і економічного ефектів від переведення такого двигуна на

споживання альтернативного моторного палива біологічного походження.

9. **Kondratenko O.**, Koloskov V., Kovalenko S., Derkach Y., Strokov O. Criteria based assessment of efficiency of conversion of reciprocating ICE of hybrid vehicle on consumption of biofuels. «*2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020*» Conference Proceedings, Kharkiv, 2020. С. 177–182. DOI: 10.1109/KhPIWeek 51551.2020.9250118. (Scopus, Index Copernicus, Google Scholar).

Особисто здобувачем виконано ранжування відомих моделей експлуатації дизельного двигуна у складі електрогенеруючої установки для енергопостачання підрозділів ДСНС України під час локалізації та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, на основі аналізу результатів комплексного критеріального оцінювання, а також аналіз світових трендів і перспектив переведення такого двигуна на споживання альтернативного моторного палива біологічного походження.

Статті у наукових фахових виданнях України *(всього – 27, з яких 10 одноосібно):*

10. Вамболь С.О., Строков О.П., **Кондратенко О.М.** Стендові випробування автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 за стандартизованими циклами для визначення ефективності роботи ФТЧ. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування*. Харків, 2014. № 10(1053). С. 11–18.

Особисто здобувачем виконано планування, підготовку, здійснення і аналіз результатів стендових моторних випробувань дизельного двигуна з розробленим і виготовленим здобувачем ФТЧ, що покращує його екологічні показники роботи.

11. **Кондратенко О.М.,** Строков О.П., Вамболь С.О. Оцінка впливу гідравлічного опору ФТЧ на паливну економічність дизеля. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Транспортне машинобудування*. Харків, 2014. № 14(1057). С. 57–66.

Особисто здобувачем виконано розробку, застосування і аналіз результатів застосування математичної моделі впливу гідравлічного опору ФТЧ на показники паливної економічності дизельного двигуна як показника рівня ЕБ.

12. **Кондратенко О.М.,** Вамболь С.О., Строков О.П. Аналіз діючих ФТЧ нетрадиційної конструкції на відповідність сучасним нормам екологічних показників.

Науковий журнал «Екологічна безпека». Кременчук, 2014. № 1(17). С. 25–30.

Особисто здобувачем виконано аналіз науково-технічної, патентної, нормативної та довідникової літератури щодо питань конструкції, принципів роботи і ефективності роботи ФТЧ дизельних двигунів, що покращують їх екологічні показники роботи.

13. **Кондратенко А.Н.** Математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц дизеля. Часть 1: настроечный коэффициент. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків, 2014. № 18(1061). С. 68–80.

Особисто здобувачем виконано розробку математичної моделі ГО ФТЧ дизельного двигуна як виконавчого пристрою системи забезпечення рівня ЕБ, розробленого, виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, та визначення фізичного змісту і значень її настроювального коефіцієнту.

14. **Кондратенко А.Н.** Математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц дизеля. Часть 2: температурный коэффициент. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків, 2014. № 18(1061). С. 80–89.

Особисто здобувачем виконано визначення фізичного змісту і значень температурного коефіцієнту математичної моделі ГО ФТЧ дизельного двигуна, розробленого, виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, як виконавчого пристрою системи забезпечення рівня ЕБ.

15. **Кондратенко А.Н.**, Строков А.П., Вамболь С.А., Семикин В.М. Регенерация фильтров твердых частиц дизелей. *Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2014. № 1. С. 89–95.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних джерел на побудову класифікації способів та засобів здійснення процесу регенерації ФТЧ ПДВЗ як виконавчих пристроїв системи забезпечення рівня ЕБ.

16. **Кондратенко А.Н.**, Строков А.П., Вамболь С.А., Авраменко А.Н. Регенерация фильтра твердых частиц дизеля с насыпкой из природного цеолита. *Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2014. № 2. С. 76–81.

Особисто здобувачем виконано аналіз конструкції ФТЧ дизельного двигуна, розробленого виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, щодо його місця у розробленій ним класифікації способів та засобів здійснення процесу регенерації ФТЧ ПДВЗ.

17. **Кондратенко О.М.**, Строков О.П., Вамболь С.О., Мараховський В.П. Шляхи регенерації модульного ФТЧ дизеля з насипкою з природного цеоліту як засіб підвищення екологічної безпеки експлуатації транспорту. *Науковий журнал «Екологічна безпека»*. Кременчук, 2014. № 2(18). С. 107–113.

Особисто здобувачем виконано аналіз сосбливостей, переваг і недоліків способів функціонування засобів реалізації здійснення процесу регенерації ФТЧ дизельних двигунів, які відображені у розробленої ним класифікації.

18. **Кондратенко О.М.**, Строков О.П., Вамболь С.О., Бганцев В.М. Особливості визначення масового викиду твердих частинок у відпрацьованих газах дизеля. *Автомобільний транспорт: сб. науч. тр*. Харків, 2014. Вып. 35. С. 100–105.

Особисто здобувачем виконано аналіз основних методологічних особливостей процесу експериментального отримання показників рівня ЕБ експлуатації ПДВЗ у складі ЕУ та визначено шлях подолання виявлених об'єктивних труднощів.

19. **Кондратенко А.Н.** Математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц дизеля. Часть 3: компоновочный коэффициент. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків, 2015. № 6(1115). С. 29–40.

Особисто здобувачем виконано визначення фізичного змісту і значень компонувального коефіцієнту математичної моделі ГО ФТЧ дизельного двигуна, розробленого, виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, як виконавчого пристрою системи забезпечення рівня ЕБ.

20. **Кондратенко А.Н.** Математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц дизеля. Часть 4: временной коэффициент. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків, 2015. № 18(1127). С. 53–61.

Особисто здобувачем виконано визначення фізичного змісту і значень часово-

го коефіцієнту математичної моделі ГО ФТЧ дизельного двигуна, розробленого, виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, як виконавчого пристрою системи забезпечення рівня ЕБ.

21. **Кондратенко О.М.,** Строков О.П., Вамболь С.О. Регенерація фільтрів твердих частинок дизелів як аспект екологічної безпеки експлуатації автотранспортних засобів. Частина 2. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2015. Вип. 3(92). Ч. 1. С. 137–143.

Особисто здобувачем виконано аналіз конструктивних рішень та робочих процесів засобів реалізації способів здійснення процесу регенерації ФТЧ дизельних двигунів, які відображені у розробленої ним класифікації.

22. Вамболь С.А., Строков А.П., Вамболь В.В., **Кондратенко А.Н.** Методологический подход к построению системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок. *Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2015. № 1. С. 48–52.

Особисто здобувачем виконано побудову структури СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, описано її функції та розкрито зміст її етапів та рівнів.

23. **Кондратенко О.М.,** Строков О.П., Вамболь С.О. Регенерація фільтрів твердих частинок дизелів як аспект екологічної безпеки експлуатації автотранспортних засобів. Частина 3. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2015. № 4(93). С. 96–102.

Особисто здобувачем виконано аналіз можливих варіантів практичної реалізації способів та засобів здійснення процесу регенерації ФТЧ дизельного двигуна, розробленого виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, згідно до розробленої ним відповідної класифікації.

24. **Кондратенко А.Н.,** Вамболь С.А., Вамболь В.В. Функции системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок. *Науковий вісник ХНАДУ*. Харків, 2015. Вип. 69. С. 95–100.

Особисто здобувачем виконано визначення та описання функцій рівнів та етапів СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, розробленої здобувачем.

25. **Кондратенко А.Н.** Концепция оценки эффективности управления экологической безопасностью процесса эксплуатации энергетических установок с порш-

невым ДВС. *Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2016. № 2. С. 68–72.

Особисто здобувачем виконано розробку концепції оцінювання ефективності управління рівнем ЕкБ процесу експлуатації енергоустановок з ПДВЗ.

26. Vambol S.O., **Kondratenko O.M.**, Vambol V.V., Mietielov O.V. Methodological basics of criterial integrated assessment of ecological safety management system functioning efficiency of power plants with piston ICE exploitation process. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. Кременчук, 2016. № 6(101), Ч. 1. С. 104–110.

Особисто здобувачем виконано описання методологічних основ концепції оцінювання ефективності управління рівнем ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, розробленої здобувачем.

27. Вамболь С.О., **Кондратенко О.М.**, Мєтєльов О.В. Методологічні основи критеріальної комплексної еколого-економічної оцінки ефективності експлуатації енергетичних установок з поршневим ДВЗ. *Автомобільний транспорт: сб. науч. тр*. Харків, 2016. Вип. 2. С. 139–149.

Особисто здобувачем виконано аналіз форм і способів реалізації оцінювання ефективності управління рівнем ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, згідно до методологічних основ відповідної концепції розробленої здобувачем.

28. **Kondratenko O.M.** Selection of criterial apparatus for complex assessment of ecological safety level of exploitation process of power plants. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. Харків, 2018. Вип. 3(1/2018). С. 75–84. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.1182858.

Особисто здобувачем виконано аналіз, описання, упорядкування у формі класифікації та визначення пріоритетності застосування відомих математичних апаратів, котрі придатні для здійснення комплексного оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ та ефективності функціонування відповідної СУЕБ.

29. **Kondratenko O.M.** Investigation of relationship between coefficients of operation efficiency of DPF of diesel ICE with using of conversion formula. Part 1: Particulate matter emission and opacity. *Двигуни внутрішнього згоряння: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2018. № 1. С. 49–55. DOI: 10.20998/0419-8719.2018.1.09.

Особисто здобувачем виконано постановку задачі, розрахунки та аналіз їх результатів щодо особливостей застосування відомої формули перерахунку одних показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ у інші – димності ВГ у масовий годинний викид ТЧ.

30. Strokov O.P., **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Mishchenko I.V. Description of mass hourly emissions of particulate matter of diesel engine by beta-distribution with taking into account the passport accuracy of gas analyzer. *Двигуни внутрішнього згоряння: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2019. № 1. С. 49–62. DOI: 10.20998/0419-8719.2019.1.09.

Особисто здобувачем виконано постановку задачі та аналіз результатів застосування математичного апарату β-розподілу для описання викиду ТЧ у потоці ВГ дизельного двигуна як показника рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

31. **Kondratenko O.M.**, Chernobay G.O., Derkach Ju.F., Kovalenko S.A. Features of determination of the efficiency of devices for improvement of ecological safety level of vehicles with reciprocating ICE exploitation. *Двигуни внутрішнього згоряння: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2019. № 2. С. 36–44. – DOI: 10.20998/0419-8719.2019.2.07.

Особисто здобувачем виконано постановку задачі, розрахунки та аналіз їх результатів щодо особливостей застосування відомої формули перерахунку одних показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ у інші – концентрації незгорілих вуглеводнів у ВГ у масовий годинний викид ТЧ.

32. **Kondratenko O.M.** Taking into account the emissions of CO_2 as a toxic pollutant and as a greenhouse gas in fuel and ecological complex criteria-based assessment of diesel-generator operation process. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. Харків, 2019. № 6(2/2019). С. 12–23. DOI: 10.5281/zenodo.3558960.

Особисто здобувачем виконано розробка підходу та відповідної йому методики для розширення номенклатури врахованих чинників ЕНБ, джерелом яких є ПДВЗ у складі ЕУ, комплексного паливно-екологічного критерію на прикладі діоксиду вуглецю як полютанту та як парникового газу, здійснено таке оцінювання і проаналізовано його результати.

33. **Kondratenko O.M.** Assessment of ecological and chemical efficiency of explo-

itation process of reciprocating ICE of vehicle with concideration of emission of sulphur oxides, benzo(a)pyrene and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. Харків, 2020. № 7(1/2020). С. 38–50. DOI: 10.5281/zenodo.3780076.

Особисто здобувачем виконано методика оцінювання показників забруднення повітря оксидами сірки, поліциклічними ароматичними вуглеводнями, у тому числі й бенз(а)піреном, з потоком ВГ дизельного двигуна, аналіз та вдосконалення математичного апарату інтегрального індексу екологохімічної оцінки, проаналізовано результати його застосування.

34. **Kondratenko O.M.** Assessment of fuel and ecological efficiency of exploitation process of reciprocating ICE of power plants with consideration of emission of benzo (a)pyrene and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Двигуни внутрішнього згоряння: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2020. № 1. С. 52–59. DOI: 10.20998/0419-8719. 2020.1.07.

Особисто здобувачем виконано розробка підходу та відповідної йому методики для розширення номенклатури врахованих чинників ЕНБ, джерелом яких є ПДВ3 у складі ЕУ, комплексного паливно-екологічного критерію щодо поліциклічних ароматичних вуглеводнів та бенз(а)пірену, здійснено таке оцінювання і проаналізовано його результати.

35. **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Derkach Yu.F., Kovalenko S.A. Criteria-based assessment of fuel and ecological efficiency of exploitation process of reciprocating ICE of power plants considering of emission of sulfur oxides. *Двигуни внутрішнього згоряння: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2020. № 2. С. 46–57. DOI: 0.20998/ 0419-8719.2020.2.07.

Особисто здобувачем виконано розробка підходу та відповідної йому методики для розширення номенклатури врахованих чинників ЕНБ, джерелом яких є ПДВ3 у складі ЕУ, комплексного паливно-екологічного критерію щодо оксидів сірки, здійснено таке оцінювання і проаналізовано його результати.

36. **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Kovalenko S.A., Derkach Yu.F., Botsmanovska O.S., Podolyako N.M. Determination of emissions of vapor of technic flammable liquids from enterprise for their storing and distribution and rational ajustments of their

breathing valves. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. Харків, 2020. № 8(2/2020). С. 17–31. DOI: 10.5281/zenodo.4300753.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики до оцінювання викидів парів технічних горючих рідин, що перебувають на зберіганні, спричинені явищами великого і малого дихання резервуарів, оцінено екологічний, економічний та енергетичний ефекти від утилізації таких викидів.

Статті у наукових виданнях України *(всього – 7, з яких 1 одноосібно):*

37. Vambol S.O., **Kondratenko O.M.** Calculated substantiation of choice of units of monetary equivalents of complex fuel and ecological criteria components. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. Харків, 2017. Вип. 2. С. 53–60. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.1182890.

Особисто здобувачем виконано обґрунтування вибору одиниць вираження для паливної та екологічної складових комплексного паливно-екологічного критерію, які мають вартісні еквіваленти.

38. **Кондратенко О.М.,** Марчук Р.А., Воробйова Д.В. Визначення вагомості витрат палива при оцінюванні рівня паливно-екологічної ефективності експлуатації автомобіля для різних видів моторного палив. Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «*Енергетична безпека та енергоефективність на транспорті*» (29 листопада 2018 р., НАУ). Київ, 2018. С. 18–22.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу до визначення фізичного змісту та значень вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію, аналіз результатів його застосування.

39. **Кондратенко О.М.**, Коваленко С.А. Оцінювання паливно-екологічної ефективності застосування ФТЧ для дизеля з урахуванням його гідравлічного опору. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «*Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика*» (11 – 14 вересня 2019 р., ХДМА). Херсон, 2019. С. 219–224.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та на його основі побудовано методику оцінювання впливу ГО ФТЧ, яким обладнано дизельний двигун, на показники рівня ЕБ процесу його експлуатації на основі вдосконаленого здобувачем математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію.

40. **Кондратенко О.М.**, Боцмановська О.С., Подоляко Н.М., Капінос Е.В. Врахування емісії пари моторного палива та аерозолю картерних газів як полютантів у критеріальному оцінюванні рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з ДВЗ. «*Інструменти та механізми модернізації наукових та освітніх процесів»:* Матеріали науково-практичної конференції (20–21 грудня 2019 р.). Херсон, 2019. С. 92–97.

Особисто здобувачем виконано розробку підходів та на їх основі побудовано методики оцінювання значень масового годинного викиду пари моторного палива, спричиненого явищами великого і малого дихання резервуарів, та аерозолю картерних газів як полютантів у критеріальному оцінюванні рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, а також аналіз результатів їх застосування.

41. **Кондратенко О.М.,** Коваленко С.А. Обґрунтування вибору раціональних одиниць вираження вартісних складових комплексного паливно-екологічного критерію [Електронний ресурс]. *Електронна збірка наукових праць «Е-КОНОМІКА»*. Харків, 2019. № 1(3)/2019. С. 114–118. URL: http://e-conomics.hpi.kh.ua/index.php/e-conomics/article/view/86/70.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики врахування явища інфляції при розрахунку значень паливної та екологічної складових комплексного паливно-екологічного критерію, які мають вартісні еквіваленти, вибір одиниьі вираження для яких обрано за розробленим здобувачем підходом.

42. **Kondratenko O.M.** Assessment of fuel-ecology effect of using of alternative motor fuel for reciprocating ICE of hybrid vehicle / **O.M. Kondratenko** // Матеріали Міжнародного наукового симпозіуму SDEV'2020 *«Сталий розвиток – стан та перспективи»* (19–22 лютого 2020 р., НУ «Львівська політехніка», Львів). – 2020. – С. 177–180.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики для ранжування відомих стаціонарних стандартизованих випробувальних циклів дизель-генератора, що споживає як традиційне, так і альтернативне моторне паливо, як моделей експлуатації АТЗ з гібридним привдом рушія на основі математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію.

43. **Kondratenko O.M.**, Kovalenko S.A., Botsmanovska O.S., Podolyako N.M.

Determination of reference values of complex fuel-ecological criterion and ponderability of its fuel component. Збірник наукових праць XVIII Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екологічної безпеки*» (06 – 08 жовтня 2020 р., КрНУ). Кременчук, 2020. С. 60–65.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики для визначення фізичного змісту та значень еталонних величин вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію як реперних точок психофізичної шкали часткової функції бажаності та здійснено аналіз отриманих за допомогою їх результатів.

Статті у наукових виданнях інших країн *(всього – 3):*

44. **Кондратенко А.Н.,** Бурменко А.О. Система отбора проб отработавших газов дизеля моторного испытательного стенда как объект метрологических исследований. Материалы XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «*Исследования и разкаботки в области машиностроения, энергетики и управления*» (23 – 24 апреля 2015 г., УО ГГТУ им. П.О. Сухого). Гомель, 2015. С. 202–205. (Стаття у науковому виданні Республіки Беларусь).

Особисто здобувачем виконано аналіз особливостей комплексу засобів вимірювальної техніки моторного випробувального стенду для експериментального отримання показників рівня ЕБ процесу експлуатації дизельного двигуна у світлі метрологічного забезпечення здійснення комплексного критеріального оцінювання такого рівня.

45. Vambol’ S.O., **Kondratenko O.M.**, Dejneko N.V. Engine test bench as a sourse of danger factors in experimental researches. *Вестник Кокшетауского технического института Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан*. Кокшетау, 2015. № 3(19). С. 7–12. (Стаття у науковому виданні Республіки Казахстан).

Особисто здобувачем виконано аналіз особливостей складових моторного випробувального стенду для експериментального отримання показників рівня ЕБ процесу експлуатації дизельного двигуна у світлі безпеки дослідника при отриманні складових набору вихідних даних для здійснення комплексного критеріального оцінювання такого рівня.

46. **Kondratenko O.M.,** Achkasova M.A., Polikanova O.V. Main results of complex criterial fuel and ecological assessment of diesel engine 2Ch10.5/12 for emergency and rescue vehicles. Сб. материалов V Международной научно-практической конференции «*Проблемы гражданской защиты: управление, предупреждение, аварийно-спасательные и специальные работы*» (17 марта 2017 г., РГУ КТИ КЧС МВД РК). Кокшетау, 2017. С. 146–150. (Стаття у науковому виданні Республіки Казахстан).

Особисто здобувачем виконано розрахункове дослідження показників рівня ЕБ процесу експлуатації автотракторного дизеля для випадку його застосування у складі одиниць аварійно-рятувальної техніки за допомогою вдосконаленого здобувачем математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації *(всього – 24, з яких 8 одноосібно, 21 у матеріалах міжнародних конференцій і конгресів, 6 у матеріалах закордонних конференцій):*

47. **Кондратенко А.Н.** Использование ФТЧ дизелей в качестве искрогасителей выпускной системы автотранспортного средства. «*Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации*»: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (22–23 мая 2014 г.). Гомель, 2014. С. 221–222.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

48. **Кондратенко А.Н.,** Строков А.П., Вамболь С.А., Авраменко А.Н. Регенерация фильтра твердых частиц дизеля с насипкой из природного цеолита. «*XIX Міжнародний конгрес двигунобудівників*»: Тези доповідей. Присв. 100-річчю генерального конструктора В.О. Лотарєва. (06–10 вересня 2014 р.) – Харків, 2014. – С. 59.

Особисто здобувачем виконано аналіз місця ФТЧ, розробленого, виготовленого і випробуваного здобувачем, у класифікації способів та засобів здійснення процесу регенерації таких фільтрів.

49. **Кондратенко О.М.,** Раманов Б.Б. Актуальні аспекти технегенно-екологічної безпеки процесу регенерації ФТЧ дизелів. Міжнародна науково-практична конференція *«Проблеми екологічної безпеки»:* Збірник тез доповідей (8–9 жовтня 2014 р.). Кременчук, 2014. С 10.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних щодо аспектів технегенно-екологічної безпеки процесу регенерації ФТЧ дизелів.

50. Stel'makh H.S., Vambol' S.O., **Kondratenko O.M.** Development of scientific thought and global trends in questions of ensure compliance with legislative established norms of vehicle exhaust gas toxity between 1991 and 2010. Сборник материалов Международной научно-практической конференции «*Роль местной противовоздушной обороны и пожарной охраны в годы великой отечественной войны*» (27 марта 2015). Кокшетау, 2015. С. 238–240.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних щодо загальносвітових тенденцій у питаннях екологізації процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ за останні 15 років.

51. Stel'makh H.S., Vambol' S.O., **Kondratenko O.M.** Structure of vehicle fleet of Ukraine as a factor of ecological safety. Сборник материалов IX Научно-практической конференции молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) «*Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы*». Часть 2 (2–3 апреля 2015). Минск, 2015. С. 140–141.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних щодо структури парку АТЗ України як чинника ЕНБ.

52. Вамболь С.А., Строков А.П., Вамболь В.В., **Кондратенко А.Н.** Методологический подход к построению системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок. «*XX Міжнародний конгрес двигунобудівників»:* Тези доповідей (05–10 вересня 2015 р.). – Х.: НАКУ «ХАІ», 2015. – С. 45.

Особисто здобувачем виконано описання розробленого здобувачем методологічного підходу до побудови СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

53. **Кондратенко О.М.,** Вамболь С.О., Авраменко А.М. Математична модель ефективності роботи фільтра твердих частинок ІПМаш у реальних умовах експлуатації. Матеріали 17-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників «*Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору*», що проведена в рамках XIV Міжнародного виставкового форуму «*Технології захисту/ПожТех–2015*» (22–23 вересня 2015 р.). Київ, 2015. С. 194–196.

Особисто здобувачем виконано описання розробленої здобувачем математичної моделі ефективності роботи ФТЧ, розробленого, виготовленого і випробуваного здобувачем, у реальних умовах експлуатації.

54. **Kondratenko O.M.,** Skrynnyk K.V., Gurbanov R. Main pollutants in diesel exhaust gases. XII Міжнародна науково-практична конференція «*Проблеми екологічної безпеки*»: Збірник тез доповідей (6–8 жовтня 2015 р.). Кременчук, 2015. С. 25.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних щодо структури ансамблю законодавчо нормованих полютантів у складі ВГ дизельних двигунів.

55. **Кондратенко А.Н.** Математическая модель гидравлического сопротивления ФТЧ дизеля в реальных условиях эксплуатации. «*Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки*»: збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції (04 грудня 2015 р., НУЦЗ України). Харків, 2015. С. 66–67.

Особисто здобувачем виконано описання розробленої здобувачем математичної моделі ГО ФТЧ, розробленого, виготовленого і випробуваного здобувачем, у реальних умовах експлуатації.

56. Вамболь С.А., **Кондратенко А.Н.** Аспекты пожарной и взрывной безопасности процесса регенерации ФТЧ дизелей. Материалы Международной научно-практической конференции «*Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации*» *«ЧС–2016»* (19–20 мая 2016 г., ГУО Гомельский инженерный институт). Гомель, 2016. С. 172–174.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних щодо аспектів пожежної та вибухової безпеки процесу регенерації ФТЧ дизелів.

57. **Кондратенко А.Н.** Концепция оценки эффективности управления экологической безопасностью процесса эксплуатации энергетических установок с поршневым ДВС. «*XXI Міжнародний конгрес двигунобудівників*»: Тези доповідей (05–10 вересня 2016 р., НАКУ «ХАІ»). Харків, 2016. С. 37.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

58. **Кондратенко О.М.,** Мєтєльов В.О. Концепція критеріальної оцінки ефективності заходів щодо підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації транспорту. XIII Міжнародна науково-практична конференція «*Проблеми екологічної безпеки*»: Збірник тез доповідей (12–14 жовтня 2016 р., КрНУ ім. М. Остроградського). – Кременчук, 2016. С. 54.

Особисто здобувачем виконано розробку та описання концепції критеріального оцінювання ефективності заходів щодо підвищення рівня ЕБ процесу експлуата-

ції транспорту.

59. Vambol S.O., Mishchenko I.V., **Kondratenko A.N.** Background of mathematical tools beta distribution application to certain characteristics of aerosol diesel exhaust gases dispersed phase. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «*Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика*» (24 листопада 2016 р., НУЦЗ України). Харків, 2016. С. 23–25.

Особисто здобувачем виконано обгрунтування доцільності застосування математичного апарату бета-розподілу для описання характеристик дисперсної фази аерозолю ВГ дизелів.

60. **Кондратенко О.М.,** Семчук В.М. Аналіз критеріальних апаратів для оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації автотранспортних засобів. Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції «*Проблеми екологічної безпеки*» (11–13 жовтня 2017 р., КрНУ ім. М. Остроградського). Кременчук, 2017. С. 122.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних джерел щодо особливостей існуючих критеріальних апаратів для оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації АТЗ з ПДВЗ.

61. **Kondratenko O.M.** Investigation of relationship between coefficients of operation efficiency of DPF of diesel ICE with using of conversion formula. Part 1: Particulate matter emission and opacity. «*XXIII Міжнародний конгрес двигунобудівників*»: Тези доповідей (05–10 вересня 2016 р., НАКУ «ХАІ»). Харків, 2016. С. 47–48.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

62. Vambol S.O., Bohdanov I.T., Vambol V.V., **Kondratenko O.M.**, Suchikova Y.O. Selection of obtaining method of criterion`s individual regime values of ecological safety level of power plants with engines exploitation process. 5-й Міжнародний конгрес «*Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*»: Збірник матеріалів (26–29 вересня 2018 р., НУ «Львівська політехніка»). Львів, 2018. С. 34.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики отримання порежимних значень комплексного паливно-екологічного критерію як показника рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ за ПДВЗ.

63. Strokov O.P., **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Mishchenko I.V. Description of mass hourly emissions of particulate matter of diesel engine by beta-distribution with taking into account the passport accuracy of gas analyzer. «*XXIV Міжнародний конгрес двигунобудівників*»: Тези доповідей (02–07 вересня 2019 р., НАКУ «ХАІ»). Харків, 2019. С. 44 – 45.

Особисто здобувачем виконано постановку задачі, формування набору вихідних даних та аналіз розрахунків по темі публікації.

64. **Кондратенко О.М.** Результати екологохімічної оцінки експлуатації дизеля 2Ч10,5/12 за випробувальним циклом ESC. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «*Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика*» (21–22 листопада 2019 р., НУЦЗ України). Харків, 2019. С. 126 – 128.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

65. **Kondratenko O.M.**, Gaponova A.S., Muzyka B.V., Verzun V.V., Podolyako N.M. Determination of influence of the emission of fuel vapour on fuel-ecological performance of diesel engine. Збірник XI Міжнародної науково-методичної конференції, 138 Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS) «*Безпека людини у сучасних умовах*» (05–06 грудня 2019 р., НТУ «ХПІ»). Харків, 2019. С. 188–190.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики для визначення кількісних і якісних параметрів викиду парів моторного палива як полютанта та врахування цього чинника ЕНБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ у критеріальному оцінюванні її рівня.

66. **Kondratenko O.M.**, Gaponova A.S., Muzyka B.V., Verzun V.V., Podolyako N.M. Taking into account the emission of carter gases in criteria-based assessment of ecological safety level of reciprocating ICE exploitation process. Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції «*Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології*» (11–12 грудня 2019 р., ОДАБА). Одеса, 2019. С. 122–123.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики для визначення кількісних і якісних параметрів викиду картерних газів як полютанта та врахування цього чинника ЕНБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ у критеріальному оцінюванні її рівня.

67. **Kondratenko O.M.** Determination of CO_2 emission from reciprocating internal combustion engine of emergency and rescue vehicle as an ecological safety factor. «*Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы*»: сб. материалов XIV Международной научно-практической конференции курсантов (студентов), слушателей и адіюнктов (аспирантов, соискателей), в 2-х томах, Т. 1. (08–09 апреля 2020 г., УГЗ МЧС Беларуси). Минск, 2020. С. 296–298.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

68. **Kondratenko O.M.** Selection of rational ecological safety structure of exploitation process model of emergency and rescue vehicle with reciprocating ICE. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «*Problems of emergency situation*» *(PES – 2020)* (20 травня 2020 р., НУЦЗ України). Харків, 2020. С. 363–365.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

69. **Kondratenko O.M.** Determination of fuel-ecological efficiency of exploitation process of diesel ICE of power plants with considering of emission of benzo(a)pyrene and polycyclic aromatic hydrocarbons in exhaust gas flow. «*XXV Міжнародний конгрес двигунобудівників*»:Тези доп. (08–11 вересня 2020 р., НАКУ «ХАІ»). Харків, 2020. С. 29.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

70. **Kondratenko O.M.**, Kovalenko S.A., Tkachenko O.O., Kapinos Ye.V. Some aspects of complex criteria-based assessment of the level of ecological safety of the exploitation process of reciprocating internal combustion engines. Abstracts of III International Scientific and Practical Conference *«Science and education: problems, prospects and innovations»* (29–31 December 2020, Kyoto, Japan). Kyoto, 2020. С. 56–66.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики для визначення кількісних і якісних параметрів викиду поліциклічних ароматичних вуглеводнів, у тому числі бенз(а)пірену, а також реперних точок для вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію для психофізичної шкали часткової функції бажаності.

ABSTRACT

Kondratenko O.M. Scientific and methodological basis of protection of atmospheric air from technogenic impact of power plants with reciprocating internal combustion engine. – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a Doctor of Engineering Science Degree in specialty 21.06.01 – Ecological Safety (Engineering Science) (21 – National Security). National University of Civil Defence of Ukraine, SES of Ukraine, Kharkiv, 2021.

Purpose of the work is development of scientific and methodological bases of the system of complex assessment of the level of ecological safety (ES) of atmospheric air protection technology in accident-free exploitation process of power plants (PP) with reciprocating internal combustion engines (RICE) with a high degree of physical wear and its implementation in the management of environmental protection technology (EPT).

Object of the work is complex system of technical solutions and management of exploitation process of PP with RICE with a high degree of physical wear according to requirements for ecological safety of atmospheric air.

Subject of the work is scientific and methodological basis for the development of a complex system of atmospheric air protection against the negative impact of RICE with a high degree of physical wear at the stage of its life cycle (LC) «accident-free exploitation» to ensure compliance with ES requirements.

Idea of the work consists in the development of a set of technological and technical solutions for the organization and implementation of ecologicaly safety working processes of accident-free exploitation of PP with RICE with a high degree of physical wear, providing a given level of ES and a complex ecological safety management system (ESMS) of PP with RICE exploitation process.

Achieving this purpose involves solving the following **tasks of the work**:

1. Providing a systematic analysis of scientific and methodological developments to determine ecologicaly efficient processes of PP with RICE at the stage of LC «accident-free exploitation» to protect atmospheric air from physical factors and emissions of pollutants based on analysis scientific and technical, reference, patent and regulatory literature.

2. Development of the scientific bases for substantiation of methodological provisi-

ons of complex research of negative impact of PP with RICE on atmospheric air for improvement of process of their accident-free exploitation at introduction of new technical solutions for the purpose of development of ESMS of such power generating objects.

3. Development of the scientific and methodological bases for the development of systems for integrative assessment of the ES level and management of accident-free exploitation of PP with RICE with a high level of physical wear.

4. Development of a set of technological and technical solutions for the organization and implementation of environmentally friendly working processes of «accident-free exploitatio» of PP with RICE which provides a given ES level, and a complex system of ecological management during their exploitation.

5. Providing of the results of increasing the ES level in the PP with RICE with a high level of physical wear when applying a set of technological and technical solutions for the operation of EPT for exhaust gas (EG) purification from particulate matter (PM) on the structurally improved filter. Detect the indicator function of the efficiency of operation of the particulate filter to achieve regulatory ES requirements for long-life RICE.

6. Determination of the advantages of using a comples control system for ecologically safe exploitation of PP with RICE in accordance with the developed function of assessing their safety in the form of an integrative indicator of ES in terms of negative impact of such energy generating facilities on atmospheric air.

The following **methods** were used to solve the set tasks: systemological analysis of scientific and technical, reference, normative and patent literature; synthesis of classifications and classifiers; synthesis of environmental safety management systems and environmental protection technologies; methods of system analysis, multilevel decomposition, method of hierarchies and decimal division; standardized methods of analysis of data of motor bench tests, calculation of average operational values of technical, economic and ecological indicators of RICE operation according to standardized steady test cycles; methods of research of dynamics of movement of aerosol real fluids, calculation of working process of RICE; methods for determining the metrological characteristics of experimental installations and measuring equipment; mathematical aparatuses of the complex fuel-ecological criterion, the integrated index of ecological-chemical evaluation and the

generalized desirability function; mathematical aparatuses of formulas for conversion of exhaust gas opacity and toxicity indicators into indicators of PM emission; mathematical apparatus of the Pearson curve family (β-distribution); method of experimental design, method of SWOT-analysis; licensed versions of Micrisoft Exel 2003, MathCAD 14 Express, T-Flex CAD 3D V8 Education and Borland Pascal Applied Beta-Distribution.

The **introduction** substantiates the relevance of the chosen topic, formulates the purpose and tasks of the dissertation, defines the object, subject and research methods, presents scientific novelty and reveals the practical significance of the results, provides information on the implementation, publication and approbation of research materials.

In the **First Section** of this work ***«System analysis of scientific and methodological bases of ecological safety of power plants with reciprocating engine for air protection»*** based on the results of analytical analysis of scientific and technical, reference, regulatory and patent literature on the topic of the dissertation has been improved system of classifications of classifications of methods of operation and design of filters of diesel particulate matter filters (DPF) and the system of classifications of means of realization of the process of their regeneration as components of EPT from the negative impact of PP with RICE with a high degree of physical wear. It is established that it is impossible to use the existing classification systems of EPT devices in the PP, in which the technical condition of the RICE does not meet the current requirements of ES. This allowed us to pay attention to additional factors of technogenic impact on the air of EG of the PP with physically worn out RICE, in particular the increased opacity of EG. In order to avoid the manifestation of this factor, the design and method of operation of the DPF are proposed. The purpose, object, subject and tasks of research are formulated.

The **Second Section** of the work ***«Scientific bases for substantiation of methodological provisions of complex research of negative influence of power plants with reciprocating engine on atmospheric air»*** contains results of development of methodological bases of construction of EPT at exploitation of PP with RICE with high level of physical wear which do not meet current requirements of ES and cannot be decommissioned. The analysis of existing methodological developments on complex assessment of technogenic impact on the state of air of such RICE is carried out, according to which it is established that

there are additional factors of negative impact on the ecological state of air, due to discrepancies between legal ecological restrictions on motor fuel quality and ecological requirements for EG composition. This allowed to justify the introduction of the integrative principle of building a system for assessing the ecological quality of exploitation of the PP with RICE with a high degree of physical wear, namely the provision of a separate assessment of safety of RICE and EPT in the power plant.

The **Third Section** of the work ***«Methodological bases of development of systems for complex assessment of the ecological safety level of exploitation of power plants with reciprocating engine»*** provides data on the results of scientific substantiation of the structure of the integrative indicator of the ES level of exploitation of PP with RICE with high level of physical wear. The developed indicator takes into account the features and a complete list of factors of negative impact on the air of the technical object that does not meet the current requirements of ES, at the stage of its LC «accident-free exploitation». In accordance with the accepted concept of separately assessing the ES of RICE and EPT in the PP, it is proposed to include in the integrative assessment a complex fuel-ecological criterion as the separate independent factor of technogenic impact on the state of air. The results of research of metrological aspects of criteria-based assessment and features of improvement of laboratory equipment and methods of receiving a set of initial data for complex criteria-based assessment are resulted.

The **Fourth Section** of the work ***«Development of a complex ecological management system for air protection in the exploitation of power plants with reciprocating engine»*** contains the results of development of scientific bases of ESMS of the exploitation process of PP with RICE with high level of physical wear at the stage of their LC «accident-free exploitation». ESMS allows to take into account the priority of ecological indicators of the PP's RICE on technical and economical at this stage of LC. In the section also given the further developed the methodological principles of develpoment a system of monitoring measures for determination the air state. In accordance with the results of the study of the features of the functioning of ESMS, proposed executive body of EPT of non-traditional design, namely DPF, it is determined appropriate to introduce the integrative basis for assessing the ecological quality of PP systems.

The **Fifth Section** of the work ***«Practical implementation of complex systems of technical and technological solutions and assessment of ecological safety in the operation of power plants with reciprocating engine»*** provides information on the results of scientific substantiation of the methodology for developing and using the index of efficiency of functioning of DPF. The results of increasing the ES level in the application of a set of technological and technical solutions in the case of joint operation of long-term RICE and EPT. This allowed to obtain a synergistic effect in ensuring the ecologicaly safe operation of RICE and EPT in the PP, and thus reduce the technogenic load on the air by 42 % and bring the performance of such PP to meet the requirements of ecological standards of level of EURO III.

The **Sixth Section** of the work ***«Results of the implementation of the control system of environmentally friendly operation of power plants with a reciprocating engine in accordance with the integrative efficiency indicator»*** included the results of development of scientific and methodological bases for develpoment a scheme of complex technology of atmospheric air protection in the exploitation of RICE with high levels of physical wear that do not meet current environmental safety requirements and cannot be removed from it at the stage of LC «accident-free exploitation». This allowed to obtain a synergistic effect from a set of ecological protective technological measures – cooling, purification and recirculation of EG, utilization of their thermal energy, conversion of the engine to the consumption of alternative motor fuels and rationalization of the structure of its exploitation model. Based on the proposed integrative indicator of the ES level D_{RICE} in the conditions of negative impact of energy generating facilities on the air it has been implemented a mutually agreed principle of operation of the components of the EPT, based on complex consideration of factors of technogenic load on the atmospheric air.

The results of the work are systematized with the help of the logical apparatus of SWOT-analysis. The practical significance of the results of the work is confirmed by the acts of implementation in production, economic, scientific and research activities of enterprises and organizations and in the educational process.

Key words: ecological safety, complex criteria-based assessment, power plant, reciprocating internal combustion engine, physical wear, exploitation process, exhaust gases, environmental protection technology, management system.

List of applicant's publications

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published (total – 70, from them: 5 monographs, 4 articles in the scientific professional editions of Ukraine which are a part of the international scientific and metric base Scopus, 27 articles in the scientific professional editions of Ukraine, 7 articles in scientific editions of Ukraine, 3 articles in scientific editions of other countries and 24 scientific works certifying approbation of dissertation materials, from them: 21 individually, 11 in foreign editions).

Monographs (*5 in total, of which: 1 in a foreign language, 1 published in the Republic of Poland, 1 – individually*):

1. Vambol S.O., Strokov O.P., Vambol V.V., **Kondratenko O.M.** Analysis of modern methods for improving the ecological safety: *Monograph*. Kharkiv. Style-Izdat. 2015. 212 p. ISBN 978-617-7256-09-9.

Carried out the analysis of literature sources, classification of the design of DPF and methods of their regeneration, the structure and description of the ESMS of exploitation process of the PP with RICE.

2. Vambol S., Vambol V., Suchikova Ya., Mishchenko I., **Kondratenko O.** Scientific and practical problems of application of ecological safety management systems in technics and technologies: *Monograph*. Opole. Academy of Management and Administration. 2017. 205 p. ISBN 978-83-62683-42-0.

Developed the concepts of methodological, technical and metrological bases and the results of criteria for complex assessment of efficiency of the ESMS of the PP with RICE exploitation process, as well as justification of the use of mathematical apparatus β-distribution to describe the processes ensuring of of ES level.

3. Vambol S.O., Vambol V.V., **Kondratenko O.M.**, Mishchenko I.V. Criteria-based assessment of level of ecological safety of process of exploitation of power plants : *Monograph*. Kharkiv. Style-Izdat. 2018. 320 p. ISBN 978-617-7555-60-4.

Developed the classifications of criterial mathematical apparatus for a complex assessment of the ES level of the PP with RICE exploitation process and ES factors, the source of which are such technical objects; mathematical models of efficiency and hydraulic resistance of the DPF of the diesel engine; problem statement and analysis of the results

of the application of the mathematical apparatus of β-distribution to describe the emission of PM in the EG flow of diesel engine; approaches to obtaining the individual regime values of the complex fuel-ecological criterion, the composition of its set of ES factors taken into account, the units of expression of monetary equivalents of the fuel and ecological components of the criterion; the results of application of the criterion for a diesel engine running on different exploitation models.

4. **Kondratenko O.M.** Metrological aspects of complex criteriabased assessment of ecological safety level of exploitation of reciprocating engines of power plants : *Monograph*. Kharkiv. Style-Izdat. 2019. 532 p. ISBN 978-617-7738-33-5.

The applicant personally owns all the results obtained in the monograph.

5. **Kondratenko O.M.,** Koloskov V.Yu., Derkach Yu.F., Kovalenko S.A. Physical and mathematical modeling of processes in particulate matter filter in practical application of criteria based assessment of ecological safety level: *Monograph*. Kharkiv. Style-Izdat. 2020. 522 p. ISBN 978-617-7912-64-3.

Developed the approaches to development of methodological, technical and metrological bases for physical and mathematical modeling of processes in the DPF and the implementation of bench motor tests; developed EPT from the negative impact of factors, the source of which is RICE in PP, as a technical basis for the relevant EPT; mathematical model of the impact of HR in the executive bodies of such EPT on the fuel efficiency of a diesel engine; development and production of the exhibition sample of DPF; problem statement and analysis of the results of practical application of the improved mathematical apparatus of the complex fuel-ecological criterion.

Articles in scientific professional publications of Ukraine, which are included in international scientific and metric databases (*total – 4*):

Kondratenko O.M., Strokov O.P., Vambol S.O., Avramenko A.M. Mathematical model of the efficiency of the diesel particulate filter, *Naukovyy visnyk Natsionalnogo hirnychoho universytetu*. 2015. № 6 (150). pp. 55–61 (Scopus).

Developed the mathematical model of DPF of diesel engine operational efficiency, analysis of the results of its application.

7. Vambol S., Vambol V., **Kondratenko O.**, Suchikova Ya., Hurenko O. Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arrangement of pollutants

neutralization system, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 3/10 (87). pp. 63–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102314. (Scopus).

Developed the planning, implementation and analysis of the results of experimental research on a motor bench with a autotractor diesel engine and determination of the physical content and values of the coefficients of the mathematical model of DPF of diesel engine operational efficiency, which take into account the temperature of EG at the inlet of the DPF and its placement in the exhaust manifold.

8. **Kondratenko O.**, Mishchenko I., Chernobay G., Derkach Yu., Suchikova Ya. Criteria based assessment of the level of ecological safety of exploitation of electric generating power plant that consumes biofuels, *2018 IEEE 3rd International International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS–2018): Book of Papers*, (10–14 September, 2018). Kharkiv. 2018. pp. 57-1–57-6. DOI: 10.1109/IEPS.2018. 8559570 (Scopus).

Developed and ranked the models of diesel engine exploitation process as part of electric power plant for power supply of industrial enterprise and private household, based on analysis of results of complex criteria-based assessment, and also analysis of energy, ecological and economic effects from conversion of such engine to consumption of alternative motor fuel of biological origin.

9. **Kondratenko O.**, Koloskov V., Kovalenko S., Derkach Y., Strokov O. Criteria based assessment of efficiency of conversion of reciprocating ICE of hybrid vehicle on consumption of biofuels, *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 – Conference Proceedings*. Kharkiv. 2020. pp. 177–182. DOI: 10.1109/KhPIWeek 51551.2020.9250118. (Scopus).

Ranked the known models of diesel engine exploitation process as part of the power plant for power supply units of the SES of Ukraine during the localization and elimination of the consequences of emergencies, based on the analysis of complex criteria-based assessment, as well as analysis of global trends and prospects for conversion of such engine to consumption of alternative motor fuel of biological origin.

Articles in scientific professional publications of Ukraine (*27 in total, 10 of them individually*):

10. Vambol S.O., Strokov O.P., **Kondratenko O.M.** Bench tests of the autotractor

diesel engine 2Ch10.5/12 on standardized cycles for definition of efficiency of operation of DPF. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Collection of scientific works. Series: Car and tractor construction*. 2014. № 10(1053). pp. 11–18.

Developed the planning, preparation, implementation and analysis of the results of bench motor tests of a diesel engine with a developed and manufactured by applicant DPF, which improves its environmental performance indicators.

11. **Kondratenko O.M.**, Strokov O.P., Vambol S.O. Estimation of influence of hydraulic resistance of DPF on fuel efficiency of the diesel engine. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Collection of scientific works. Series: Transport engineering*. 2014. № 14(1057), pp. 57–66.

Developed, applied and analyzed the results of application the mathematical model of influence of hydraulic resistance of DPF on indicators of fuel efficiency of the diesel engine as an indicator of ES level.

12. **Kondratenko O.M.**, Vambol S.O., Strokov O.P. Analysis of existing non-traditional DPFs for compliance with modern standards of ecological performance. *Scientific Journal «Environmental safety»*. 2014. № 1(17). pp. 25–30.

Developed the analysis of scientific and technical, patent, normative and reference literature on the design, principles of operation and efficiency of DPFs of diesel engines, which improve their environmental performance indicators.

13. **Kondratenko O.M.** Mathematical model of hydraulic resistance of particulate matter filter of diesel engine. Part 1: tuning coefficient. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Collection of scientific works. Series: Mathematical modeling in engineering and technology*. 2014. № 18(1061). pp. 68–80.

Developed the mathematical model of HR of DPF of the diesel engine as executive body of system of maintenance of ES level, developed, made and experimentally investigated by the applicant, and definition of physical maintenance and values of its tuning coefficient.

14. **Kondratenko A.N.** Mathematical model of hydraulic resistance of particulate matter filter of diesel engine. Part 2: temperature coefficient. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Collection of scientific works. Series: Mathematical modeling in engineering and technology*. 2014. № 18(1061). pp. 80–89.

Developed the method of determining the physical content and values of the temperature coefficient of the mathematical model of the HR of DPF of diesel engine, developed, manufactured and experimentally studied by the applicant, as the executive body of the ES level assurance system.

15. **Kondratenko O.M.**, Strokov O.P., Vambol S.O., Semykin V.M. Regeneration of diesel particulate matter filters. *Internal combustion engines*. 2014. № 1. pp. 89–95.

Developed the analysis of literature sources on the construction of the classification of methods and means of implementation of the process of regeneration of DPF of RICE as executive bodies of the assurance system of ES level.

16. **Kondratenko A.N.**, Strokov O.P., Vambol S.A., Semykin V.M. Regeneration of diesel particulate matter filter with bulk from natural zeolite. *Internal combustion engines*. 2014. № 2. pp. 76–81.

Developed the analysis of the design of the DPF of diesel engine, developed by the manufactured and experimentally studied by the applicant, in relation to its place in the classification of methods and means of implementation of the process of regeneration of DPFs of RICE.

17. **Kondratenko O.M.**, Strokov O.P., Vambol S.O., Marakhovskyy V.P. Ways of regeneration of the modular DPF of the diesel engine with bulk from natural zeolite as means of increase of ecological safety of exploitation process of transport. *Scientific journal «Ecological safety»*. 2014. № 2(18). pp. 107–113.

Developed the analysis of features, advantages and disadvantages of ways of functioning of means of realization of process of regeneration of DPF of diesel engines which are presented in the classification developed by applicant.

18. **Kondratenko O.M.**, Strokov O.P., Vambol S.O., Bgantsev V.M. Features of determination of mass emission of particulate matters in diesel exhaust gases. *Automotive transport*. 2014. Issue 35. pp. 100–105.

Developed the analysis of the main methodological features of the process of experimental obtaining of indicators of the ES level of exploitation process of RICE in the PP and identified a way to overcome the identified objective difficulties.

19. **Kondratenko A.N.** Mathematical model of hydraulic resistance of particulate matter filter of diesel engine. Part 3: arrangement coefficient. *Bulletin of the National*

Technical University «KhPI». Collection of scientific works. Series: Mathematical modeling in engineering and technology. 2015. № 6(1115). pp. 29–40.

Developed the method of determining the physical content and values of the arrangement coefficient of the mathematical model of the HR of DPF of diesel engine, developed, manufactured and experimentally studied by the applicant, as the executive body of the ES level assurance system.

20. **Kondratenko A.N.** Mathematical model of hydraulic resistance of particulate matter filter of diesel engine. Part 3: time coefficient. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Collection of scientific works. Series: Mathematical modeling in engineering and technology*. 2015. № 18(1127). pp. 53–61.

Developed the method of determining the physical content and values of the time coefficient of the mathematical model of the HR of DPF of diesel engine, developed, manufactured and experimentally studied by the applicant, as the executive body of the ES level assurance system.

21. **Kondratenko O.M.**, Strokov O.P., Vambol S.O. Regeneration of diesel particulate matter filters as the aspect of ecological safety of vehicle exploitation process. Part 2. *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University*. 2015. Issue 3(92). Part 1. pp. 137–143.

Developed the analysis of design solutions and working processes of means of realization of methods of realization of process of regeneration of DPF of diesel engines which are presented in the classification developed by applicant.

22. Vambol S.O., Strokov O.P., **Kondratenko O.M.**, Vambol V.V. Methodological approach to building a management system for environmental safety of operation of power plants. *Internal combustion engines*. 2015. № 1. pp. 48–52.

Developed the structure of the ESMS structure of the PP with RICE exploitation process, its functions are described and the content of its stages and levels is revealed.

23. **Kondratenko O.M.**, Strokov O.P., Vambol S.O. Regeneration of diesel particulate matter filters as the aspect of ecological safety of vehicle exploitation process. Part 3. *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University*. 2015. № 4(93). pp. 96–102.

Developed the analysis of possible variants of practical realization of methods and

means of realization of process of regeneration of DPF of the diesel engine developed manufactured and experimentally investigated by the applicant, according to the corresponding classification developed by him.

24. **Kondratenko A.N.**, Vambol S.A., Vambol V.V. Functions of the ecological safety management system for the exploitation process of power plants. *Scientific Bulletin of KhNADU*. 2015. Issue 69. pp. 95–100.

Developed the definition and description of functions of levels and stages of ESMS of exploitation process of PP with RICE which developed by the applicant.

25. **Kondratenko A.N.** The concept of assessing the effectiveness of ecological safety management of the exploitation process of power plants with reciprocating ICE. *Internal combustion engines*. 2016. № 2. pp. 68–72.

Developed the concept for assessing the effectiveness of the management of the ES level of the exploitation process of power plants with RICE.

26. Vambol S.O., **Kondratenko O.M.**, Vambol V.V., Mietielov O.V. Methodological basics of criterial integrated assessment of ecological safety management system functioning efficiency of power plants with piston ICE exploitation process, *Bulletin of M. Ostrogradsky Kremenchuk National University*. 2016. № 6(101). Part 1. pp. 104–110.

Developed the description of the methodological basis of the concept of assessing the effectiveness of the management of the ECB level of the exploitation process of the PP with RICE, developed by the applicant.

27. Vambol S.O., **Kondratenko O.M.**, Mietielov O.V. Methodological bases of criteria-based complex ecological and economic assessment of efficiency of exploitation process of power plants with piston ICE. *Automotive transport*. 2016. Issue 2. pp.139–149.

Developed the analysis of forms and methods of assessment of the efficiency of management of ES level of exploitation process of the PP with RICE, according to the methodological bases of the relevant concept developed by the applicant.

28. **Kondratenko O.M.** Selection of criterial apparatus for complex assessment of ecological safety level of exploitation process of power plants. *Scientific and technical journal «Technogenic and ecological safety»*. 2018. Issue 3(1/2018). pp. 75–84. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.1182858.

Developed the analysis, description, ordering in the form of classification and prio-

ritization of known mathematical apparatuses that are suitable for a complex assessment of the ES level of the exploitation process of the PP with RICE and the efficiency of the relevant ESMS.

29. **Kondratenko O.M.** Investigation of relationship between coefficients of operation efficiency of DPF of diesel ICE with using of conversion formula. Part 1: Particulate matter emission and opacity. *Internal combustion engines*. 2018. № 1. pp. 49–55. DOI: 10.20998/0419-8719.2018.1.09.

Developed the statement of the problem, calculations and analysis of their results on the features of the application of the known formula for recalculation of some indicators of the ES level of the exploitation process of the PP with RICE in others – opacity of exhaust gases in the mass hourly PM emissions.

30. Strokov O.P., **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Mishchenko I.V. Description of mass hourly emissions of particulate matter of diesel engine by beta-distribution with taking into account the passport accuracy of gas analyzer. *Internal combustion engines*. 2019. № 1. pp. 49–62. DOI: 10.20998/0419-8719.2019.1.09.

Developed the problem statement and analysis of the results of the application of the mathematical apparatus of β-distribution to describe the PM emission in the flow of EG of diesel engine as the indicator of the ES level of the exploitation process of the PP with RICE.

31. **Kondratenko O.M.**, Chernobay G.O., Derkach Ju.F., Kovalenko S.A. Features of determination of the efficiency of devices for improvement of ecological safety level of vehicles with reciprocating ICE exploitation. *Internal combustion engines*. 2019. № 2. pp. 36–44. DOI: 10.20998/0419-8719.2019.2.07.

Developed the problem statement, calculations and analysis of their results on the features of the application of the known formula for recalculation of some indicators of the ES level of the exploitation process of the PP with RICE in others – the concentration of unburned hydrocarbons in EG in the mass hourly PM emissions.

32. **Kondratenko O.M.** Taking into account the emissions of CO_2 as a toxic pollutant and as a greenhouse gas in fuel and ecological complex criteria-based assessment of diesel-generator operation process. *Scientific and technical journal «Technogenic and ecological safety»*. 2019. № 6(2/2019). pp. 12–23. DOI: 10.5281/zenodo.3558960.

Developed the approach and corresponding methods for expanding the range of ES factors taken into account, the source of which is the RICE in the PP, a complex fuel-ecological criterion on the example of carbon dioxide as a pollutant and as a greenhouse gas, such an assessment was made and analyzed its results.

33. **Kondratenko O.M.** Assessment of ecological and chemical efficiency of exploitation process of reciprocating ICE of vehicle with concideration of emission of sulphur oxides, benzo(a)pyrene and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Scientific and technical journal «Technogenic and ecological safety»*. 2020. № 7(1/2020). pp. 38–50. DOI: 10.5281/zenodo.3780076.

Developed the method for assessment of air pollution by sulfur oxides, polycyclic aromatic hydrocarbons, including benzo(a)pyrene, with the EG flow of diesel engine, analysis and improvement of the mathematical apparatus of the integrated index of environmental-chemical assessment, the results of its application are analyzed.

34. **Kondratenko O.M.** Assessment of fuel and ecological efficiency of exploitation process of reciprocating ICE of power plants with consideration of emission of benzo(a)pyrene and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Internal combustion engines*. 2020. № 1. pp. 52–59. DOI: 10.20998/0419-8719.2020.1.07.

Developed the approach and the corresponding method for expansion of the nomenclature of the considered ES factors which source is RICE in structure of PP, which complex fuel-ecological criterion considering, namely polycyclic aromatic hydrocarbons and benzo(a)pyrene, such estimation is carried out and its results are analyzed.

35. **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Derkach Yu.F., Kovalenko S.A. Criteria-based assessment of fuel and ecological efficiency of exploitation process of reciprocating ICE of power plants considering of emission of sulfur oxides. *Internal combustion engines*. 2020. № 2. pp. 46–57. DOI: 0.20998/0419-8719.2020.2.07.

Developed the approach and the corresponding method for expansion of the nomenclature of the considered ES factors of which source is the RICE as part of PP, which the complex fuel-ecological criterion considering, namely oxides of sulfur, such estimation is carried out and its results are analyzed.

36. **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Kovalenko S.A., Derkach Yu.F., Botsmanovska O.S., Podolyako N.M. Determination of emissions of vapor of technic

flammable liquids from enterprise for their storing and distribution and rational ajustments of their breathing valves. *Scientific and technical journal «Technogenic and ecological safety»*. 2020. № 8(2/2020). pp. 17–31. DOI: 10.5281/zenodo.4300753.

Developed the development of the approach and corresponding methods to the assessment of emissions of vapors of technical combustible liquids in storage caused by the phenomena of large and small respiration of reservoirs, the ecological, economic and energy effects of utilization of such emissions are estimated.

Articles in scientific publications of Ukraine (*total – 7, of which 1 individually*):

37. Vambol S.O., **Kondratenko O.M.** Calculated substantiation of choice of units of monetary equivalents of complex fuel and ecological criteria components. *Scientific and technical journal «Technogenic and ecological safety»*. 2017. № 2. pp. 53–60. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.1182890.

Developed the justification for the choice of units of expression for the fuel and ecological components of the complex fuel-ecological criterion, which have monetary equivalents.

38. **Kondratenko O.M.**, Marchuk R.A., Vorobyova D.V. Determining the ponderability of fuel consumption in assessing the level of fuel and ecological efficiency of the car exploitation process for different types of motor fuel. *Proceedings of V All-Ukrainian scientific-practical conference of young scientists and students «Energy security and energy efficiency in transport»* (November 29, 2018, NAU, Kyiv). 2018. pp. 18–22.

Developed the approach to determining the physical content and values of the weight of the fuel component of the complex fuel-ecological criterion, analysis of the results of its application.

39. **Kondratenko O.M.**, Kovalenko S.A. Assessment of fuel and ecological efficiency of the use of DPF for diesel engine with taking into account its hydraulic resistance. *Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference «Safety of life in transport and production – education, science, practice»* (September 11–14, 2019, KhSMA, Kherson). 2019. pp. 219–224.

Developed the approach and on its basis the method of assessment of influence of HR of DPF which is equipped with the diesel engine on indicators of ES level of its exploitation process on the basis of the complex fuel-ecological criterion improved by the

applicant of the mathematical apparatus.

40. **Kondratenko O.M.**, Botsmanovska O.S., Podolyako N.M., Kapinos Ye.V. Taking into account the emission of motor fuel vapor and carter gas aerosol as pollutants in the criteria-based assessment of the ecological safety level of exploitation process of power plants with ICE. *«Tools and mechanisms for modernization of scientific and educational processes»: Proceedings of the scientific-practical conference* (December 20-21, 2019, Lviv). Kherson. Young Scientist Publishing House. 2019. pp. 92–97.

Developed the approaches and based on them built methods for assessment of values of mass hourly emissions of motor fuel vapor caused by the phenomena of large and small respiration of reservoirs and aerosol of crankcase gases as pollutants in the criteria-based assessment of the ES level of the PP exploitation process with RICE, as well as analysis of their application.

41. **Kondratenko O.M.**, Kovalenko S.A. Substantiation of choice of rational units of expression of monetary components of the complex fuel-ecological criterion [Electronic resource]. *Electronic collection of scientific works «E-CONOMICS»*. 2019. № 1(3). pp. 114–118. URL: http://e-conomics.hpi.kh.ua/index.php/e-conomics/article/view/86/70.

Developed the approach and the corresponding method of taking into account the phenomenon of inflation when calculating the values of fuel and ecological components of the complex fuel-ecological criterion, which have monetary equivalents, the choice of units and expression for which is chosen by the applicant's approach.

42. **Kondratenko O.M.** Assessment of fuel-ecology effect of using of alternative motor fuel for reciprocating ICE of hybrid vehicle. *Proceedings of the International Scientific Symposium SDEV'2020 «Sustainable Development – Status and Prospects»* (February 19–22, 2020, Lviv Polytechnic National University, Lviv). 2020. pp. 177–180.

Developed the approach and corresponding methods for ranking the known steady standardized test cycles of diesel generator that consumes both traditional and alternative motor fuel, as exploitation models of vehicle with a hybrid drive of the engine based on the mathematical apparatus of the complex fuel-ecological criterion.

43. **Kondratenko O.M.**, Kovalenko S.A., Botsmanovska O.S., Podolyako N.M. Determination of reference values of complex fuel-ecological criterion and ponderability of its fuel component. *Proceedings of XVIII International Scientific and Technical*

Conference «Problems of Environmental Safety» (October 6–8, 2020, KrNU, Kremenchuk). 2020. pp. 60–65.

Developed the approach and corresponding methods for determining the physical content and values of reference values of the ponderability of the fuel component of complex fuel-ecological criterion as reference points of the psychophysical scale of the partial desirability function and the analysis of the results obtained with their help.

Articles in scientific journals of other countries (*3 in total*):

44. **Kondratenko A.N.**, Burmenko A.A. Exhaust gas sampling system of a diesel engine test bench as the object of metrological research. *Proceedings of XV International Scientific and Technical Conference of students, graduate students and young scientists «Research and development in the field of mechanical engineering, energy and management»* (April 23–24, 2015, EI GSTU named after P.O. Sukhoi, Gomel). 2015. pp 202–205 (Republic of Belarus).

Developed the analysis of the features of the complex of measuring equipment of the motor test bench for experimental obtaining of the ES level indicators of the diesel engine exploitation process in the light of metrological support of the implementation of complex criteria-based assessment of such level.

45. Vambol S.O., **Kondratenko O.M.**, Dejneko N.V. Engine test bench as a sourse of danger factors in experimental researches. *Bulletin of the Kokshetau Technical Institute of the Committee for Emergencies of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan*. № 3(19). 2015. pp. 7–12 (Republic of Kazakhstan).

Developed the analysis of the features of the components of the motor test bench for experimental obtaining indicators of the ES level of the diesel engine exploitation process in the light of the safety of the researcher in obtaining the components of the initial data set for a cpmplex criteria-based assessment of this level.

46. **Kondratenko O.M.**, Achkasova M.A., Polikanova O.V. Main results of complex criterial fuel and ecological assessment of diesel engine 2Ch10.5/12 for emergency and rescue vehicles. *Proceedings of V International Scientific and Practical Conference «Problems of Civil Protection: Management, Prevention, Rescue and Special Works»* (March 17, 2017, RSU KTI KCHS MIA RK, Kokshetau). 2017. pp. 146–150 (Republic of Kazakhstan).

Developed the calculated study of the ES level indicators of the exploitation process of the autotractor diesel engine for the case of its application as a part of emergency rescue units with the help of the complex fuel-ecological criterion improved by the applicant of the mathematical apparatus.

Scientific works that certify the approbation of the dissertation materials (*total – 24, of which 8 individually, 21 in the materials of international conferences and congresses, 6 in the materials of foreign conferences*):

47. **Kondratenko A.N.** Using of DPF of diesel engines as spark arresters of the exhaust system of vehicle. *«Emergency situations: theory, practice, innovation» materials of the International scientific-practical conference* (May 22–23, 2014, GSTU im. P.O. Sukhoi, Gomel). 2014. pp. 221–222.

The applicant personally performed all the research reflected in the publication.

48. **Kondratenko A.N.**, Strokov A.P., Vambol S.A., Avramenko A.M. Regeneration of diesel particulate matter filter with bulk of natural zeolite. *Abstracts of XIX International Congress of Engine Builders* (Sept. 6–10, 2014, Kharkiv–Kobleve). 2014. p. 59.

Developed the analysis of the place of DPF, developed, manufactured and tested by the applicant, in the classification of methods and means of implementation of the process of regeneration of such filters.

49. **Kondratenko O.M.**, Ramanov B.B. Actual aspects of technogenic and ecological safety of the process of regeneration of DPF of diesel engines. *International scientific-practical conference «Problems of environmental safety»: Collection of abstracts* (October 8–9, 2014, KrNU named after M. Ostrogradsky, Kremenchuk). 2014. p. 10.

Developed the analysis of literature data on aspects of technogenic and ecological safety of diesel fuel regeneration process.

50. Stel'makh H.S., Vambol' S.O., **Kondratenko O.M.** Development of scientific thought and global trends in questions of ensure compliance with legislative established norms of vehicle exhaust gas toxity between 1991 and 2010. *Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference «The Role of Local Air Defense and Fire Protection in the Years of the Great Patriotic War»* (March 27, 2015, KTI KES MIA RK, Kokshetau). 2015. pp. 238–240.

Developed the analysis of literature data on general trends in the ecologization of

the exploitation process of the PP with RICE for the last 15 years.

51. Stel'makh H.S., Vambol' S.O., **Kondratenko O.M.** Structure of vehicle fleet of Ukraine as a factor of ecological safety. *Collection of materials of IX Scientific-practical conference of young scientists: cadets (students), students of magistracy and adjuncts (graduate students) «Ensuring life safety: problems and prospects»*. Part 2 (2–3 April 2015, GUO KII EMERCOM of the Republic of Belarus, Minsk). 2015. pp. 140–141.

Developed the analysis of literature data on the structure of the vehicle fleet of Ukraine as the ES factor.

52. Vambol S.A., Strokov A.P., VambolV.V., **Kondratenko A.N.** Methodological approach to development of ecological safety management system for the exploitation process of power plants. *XX International Congress of Engine Builders: Abstracts* (September 5–10, 2015, Kharkiv – Kobleve). 2015. p. 45.

Developed the description of the methodological approach developed by the applicant to the development of ESMS of theexploitation process of the PP with RICE.

53. **Kondratenko A.N.**, Vambol S.A., Avramenko A.M. Mathematical model of IPMash particulate matter filter efficiency in real operating conditions. *Proceedings of 17th All-Ukrainian scientific-practical conference of rescuers «Current state of civil defense of Ukraine: prospects and ways to the European space», held within the XIV International Exhibition Forum «Defense Technologies / FireTech–2015»* (September 22–23, 2015, IDUZC, Kyiv). 2015. pp. 194–196.

Developed the description of the mathematical model of efficiency of operation of DPF rhat developed by the applicant, developed, made and tested by the applicant, in real conditions of operation.

54. **Kondratenko O.M.**, Skrynnyk K.V., Gurbanov R. Main pollutants in diesel exhaust gases. *XII International Scientific and Practical Conference «Problems of Environmental Safety»: Collection of abstracts* (October 6–8, 2015, KrNU named after M. Ostrogradsky, Kremenchuk). 2015. p. 25.

Developed the analysis of literature data on the structure of the structure of ensemble of legally regulated pollutants in the EG of diesel engines.

55. **Kondratenko A.N.** Mathematical model of hydraulic resistance of the diesel DPF in real operating conditions. *«Applied aspects of technogenic and ecological safety»:*

collection of materials of the International scientific-practical conference (December 4, 2015, NUCDU, Kharkiv). 2015. pp. 66–67.

Developed the description of the mathematical model of HR of the DPF that developed by the applicant, developed, manufactured and tested by the applicant, in real operating conditions.

56. Vambol S.A., **Kondratenko A.N.** Aspects of fire and explosive safety of DPF regeneration process. *Materials of the International Scientific and Practical Conference «Emergency Situations: Theory, Practice, Innovation» «Emergency Situations – 2016»* (May 19–20, 2016, GUO Gomel Engineering Institute, Gomel). 2016. pp. 172–174.

Developed the analysis of literature data on aspects of fire and explosion safety of the process of regeneration of DPF of diesel engines.

57. **Kondratenko A.N.** The concept of assessing the effectiveness of ecological safety management of the exploitation process of power plants with reciprocating ICE. *XXI International Congress of Engine Builders: Abstracts* (September 5–10, 2016, Kharkiv – Kobleve). 2016. p. 37.

The applicant personally performed all the research reflected in the publication.

58. **Kondratenko O.M.**, Mietielov V.O. The concept of criteria-based assessing the effectiveness of measures to improve the ecological safety of transport. *XIII International Scientific and Practical Conference «Problems of Ecological Safety»: Collection of abstracts* (October 12–14, 2016, KrNU nmd aft M. Ostrogradsky, Kremenchuk). 2015. p. 54.

Developed and described the concept of criteria-based assessment of the effectiveness of measures to increase the ES level in the process of transport exploitation.

59. Vambol S.O., Mishchenko I.V., **Kondratenko A.N.** Background of mathematical tools beta distribution application to certain characteristics of aerosol diesel exhaust gases dispersed phase. *Proceedings of All-Ukrainian scientific-practical conference «Problems of technogenic and ecological safety: education, science, practice»* (November 24, 2016, NUCDU, Kharkiv). 2016. pp. 23–25.

Developed the substantiation of expediency of application of mathematical apparatus of beta-distribution for description of characteristics of dispersed phase of aerosol of EG of diesels engine.

60. **Kondratenko O.M.**, Semchuk V.M. Analysis of criterial apparatuses for asses-

sing the level of ecological safety of the exploitation process of vehicles. *Collection of abstracts of XV International Scientific and Practical Conference «Problems of Ecological Safety»* (October 11–13, 2017, KrNU named after M. Ostrogradsky, Kremenchuk). 2017. p. 122.

Developed and analysis of literature sources on the features of the existing criterial apparatus for assessing the ES level of the exploitation process of vehicles with RICE.

61. **Kondratenko O.M.** Investigation of relationship between coefficients of operation efficiency of DPF of diesel ICE with using of conversion formula. Part 1: Particulate matter emission and opacity. *XXIII International Congress of Engine Builders: Abstracts* (September 5–10, 2016, Kharkiv – Kobleve). 2016. pp. 47–48.

The applicant personally performed all the research reflected in the publication.

62. Vambol S.O., Bohdanov I.T., Vambol V.V., **Kondratenko O.M.**, Suchikova Y.O. Selection of obtaining method of criterion`s individual regime values of ecological safety level of power plants with engines exploitation process. *5th International Congress «Sustainable Development: Protecting the Environment. Energy saving. Balanced nature management»: Collection of materials* (September 26–29, 2018, Lviv Polytechnic National University, Lviv). 2018. p. 34.

Developed the approach and the corresponding method of obtaining the individual regime values of the complex fuel-ecological criterion as the indicator of the ES level of the PP with RICE exploitation process.

63. Strokov O.P., **Kondratenko O.M**, Koloskov V.Yu, Mishchenko I.V. Description of mass hourly emissions of particulate matter of diesel engine by beta-distribution with taking into account the passport accuracy of gas analyzer. *XXIV International Congress of Engine Builders: Abstracts* (September 2–7, 2019, Kharkiv – Kobleve). 2019. pp. 44–45.

Developed the problem statement, formation of a set of initial data and analysis of calculations on the topic of publication.

64. **Kondratenko O.M** The results of the ecological and chemical evaluation of the exploitation process of the 2Ch10.5/12 diesel engine on the test cycle ESC. *Proceedings of International scientific-practical conference «Problems of technogenic and ecological safety: education, science, practice»* (November 21–22, 2019, NUCDU, Kharkiv). 2019.

pp. 126–128.

The applicant personally performed all the research reflected in the publication.

65. **Kondratenko O.M.**, Gaponova A.S., Muzyka B.V., Verzun V.V., Podolyako N.M. Determination of influence of the emission of fuel vapour on fuel-ecological performance of diesel engine. *Proceedings of XI International Scientific and Methodological Conference, 138th International Scientific Conference of the European Association of Security Sciences (EAS) «Human Security in Modern Conditions»* (December 5–6, 2019, NTU «KhPI», Kharkiv). 2019. pp. 188–190.

Developed the approach and the corresponding methodology for determining the quantitative and qualitative parameters of motor fuel vapor emissions as the pollutant and taking into account this ES factor of exploitation process of the PP with RICE in the criteria-based assessment of its level.

66. **Kondratenko O.M.**, Gaponova A.S., Muzyka B.V., Verzun V.V., Podolyako N.M. Taking into account the emission of carter gases in criteria-based assessment of ecological safety level of reciprocating ICE exploitation process. *Proceedings of III International Scientific and Technical Conference «Actual problems of energy and resource conservation and ecology»* (December 11–12, 2019, OSADA, Odessa). 2019. pp.122–123.

Developed the approach and the corresponding methodology for determining the quantitative and qualitative parameters of carter gas emissions as the pollutant and taking into account this ES factor of exploitation process of the PP with RICE in the criteria-based assessment of its level.

67. **Kondratenko O.M.** Determination of CO_2 emission from reciprocating internal combustion engine of emergency and rescue vehicle as an ecological safety factor. *«Ensuring the safety of life: problems and prospects»: Collection of materials of XIV International scientific-practical conference of cadets (students), listeners and adjuncts (graduate students, applicants)*, in 2 volumes, Vol. 1 (08–09 April 2020, UGZ of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, Minsk). 2020. pp. 296–298.

The applicant personally performed all the research reflected in the publication.

68. **Kondratenko O.M.** Selection of rational ecological safety structure of exploitation process model of emergency and rescue vehicle with reciprocating ICE. *Proceedings of International Scientific and Practical Conference «Problems of Emergency Situation»*

(PES – 2020) (May 20, 2020, NUCDU, Kharkiv). 2020. pp. 363–365.

The applicant personally performed all the research reflected in the publication.

69. **Kondratenko O.M.** Determination of fuel-ecological efficiency of exploitation process of diesel ICE of power plants with considering of emission of benzo(a) pyrene and polycyclic aromatic hydrocarbons in exhaust gas flow. *XXV International Congress of Engine Builders: Abstracts* (September 8–11, 2020, Kharkiv –Kobleve). 2020. p. 29.

The applicant personally performed all the research reflected in the publication.

70. **Kondratenko O.M.**, Kovalenko S.A., Tkachenko O.O., Kapinos Ye.V. Some aspects of complex criteria-based assessment of the level of ecological safety of the exploitation process of reciprocating internal combustion engines. *Abstracts of III International Scientific and Practical Conference «Science and education: problems, prospects and innovations»* (29 – 31 December 2020, Kyoto, Japan). 2020. pp. 56–66

Developed the approach and corresponding methods for determining quantitative and qualitative parameters of polycyclic aromatic hydrocarbon emissions, including benzo (a)pyrene, as well as reference points for the ponderability of the fuel component of complex fuel-ecological criterion for the psychophysical scale of partial desirability function.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ 2
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 59
ВСТУП 63
1 СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ РОБОТИ НЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ ЩОДО ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ 78
1.1 Загальні міркування 78
1.2 Аналіз науково-технічної, довідникової, нормативної та патентної літератури за темою дисертаційного дослідження 79
1.3 Структура парку автотранспортних засобів України як чинник екологічної небезпеки 83
1.4 Основні проблеми забезпечення виконання законодавчо встановлених норм показників рівня екологічної безпеки енергоустановок з поршневим ДВЗ в Україні 85
1.5 Визначення поняття «безаварійна експлуатація» як частини життєвого циклу енергоустановки з поршневим ДВЗ 87
1.6 Системний аналіз організації, складу та технічних рішень технологій захисту навколишнього середовища при безаварійній експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу 88
1.6.1 Стратегії досягнення оптимальних екологічних показників дизелів 88
1.6.2 Повний комплекс засобів для очищення відпрацьованих газів дизелів від нормованих полютантів 89
1.6.3 Компонування виконавчих пристроїв у системі зниження токсичності відпрацьованих газів дизелів 90

1.7 Класифікація чинників екологічної небезпеки, джерелом яких є поршневий ДВЗ в складі енергоустановки ……. 92
1.8 Аналіз впливу споживання моторного палива поршневим ДВЗ на чинники екологічної небезпеки процесу експлуатації енергоустановки ……... 94
1.9 Характеристика особливостей відпрацьованих газів дизельного двигуна як чинника негативного впливу на складові довкілля …….. 101
1.10 Класифікація способів та засобів зниження токсичності відпрацьованих газів дизельних двигунів від твердих частинок …… 106
1.11 Класифікація способів і засобів очищення відпрацьованих газів дизельних двигунів від твердих частинок ……. 109
1.11.1 Механічні пристрої і системи очищення відпрацьованих газів дизельних двигунів від твердих частинок …… 113
1.11.2 Хімічні пристрої і системи очищення відпрацьованих газів дизельних двигунів від твердих частинок ……. 117
1.12 Класифікація способів та засобів реалізації процесу регенерації фільтрів твердих частинок дизельних ДВЗ …..…… 120
1.12.1 Передумови побудови класифікації ……... 120
1.12.2 Основний принцип класифікації способів і засобів здійснення процесу регенерації фільтрів твердих частинок …… 123
1.12.3 Класифікація способів і засобів здійснення процесу регенерації фільтрів твердих частинок I роду …….. 125
1.12.4 Класифікації способів і засобів здійснення процесу регенерації фільтрів твердих частинок II роду ……. 135
1.13 Висновки по розділу 1 …… 137
2 НАУКОВІ ЗАСАДИ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ НА АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ……... 143
2.1 Загальні міркування …… 143

2.2 Розробка класифікації критеріальних математичних апаратів для оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ 144
2.3 Аналіз особливостей роботи відомих підходів до здійснення комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ ... 152
2.4 Визначення пріоритетності застосування критеріїв 157
2.5 Покоління критеріїв для комплексного оцінювання показників рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ 159
2.6 Концепція вдосконалення математичного апарату і методики застосування комплексного паливно-екологічного критерію 160
2.7 Вдосконалення базового варіанту комплексного паливно-екологічного критерію 161
2.7.1 Отримання порежимних значень комплексного паливно-екологічного критерію 162
2.7.2 Отримання середньоексплуатаційних значень комплексного паливно-екологічного критерію 167
2.7.3 Вибір складу набору врахованих чинників комплексного паливно-екологічного критерію 173
2.7.4 Вибір одиниць вираження складових комплексного паливно-екологічного критерію, що мають вартісні еквіваленти, та врахування явища інфляції 178
2.8 Висновки по розділу 2 182
3 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ 185
3.1 Загальні міркування 185
3.2 Розробка індикатора екобезпеки поршневого ДВЗ і його технології захисту навколишнього середовища 187

3.3 Визначення вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію у якості показника вагомості витрат палива . 189
3.3.1 Постановка задачі 189
3.3.2 Методика розрахункового оцінювання вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію 190
3.3.3 Результати оцінювання вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію 195
3.4 Розширення номенклатури врахованих математичним апаратом комплексного паливно-екологічного критерію чинників екологічної небезпеки відповідно до розробленого класифікатора 198
3.4.1 Загальний підхід до врахування викиду полютанта з потоком відпрацьованих газів при комплексному критеріальному оцінюванні 198
3.4.2 Врахування викидів оксидів сірки з потоком відпрацьованих газів 200
3.4.3 Врахування викидів діоксиду вуглецю як полютанта з потоком відпрацьованих газів 201
3.4.4 Врахування викидів діоксиду вуглецю з потоком відпрацьованих газів як парникового газу 201
3.4.5 Врахування викидів бенз(а)пірену та поліциклічних ароматичних вуглеводнів з потоком відпрацьованих газів і застосування вдосконаленого математичного апарату інтегрального індексу екологохімічної оцінки 204
3.4.6 Врахування викидів аерозолю картерних газів 207
3.4.7 Врахування викидів випарів моторного палива, спричинених явищами великого та малого дихання резервуарів 209
3.4.8 Врахування викидів пари води у потоці відпрацьованих газів . 211
3.4.9 Врахування викидів теплової енергії 213
3.5 Аналіз поточного стану врахованості чинників екологічної небезпеки при комплексному критеріальному оцінюванні 216

3.6 Визначення еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію як реперних точок психофізичної шкали відповідної йому часткової функції бажаності 222
3.6.1 Аналіз математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона 222
3.6.2 Отримання еталонних значень екологічних показників роботи поршневого ДВЗ 225
3.6.3 Результати попередніх розрахунків та їх аналіз 226
3.6.4 Результати основних розрахунків та їх аналіз 233
3.7 Визначення еталонних значень вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію 237
3.8 Отримання значень інтегративного показника рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації поршневого ДВЗ в енергоустановці на основі узагальненої функції бажаності з урахуванням значень комплексного паливно-екологічного критерію 239
3.9 Висновки по розділу 3 242
4 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ 245
4.1 Загальні міркування 245
4.2 Передумови розробки системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ 246
4.3 Побудова системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ на етапі його життєвого циклу «безаварійна експлуатація» 250
4.4 Функції системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ та її складових 257

4.5 Методологічні основи комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ у структурі системи управління …….. 262
4.5.1 Концепція створення та застосування критерію ефективності функціонування системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ ……. 262
4.5.2 Ієрархічне місце критеріального математичного апарату в структурі системи управління екологічною безпекою ……. 268
4.6 Система моніторингу роботи системи управління екологічною безпекою ……..... 272
4.7 Висновки по розділу 4 …….. 275
5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСНИХ СИСТЕМ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ І ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ РОБОТІ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ …….. 277
5.1 Загальні міркування …….. 277
5.2 Побудова схеми технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу поршневих ДВЗ у складі енергоустановки на атмосферне повітря ……..... 278
5.3 Описання схеми технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу поршневих ДВЗ у складі енергоустановки на атмосферне повітря ……. 280
5.4 Ланцюги та ланки технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу поршневого ДВЗ у складі енергоустановки … 282
5.5 Описання конструкції та принципу роботи фільтра твердих частинок дизельного ДВЗ нетрадиційної конструкції як виконавчого пристрою технології захисту навколишнього середовища …… 289
5.5.1 Визначення поняття «фільтр твердих частинок» …… 290

5.5.2 Фільтр твердих частинок нетрадиційної конструкції з насипкою з природного цеоліту в сітчастих касетах 295
5.6 Способи і засоби здійснення процесу регенерації I і II роду розробленого фільтра твердих частинок з цеолітовою насипкою у сітчастих касетах 300
5.7 Математична модель гідравлічного опору фільтра твердих частинок дизельного ДВЗ в реальних умовах експлуатації 306
5.8 Математична модель ефективності роботи розробленого фільтра твердих частинок 312
5.9 Математична модель впливу гідравлічного опору розробленого фільтра твердих частинок на паливну економічність поршневого ДВЗ 314
5.10 Побудова комплексу з математичних моделей функціонування фільтра твердих частинок дизеля як виконавчого пристрою технології захисту навколишнього середовища 320
5.11 Вдосконалення конструкції та принципу роботи модульного фільтра твердих частинок нетрадиційної конструкції з насипкою з природного цеоліту у сітчастих касетах 324
5.12 Висновки по розділу 5 327
6 РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОЮ ЕКСПЛУАТАЦІЄЮ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ ВІДПОВІДНО ДО ІНТЕГРАТИВНОГО ПОКАЗНИКА ЕФЕКТИВНОСТІ 329
6.1 Загальні міркування 329
6.2 Алгоритм управління рівнем екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу 330
6.3 Практична реалізація Кроків № 10 і № 11 алгоритму управління 334
6.4 Практична реалізація Кроку № 9 алгоритму управління 340
6.5 Практична реалізація Кроку № 12 алгоритму управління 348

6.6 Практична реалізація зворотного зв'язку в алгоритмі управління ….. 355
6.7 Висновки по розділу 6 …… 357
ВИСНОВКИ …….. 359
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ……..…… 363
Додаток А SWOT-АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ …….. 388
Додаток Б МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРІАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОЦЕСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВЗ ……..... 394
Б.1 Метрологічні аспекти застосування формули перерахунку показників димності й токсичності відпрацьованих газів у викид твердих частинок …… 394
Б.1.1 Постановка задачі …… 394
Б.1.2 Аналіз математичного апарату формули перерахунку …….. 395
Б.1.3 Методика розрахункового оцінювання інструментальної точності отримання величини масового годинного викиду твердих частинок з потоком відпрацьованих газів за формулою перерахунку ……..... 396
Б.1.4 Виявлення впливу типу одиниць вимірювання показників димності відпрацьованих газів на інструментальну точність формули перерахунку ……..... 398
Б.2 Метрологічні аспекти застосування комплексного паливно-екологічного критерію ……..…… 403
Б.2.1 Постановка задачі …… 403
Б.2.2 Методика оцінювання інструментальної складової відносної результуючої систематичної похибки отримання значень комплексного паливно-екологічного критерію …..…….... 404
Б.2.3 Результати оцінювання інструментальної точності комплексного паливно-екологічного критерію та їх аналіз ….. 406

Б.3 Застосування математичного апарату сімейства кривих Пірсона для описання результатів застосування формули перерахунку 408
Б.3.1 Постановка задачі 408
Б.3.2 Методика визначення параметрів β-розподілу 409
Б.3.3 Результати дослідження та їх аналіз 411
Б.4 Висновки по додатку Б 414
Додаток В ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ І МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ НАБОРУ ВИХІДНИХ ДАНИХ 416
В.1 Розробка комплексу організаційно-технічних заходів щодо вдосконалення процедури отримання набору вихідних даних для комплексного критеріального оцінювання 416
В.2 Критеріальне оцінювання ефективності застосування фільтра твердих частинок як виконавчого пристрою технології захисту навколишнього середовища для дизельного ДВЗ впродовж міжрегенераційного періоду з урахуванням гідравлічного опору ... 419
В.3 Приклади практичного застосування вдосконаленого комплексного паливно-екологічного критерію 424
В.3.1 Визначення раціональної кількості режимів при стендових випробуваннях дизельного ДВЗ з урахуванням собівартості здійснення випробувань 424
В.3.2 Вибір раціональної структури моделі експлуатації аварійно-рятувального транспортного засобу з дизельним ДВЗ 426
В.3.3 Оцінювання паливно-екологічної ефективності переведення поршневого ДВЗ електромобіля на споживання біопалива 428
В.3.4 Оцінювання екологічної ефективності переведення дизель-генератора на споживання палива біологічного походження за розробленими моделями експлуатації 432
В.4 Висновки по додатку В 433

Додаток Г ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ……. 435
Додаток Д ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ …….. 454

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Скорочення:

АП – атмосферне повітря.

АТЗ – автотранспортний засіб.

АТП – автотранспортне підприємство.

АРТЗ – аварійно-рятувальний транспортний засіб.

БДУ – безмоторна дослідницька установка.

БСР – бортова система регенерації ФТЧ.

ВГ – відпрацьовані гази.

ГО – гідравлічний опір.

ДСНС України – Державна служба України з надзвичайних ситуацій.

ЕБ – екологічна безпека.

ЕНБ – екологічна небезпека.

ЕСАК – електронна система автоматичного керування.

ЕУ – енергетична установка.

ЄС – Європейська Спілка.

ЖЦ – життєвий цикл.

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки.

ЗШХ – зовнішня швидкісна характеристика.

ІПМаш НАН України – Інститут проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України.

НАН України – Національна академія наук України.

МВС – моторний випробувальний стенд.

НДР – науково-дослідна робота.

НУЦЗ України – Національний університет цивільного захисту України.

НПС – навколишнє природне середовище.

ПДВЗ – поршневий двигун внутрішнього згоряння.

ПНЗП – продукти неповного згоряння моторного палива та моторної оливи.

СТ – спеціальна техніка.

СТО – станція технічного обслуговування.

СУЕБ – система управління екологічною безпекою.

ТЗНС – технологія захисту навколишнього середовища.

ТЧ – тверді частинки.

ХХХ – характеристика холостого ходу.

ФТЧ – фільтр твердих частинок.

ФЕ – фільтрувальний елемент.

ЦБ – цивільна безпека.

Умовні позначення:

1. Параметри роботи ПДВЗ:

$n_{кв}$ – частота обертання колінчастого вала, об/хв, $хв^{-1}$, rpm;

N_e – ефективна номінальна потужність, кВт;

$M_{кр}$ – крутний момент, Н·м;

α – коефіцієнт надлишку повітря;

G_{fuel}, G_{air}, G_{EG} – масова годинна витрата палива, повітря та ВГ, кг/год;

g_e – питома ефективна масова годинна витрата палива, кг/(кВт·год);

2. Речовини-полютанти:

C_nH_m – незгорілі вуглеводні моторного палива і оливи;

NO_X – оксиди азоту;

CO – монооксид вуглецю;

CO_2 – діоксид вуглецю;

SO_2 – оксиди сірки;

H_2O – дігідрогену монооксид;

Б(α)П – бенз(α)пірен.

3. Параметри токсичності відпрацьованих газів, об. % або $млн^{-1}$ (ppm)

– об’ємна концентрація у ВГ:

C_{CH}, C_{CO}, C_{CO2}, C_{NOx}, C_{O2} – незгорілих вуглеводів палива і моторної оливи, монооксиду вуглецю, діоксиду вуглецю; оксидів азоту; залишкового кисню.

G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO} – масові годинні викиди законодавчо нормованих полютантів, кг/год.

g_{ePM}, g_{eNOx}, g_{eCnHm}, g_{eCO} – питомі ефективні масові годинні викиди полютантів, г/(кВт·год).

4. Параметри димності відпрацьованих газів:

D – ступінь чорноти тефлонового фільтра, %;

N_D – коефіцієнт ослаблення світлового потоку у ВГ, %;

K – коефіцієнт поглинання світлового потоку у ВГ, $м^{-1}$.

5. Параметри ТЧ (*Parameters of PM*):

G_{PM} – масовий годинний викид ТЧ, кг/год;

d_{PM} – діаметр ТЧ, мм.

6. Характеристики ефективності роботи ФТЧ

– коефіцієнт ефективності очищення потоку ВГ дизеля від ТЧ, %:

$K_{EO}(N_D)$ – за показниками димності ВГ;

$K_{EO}(C_{CH})$ – за концентрацією у ВГ незгорілих вуглеводнів;

$K_{EO}(G_{PM})$ – за показниками масового викиду ТЧ з потоком ВГ.

7. Комплексний паливно-екологічний критерій та його складові:

K_{fe} – комплексний паливно-екологічний критерій, ‰;

η_e – ефективний ККД ПДВЗ;

η_i – індикаторний ККД ПДВЗ;

η_m – механічний ККД ПДВЗ;

β – коефіцієнт відносних експлуатаційних екологічних грошових витрат;

Z_e – грошові витрати на відшкодування екологічної шкоди, $/(кВт·год);

Z_f – грошові витрати на паливо, $/(кВт·год);

g_e – масові питомі ефективні витрати палива ПДВЗ, кг/(кВт·год);

g_i – масові питомі індикаторні витрати палива ПДВЗ, кг/(кВт·год);

δ – безрозмірний показник відносної небезпеки забруднення на різних територіях;

f – безрозмірний коефіцієнт, що враховує характер розсіювання ВГ в атмосфері;

H_u – нижча теплота згоряння моторного палива, МДж/кг;

P_f – ціна одиниці ваги моторного палива, $/кг;

h – загальна кількість законодавчо нормованих забруднюючих компонентів у ВГ ПДВЗ;

A_k – безрозмірний показник відносної агресивності k-го забруднюючого компоненту ВГ ПДВЗ;

WF – відносне дольове напрацювання ПДВЗ на i-ому полігоні моделі експлуатації або ваговий фактор;

N_e – ефективна потужність ПДВЗ, кВт;

N_i – індикаторна потужність ПДВЗ, кВт;

$N_{МП}$ – потужність насосних втрат ПДВЗ,кВт;

G_{fuel} – масова годинна витрата палива ПДВЗ, кг/год;

G_k – масовий годинний викид k-го забруднюючого компоненту ВГ ПДВЗ, кг/год;

$M_{кр}$ – крутний момент ПДВЗ, Н·м;

$n_{кв}$ – частота обертання колінчастого валу ПДВЗ, хв$^{-1}$;

U_e – вартісне відшкодування екологічної шкоди, $/кг;

g_{pr} – питомий приведений викид шкідливих речовин з ВГ ПДВЗ;

F_{NOx} і F_{CO} – поправочні коефіцієнти на вологість повітря лабораторії;

d – вміст водяної пари у повітрі НПС, г/кг;

φ_0 – відносна вологість повітря НПС, %;

B_0 – барометричний тиск, гПа;

P_s – тиск насичених парів води, гПа;

t_0 – температура повітря НПС, °С.

8. Узагальнена функція бажаності:

D – узагальнена функція бажаності, що відповідає усім n критеріям якості;

d_k – часткова функція бажаності, що відповідає k-му критерію якості;

υ_k – коефіцієнт вагомості k-го критерію якості.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Стан атмосферного повітря (АП) в Україні, оцінений за методикою Агентства із захисту навколишнього середовища США (US EPA) та за даними Центральної геофізичної лабораторії України, характеризується для 2/3 регіонів як допустимий, а у решті регіонів – як гранично-допустимий. На фоні позитивних тенденцій суттєвого зниження промислового навантаження на навколишнє природне середовище (НПС) в Україні одним із чинників зниження якості атмосферного повітря визнано зростання чисельності енергоустановок (ЕУ) з поршневим двигуном внутрішнього згоряння (ПДВЗ), що мають високий ступінь фізичного зносу. Особливістю експлуатації ЕУ з ПДВЗ є наявність негативного техногенного впливу на АП навіть при роботі у штатному режимі й справному стані. В Україні понад 70 % механічної та електричної енергії виробляють саме ЕУ з ПДВЗ. Вимоги до екологічних показників ПДВЗ є загальнообов'язковими, оскільки закріплені на законодавчому рівні. В Україні з 01.01.2016 р. для ввезення нових автотранспортних засобів (АТЗ) діють вимоги Правил ЄЕК ООН R-49 рівня EURO V. Оскільки вимоги цих правил рівня EURO VI не введені в дію в Україні, то ввезення та вільний обіг вживаних АТЗ має відбуватися з дотриманням вимог рівня EURO II, тобто дозволені АТЗ мають бути не старшими за 2009 р. випуску, що регулюється відповідно до статті 14 Закону України «Про державне регулювання виробництва і обігу спирту етилового, коньячного і плодового, алкогольних напоїв та тютюнових виробів» у редакції від 01.01.2021 р. Приведення показників ПДВЗ до більш високого рівня EURO складає до 40 % від його собівартості за кожний наступний рівень.

Аналіз структури парку та екологічних показників роботи ЕУ з ПДВЗ в Україні виявив, що на фоні його дизелізації відбувається інтенсивне старіння – середній вік ЕУ складає 14 років. Саме тому понад 69 % таких технічних об'єктів не відповідає чинним вимогам екологічної безпеки (ЕБ), але вони залишаються в експлуатації. Такі ПДВЗ належать до приблизно 2007 р. випуску і не мають від початку експлуатації засобів захисту АП від їх техногенного впливу, а саме системи нейтралізації полютантів у відпрацьованих газах (ВГ) та утримання твердих частинок (ТЧ). Вста-

новлено, що ЕУ, які на момент випуску відповідали жорстким вимогам наявності засобів екологічного захисту НПС, позбулись пристроїв очищення викидів через порушення умов експлуатації та чинного законодавства.

Таким чином, на даний час збільшився відсоток ЕУ і АТЗ, що не відпадають вимогам нормативної бази вітчизняних органів екологічного нагляду. За цих обставин постає питання про необхідність у системній розробці й впровадженні засобів захисту АП від техногенного впливу при експлуатації ПДВЗ, що розглядаються як частина технології захисту навколишнього середовища (ТЗНС), зокрема стосовно розробки методологічної основи комплексного оцінювання процесів на етапі життєвого циклу (ЖЦ) «безаварійна експлуатація» та матеріальної основи відповідної системи управління екологічною безпекою (СУЕБ).

За результатами аналітичного огляду науково-практичних досягнень щодо розробки і впровадження систем забезпечення екологічної безпеки при експлуатації ЕУ і АТЗ з ПДВЗ визначені найбільш широко вживані засоби захисту АП в технічних рішеннях фірм Bosch, Engelhard, Econix, DCL, Johnson Matthey. Однак, ці системи управління екологічною безпекою є обмежено придатними для ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, що здебільшого і складають парк ЕУ України.

Відомими підходами до комплексного оцінювання рівня екологічної безпеки при експлуатації ЕУ з ПДВЗ є методологія комплексного критеріального оцінювання, яка розроблена професором НТУ «ХПІ» І.В. Парсадановим, методологія еколого-хімічної оцінки, що запропонована професором ХНАДУ П.М. Каніло та системи індексів оцінювання Air Quality Index of EPA та ERoEI Index. Основними недоліками вказаних підходів з оцінки безпечності техногенного впливу є відсутність розгляду чинників негативної дії на НПС при роботі ПДВЗ, що не враховані у зв'язку з розбіжністю вимог законодавчих екологічних обмежень щодо складу моторного палива і ВГ (це особливо важливо для експлуатації ЕУ з ПДВЗ з підвищеним фізичним зносом); неможливість надати окремої оцінки екологічній якості роботи ПДВЗ і ТЗНС в енергоустановках; неврахування пріоритетності екологічних показників роботи ЕУ на основі ПДВЗ над техніко-економічними на етапі ЖЦ «безаварійна експлуатація» близько до межі фізичного зносу. [1–20].

Отже, в роботі поставлена задача вирішення актуальної науково-практичної проблеми у галузі екологічної безпеки захисту АП від техногенного впливу ЕУ з ПДВЗ, які працюють в безаварійному режимі з невеликим залишковим ресурсом, на основі розробки ТЗНС для зменшення викидів у АП та обґрунтування науково-методологічних основ системи комплексного оцінювання екологічного стану ЕУ з ПДВЗ на етапі ЖЦ «безаварійна експлуатація» з урахуванням екологічних показників роботи ПДВЗ та ТЗНС на основі методології комплексного критеріального оцінювання. Актуальність тематики вказаних досліджень зумовлена результатами аналізу її відповідності формулам і окремим пунктам напрямків досліджень паспорту спеціальності 21.06.01 – екологічна безпека, результати якого наведено нижче.

Формула спеціальності 21.06.01 формулюється таким чином (згідно до Постанови Президії ВАК України № 33-07/7 від 04.07.2001 р.; «Бюлетень Вищої атестаційної комісії України», № 3, 2003 р.):

«*Спеціальність орієнтована на розробку систем екологічного моніторингу та технічних засобів контролю за станом навколишнього середовища, теоретичних основ та обґрунтування оцінок екологічного ризику, пошук та створення за їх допомогою оптимальних форм управління екологічною безпекою; вивчення й обґрунтування ступеня відповідності наявних або прогнозованих екологічних умов завданням збереження здоров'я людини, забезпечення сталого соціально-екологічного розвитку та потенціалу держави; збереження і відновлення навколишнього середовища*».

У тому ж документі наведено таке стисле визначення: «*Техногенна безпека держави є складовою частиною екологічної безпеки за кінцевим результатом впливу на навколишнє середовище*».

Комплексне критеріальне оцінювання рівня ЕБ деякої частини ЖЦ ЕУ з ПДВЗ, зокрема процесу їх безаварійної експлуатації, у всьому розмаїтті своїх аспектів, зокрема методологічних, математичних, методичних, експериментальних і метрологічних, на глибоке переконання здобувача, повністю відповідає формулі спеціальності 21.06.01 у частинах, що відображають такі пункти напрямків досліджень паспорту цієї спеціальності.

1. Обґрунтування теоретичних основ оцінок техногенного ризику, розробка

та пошук за їх допомогою оптимальних форм управління екологічною безпекою.

Результат комплексного критеріального оцінювання являє собою деяку інтегральну усереднену числову характеристику об'єкту оцінювання, зокрема рівня ЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ. Таку характеристику можливо перетворити на іншу, що має фізичний зміст техногенного ризику, користуючись наявним, модернізованим чи новоствореним понятійним та математичним апаратами.

2. Розробка наукових методів дослідження комплексної оцінки та прогнозування впливу техногенного забруднення на навколишнє середовище та людину.

Означена інтегральна усереднена числова характеристика може комплексно описувати як індивідуальну одиницю ЕУ з ПДВЗ на деяких етапах її ЖЦ, так і сукупності (наприклад, автопарку підприємства, територіальної громади, держави в цілому). Ступінь комплексності може варіюватися для окремих критеріальних апаратів. Чинники ЕНБ, що комплексно враховуються тим чи іншим критеріальних математичним апаратом чинять цілком визначений вплив на стан забрудненості НПС та здоров'я людини як інтенсивно (визначається ступенем досконалості окремо взятої одиниці ЕУ з ПДВЗ), так і екстенсивно (визначається структурою сукупності таких одиниць, моделями їх експлуатації, рівнем індивідуальної майстерності, екологічної свідомості та законослухняності їх експлуатантів та власників).

3. Удосконалення існуючих, створення нових екологічно безпечних технологічних процесів та устаткування, що забезпечують раціональне використання природних ресурсів, додержання нормативів шкідливих впливів на довкілля. Екологічний аудит, екологічний менеджмент.

Результати комплексного критеріального оцінювання можуть бути використані для надання характеристики ефективності застосування нових чи вдосконалених заходів технічного й організаційного плану, а також засобів (устаткування та відповідних йому технологічних процесів) для підвищення рівня ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, направлених на забезпечення дотримання відповідних нормативів шкідливих впливів на довкілля.

4. Вивчення екологічної обстановки навколо атомних, теплових електростанцій, гірничо-видобувних підприємств, інших небезпечних об'єктів; обґрунтування й

розробка заходів для поліпшення цієї обстановки.

Частина картини актуальної екологічної обстановки навколо вказаних об'єктів підвищеного ризику створюється різноманітними ЕУ з ПДВЗ. Комплексне критеріальне оцінювання дозволяє вивчити цю частину екологічної обстановки та надати матеріал щодо обґрунтування ефективності застосування розроблених чи вдосконалених заходів для поліпшення цієї обстановки.

5. Розробка систем екологічного моніторингу й техногенно-екологічної безпеки регіонів, окремих екосистем. Заходи стабілізації та поліпшення стану довкілля.

Будь-яка система екологічного моніторингу потребує засобів кількісного і якісного оцінювання поточного екологічного стану об'єкту моніторингу та відгуку об'єкту на вплив системи моніторингу (для реалізації зворотного зв'язку). Особливості обраного об'єкту – ЕУ з ПДВЗ, а саме універсальність і розповсюдженість, доля у валовому виробленні енергії, дозволяють використовувати результати комплексного критеріального оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації їх сукупностей (автопарків) у системах моніторингу й техногенно-екологічної безпеки як регіонів, так і окремих екосистем. Також, як результат, виступати числовою характеристикою ефективності застосування заходів стабілізації та поліпшення стану довкілля.

6. Обґрунтування наукових засад безпечного видобування, зберігання, технології переробки, транспортування, захоронення, знешкодження радіоактивних та інших шкідливих речовин.

На всіх перелічених етапах ЖЦ радіоактивних та інших шкідливих речовин при їх корисному використанні застосовують ЕУ з ПДВЗ, які вносять деяку частину у поточний рівень ЕБ урбосистеми, що потребує врахування при розробці технологій безпечного поводження з ними.

7. Вплив техногенно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище, обґрунтування теоретичних і практичних засад виведення їх з експлуатації.

Математичний апарат переважної більшості критеріїв, що придатні для оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації таких техногенно небезпечних об'єктів, як ЕУ з ПДВЗ, містить складові, що безпосередньо враховують вплив таких об'єктів на НПС. Кількісні результати такого оцінювання придатні для використання у якості

показників критичного стану цих об'єктів (крайнього ступеня фізичного та/або морального зносу) та сигналізаторів для виведення їх з експлуатації.

8. Розрахунки та наукове обґрунтування допустимих рівнів впливу техногенної діяльності на споруди різного призначення, створення умов надійної безпеки життя та діяльності людини, враховуючи критичні ситуації, що можуть виникати під час техногенних аварій чи природних катастроф. Наукове обґрунтування та розробка оптимальної структури розміщення техногенно безпечних та ліквідації техногенно небезпечних об'єктів на території України.

ЕУ з ПДВЗ є потужним джерелом впливу на всі елементи урбосистеми хімічними (полютанти, кислоти, волога, парникові гази, вибухо- та вогненебезпечні речовини тощо), фізичними (теплота, шум, вібрації, електромагнітні поля і т.д.) та інформаційними (інформаційний шум, хибна інформація, турбуючі фактори і т.п.) чинниками. Перспективні математичні критеріальні апарати можуть комплексно враховувати такі чинники, що діють у тому числі й на споруди, об'єкти, людину, у тому числі й у критичних (аварійних техногенних) ситуаціях, й надати кількісну і якісну їх характеристику. На основі результатів такого оцінювання для сукупності таких техногенно небезпечних об'єктів, як ЕУ з ПДВЗ, можливим є наукове обґрунтування та розробка оптимальної структури розміщення сукупностей з таких об'єктів.

Таким чином, здійснений аналіз паспорту спеціальності 21.06.01 – екологічна безпека показує, що питання комплексного критеріального оцінювання показників рівня ЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ взагалі, та метрологічні аспекти такого оцінювання зокрема, повністю відповідають визначенню та пунктам 1, 2, 3 цього документу.

Отже, в роботі потребує вирішення актуальна науково-практична проблема у галузі ЕБ захисту АП від впливу ЕУ з ПДВЗ, що перебувають в експлуатації тривалий час, не відповідають чинним вимогам екобезпеки та не можуть бути виведені з експлуатації, при їх безаварійній експлуатації на основі системного управління рівнем ЕБ такого процесу, на основі результатів комплексного критеріального оцінювання такого рівня.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дане наукове дослід-

ження відображає основні результати виконуваної ініціативної НДР НУЦЗ України за темою: «*Використання апарату нечіткої логіки та психофізичних шкал у критеріальному оцінюванні рівня екологічної безпеки*» (№ ДР 0119U001001, 2019–2021 рр., *керівник*) і завершених ініціативних НДР НУЦЗ України за темами: «*Методологічне забезпечення критеріального оцінювання ефективності функціонування системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергетичних установок аварійно-рятувальної техніки*» (№ ДР 0117U002002, 2017–2018 рр.) і «*Теоретичні дослідження і розробка пристроїв для підвищення безпеки експлуатації енергетичних установок на базі дизельних двигунів*» (№ ДР 0115U002040, 2015–2016 рр., *відповідальний виконавець*). Тематика дослідження узгоджена з основними пунктами «*Стратегії сталого розвитку «Україна–2020*», схваленої Указом Президента України № 5/2015 від 12.01.2015 р., «*Положення про організацію екологічного забезпечення ДСНС України*», затвердженого наказом № 618 (з основної діяльності) від 20.09.2013 р., а також *«Типового положення про регіональну та місцеву комісію з питань техногенно-екологічної безпеки і надзвичайних ситуацій*», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України № 409 від 17.06.2015 р.

Метою роботи є розробка науково-методологічних основ системи комплексного оцінювання рівня екологічної безпеки технології захисту атмосферного повітря при безаварійній експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу та впровадження її в управління технології захисту навколишнього середовища.

Об'єктом дослідження є комплексні системи технічних рішень та управління експлуатацією енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу відповідно до вимог екологічної безпеки атмосферного повітря.

Предметом дослідження є науково-методологічні основи розробки комплексної системи захисту атмосферного повітря від негативного впливу енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу на етапі його життєвого циклу «безаварійна експлуатація» для забезпечення дотримання вимог екобезпеки.

Ідея дослідження полягає у розробці комплексу технологічних і технічних рішень з організації та впровадження екобезпечних робочих процесів безаварійної

експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, що забезпечують заданий рівень екологічної безпеки, та комплексної системи екологічного управління процесом експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких **задач**:

1. Надати системний аналіз науково-методологічних розробок щодо визначення екологічно ефективних процесів роботи енергоустановок з поршневим ДВЗ на етапі життєвого циклу «безаварійна експлуатація» для захисту атмосферного повітря від фізичних чинників впливу та викиду екологічно небезпечних речовин на базі огляду науково-технічної, довідникової, патентної та нормативної літератури.

2. Розробити наукові засади для обґрунтування методологічних положень комплексного дослідження негативного впливу енергоустановок з поршневим ДВЗ на атмосферне повітря для удосконалення процесу їх безаварійної експлуатації при впровадженні нових технічних рішень з метою побудови системи управління екологічною безпекою енергогенеруючих об'єктів названого виду.

3. Розробити наукові основи та методологічні засади для розробки систем комплексної оцінки рівня екологічної безпеки та управління безаварійною експлуатацією енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу.

4. Розробити комплекс технологічних і технічних рішень з організації та впровадження екобезпечних робочих процесів «безаварійної експлуатації» енергоустановок з поршневим ДВЗ, що забезпечують заданий рівень екологічної безпеки, та комплексну систему екологічного управління процесом при їх експлуатації.

5. Надати результати підвищення рівня екологічної безпеки в ЕУ з ПДВЗ із високим рівнем зносу при застосуванні комплексу технологічних і технічних рішень щодо роботи ТЗНС стосовно очищення відпрацьованих газів від твердих частинок на конструктивно удосконаленому фільтрі. Встановити індикаторну функцію ефективності роботи фільтру твердих частинок до досягнення нормативних вимог екологічної безпеки для поршневого ДВЗ тривалої експлуатації.

6. Визначити переваги застосування комплексної системи управління екологічно безпечною експлуатацією енергоустановок з поршневим ДВЗ відповідно до розробленої функції оцінювання їх безпечності у вигляді інтегративного показника

рівня екологічної безпеки в умовах негативного впливу таких енергогенеруючих об'єктів на атмосферне повітря.

Для розв'язання поставлених задач застосовувались **методи**: системологічний аналіз науково-технічної, довідникової, нормативної та патентної літератури; синтез класифікацій і класифікаторів; синтез систем управління екологічною безпекою та технологій захисту навколишнього середовища; методи системного аналізу, багаторівнева декомпозиція, метод ієрархій та десятинного поділу; стандартизовані методики аналізу даних моторних стендових випробувань, розрахунку середньоексплуатаційних значень техніко-економічних і екологічних показників роботи ПДВЗ за стандартизованими стаціонарними випробувальними циклами; методи дослідження динаміки руху аерозольних реальних текучих середовищ, розрахунку робочого процесу ПДВЗ; методи визначення метрологічних характеристик експериментальних установок і засобів вимірювальної техніки; математичні апарати комплексного паливно-екологічного критерію, інтегрального індексу еколого-хімічного оцінювання та узагальненої функції бажаності; математичні апарати формул перерахунку показників димності у показники токсичності відпрацьованих газів; математичний апарат сімейства кривих Пірсона (β-розподілу); математичний апарат індикатора екобезпеки ПДВЗ і його ТЗНС; метод експериментального проектування; метод SWOT-аналізу; ліцензійні версії програмних застосунків Micrisoft Exel 2003, MathCAD 14 Express, T-Flex CAD 3D V8 Education та розроблений у середовищі Borland Pascal застосунок Applied Beta-Distribution.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у науково-прикладному обґрунтуванні методологічних основ системи комплексного оцінювання рівня екологічної безпеки технології захисту атмосферного повітря при роботі енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу на етапі «безаварійної експлуатації» та розробці системи управління технології захисту навколишнього середовища, що дозволило отримати такі наукові результати:

1. *Вперше* науково обґрунтовано методологію побудови та використання індексу ефективності функціонування фільтра твердих частинок, що є частиною технології захисту навколишнього середовища в енергоустановці з поршневим ДВЗ. Це

дозволило об'єднати в єдиний комплекс математичні моделі процесів у фільтрі впродовж міжрегенераційного періоду. На основі індексу визначено систему керування рівнем екологічної ефективності роботи фільтра. За значенням індексу забезпечується підтримування показників ефективності фільтра на стабільному рівні для різних режимів роботи поршневого ДВЗ.

2. *Вперше* науково обґрунтовано структуру інтегративного показника рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу. Показник враховує особливості та повний перелік чинників негативного впливу такого технічного об'єкту на атмосферне повітря на етапі його життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Показник включає комплексний паливно-екологічний критерій у якості окремого самостійного чинника техногенного впливу на стан атмосферного повітря та дозволяє надати окрему оцінку екологічній безпеці роботи поршневих ДВЗ і технології захисту навколишнього середовища в енергоустановці.

3. *Вперше* розроблено наукові основи системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу на етапі їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Система управління дозволяє врахувати пріоритетність екологічних показників роботи енергоустановки з поршневим ДВЗ над техніко-економічними на цьому етапі життєвого циклу. Механізми екологічного управління запропонованої системи процесуально реалізуються на матеріальній основі відповідної технології захисту навколишнього середовища в межах енергоустановки з поршневим ДВЗ певного рівня фізичного зносу. Функцією управління та зворотним зв'язком у системі управління є інтегративний показник, що комплексно оцінює екологічну ефективність роботи поршневого ДВЗ та його технологію захисту навколишнього середовища.

4. *Вдосконалено* систему класифікації способів роботи та конструкцій фільтрів твердих частинок і систему класифікації способів і засобів реалізації процесу їх регенерації як складових методологічного забезпечення розробки технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу енергоустановок з поршневим ДВЗ за якісним і кількісним складом класифікаційних ознак та класифікованих

об'єктів. Система класифікацій дозволяє комплексно і адекватно оцінювати поточний стан рівня екологічної безпеки системи очищення відпрацьованих газів.

5. *Набули подальшого розвитку* методологічні засади побудови технології захисту навколишнього середовища як матеріальної основи системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, які не відповідають чинним вимогам екологічної безпеки і не можуть бути виведені з експлуатації. Розвиток здійснено у напряму виокремлення ієрархічного місця такої технології та її елементів у системі управління та побудови синергетичних ланцюгів із засобів захисту атмосферного повітря. Це дозволило врахувати чинники техногенного впливу при роботі таких технічних об'єктів на екологічний стан атмосферного повітря, зумовлені розбіжністю вимог законодавчих екологічних обмежень щодо якості моторного палива та екологічних вимог до складу відпрацьованих газів.

6. *Набули подальшого розвитку* науково-методологічні основи побудови схем комплексної технології захисту атмосферного повітря при роботі енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, що не відповідають чинним вимогам екологічної безпеки і не можуть бути виведені з експлуатації на етапі життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Це дозволило отримати синергетичний ефект від комплексу природозахисних технологічних заходів – охолодження, очищення і рециркуляції відпрацьованих газів, утилізації їх теплової енергії, переведення двигуна на споживання альтернативного моторного палива й раціоналізації структури моделі його експлуатації.

Отримані у роботі результати мають таке **практичне значення**.

1. Запропонований індекс ефективності функціонування фільтра твердих частинок, що є частиною технології захисту навколишнього середовища в енергоустановці з поршневим ДВЗ, об'єднує в єдиний комплекс математичні моделі процесів у фільтрі впродовж міжрегенераційного періоду. Індекс *використаний* як основа для визначення системи керування рівнем екологічної ефективності роботи фільтра і забезпечення підтримування показників його ефективності на стабільному рівні для різних режимів роботи поршневого ДВЗ. На практиці індекс ефективності функціо-

нування фільтра застосовують для розрахунків прогнозних техніко-економічних, масогабаритних і вартісних показників роботи технічних об'єктів з високим ступенем фізичного зносу та формування частини вихідних даних для здійснення комплексного критеріального оцінювання стану екологічної безпеки таких об'єктів.

2. Розроблений інтегративний показник рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу *застосовано* для надання окремої оцінки екологічної якості роботи поршневих ДВЗ і технології захисту навколишнього середовища в енергоустановці. Показник придатний для врахування нових чинників, які супроводжують техніко-технологічний розвиток систем екологічної безпеки у фізичному і правовому полі, при комплексному оцінюванні техногенного навантаження на атмосферне повітря для об'єктів паливно-енергетичного циклу.

3. Розроблена система управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу *впроваджена* у практику виробничої діяльності ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «Харківський насосний завод» (м. Харків) для планування переліку заходів щодо забезпечення нормативного рівня показників екологічної безпеки при експлуатації одиниць парку транспортних і електрогенеруючих енергоустановок з поршневим ДВЗ та при плануванні витрат на паливо-мастильні матеріали з урахуванням можливості переведення деяких з них на альтернативне моторне паливо (акт впровадження від 11.12.2020 р.).

4. Розроблена схема комплексної технології захисту атмосферного повітря при експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу *впроваджена* у практику господарчої діяльності ТОВ «Армко-Інжинірінг» (м. Київ) для планування переліку заходів щодо забезпечення комплексу з нормативно встановлених показників екологічної безпеки одиниць парку при безаварійній експлуатації транспортних і електрогенеруючих енергоустановок з поршневим ДВЗ, моторкомпресорів газотранспортної системи і газовидобувних станцій з урахуванням можливості переведення деяких з них на альтернативне моторне паливо біологічного походження (акт впровадження від 24.11.2020 р.).

5. Вдосконалені система класифікації способів роботи та конструкцій фільтрів твердих частинок і система класифікацій способів і засобів реалізації процесу їх регенерації як складових технології захисту навколишнього середовища *використані* в науково-дослідній діяльності відділу водневої енергетики Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України (м. Харків) для надання комплексної і адекватної оцінки поточного стану рівня екологічної безпеки системи очищення відпрацьованих газів моторного випробувального стенду, а також пошуку нових конструкційно-технологічних рішень на основі систематизованих знань при виконанні науково-дослідних робіт (довідка про використання від 12.01.2021 р.).

6. Результати дослідження *використані* у навчальному процесі кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища факультету техногенно-екологічної безпеки Національного університету цивільного захисту України (м. Харків) при підготовці здобувачів вищої освіти за другим (магістерським) та третім (доктор філософії) рівнями за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища» (довідка про використання від 19.11.2020 р.).

Матеріали дослідження пройшли апробацію на 24 науково-технічних і науково-практичних конференціях, конгресах, симпозіумах та виставкових форумах, а саме 6 закордонних (Республіка Білорусь, Республіка Казахстан, Республіка Польща, Японія), 21 міжнародного рівня і 2 загальнодержавного рівня: Международная научно-практическая конференция «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации»
(22–23 мая 2014 г., ГГТУ им. П.О. Сухого, Гомель, Республика Беларусь); XIX Міжнародний конгрес двигунобудівників (06–10 вересня 2014 р., Харків – Коблеве, Україна); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми екологічної безпеки» (8–9 жовтня 2014 р., КрНУ ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна); Международная научно-практическая конференция «Роль местной противовоздушной обороны и пожарной охраны в годы великой отечественной войны» (27 марта 2015 г., КТИ КЧС МВД РК, Кокшетау, Республика Казахстан); IX Научно-практическая конференция молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проб-

лемы и перспективы» (2–3 апреля 2015 г., ГУО КИИ МЧС РБ, Минск, Республика Беларусь); XX Міжнародний конгрес двигунобудівників (05–10 вересня 2015 р., Харків – Коблеве, Україна); 17 Всеукраїнська науково-практична конференція рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору», проведена в рамках XIV Міжнародного виставкового форуму «Технології захисту/ПожТех–2015» (22–23 вересня 2015 р., ІДУЗЦ, Київ, Україна); XII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми екологічної безпеки» (6–8 жовтня 2015 р., КрНУ ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна); Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки» (04 грудня 2015 р., НУЦЗ України, Харків, Україна); Международная научно-практическая конференция «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации» «ЧС–2016» (19–20 мая 2016 г., ГУО Гомельский инженерный институт, Гомель, Республика Беларусь); XXI Міжнародний конгрес двигунобудівників (05–10 вересня 2016 р., Харків – Коблеве, Україна); XIII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми екологічної безпеки» (12–14 жовтня 2016 р., КрНУ ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна); Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика» (24 листопада 2016 р., НУЦЗ України, Харків, Україна); XV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми екологічної безпеки» (11–13 жовтня 2017 р., КрНУ ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна); XXIII Міжнародний конгрес двигунобудівників (05–10 вересня 2016 р., Харків – Коблеве, Україна); 5-й Міжнародний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (26–29 вересня 2018 р., НУ «Львівська політехніка», Львів, Україна); XXIV Міжнародний конгрес двигунобудівників (02–07 вересня 2019 р., Харків – Коблеве, Україна); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика» (21–22 листопада 2019 р., НУЦЗ України, Харків, Україна); XI Міжнародна науково-методична конференція, 138 Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS) «Безпека людини у сучасних умовах» (05–06 грудня 2019 р., НТУ «ХПІ», Харків, Україна); III Міжнародна науково-технічна конферен-

ція «Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології» (11–12 грудня 2019 р., ОДАБА, Одеса, Україна); XIV Международная научно-практическая конференция курсантов (студентов), слушателей и адъюнктов (аспирантов, соискателей) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (08–09 апреля 2020 г., УГЗ МЧС Беларуси, Минск, Республика Беларусь); Міжнародна науково-практична конференція «Problems of emergency situation» (PES–2020) (20 травня 2020 р., Харків, НУЦЗ України, Україна); XXV Міжнародний конгрес двигунобудівників (08–11 вересня 2020 р., Харків – Коблеве, Україна); III International Scientific and Practical Conference «Science and education: problems, prospects and innovations» (29–31 December 2020, Kyoto, Japan).

Матеріали досліджень **опубліковано** у 70 друкованих працях, з них: 5 монографій, з яких 1 іноземною мовою, 1 видана у країні ЄС – Республіці Польщі, 1 – одноосібна; 31 стаття у наукових фахових виданнях України, з яких 4 входять до міжнародних науко-метричних баз Scopus, Index Copernicus, Google Scholar, 13 іноземною мовою, 10 одноосібно; 7 статей у наукових виданнях України, з яких 3 іноземною мовою, 1 одноосібна; 3 статті у наукових виданнях Білорусії і Казахстану, з яких 2 іноземною мовою, та 24 наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (13 іноземною мовою, 8 одноосібно, 21 у матеріалах міжнародних конференцій і конгресів, 6 у матеріалах закордонних міжнародних науково-практичних конференцій).

Структура та обсяг роботи. Рукопис дисертації викладений на 465 сторінках, з яких 300 сторінок основного тексту. Рукопис складається зі анотації, списку умовних позначень та скорочень, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 287 найменувань на 25 сторінках, та 5 додатків на 78 сторінках. Рукопис дисертації містить 120 рисунків, 12 таблиць.

1 СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ РОБОТИ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ ЩОДО ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

1.1 Загальні міркування

Аналізуючи сучасний стан екологічної ситуації у країнах в країнах колишнього СРСР взагалі та в Україні зокрема, слід відзначити тенденцію до її погіршення на відміну від країн Європейської Спілки (ЄС) і Сполучених Штатів Америки (США). У цих країнах спостерігається зворотна ситуація завдяки жорсткому екологічному законодавству і забезпеченню виконання його вимог. За останні 25 років при збільшенні кількості діючих одиниць ЕУ взагалі й автотранспортних засобів (АТЗ) і спеціальної техніки зокрема, а також невпинному погіршенню їхнього технічного стану через моральний і фізичний знос (вік, строк експлуатації, напрацювання у мотогодинах та ін.) кількість заходів, що забезпечують ЕБ населення і НПС, недостатня. Розглядаючи доцільність застосування дорогих і складних очисних та відновлювальних систем для підвищення ЕБ процесу експлуатації ЕУ, АТЗ і спеціальної техніки, в першу чергу враховують підвищення собівартості як їх самих, так і енергії й продукції, що за допомогою них виробляється або транспортується, і витрат на охорону здоров'я у масштабі цілої країни. Тому створення СУЕБ процесу експлуатації ЕУ, АТЗ і спеціальної техніки, обладнаних ПДВЗ на основі систем і пристроїв для очищення або нейтралізація потоку ВГ ПДВЗ від їхніх шкідливих компонентів (шкідливих речовин, полютантів) і подальшого знешкодження полютантів є вкрай перспективним і актуальним з точки зору енергетичних і ресурсних витрат як у масштабі країни, так і у всесвітньому масштабі [1].

У цьому розділі дисертації відображено результат аналізу 700 наукових джерел інформації, котрі докладно перелічені у [1], з яких: підручників, навчальних посібників і довідників – 51, наукових монографій – 39, рукописів кваліфікаційних робіт – 47, звітів про НДР – 18, аналітичних довідок – 7, патентів і авторських свідоцтв – 49, статей – 454, нормативно-правових актів – 9.

1.2 Аналіз науково-технічної, довідникової, нормативної та патентної літератури за темою дисертаційного дослідження

Як відомо, теплові двигуни – це теплові машини, що перетворюють підведену до робочого тіла теплоту у механічну енергію, тобто являють собою джерела механічної енергії [1–20]. При цьому вони або використовують як первинне джерело теплоти побічні продукти інших технологічних процесів (доменні, шахтні гази, водяна пара), або такі, що регенеруються (сонячна енергія) або «незручні» для прямого використання джерела теплоти (теплота земної кори, пара з контурів охолодження атомних станцій) – це двигуни із зовнішнім підводом теплоти – парова машина, парова турбіна і двигун Стірлінга. Якщо це джерело створюють шляхом вивільнення енергії екзотермічних окисно-відновлювальних реакцій окислення палива (рідке, тверде або газоподібне палива нафтового або рослинного походження, неорганічні з'єднання) окислювачем (кисень повітря, рідкий кисень, сильні неорганічні кислоти, селітра) – це ДВЗ (поршневі, лопаткові й реактивні). Теплові двигуни займають свою цілком визначену і доволі широку нішу у світовій енергетиці. При цьому ДВЗ займають у енергетичному балансі розвинених країн світу більш ніж 80 % від сумарної потужності, що виробляється енергетичними установками, і превалюють над двигунами із зовнішнім підводом теплоти за загальною кількістю і сумарною вироблюваною енергією [8]. Також ДВЗ повністю займають нішу джерел механічної (транспорт), теплової (вільно-поршневі генератори газу і енергетичні установки з рекуперацією теплоти) та електричної (у складі дизель-генераторів) енергії у віддалених, важкодоступних місцевостях, що необлаштовані й неелектрофіковані, а також у резервному енергозабезпеченні. ПДВЗ практично повністю займають нішу джерел механічної енергії на АТЗ, морському, річковому й залізничному транспорті, у малій авіації, сільськогосподарській, будівельній, шахтній, складській, військовій техніці, а також у техніці спеціального призначення (що застосовується ДСНС України, комунальними підприємствами тощо) [1].

У останні десятиліття накреслилася тенденція до дизелізації парку ПДВЗ у транспортній галузі – підвищення відсотка двигунів, що працюють за циклом Рудольфа Дизеля (двигуни, що споживають важкі моторні палива, із внутрішнім сумішо-

утворенням, якісним регулюванням потужності й самозайманням від стискування, тобто дизелів або дизельних ДВЗ), у загальній кількості ПДВЗ в галузі, чому сприяв широкий спектр чинників. Серед цих факторів одним з найважливіших є такий: дизель меншою мірою забруднює навколишнє природне середовище за інших рівних умов. Така думка більшості фахівців галузі [6–20]. До того ж витрати на паливо при роботі дизелів більш ніж на чверть нижчі, ніж при роботі двигунів, що працюють за циклом Ніколауса Отто (двигуни, що споживають бензини, з іскровим запалюванням, кількісним регулюванням потужності й зовнішнім сумішоутворенням). Окрім того, дизелі мають в 2,0–2,5 рази більший технічний ресурс, краще пристосовані до форсування застосуванням газотурбінного наддуву, більш пожежобезпечні, забезпечують отримання більшої потужності в одному агрегаті [1]. Також простежується поширення деяких принципів роботи дизельних ДВЗ на організацію робочих процесів в інших типах ПДВЗ – впорскування палива взагалі, і безносереднє впорскування зокрема, підвищення ступеня стиснення, перехід на двотактний цикл і використання в зв'язку з цим наддуву, створення локальних зон у камері згоряння з коефіцієнтом надлишку повітря α, що значно відрізняється від стехіометричного, за рахунок розшарування свіжого заряду та ін.

У цей час провідні фахівці у області знань, що пов’язані з ПДВЗ, при створенні нових зразків двигунів вирішують такі основні завдання [1, 6–20]: 1) підвищення паливної економічності ПДВЗ; 2) підвищення надійності ПДВЗ; 3) підвищення екологічності ПДВЗ; 4) зниження собівартості виробництва, експлуатації, технічного обслуговування і ремонту ПДВЗ; 5) специфічні: забезпечення багатопаливності; форсування і дефорсування; конверсія ПДВЗ. До специфічних також слід віднести забезпечення певних, наперед завданих, масогабаритних показників, показників пожежної й вибухової безпеки, забезпечення уніфікації з іншими типами ДВЗ та ін. [1].

Наочно розподіл цих задач подано на рис. 1.1 з джерела [1].

Ці задачі вирішуються сукупно, однак для різних типів ПДВЗ окремі з вищеперелічених виступають пріоритетними. Наприклад, для ПДВЗ авіаційної, військової й спеціальної техніки такою є надійність, зокрема безвідмовність, що в умовах польоту, бойових дій і ліквідації надзвичайних ситуацій є критичним. Проте вимоги до екологічності ПДВЗ особливо виділяються на тлі інших, оскільки закріплені зако-

нодавчо [21–30], тобто обов'язкові до виконання, у той час як вимоги до результатів вирішення інших основних задач двигунобудування диктуються виключно законами ринкової економіки [1–5, 6–20].



Рисунок 1.1 – Задачі сучасного двигунобудування [1]

У країнах ЄС для АТЗ на цей момент діють Правила ЄЕК ООН R – 49 рівня EURO VI, для України – формально введені в дію стандарти рівня EURO V [21]. При цьому приведення технічного рівня дизеля у відповідність наступному рівню цих норм підвищує його собівартість на 40 % [1, 6]. На ТЧ припадає 20 – 45 % сумарної еквівалентної токсичності відпрацьованих газів дизелів, оскільки в них містяться канцерогенні й мутагенні речовини [1, 6–20].

З іншого боку, значний внесок у забруднення НПС викидом полютантів з потоком ВГ ПДВЗ зумовлено великою кількістю об'єктів у структурі парку АТЗ нашої країни, оснащених дизелями, що знаходяться в експлуатації понад 15 років і не мали з моменту початку експлуатації засобів зниження токсичності ВГ їхніх ПДВЗ, або позбулися їх через різні обставини [1]. Дизелізація світового парку АТЗ і значне поширення у їх конструкції систем рециркуляції ВГ, які вимагають обов'язкового очищення [1], формують необхідність у розроблені й впровадженні таких засобів як виконавчих пристроїв ТЗНС як матеріальної основи СУЕБ. Особливо гостро ця проблема стає для АТЗ, що працюють в умовах обмеженого повітрообміну і в місцях скупчення людей, це маневрові тепловози, складські, кар'єрні, будівельні

та шахтні машини, судна, що працюють в акваторії курортних міст та військова і спеціальна техніка, у тому числі й пожежна і аварійно-рятувальна [1–5].

Отже, поліпшення екологічних показників ПДВЗ є перманентним і актуальним завданням галузі транспортного машинобудування і підгалузі двигунобудування, а підтримання їх значень на потрібному рівні – сфери експлуатації ЕУ, що оснащені ПДВЗ, в усіх розвинених країнах світу. Це знаходить своє відображення в роботах таких провідних учених з України і держав СНД: Ф.І. Абрамчук, Р.М. Баширов, В.В. Бразовський, І.Л. Варшавський, І.П. Васильєв, Л.В. Грєхов, В.А. Звонов, П.М. Каніло, А.П. Кудряш, А.Р. Кульчицький, А.М. Лєвтєров, В.П. Матейчик, А.П. Марченко, В.А. Марков, А.Л. Новоселов, І.В. Парсаданов, А.П. Поливя'нчук, В.Ф. Шапко, В.І. Смайліс, Н.К. Шокотов та ін.; а також фахівців таких закордонних фірм і організацій, як AVL, Bosch, Ricardo, Johnson Matthew, Engelhart, DCL, Emitech, Boshart, Rhodia, Volvo, MAN, Toyota, SAE, EPA, CARB, WHO, Massachusetts Institute of Technology, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Chalmers University of Technology, University of Minnesota, West Virginia University, Mining and Mineral Sciences Laboratories, Kobe University, Massachusetts Department of Environmental Protection, Idaho National Laboratory, Colorado Air Pollution Control Division, Virginia Polytechnic Institute, California Environtmental Protection Agency, University of Cincinnati, University of Auckland, University of Tennessee та ін., серед яких слід виокремити такі персоналії: P. Eastwood, A.D. Bugarsky, S. Bari, H. Strom, K. Bickel, P. Karin, K. Hanamura, D.B. Kettelson, B.J. Boothe, W.A. Majewsky, M.G. Campbell, M.V. Twigg, T.V. Johnson, J.P. Muter та ін., їх роботи проаналізовано у джерелі [1].

Серед учених, що працювали у галузі екології й ЕБ транспорту, альтернативних видів палива, гібридних й електромобілів, слід також відзначити роботи А.М. Авраменка, А.І. Атамася, В.Н. Бганцева, В.Г. Дяченка, С.А. Єрощенкова, К.В. Костенка, В.Г. Колобородова, В.А. Корогодського, Л.І. Лєвтєрової, В.М. Семикіна, В.М. Шмандія, М.В. Нечипорука, М.С. Мальованого, В.П. Мараховського, В.В. Солов'я, В.А. Юрченко та ін., роботи яких також проаналізовано у [1].

1.3 Структура парку автотранспортних засобів України як чинник екологічної небезпеки

Все вищевикладене стосується нових АТЗ і ПДВЗ. Технічний рівень ПДВЗ, що перебувають в експлуатації, відповідав рівню розвитку підгалузі на момент випуску, але не відповідає сучасним вимогам до паливної економічності, собівартості технічного обслуговування і ремонту, надійності. Радикального приросту цих характеристик модернізацією досягти неможливо. Проте вимоги до екологічності безвідносні терміну експлуатації ПДВЗ і АТЗ з таким двигуном допускаються до експлуатації тільки разом із введенням економічних санкцій для їхніх власників – штрафів, підвищених податків і зборів, ненадання пільг і преференцій, часткової або повної заборони експлуатації АТЗ. Це призводить до необхідності розроблення методів приведення екологічних показників ПДВЗ більш ранніх років випуску до вимог сучасних норм. Парк АТЗ України характеризується значною кількістю одиниць техніки, яка досягла високого ступеня морального і фізичного зносу, але попри все не може бути виведена з експлуатації через різні причини – це ПДВЗ сільськогосподарської та військової техніки, будівельних і дорожніх машин, а також тепловозні, суднові й поршневі авіаційні ПДВЗ, у тому числі й пожежна і аварійно-рятувальна [1].

Середній термін експлуатації автомобіля у країнах ЄС становить 8 років, в Україні цей показник для вітчизняних марок АТЗ знаходиться на рівні 14 – 16 років, а для іномарок – 10 – 12 років. Автопарк України за віковим показником автомобілів складається з таких сегментів: до 5 років – 22 %, 6 – 8 років – 10 %, понад 9 років – 68 % [1]. Український авторинок далекий від насичення. В середньому по Україні показник автомобілізації становить 130 автомобілів на 1000 жителів (у країнах ЄС він становить 400 – 600 автомобілів на 1000 жителів). Обсяг первинного ринку автомобілів в Україні в 2009 році становив 162 291 автомобіль, а вторинного – удвічі більше, оскільки ціна автомобіля з пробігом в 2 – 3 рази нижча за ціну нового автомобіля. Тенденції авторинку України за 1 рік такі – реєстрація нових автомобілів – знижується з 59,5 до 32,2 %, перепродаж автомобілів з пробігом на внутрішньому ринку – зростає з 40 до 67,2 % відповідно, реєстрація імпортних автомобілів з пробігом – майже не змінюється – 0,5 % [1]. Величина автопарку України становила близько 7,5 млн АТЗ. З них близько 50 % становлять автомобілі вітчизняних марок:

(ВАЗ – 27 %, ЗАЗ – 8 %, Москвич – 3 %, ГАЗ – 2 %, інші – 10 %), а на автомобілі марок Opel, Daewoo, Volkswagen, Chevrolet, Ford, Toyota, Mitsubishi, Skoda, Nissan, Mercedes, Mazda, Hyundai, Audi припадає 25 % одиниць автопарку відповідно, на інші – 20 %. На вторинному ринку в Україні з проданих автомобілів 35 % становлять автомобілі виробництва країн СНД, з яких 59 % припадає на автомобілі марки ВАЗ, а найбільш продаваною моделлю автомобіля на ринку стала Daewoo Lanos. Брендова структура продажів комерційних автомобілів (карго, мокроавтобуси, вантажні автомобілі) з пробігом на авторинку України має такий: ГАЗ – 14 і 18 % відповідно, Volkswagen – 17,5 і 17,7 %, Mersedes-Benz – 19 і 17 %, Ford – 8 і 7,5 %, Renault – 9 і 8 %, Fiat – 6,5 і 6 %, ЗАЗ – 2,5 і 3,5 %, Peugeot – 3,3 і 3,2 %, Іж – 2 і 3 %, УАЗ – 2,7 і 2,9 %, Citroen – 3 і 2,7 %, Opel – 2,9 і 2,6 %, інші – 9 і 8 % [1].

Середній термін експлуатації АТЗ в автопарку України станом на 01.01.2001 р. становив 17,1 року, станом на 01.01.2006 р. – 18,5 років (історичний максимум), станом на 01.01.2011 р. – 18,2 роки, наразі – близько 15,6 років через неконтрольований ввіз так званих «євроблях». Таким чином, середньостатистичний автомобіль на дорозі в Україні – це машина 2000 року випуску, переважно ВАЗ [1].

У структурі автопарку нашої країни є досить велика кількість АТЗ іноземного виробництва, обладнаних системами зниження токсичності ВГ, але на практиці багато з цих АТЗ таких систем вже не мають. Це відбувається через вельми дорогий ремонт таких систем, схильних до негативного впливу ВГ, що утворилися з неякісних палив, а також схильних до термічного руйнування. Ще трьома причинами такого явища є відсутність державного нагляду за виконанням законодавчо встановлених норм токсичності ВГ, відсутність кваліфікованого персоналу в штаті офіційних представництв іноземних торгівельних марок та крадіжки таких агрегатів безпосередньо з борту АТЗ через їх високу вартість [1].

Зазвичай після виходу з ладу такої системи її повністю демонтують з борту АТЗ разом з датчиками тиску і температури ВГ, кисню у ВГ і замінюють відрізком трубопроводу і так званим емулятором роботи системи очищення ВГ (з переналаштуванням електронного блоку керування). Емулятор генерує сигнали датчиків випускної системи АТЗ за їхньої фізичної відсутності за закладеною в нього програмою і подає їх в електронний блок керування ПДВЗ або АТЗ. При цьому електронний блок

керування для моделей АТЗ, що відрізняються тільки наявністю системи очищення ВГ, мають різну архітектуру і не є взаємозамінними. Достовірно точно оцінити кількість АТЗ, обладнаних емуляторами, складно [1].

1.4 Основні проблеми забезпечення виконання законодавчо встановлених норм показників рівня екологічної безпеки енергоустановок з поршневим ДВЗ в Україні

Як указано вище, на територіях України та країн ЄС діють законодавчо встановлені норми екологічності АТЗ і спеціальної техніки, що оснащені дизельним ПДВЗ [21–26]. Це Правила ЄЕК ООН № 49 (для АТЗ) і № 96 (для спеціальної техніки) рівнів EURO I – VI відповідно [21, 22]. У цих документах подано гранично допустимі значення масового викиду нормованих полютантів у ВГ дизелів, методики проведення випробувань, перелік і параметри режимів випробувальних циклів, вид і характеристики засобів вимірювальної техніки.

Однак проконтролювати додержання вимог цих норм наразі не є можливим як для нових одиниць АТЗ і спеціальної техніки, так і для таких об'єктів, що перебувають у експлуатації. Відповідно практично неможливим є також застосування відповідних санкцій до автовласників, АТЗ і спеціальна техніка яких не відповідають цим нормам, а також вилучення з експлуатації таких об'єктів. Такий стан зумовлено такими причинами:

1. Скасування щорічних обов'язкових технічних оглядів АТЗ у органах відповідних підрозділах МВС України. Радикальне реформування структури МВС України, розформування Державтоінспекції.

2. Скасування процедури перевірки показників токсичності ВГ поршневого ДВЗ АТЗ на стаціонарних постах ДАІ.

3. Відсутність обов'язкових сертифікаційних досліджень одиниць АТЗ, що ввозяться на територію України, або слідують її територією транзитом на в'їзних пунктах пропуску митниць, законодавчі прогалини у питаннях ввезення з-за кордону так званих «євроблях».

4. Відсутність сертифікованих сучасних засобів дослідження і контролю по-

казників токсичності ВГ ПДВЗ такої техніки у достатній кількості як на ринку, так і у лабораторіях наукових установ, закладів вищої освіти та конструкторських бюро підприємств.

5. Відсутність фактичного контролю якості паливо-мастильних матеріалів, що виробляються на вітчизняних нафтопереробних заводах або ввозяться з-за кордону і реалізуються мережами автозаправних станцій.

6. Відсутність заходів державного стимулювання додержання таких норм: надання податкових пільг, знижок на паркування і паливо, спрощених процедур оформлення документації тощо.

7. Відсутність державного замовлення на виробництво соціальної рекламної продукції, що роз'яснює, популяризує цю проблематику і впливає на рівень громадської свідомості власників та експлуатантів АТЗ з ПДВЗ.

8. Відсутність на ринку пропозицій сертифікованих систем і окремих агрегатів для зниження токсичності ВГ ПДВЗ АТЗ вітчизняного виробництва відповідної якості й невисокої вартості.

9. Відсутність державного замовлення на розроблення силами вітчизняних науковців і впровадження у виробництво на вітчизняних промислових підприємствах систем очищення ВГ ПДВЗ, засобів дослідження і контролю кількісного і якісного складу ВГ, методик і стендів для випробувань АТЗ і їхніх поршневих ДВЗ.

10. Відсутність законодавчої заборони на використання так званих емуляторів роботи систем очищення ВГ ПДВЗ, що програмно імітують їхньої наявність за їх несправної роботи або відсутності.

11. Економічна і політична ситуація в Україні починаючи з кінця 2013 і по теперішній час, у тому числі у пов'язана з пандемією короновірусного захворювання, відсуває проблематику ЕкБ експлуатації транспорту на другорядні позиції.

Отже, як випливає з вищенаведеного, у нашій державі склалася правова колізія – наявність законодавчо встановлених норм, з одного боку, і відсутність реальних важелів впливу – з іншого, чим і користуються автовласники і експлуатуючі організації, злісно не додержуючись вищезгаданих норм.

Основними шляхами покращання такої ситуації є ті, що природним чином ви-

пливають з формулювань вищенаведених проблем. Передумови для вирішення деяких з них закладено у доробку вітчизняних учених. Деякі з досліджень завершилися створенням відповідних пристроїв й приладів, тобто «в металі», їх докладно проаналізовано у [1]. При цьому, проблеми, пов'язані зі створенням відповідного правового забезпечення, можуть вирішуватися виключно на законодавчому рівні.

На фоні означених проблем чітко простежується ще одна – відсутність науково-методологічних основ комплексного всебічного і вичерпного вирішення проблем забезпечення законодавчо встановленого значення показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, чому і присвячено дане дисертаційне дослідження.

1.5 Визначення поняття «безаварійна експлуатація» як частини життєвого циклу енергоустановки з поршневим ДВЗ

Чинна редакція Правил безпеки дорожнього руху України (ПДР) [32] в розділі 31 «Технічний стан транспортних засобів та їх обладнання» в пункті 31.1 визначає таке: «технічний рівень транспортних засобів та їх обладнання повинні відповідати вимогам стандартів, що стосуються безпеки дорожнього руху та охорони довкілля, а також правил технічної експлуатації, інструкцій підприємств-виробників та іншої нормативно-технічної документації».

Пункт 31.4 містить таке: «забороняється експлуатація транспортних засобів згідно із законодавством за наявності таких технічних несправностей і невідповідності таким вимогам» і далі наведено перелік таких несправностей у відповідних підпунктах.

Так, у підпункті 31.4.6 «Двигун» зазначено таке: «а) вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах або їх димність перевищує встановлені норми стандартів; б) негерметичність паливної системи; в) несправна випускна система».

Пункт 31.5 містить таке: «у разі виникнення в дорозі несправностей, перерахованих в пункті 31.4 цих Правил, водій повинен вжити заходи щодо їх усунення, а якщо це зробити неможливо, то рухатися якомога коротшим шляхом до місця стоянки або ремонту. ... У разі виникнення під час перевезення несправностей, зазначених у підпункті 31.4.7 ... подальший рух заборонено до їх усунення ... ».

Тобто, в ПДР поняття «експлуатація автотранспортного засобу» ніяк не пов'язане з фактом наявність можливості його самостійного пересування, а тільки в сумі з фактом перебування його в прийнятному або задовільному технічному стані.

АТЗ, які за технічним станом порушує вимоги підпункту 31.4 ПДР і, тим більше, аварійно вийшло з ладу, незалежно від наявності факту його технічної або фактичної здатності самостійно рухатися, не вважається таким, що перебуває в процесі експлуатації. Також можна зробити висновок, що АТЗ, що знаходиться в стані технічного обслуговування або ремонту, також не може вважатися таким, яке знаходиться в процесі експлуатації. Зауважимо, що невідповідність показників токсичності й димності ВГ конкретного екземпляру ПДВЗ вимогам чинного на даній території законодавства не завжди є ознакою несправності ПДВЗ та не є у зв'язку з цим основою вважати дану конкретну ЕУ з цим ПДВЗ такою, що не перебуває у безаварійній експлуатації. Винятком тут є така невідповідність, зумовлена моральним зносом ПДВЗ чи не адаптованістю його до експлуатації на даній території.

1.6 Системний аналіз організації, складу та технічних рішень технологій захисту навколишнього середовища при безаварійній експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу

1.6.1 Стратегії досягнення оптимальних екологічних показників дизелів

Виявлено, що розробники дизелів через особливості складу їх ВГ дотримуються однієї з 3 стратегій досягнення оптимальних екологічних характеристик [1]:

1. Зниження емісії NO_x за рахунок узгодження параметрів робочого процесу і видалення ТЧ вже з потоку ВГ. Штучне погіршення робочого процесу з метою зменшення емісії NO_x призводить до збільшення емісії продуктів неповного згоряння палива і ТЧ. При цьому саме такому погіршенню найчастіше надають перевагу, оскільки воно сприяє зниженню жорсткості робочого процесу, що позитивно позначається на надійності ПДВЗ взагалі і на довговічності й безвідмовності зокрема.

2. Зменшення викиду продуктів неповного згоряння палива і ТЧ за рахунок узгодження параметрів робочого процесу і нейтралізація NO_x у потоці ВГ.

3. Прийняття паливної економічності (або іншого показника роботи дизеля) як

критерію якості, організація робочого процесу таким чином, щоби досягався локальний оптимум емісій ТЧ і NO_x, і видалення з потоку ВГ надлишків цих полютантів, що перевищують діючі норми. Ця концепція набула більш ширшого застосування порівняно з першими двома.

1.6.2 Повний комплекс засобів для очищення відпрацьованих газів дизелів від нормованих полютантів

Розповсюджені пристрої очищення повітря від пилу – циклони і мультициклони, сітчасті сухі й мокрі фільтри, побутові HEPA-фільтри, глибинні волокнисті та керамічні фільтри, а також промислові електрофільтри не здатні повною мірою задовольнити вимоги до очищення потоку ВГ двигунів АТЗ від ТЧ. Не здатні їх задовольнити й пристрої, що застосовуються при очищенні промислових газів [1].

Системи очищення ВГ ПДВЗ різного типу умовно поділяють за кількістю полютантів, які ці системи можуть нейтралізувати (знешкодити, перетворити). З п'яти законодавчо нормованих (прямо або опосередковано) це такі [1]: а) однокомпонентні – містять фільтри твердих частинок (ФТЧ) або сажові фільтри як окремі агрегати з системою керування, що знижують викиди ТЧ; б) двокомпонентні – містять ФТЧ і каталітичний відновлював (перетворювач) оксидів азоту або каталітичний поглинач NO_x як окремі агрегати, поєднані системою керування, і знижують викиди ТЧ і NO_x; в) трикомпонентні – містять ФТЧ, окислювальний каталітичний нейтралізатор продуктів неповного згоряння палива і ФТЧ як окремі агрегати, поєднані системою керування, і знижують викиди C_nH_m, CO і ТЧ; г) чотирикомпонентні – містять окислювальний каталітичний нейтралізатор, ФТЧ і каталітичний поглинач NO_x як окремі агрегати, поєднані системою керування, і знижують викиди C_nH_m, CO, ТЧ і NO_x; д) п'ятикомпонентні – містять окислювальний каталітичний нейтралізатор, ФТЧ, каталітичний поглинач NO_X і фільтр або поглинач оксидів сірки SO_x як окремі агрегати, поєднані системою керування, і знижують викиди C_nH_m, CO, ТЧ, NO_x і SO_x.

1.6.3 Компонування виконавчих пристроїв у системі зниження токсичності відпрацьованих газів дизелів

Повний комплекс для очищення ВГ дизеля від їхніх шкідливих компонентів в переважній більшості випадків складається з трьох елементів, які розташовуються послідовно по потоку ВГ [1]: 1) термічний або каталітичний окислювальний нейтралізатор продуктів неповного згоряння палива і сажі з системою подачі додаткового повітря і палива (розміщений по потоку ВГ якомога ближче до ПДВС для забезпечення його швидкого прогрівання); 2) ФТЧ або сажовий фільтр з системою його регенерації (для забезпечення температури ВГ 600 ºС для вигоряння ТЧ і 650 ºС для десульфітації); 3) каталітичний поглинач NO_x з системою його регенерації.

Світовий досвід розроблення систем очищення ВГ дизелів від шкідливих речовин показує, що сажовий фільтр (або ФТЧ) – невід'ємна частина такої системи, а в деяких випадках і її єдиний компонент, що часто доповнюється системою регенерації самого ФТЧ. Застосування ФТЧ пов'язано з динамічною зміною його параметрів роботи і необхідністю періодичного відновлення його робочих властивостей, що неможливо без застосування електронного керування або у вигляді автономного контуру, або у вигляді гілки електронного блоку керування дизелем. Система очищення ВГ від нормованих шкідливих речовин для дизелів різної потужності та призначення може бути побудована на основі модульного принципу і містити, залежно від параметрів конкретного дизеля і необхідного рівня очищення ВГ, будь-яку необхідну кількість компонентів. Порядок розміщення по потоку ВГ (вздовж випускного тракту дизеля) і компонування елементів системи очищення ВГ дизеля не є усталеною нормою. Іноді каталітичний поглинач NO_x встановлюється до ФТЧ з каталітичним покриттям із платини для здійснення окислення ТЧ оксидами азоту [1]. Через те, що при горінні сажі у ФТЧ при регенерації відзначається значна емісія ПАВ і продуктів їхнього згоряння (бензол, толуол), іноді встановлюється додатковий каталітичний нейтралізатор продуктів неповного згоряння палива за ФТЧ або міняють місцями окисний каталітичний нейтралізатор продуктів неповного згоряння палива і ФТЧ по потоку ВГ [1]. У будь-якому разі, це питання ще не знайшло однозначної відповіді й потребує подальших досліджень.

Через наявність вимог до масогабаритних показників і компонування АТЗ розробники пристроїв і систем з очищення ВГ прагнуть розміщувати складові цих систем більш компактно, бажано в єдиному корпусі. При цьому такий комбінований пристрій ще може частково або повністю виконувати функції глушника шуму випуску, шуму, що виникає в процесі регенерації ФТЧ, а також функції іскрогасника.

Для великовантажних АТЗ, як правило, загальний корпус системи зниження токсичності ВГ має великий поперечний переріз і малу протяжність – в них потік ВГ проходить паралельно осі корпусу до п'яти разів, здійснюючи кожен раз поворот на 180°. Для легкових АТЗ корпус такої системи має малий поперечний розріз, але значну протяжність – у ньому всі вищевказані елементи встановлено послідовно вздовж осі кузова АТЗ і потік ВГ не змінює свого напряму. Відомі також конструкції, в яких ФЕ і носії каталітичного покриття нейтралізаторів і поглиначів являють собою полі циліндри або конуси з керамічного матеріалу і встановлюються коаксіально або під нахилом один відносно одного або в комбінації з циліндрами з сітчастого і волокнистого матеріалу [1].

Для сучасних дизелів з турбонаддувом такі системи працюють спільно з системою рециркуляції ВГ, така система може містити окремий ФТЧ для рециркульованих ВГ, що не має власної бортової системи регенерації, яка здійснюється на спеціалізованому підприємстві під час чергового технічного обслуговування АТЗ [1].

Для підвищення компактності системи зниження токсичності ВГ спеціалістами деяких підприємств пропонується розташовувати всі її елементи в корпусах гнучких компенсаторів випускного тракту АТЗ [1].

Корпуси систем зниження токсичності ВГ виготовляють з листового нержавіючого прокату, в особливих випадках – з діелектрика. Зазвичай корпуси мають теплоізоляцію у вигляді шару теплоізолюючого матеріалу між подвійними стінками корпусу і/або теплового відбиваючого екрану всередині корпусу для зменшення теплovтрат при роботі, якомога більш швидкого прогріву при запуску і прогріванні двигуна й підтримки необхідного рівня температури ФЕ [1]. Так, наприклад, корпус системи очищення ВГ дизеля Isuzu 4HL1, що містить ФЕ каталітичного перетворювача і ФТЧ, а також дифузор на вході і конфузор на виході, має такі габаритні розміри:

діаметр 0,3 м, довжина 0,8 м, а усі його елементи з'єднані між собою рознімно [1].

Фахівці, що працюють над удосконаленням таких систем, у заявках на корисні моделі й винаходи пропонують оснащувати проточні частини корпусів та елементів цих систем такими елементами [1]: а) дифузори на вході і конфузори на виході потоку ВГ; б) завихрювачі й пластинчасті або лопаткові напрямні апарати на вході, з напрямними лопатками зі змінним кроком повороту у ФЕ; в) системи подачі у ВГ додаткового повітря (окремі повітродувки), палива (випарювальна горілка, форсунка) або інших речовин (для реалізації процесів регенерації і десульфації елементів системи); г) механізми газорозподілу золотникового типу, байпасні канали із запобіжними або легкоруйнівними перегородками; д) рухомі очищувачі ФЕ від накопичених ТЧ з обертовими від електродвигуна щітками, ротаційними камерами на вході потоку ВГ, вхідними патрубками у вигляді «равлика» і газовою турбіною, що приводить в обертання ФЕ з опорами в торцевих кришках корпусу, рухомим кріпленням ФЕ у ФТЧ, що має поздовжнє переміщення уздовж напрямних з механізмом зворотного ходу; е) камери згоряння і резонансні камери, електричні нагрівальні елементи (ніхромові спіралі), що живляться електричним струмом напругою 220 В.

Оскільки в конструкції елементів системи зниження токсичності ВГ АТЗ також використовуються принципи і елементи системи гасіння шуму випуску ВГ – різке розширення, різкий поворот і поділ потоку ВГ, а також наявність значного ГО при проходженні потоком ФЕ, то такі системи можуть частково або повністю замінити штатний глушник шуму випуску ВГ і штатний іскрогасник АТЗ. Деякі автори в описах суті винаходів, що являють собою новий або вдосконалений ФЕ для ФТЧ, передбачають більш широке коло завдань для його використання: для очищення ВГ котелень, ТЕЦ, ТЕС і заводів зі спалювання твердих побутових відходів [1].

1.7 Класифікація чинників екологічної небезпеки, джерелом яких є поршневий ДВЗ в складі енергоустановки

У роботі [1] розроблено класифікацію чинників екологічної небезпеки (ЕНБ), джерелом яких є ПДВЗ в складі ЕУ у двох наближеннях. Однак, постала нагальна потреба розширити, уточнити й доповнити цю класифікацію, представити її вичерпною для етапу «експлуатація» ЖЦ таких технічних об’єктів. На основі такої

класифікації, у третьому її наближенні, побудовано класифікатор, заснований на ієрархічному принципі, його відображено на табл. 1.1 та описано у [3].

Таблиця 1.1 – Класифікація та ієрархічний класифікатор чинників екологічної небезпеки, джерелом яких є поршневий ДВЗ в складі енергоустановки

Шифр класифікат	ЧИННИК ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ	Поточний статус
A	**ПОЛЮТАНТИ**	**2 з 14**
A.a	***Газоподібні й аерозольні речовини-полютанти***	***2 з 8***
A.a.1	*Законодавчо нормовані прямо*	*2 з 2*
A.a.1.1	Викид продуктів неповного згоряння моторного палива, у потоці аерозолю ВГ (C_nH_m, CO, PM)	так
A.a.1.2	Викид продуктів повного згоряння моторного палива, у потоці аерозолю ВГ (NO_x)	так
A.a.2	*Законодавчо нормовані опосередковано*	*0 з 3*
A.a.2.1	Викид оксидів сірки у потоці аерозолю ВГ (SO_x)	ні
A.a.2.2	Викид ПАВ та сполук важких металів у потоці аерозолю ВГ (бенз(а)пірен, ПАУ, ТЕС)	ні
A.a.2.3	Викид парникових газів у потоці аерозолю ВГ (CO_2, H_2O, CH_4, NO_x)	ні
A.a.3	*Законодавчо ненормовані*	*0 з 3*
A.a.3.1	Викид випарів моторного палива та оливи, спричинені явищами великого та малого дихання резервуару	ні
A.a.3.2	Викид аерозолю картерних газів	ні
A.a.3.3	Підвищення вологості атмосферного повітря (H_2O)	ні
A.b	***Рідкі речовини-полютанти***	***0 з 6***
A.b.1	*Горючі й вибухонебезпечні*	*0 з 2*
A.b.1.1	Забруднення НПС моторним паливом	ні
A.b.1.2	Забруднення НПС моторною оливою	ні
A.b.2	*Негорючі*	*0 з 2*
A.b.2.1	Забруднення НПС охолоджуючою рідиною	ні
A.b.2.2	Забруднення НПС гальмівною рідиною	ні
A.b.3	**Консистентні**	**0 з 2**
A.b.3.1	Забруднення НПС консистентними змазками	ні
A.b.3.2	Забруднення НПС консерваційними рідинами	ні
B	**ШКІДЛИВІ ФАКТОРИ ВПЛИВУ**	**1 з 6**
B.a	***Енергетичне забруднення НПС***	***0 з 3***
B.a.1	Забруднення НПС шумом та вібрацією	ні
B.a.2	Забруднення НПС теплотою	ні
B.a.3	Забруднення НПС електромагнітними полями	ні
B.b	***Інформаційне забруднення НПС***	***0 з 3***
B.b.1	Забруднення НПС хибною інформацією	ні
B.b.2	Забруднення НПС інформаційним шумом	ні
B.b.3	Забруднення НПС турбуючими факторами	ні
B.c	***Споживання невідновного джерела енергії***	***так, 1 з 1***
C	**ВІДХОДИ (ТВЕРДІ РЕЧОВИНИ-ПОЛЮТАНТИ)**	**0 з 3**

Закінчення таблиці 1.1

C.a	Забруднення НПС сплавами чорних та кольорових металів	ні
C.b	Забруднення НПС полімерними та композиційними матеріалами	ні
C.c	Забруднення НПС склом та керамічними речовинами	ні

У цьому класифікаторі:

– позиції A.a.1.1, A.a.1.2, B.c (виділено зеленим кольором) – чинники ЕНБ, що враховуються оригінальним математичним апаратом комплексного паливно-екологічного критерію;

– позиції A.a.2.1 – A.a.2.3, A.a.3.1 – A.a.3.3, B.a.1, B.a.2 (виділено сірим кольором) – чинники ЕНБ, які проявляються в процесі безаварійної експлуатації ПДВЗ і можуть бути враховані вдосконаленим математичним апаратом комплексного паливно-екологічного критерію;

– позиції A.b.1.1, A.b.1.2, A.b.2.1, A.b.2.2, A.b.3.1, A.b.3.2, B.a.3, B.b.1 – B.b.3, C.a – C.c (виділено помаранчевим кольором) – чинники, котрі не проявляються в процесі безаварійної експлуатації ПДВЗ, та не можуть бути враховані оригінальним і вдосконаленим математичним апаратом комплексного паливно-екологічного критерію, для їх врахування слід розробити інший критеріальний математичний апарат.

Врахування позиції B.c класифікатора – споживання невідновного джерела енергії, тобто моторного палива нафтового походження, природного газу тощо – є однією з переваг математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію, проте параметри такого врахованого чинника ЕНБ не є чітко визначеними.

Для обґрунтування необхідності врахування споживання моторного палива було проаналізовано характер впливу цього чинники на усі інші з вказаного класифікатора, результати якого проілюстровано у табл. 1.2. – див. підрозділ 1.8, вагомість такого чинника ЕНБ у структурі критерію досліджено у розділі 3.

1.8 Аналіз впливу споживання моторного палива поршневим ДВЗ на чинники екологічної небезпеки процесу експлуатації енергоустановки

Хоча витрати палива двигуном зазвичай не відносять до чинників ЕНБ, їх значення чинить суттєвий вплив на увесь відомий спектр інших чинників ЕНБ.

Аналіз спеціалізованої науково-технічної літератури виявив, що споживання

палива ПДВЗ як у формі середньоексплуатаційного значення масової годинної витрати палива G_{fme} (у кг/год) (має екстенсивний характер впливу), так і у формі середньоексплуатаційного значення питомої ефективної масової годинної витрати палива g_{eme} (у кг/(кВт·год)) (має інтенсивний характер впливу), неоднозначно характеризує всі аспекти рівня ЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

За рівних інших умов, що описані вище, такий вплив проявляється таким чином. Результати аналізу передусім дозволяють доповнити та уточнити класифікацію типів забруднення НПС від ПДВЗ як частини ЕУ, відображену в [1] та розповсюджену на випадок безаварійної експлуатації (див. попередній підрозділ).

1. Моторне паливо нафтового походження є невідновним джерелом енергії. Тому, чим нижче значення G_{fme} і g_{eme}, тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу в глобальному масштабі [1, 3, 6].

2. Джерелом деяких типів законодавчо нормованих полютантів у потоці ВГ, зокрема продуктів неповного згоряння, а саме незгорілих газоподібних вуглеводнів моторного палива та мастила C_nH_m, монооксиду вуглецю CO, твердих частинок ТЧ, є екзотермічні окислено-відновні реакції згоряння палива, що здійснюється в умовах далеких від ідеальних. Тому, чим повніше такі реакції проходять (що означає нижче значення G_{fme} і g_{eme}), тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу [1, 3, 6].

3. Моторне паливо містить атомарну і зв'язану сірку, кількість якої обмежена відповідними нормативними документами [33]. Це означає, що масовий годинний викид оксидів сірки SO_x в потоці ВГ також є нормованим полютантом, хоча й опосередковано. Тому, чим меншим є значення G_{fme}, тим нижчим є величина викиду цього полютанта, і вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу [1, 3]. Значення g_{eme} має вплив на співвідношення між SO_x та іншими сполуками сірки в потоці ВГ, зміщуючи баланс у бік SO_x.

4. ПДВЗ традиційної конструкції з кривошипно-шатунним механізмом є потужним джерелом шуму та вібрацій (факторів зовнішньої неврівноваженості) [1, 3], інтенсивність яких тим вище, чим більшою є вироблена ПДВЗ індикаторна потужність на робочому режимі. Обидва ці чинники ЕНБ за своєю суттю є дисипативними процесами. Тому, чим меншим є значення G_{fme} і g_{eme}, тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу.

5. Будь-який ПДВЗ – це теплова машина, і вся енергія, що виділяється під час процесу згоряння моторного палива у камері згоряння у робочому процесі при експлуатації, так чи інакше в кінцевому підсумку перетворюється на теплову енергію й передається в НПС і є частиною його теплового забруднення [1, 3]. Хімічна енергія, що потенційно міститься в споживаному моторному паливі, може бути розділена на недоотриману (через недосконаліть робочого процесу), механічні втрати (через недосконаліть конструкції ПДВЗ та необхідності забезпечення здійснення робочого процесу) та корисну (передану споживачеві). Споживач витрачає ефективну потужність, отриману від ПДВЗ, для подолання дисипативних сил (головним чином сил тертя), а також під час виконання функцій, для яких він призначений (наприклад, виконання механічної роботи), як і для подолання недосконалості його конструкції. Співвідношення між першими двома і третіми компонентами енергетичного балансу характеризується значенням g_{eme}, співвідношення між першим і другим – показниками токсичності ВГ, а значення G_{fme} характеризують абсолютне значення теплового забруднення НПС. Однак, ефективна потужність спочатку витрачається на виконання корисної роботи і лише після цього неминуче перетворюється на теплову енергію. Тому, чим меншим є значення G_{fme} і g_{eme}, тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу.

6. Моторне паливо, що в процесі виготовлення піддається каталітичному риформінгу, містить опосередковано нормовані потенційно шкідливі компоненти, а саме: поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) (наприклад, бензин(а)пірен) та присадки з сполуками важких металів (наприклад, тетраетилсвинець, повністю заборонений сучасними нормативними документами) [11]. Також з масовою годинною витратою палива співвідноситься витрата моторної оливи на угар, що також містить сполуки важких металів. Це відбувається через те, що моторна олива потрапляє в камеру згоряння ПДВЗ, а для деяких видів ПДВЗ є це компонентом моторного палива, як у ПДВЗ з кривошипно-камерною продувкою. Тому, чим меншим є значення G_{fme} і g_{eme}, тим нижчою є величина масового годинного викиду незгорілих ПАВ у потоці ВГ, а значить і вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу [1, 3]. Кореляції між значеннями викиду сполук важких металів та інших непрямо нормованих

полютантів у ВГ та значення g_{eme} не виявлено.

7. Моторне паливо та олива містять азотовмісні присадки, які у процесі згоряння разом із азотом повітря утворюють оксиди азоту NO_x, що також є законодавчо нормованими полютантами [1, 3, 6]. Чим краще організовано робочий процес ПДВЗ, тим вищою є температура в камері згоряння і, відповідно, вищою є величина масового годинного викиду NO_x в потоці ВГ (значення цієї величини не досягає нуля навіть при значному погіршенні чи порушенні робочого процесу ПДВЗ). Тому, чим меншим є значення G_{fme} і більшим є значення g_{eme}, тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу.

8. До числа продуктів повного згоряння моторного палива відносяться вода H_2O та вуглекислий газ CO_2. Друга з цих речовин – продукт екзотермічних окисно-відновних реакцій, що являє собою парниковий газ і сприяє глобальному потеплінню на Землі. Викиди CO_2 в певній країні не повинні перевищувати квот, встановлений Кіотським протоколом [1, 3, 23]. Це означає, що CO_2 також є законодавчо нормованим полютантом, хоча і опосередковано. Тому, чим більше і ефективніше моторного палива згоряє в камері згоряння ПДВЗ, тим меншим є значення G_{fme} і g_{eme}, і тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу.

9. Загальновідомо, що будь-який АТЗ, що споживає рідке моторне паливо, забруднює НПС випарами цього палива через прояв явищ великого та малого дихання резервуару. Саме так проявляється той тип чинників ЕНБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ, як забруднення НПС рідкими полютантами [1, 3]. Чим більшою є кількість спожитого ПДВЗ палива і менш ефективним є його згоряння, тим більшим паливний баком оснащують ЕУ, і тим частіше відбувається повне вичерпання палива з резервуара й, відповідно, повна заправка бака, що екстенсивно збільшує ефект великого дихання резервуара. За тих самих умов при великій амплітуді зміни температури повітря НПС впродовж доби також спостерігається інтенсифікація ефекту малого дихання резервуара. Тому, чим меншим є значення G_{fme} і g_{eme}, тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу.

10. Під час експлуатації ПДВЗ виділяються так звані картерні гази, що складаються з випарів моторного палива та оливи, мілких крапель рідкого незгорілого па-

лива, повітря свіжого заряду, компонентів ВГ, що потрапляють у картер ПДВЗ, де зберігається моторна олива крізь зазори у циліндропоршневій групі (ЦПГ) КШМ, а також краплі туману моторної оливи, що утворився як результат процесу змащення ЦПГ розбризкуванням [1, 3]. Картерні гази створюють надлишковий тиск у внутрішніх порожнинах картера та піддону ПДВЗ і тому періодично скидаються в НПС. Від дисперсної фази аерозолі картерних газів, а саме крапель туману моторної оливи, очищаються системою суфлювання ПДВЗ. Дисперсійне середовище аерозолю картерних газів, а саме суміш перелічених вище газів, в ПДВЗ без системи нейтралізації полютантів у потоці ВГ також не очищається від його шкідливих компонентів. Тому, чим меншим є значення G_{fme} і g_{eme} (у одиницях ПДВЗ, які ще не досягли граничного стану через фізичний знос), тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу.

11. Робота ПДВЗ, як сучасних конструкцій, так і достатньо морально застарілих, керується електронною системою автоматичного керування (ЕСАК), яка складається з джерела електричної енергії (генератора та акумулятора), датчиків, електронного блоку керування (ЕБК), виконуючих пристроїв та проводів. Деякі види ПДВЗ мають систему запалювання, яка складається з електричних кіл високої та низької напруги. Обидві ці системи є джерелами потужного електромагнітного забруднення НПС. Чим вищим є значення G_{fme}, тим інтенсивніше працюють ці системи та чим нижчим є значення g_{eme}, тим ефективніше ці системи працюють. Тому, чим вищим є значення G_{fme} та чим нижчим є значення g_{eme}, тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу. При цьому треба враховувати той факт, що значна частина одиниць ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу вітчизняного виробництва, які досі перебувають в експлуатації та не можуть бути виведені з неї, обладнано механічними чи гідромеханічними регуляторами, а не ЕСАК.

12. Описані вище системи є потужними джерелами інформаційного забруднення НПС, особливо при використанні бездротових інтерфейсів для передачі даних, наприклад GPS, Wi-Fi, Bluetooth – хибної інформації, інформаційного шуму, турбуючи факторів. Чим вищим є значення G_{fme}, тим інтенсивніше працюють ці системи та чим нижчим є значення g_{eme}, тим ефективніше ці системи працюють. Тому, чим вищим є значення G_{fme} та чим нижчим є значення g_{eme}, тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу.

13. Чим більш інтенсивно працює ПДВЗ, тим більше він споживає моторного палива за одиницю часу G_{fme}, і відповідно тим швидше він вичерпає свій фізичний ресурс – сплави чорних і кольорових металів, полімери і гума, кераміка і скло. Чим ефективніше він використовує споживане паливо g_{eme}, тим рідше він потребує технічного обслуговування та ремонту з урахуванням того, що подія відмови є явищем, що насить випадковий характер. У разі досягнення ПДВЗ граничного технічного стану він потребує капітального ремонту або утилізації, що супроводжується забрудненням НПС твердими полютантами (відходами), тобто деталями. Тому, чим нижчим є значення G_{fme} та g_{eme}, тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу.

14. Викладене вище у рівній мірі стосується забруднення НПС від ПДВЗ рідкими полютантами, а саме відходами технічних рідин – моторних палива і мастила; охолоджуючої, оживаючої й гальмівної рідин, консистентних і консерваційних змазок. Тому, чим нижчим є значення G_{fme} та g_{eme}, тим вищим є рівень ЕБ процесу.

15. Продуктом повного згоряння моторного палива є пара дігідрогену монооксиду H_2O, яка потрапляє у НПС з потоком ВГ та конденсується за відповідних температур. При цьому ця речовина сама по собі не є шкідливою чи небезпечною. Однак, по-перше, сприяє підвищенню вологості повітря, корозії виробів зі сплавів чорних металів та утворенню кислотних дощів, реагуючи з такими компонентами ВГ, як оксиди азоту NO_x і сірки SO_x. Тому, чим нижчим є значення G_{fme} та g_{eme}, тим вищим є рівень ЕБ оцінюваного процесу.

Наведені вище міркування про характер кореляції між чинниками ЕНБ та впливаючих на них паливних чинників ЕНБ зведено до таблиці 1.2.

Слід зазначити, що з числа відображених у розділі 2 критеріальних апаратів тільки математичний апарат комплексного паливно-екологічного критерію враховує споживання палива ПДВЗ як у вигляді масової годинної витрати G_{fme} і у вигляді питомої ефективної масової годинної витрати g_{eme}.

У таблиці 1.2 застосовано такі умовні позначення (*): позначка «+» вказує на те, що збільшення значення величини впливаючого паливного чинника ЕНБ спричиняє збільшення значення величини чинника ЕНБ; позначка «–» вказує на те, що збільшення значення впливаючого паливного чинника ЕНБ спричиняє зменшення значення величини чинника ЕНБ.

Таблиця 1.2 – Вплив споживання моторного палива поршневим ДВЗ на інші чинники ЕНБ процесу безаварійної експлуатації енергоустановок з ним

Шифр класифікатора	ЧИННИК ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ	Впливаючий фактор		
		G_{fuel}	g_e	η_e
		кг/год	г/(кВт·год)	–
		Характер впливу		
A	**ПОЛЮТАНТИ**			
A.a	***Газоподібні й аерозольні речовини-полютанти***			
A.a.1	*Законодавчо нормовані прямо*			
A.a.1.1	Викид продуктів неповного згоряння моторного палива, у потоці аерозолю ВГ (C_nH_m, CO, PM)	+	+	–
A.a.1.2	Викид продуктів повного згоряння моторного палива, у потоці аерозолю ВГ (NO_x)	+	–	+
A.a.2	*Законодавчо нормовані опосередковано*			
A.a.2.1	Викид оксидів сірки у потоці аерозолю ВГ (SO_x)	+	–	+
A.a.2.2	Викид ПАВ та сполук важких металів у потоці аерозолю ВГ (бенз(а)пірен, ТЕС)	+	+	–
A.a.2.3	Викид парникових газів у потоці аерозолю ВГ (CO_2)	+	–	+
A.a.3	*Законодавчо ненормовані*			
A.a.3.1	Викид випарів моторного палива та оливи, спричинені явищами великого та малого дихання резервуару	+	+	–
A.a.3.2	Викид аерозолю картерних газів	+	+	–
A.a.3.3	Підвищення вологості атмосферного повітря (H_2O)	+	+	–
A.b	***Рідкі речовини-полютанти***			
A.b.1	*Горючі й вибухонебезпечні*			
A.b.1.1	Забруднення НПС моторним паливом	+	+	–
A.b.1.2	Забруднення НПС моторною оливою	+	+	–
A.b.2	*Негорючі*			
A.b.2.1	Забруднення НПС охолоджуючою рідиною	+	+	–
A.b.2.2	Забруднення НПС гальмівною рідиною	+	+	–
A.b.3	*Консистентні*			
A.b.3.1	Забруднення НПС консистентними змазками	+	+	–
A.b.3.2	Забруднення НПС консерваційними рідинами	+	+	–
B	**ШКІДЛИВІ ФАКТОРИ ВПЛИВУ**			
B.a	***Енергетичне забруднення НПС***			
B.a.1	Забруднення НПС шумом та вібрацією	+	+	–
B.a.2	Забруднення НПС теплотою	+	+	–
B.a.3	Забруднення НПС електромагнітними полями	+	+	–
B.b	***Інформаційне забруднення НПС***			
B.b.1	Забруднення НПС хибною інформацією	+	+	–
B.b.2	Забруднення НПС інформаційним шумом	+	+	–
B.b.3	Забруднення НПС турбуючими факторами	+	+	–
B.c	***Споживання невідновного джерела енергії***			
C	**ВІДХОДИ (ТВЕРДІ РЕЧОВИНИ-ПОЛЮТАНТИ)**			
C.a	Забруднення НПС сплавами чорних та кольорових металів	+	+	–

Закінчення таблиці 1.2

C.b	Забруднення НПС полімерними та композиційними матеріалами	+	+	–
C.c	Забруднення НПС склом та керамічними речовинами	+	+	–

Зокрема, у класифікації чинників ЕНБ, джерелом яких є ПДВЗ в складі ЕУ, з відповідним класифікатором, побудованим за ієрархічним принципом у [3], до законодавчо нормованих безпосередньо у складі ВГ чинників – газоподібних та аерозольних забруднювачів в потоці ВГ, також містяться законодавчо нормовані опосередковано у складі ВГ чинники – оксиди сірки SO_2, поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), сполуки важких металів, парникові гази (CO_2), а також законодавчо ненормовані у складі ВГ – викиди парів моторного палива та оливи, аерозолю картерних газів та водяної пари та інших. Такі чинники ЕНБ в принципі можуть бути введено до структури критерію комплексного паливно-екологічного критерію.

Інші речовинні чинники ЕНБ, що містяться в класифікації, для того, щоб бути у складі впливаючих факторів у математичному апараті комплексного паливно-екологічного критерію, повинні перетворюватися у газоподібний стан (це виливи рідких забруднювачів), а такі, що за нормальних умов не можу таким чином перетворені (відходи, тобто тверді речовини-забруднювачі) таким математичним апаратом взагалі не можуть бути враховані безпосередньо.

1.9 Характеристика особливостей відпрацьованих газів дизельного двигуна як чинника негативного впливу на складові довкілля

Токсичність ВГ двигуна – один з найважливіших показників його роботи. Доля автомобільного транспорту у викиді шкідливих речовин становить у США 60,6 %, у Великобританії – 33,5 %, у Франції – 32 % [1]. Щодо України такі дані наведено у Національних доповідях про стан навколишнього природного середовища в Україні за 2009–2018 рр., з аналізу в [1] яких можна з упевненістю можна встановити, що вони суттєво не відрізняються від наведених, а саме становить 35 %.

ВГ дизеля являють собою багатокомпонентну суміш газів, що містить також випари, краплі рідин і дисперсні тверді частинки, а також мають продукти повного згоряння палива (діоксид вуглецю CO_2 і вода H_2O) і продукти неповного згоряння

(монооксид вуглецю CO, газоподібні або конденсовані вуглеводні C_nH_m (або CH_x, чи CH), альдегіди RCOH, сажа C). У ВГ присутні також невикористаний при горінні кисень O_2, азот з повітря N_2 і продукти його окислення – оксиди азоту NO_X, газоподібні продукти окислення містяться в паливі сірки (SO_x). Крім газоподібних компонентів у ВГ присутні й «тверді частинки» (ТЧ або PM від Particulate Matter у імплементованих стандартах), основною частиною яких є сажа. Всього ВГ ПДВЗ містять за різними оцінками 250 – 2000 компонентів, однак лише 0,1 – 1,0 % від їх обсягу є токсичними. При цьому 80–95 % від загальної маси забруднюючих речовин у ВГ випадає на такі п'ять: NO_x, CO, C_nH_m, RCOH, SO_2. Нормуються NO_x, CO, C_nH_m, ТЧ [1].

Дизелі, зважаючи на специфіку організації їхнього робочого процесу, мають свої особливості складу ВГ порівняно з ПДВЗ інших типів. Так, у ВГ дизеля мало продуктів неповного згоряння палива – CO і газоподібних C_nH_m, однак присутня значна кількість ТЧ, NO_x і SO_x. Головна особливість ВГ дизеля полягає в антагоністичності факторів, які сприяють утворенню ТЧ і NO_x в робочому процесі. Це призводить до того, що узгодженням параметрів роботи дизеля неможливо отримати одночасно абсолютний мінімум емісій і ТЧ, і NO_x, мова може йти лише про відшукання деякого оптимуму, побудованому на компромісі [1].

Одним з двох основних забруднюючих речовин у ВГ дизелів незалежно від їх типу, розмірності й конструктивних особливостей є оксиди азоту NO_x – їхня доля у сумарних викидах забруднюючих речовин за масою становить 30–80 % і 60–95 % за еквівалентною токсичністю. Вони на 80–90 % складаються з NO і NO_2, а решта припадає на N_2O, N_2O_3, N_2O_4, N_2O_5 [1, 6].

За визначенням з імплементованих стандартів Правил ЄЕК ООН різних рівнів EURO під терміном ТЧ розуміють всі субстанції, які, перебуваючи в суміші ВГ з чистим повітрям при максимальній температурі 52 °C (125 F), затримуються фільтром зі скловолокна з тефлоновим покриттям і не є водою [1, 6 21, 22]. Усі ТЧ поділяють на дві фракції – розчинні й нерозчинні у органічних розчинниках (у воді такі ТЧ не є розчинними, оскільки вкриті шаром сконденсованих незгорілих вуглеводнів, які не змочуються водою). Розчинні ТЧ – це абсорбовані (поглинені усім обсягом) вуглеводні, що виділилися з палива або з моторної оливи. Вони можуть бути затримані лише

при їхніх конденсації або адсорбції (осадженням на поверхні) за відповідних температур. Нерозчинні ТЧ складаються із сажі (тверді аморфні пористі агломерати гіллястої структури з вуглецю палива з незначною домішкою водню), сульфатів (твердих солей сірки палива і присадок моторної оливи), оксидів металів (з присадок палива і оливи), і абразивних частинок (продуктів зносу деталей двигуна), золи (металоорганічні сполуки, що утворюються в камері згоряння з моторної оливи).

Слід зазначити, що таке визначення поняття ТЧ, наведене у стандарті, дещо відрізняється від основних положень теорії дисперсних систем щодо дисперсної фази аерозолів та загальноприйнятої у екології класифікації видів забруднення атмосферного повітря і може бути поділене на хімічне і механічне забруднення. Тому склалася тенденція щодо заміни терміна «тверді частинки» на термін «дисперсні частинки». У цьому дослідженні буде використовуватися термін «тверді частинки» і позначення «PM» на рисунках і у формулах.

У 1 $м^3$ сухих ВГ автотракторних дизелів нерозчинні й розчинні ТЧ спів відносяться як 9:1. Нерозчинні ТЧ в середньому на 5–65 % за масою складаються з оксидів металів і сульфатів і на 25–95 % – із сажі, але конкретне співвідношення цих компонентів ТЧ залежить від режиму роботи дизеля, а їхня кількість – у прямій кореляції з витратою оливи на угар [1, 6–9]. Сажа – це продукт крекінгу (розщеплення) вуглеводнів палива під впливом високої температури і при відсутності або дефіциті кисню, її частинки мають розміри в межах 0,01–100 мкм. Але основна маса частинок сажі має розміри в межах 0,5–10 мкм.

Головними особливостями сажі є дуже розвинена поверхня і, відповідно велика адсорбційна здатність. Саме тому в сажі присутні незгорілі вуглеводні і, що особливо небезпечно, ПАВ, яких у ВГ налічується більше 20 видів. Такі речовини переходять з палива безпосередньо у ВГ або утворюються під час піролізу важких фракцій палива в зонах з малим коефіцієнтом надлишку повітря. У камері згоряння дизеля ці речовини адсорбуються на поверхні частинок сажі й утримуються ними. Серед них – бенз(α)пірен $C_{20}H_{12}$ – один з найбільш токсичних забруднюючих речовин у ВГ, що являє собою один з найсильніших канцерогенів і використовується як маркер наявності таких речовин у ВГ. Найбільш небезпечними частинками сажі є частинки з

розмірами 0,1–1 мкм, оскільки вони здатні проникати крізь альвеоли легенів безпосередньо в кров людини або тварини. Тому частина ТЧ у сумарних викидах становить за масою до 7,5 % і 5–45 % за еквівалентною токсичністю [1, 6–18].

Крім того, сажа погіршує видимість у містах, входячи до складу смогу, забруднює воду і ґрунт (чорне димлення, яке стає видимим при концентрації сажі більш ніж 0,1 г/м^3). Ще однією особливістю сажі, яка сильно ускладнює процес очищення ВГ від неї, є її мала щільність, причому вона являє собою фракцію ТЧ, що має найбільшу питому вагу [8, 9]. Також у ВГ дизелів присутні продукти реакцій їхніх шкідливих компонентів – нітроканцерогени, нітромутагени [11], і фулерени (алотропні форми вуглецю, що мають вигляд опуклих замкнених багатогранників з парним числом трикоординатних атомів вуглецю) несуть у собі (містяться у середині обсягу самого фулерену) і на собі (адсорбовані на його поверхні) поліциклічні ароматичні вуглеводні, які вкрай складно екстрагувати [1].

Механізм утворення сажі – це послідовність процесів термічного розкладання палива, утворення активних вуглеводневих частинок у полум'ї (факелі палива, що згоряє), зростання ядер сажі, агломерації цих частинок і їх окислення. Вміст сажі у ВГ є результатом двох взаємно визначальних процесів – утворення і окислення сажі. У робочому циклі дизеля сажоутворення залежить від коефіцієнта надлишку повітря, особливостей сумішоутворення, властивостей палива, температури і тривалості згоряння. Підвищення вмісту сажі у ВГ дизеля відбувається на перехідних режимах (через інерційність системи повітропостачання), а також на режимах з мінімальною частотою обертання КВ двигуна і повним навантаженням, де зменшується тиск наддувного повітря і погіршується якість сумішоутворення [1, 6–17].

ТЧ являють собою досить складне фізичне явище (матеріальний об’єкт фізичної реальності) і, відповідно, вкрай складний об’єкт наукового дослідження з усіма притаманними їм аспектами. Ось основні з тих, що не описані вище: внесок у токсичність ВГ дизелів, особливості генезису в паливному факелі й особливих зонах камери згоряння дизеля, антагоністичність факторів генезису ТЧ і оксидів азоту, структура і хімічний склад окремої ТЧ [1].

По-перше, розміри, геометрична структура і хімічний склад конгломератів ТЧ

відрізняються для різних видів моторного палива, при згорянні якого утворились[1].

По-друге, ТЧ – це дисперсна фаза аерозолю «ВГ – ТЧ», окремі частинки якої не відповідають одна одній ні за масою, ні за розміром (гідравлічним радіусом), ні за співвідношенням складових (хімічним складом), ні за площею зовнішньої адсорбуючої) поверхні, ні за і структурою. Їх розподіли за масою, рахунковою кількістю та за площею зовнішньої поверхні у функції їхнього гідравлічного діаметра у потоці ВГ безпосередньо на виході з циліндра дизеля проаналізовано у [1]. Із результатів такого аналізу стає зрозумілим, що самі розподіли далекі від нормального, а їхні максимуми (яких більше одного) не збігаються. Тому доцільним було б застосування для їх описання математичного апарата сімей кривих Пірсона, що можуть описати широкий клас розподілів, не близьких до нормального, або інших широковживаних [1].

По-третє, тип і параметри (максимальне значення і розміщення і кількість максимумів) таких розподілів значно відрізняються для різних режимів роботи дизеля, зокрема для різного рівня теплонапруженості деталей камери згоряння дизеля [1].

По-четверте, окрема частинка у потоці ВГ у випускному тракті дизеля має далеку від сферичної (складну розгалужену) геометричну форму і характеризується гідравлічним радіусом (еквівалентним або середнім діаметром), що дозволяє лише приблизно описати абсолютний рух частинки у тривимірному просторі. Її взаємодію з твердим нерухомим тілом також неможливо описати моделлю ідеального удару з достатньою точністю [1].

По-п'яте, значною є зміна характеристик ТЧ під час руху аерозолю «ВГ – ТЧ» у випускному тракті дизеля. Первинні ТЧ, що утворились у камері згоряння дизеля, мають геометричну форму, що значно більш близька до сферичної й складається з сажового ядра і адсорбованого на ньому шару з незгорілих вуглеводнів моторного палива і оливи, а також частинки золи від згоряння метало- і сірковмісних фракцій та присадок палива й оливи. При русі потоку аерозолю «ВГ – ТЧ» у випускному тракті дизеля відбуваються зростання розмірів ТЧ і зміна форми самих частинок, причинами чого є два характерні процеси [1]: 1-й – адсорбція незгорілих вуглеводнів на первинних ТЧ внаслідок їхньої конденсації при зменшенні температури ВГ і самих ТЧ через теплообмін і розширення потоку ВГ, тобто збільшення маси і розмі-

рів частинок дисперсної фази аерозолю за рахунок переходу у них компонентів дисперсного середовища; 2-й – коагуляція ТЧ під дією їхніх зіткнень у турбулентному потоці ВГ, значних адсорбційних властивостей сажових ядер і адгезивних властивостей шарів незгорілих вуглеводнів у конгломерати розгалуженої структури. Результат дії обох процесів – зростання розмірів частинок дисперсної фази аерозолю «ВГ – ТЧ» у функції спадаючої температури дисперсного середовища (самих ВГ), а фактично – вздовж довжини випускного тракту дизеля, що може бути проілюстровано спадаючою кривою [12].

По-шосте, дія ТЧ на організм людини і тварини має широкий спектр. ТЧ містять канцерогенні й мутагенні вуглеводні а також вирізняються широким діапазоном зміни значень їхніх розмірів – від десятків нанометрів до десятків мікрометрів. У організм живої істоти ТЧ потрапляють переважно через органи дихальної системи. Розподіл відкладених ТЧ за розмірами вздовж дихального тракту людини проаналізовано у [1, 13]. З наведеного зрозуміло, що: фракції ТЧ з розмірами 5–10 мкм відкладаються у верхніх дихальних шляхах і виводяться з мокротою; фракції ТЧ з розмірами 3–5 мкм відкладаються у трахеї виводяться так само; фракції ТЧ з розмірами 1–3 мкм відкладаються у бронхах і виводяться з мокротою не повністю, частково засмічують легені, що призводить до силікозу; фракції ТЧ з розмірами, меншими за 1 мкм, потрапляють безпосередньо у кров крізь альвеоли легень.

Співвідношення усереднених розмірів первинної сажової частинки з адсорбованим шаром C_nH_m, конгломерату ТЧ, людської волосини і піщинки таке: частинка піску – 90 мкм, людська волосина – 60 мкм, агломерат сажі – 5 мкм, сажове ядро – 0,1 мкм [1]. Особливості нормування викиду ТЧ з потоком ВГ дизелів описано, в першу чергу, у Правилах ЄЕК ООН № 49 і № 96 [21, 22], а також у інших джерелах [1, 6–18].

1.10 Класифікація способів та засобів зниження токсичності відпрацьованих газів дизельних двигунів від твердих частинок

У світовій практиці відомо декілька способів зниження вмісту твердих частинок у потоці ВГ ПДВЗ. Особливості фракційного і хімічного складу ВГ дизелів у загальному випадку не дозволяють задовольнятись одним з них [1–17]. У дисертації

запропоновано таку класифікацію зниження вмісту ТЧ у потоці ВГ, якщо тип ПДВЗ для певної ЕУ обрано остаточно як дизель (рис. 1.2), яку докладно описано у [1].

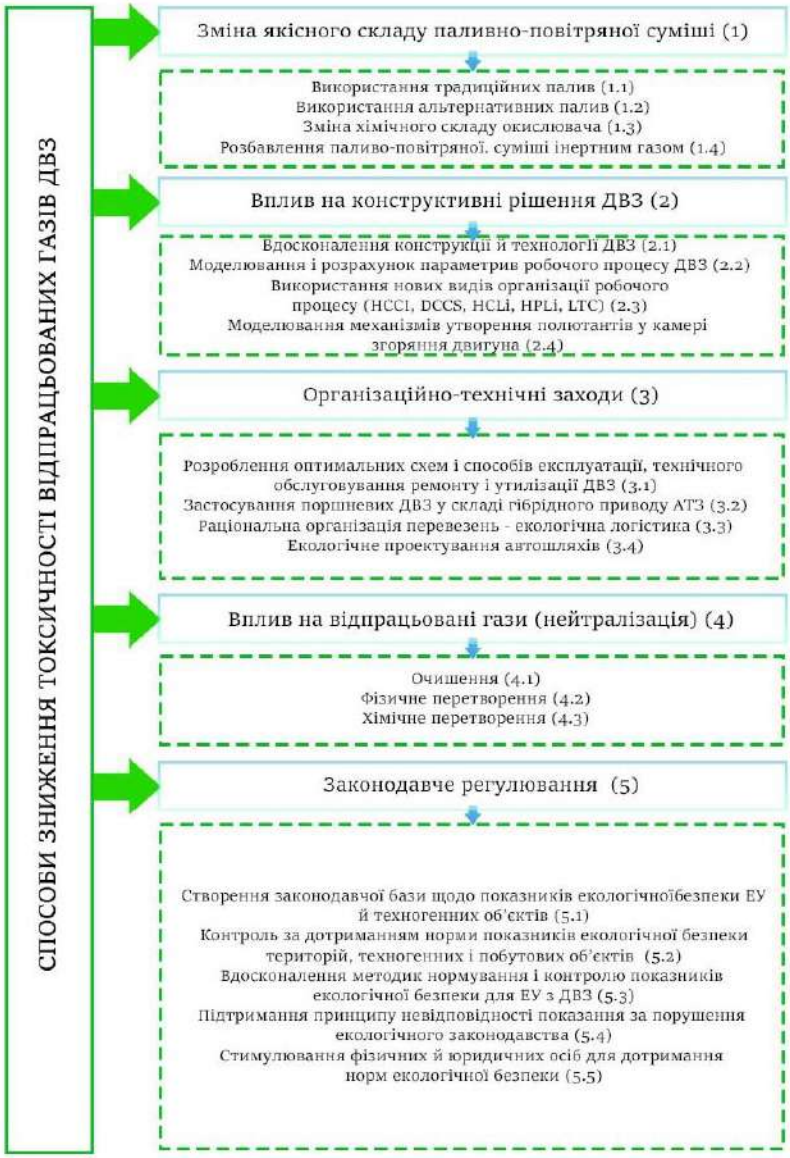


Рисунок 1.2 – Класифікація способів зниження токсичності відпрацьованих газів поршневих ДВЗ

1. Зміна якісного складу паливо-повітряної суміші, що може досягатися такими заходами:

1.1. при використанні традиційних палив: 1.1.1. підвищенням якості традиційних палив нафтового походження, 1.1.2. підвищенням якості моторних олив, 1.1.3. постійним контролем показників їхньої якості;

1.2. при використанні альтернативних палив: 1.2.1. використанням 100 % альтернативних палив біологічного походження; 1.2.2. використанням сумішевих па-

лив, 1.2.3. переходом на газодизельний робочий процес, 1.2.4. підвищенням воднево-го числа палива шляхом додавання водню у поливно-повітряну суміш;

1.3. при зміні хімічного складу окислювача: 1.3.1. збагаченням паливно-повітряної суміші киснем, 1.3.2. переведенням ПДВЗ на роботу на чистому кисні, 1.3.3. додаванням у паливно-повітряну суміш озону, 1.3.4. іонізацією повітря на впуску;

1.4. при розбавленні паливо-повітряної суміші інертним газом: 1.4.1. впорскуванням водяної пари у камеру згоряння, 1.4.2. застосуванням рециркуляції ВГ; 1.4.3. переведенням ПДВЗ на замкнений цикл роботи.

2. Вплив на конструктивні рішення ПДВЗ: 2.1. вдосконалення конструкції й технології виробництва ПДВЗ; 2.2. моделювання і розрахунок параметрів робочого процесу ПДВЗ; 2.3. використання нових видів організації робочого процесу (HCCI, DCCS, HCLi, HPLi, LTC); 2.4. моделювання механізмів утворення полютантів у камері згоряння двигуна

3. Організаційно-технічні заходи: 3.1. розроблення оптимальних схем і способів експлуатації, технічного обслуговування, ремонту і утилізації ПДВЗ; 3.2. застосування ПДВЗ у складі гібридного приводу АТЗ; 3.3. раціональна організація перевезень – екологічна логістика; 3.4. екологічне проектування автошляхів.

4. Вплив на ВГ – нейтралізації різноманітними способами за допомогою різноманітних систем і пристроїв шляхом їхнього: 4.1. очищення (фільтрування); 4.2. фізичного перетворення; 4.3. хімічного перетворення.

5. Законодавче регулювання: 5.1. створення законодавчої бази щодо показників рівня ЕБ ЕУ і техногенних об’єктів; 5.2. контроль за дотриманням норм показників рівня ЕБ територій і техногенних і побутових об’єктів; 5.3. вдосконалення методик нормування і контролю показників рівня ЕБ для ЕУ з ПДВЗ; 5.4. підтримання принципу невідворотності покарання за порушення екологічного законодавства; 5.5. стимулювання фізичних і юридичних осіб для дотримання норм ЕБ, у тому числі й створення соціальної реклами на відповідну тематику, заохочення власників ЕУ з ПДВЗ шляхом надання різноманітних пільг, адресного зниження податкового навантаження тощо.

Удосконалення моторних палив у світлі підвищення екологічних показників дизелів в основному полягає в обмеженні вмісту в них сірки (бажано повне її виклю-

чення зі складу палива і моторних олив) і ПАВ. Також до заходів, що знижують токсичність ВГ дизелів, належать додавання різного роду антидимних присадок, що заважають утворенню ТЧ у робочому процесі дизеля, та присадок, що знижують температуру горіння ТЧ у ФТЧ при його регенерації.

Використання альтернативних палив для дизелів, в тому числі й водню, набуло обмеженого застосування через неготовність ресурсно-виробничих баз та інфраструктури до забезпечення транспорту необхідною кількістю палива відповідної якості. У цей час більш значного поширення набуло використання газодизельного робочого процесу. З усіх заходів щодо зміни хімічного складу окислювача на практиці поки використовується тільки рециркуляція ВГ.

До способів боротьби з емісією ТЧ у частині вдосконалення конструкції ПДВЗ належать такі: 2.1.1. оптимізація форми камери згоряння; 2.1.2. використання паливоподаючої апаратури, що забезпечує високий рівень тиску впорскування (а отже, і необхідні ступінь розпилу і дальнобійність паливного факелу), точність дозування, необхідний закон впорскування (для дизеля це або системи з насос-форсунками, або системи типу Common Rail); 2.1.3. використання електронного керування і регулювання (у тому числі з алгоритмами адаптації й аварійного захисту); 2.1.4. використання керування параметрами наддувного повітря (регульований турбокомпресор, охолодження наддувного повітря, засоби інтенсифікації вихрового руху повітряного заряду в циліндрі); 2.1.5. використання охолодження і очищення ВГ при їхньої рециркуляції; 2.1.6. керування фазами газорозподілу, ступенем стиснення, числом працюючих циліндрів, порядком роботи циліндрів і тактністю дизеля; 2.1.7. оптимізація таких перехідних процесів, як пуск (в тому числі й холодний), розгін, гальмування (у тому числі й двигуном), зупинка дизеля.

1.11 Класифікація способів і засобів очищення відпрацьованих газів дизельних двигунів від твердих частинок

Встановлено, що за конструктивними особливостями системи і пристрої очищення традиційно ВГ від ТЧ класифікують (рис. 1.3): А) за принципом дії (А): А.1. the wall-flow type – системи закритого типу; А.2. the separation type – системи від-

критого типу; В) за ступенем очищення: В.1. повнопоточні; В.2. частковопоточні; С) за матеріалом фільтрувального елемента (ФЕ) [14–16], [34–57].



Рисунок 1.3 – Іноземна класифікація конструкцій фільтрів твердих частинок

ФТЧ, що характеризуються ефективністю очищення в межах 50–85 %, називаються частковопоточними, їх основною перевагою є малий гідравлічний опір (ГО) (протитиск) і великий міжрегенераційний період роботи. Такі ФТЧ набувають широкого застосування при модернізації АТЗ. ФТЧ зі ступенем очищення потоку ВГ від ТЧ, більшим за 85 %, називають повно поточними [1]. За матеріалом їхнього ФЕ фільтри поділяють так:

С1. З кордієриту. Вирізняються чи не найбільшою ефективністю очищення ВГ, відносно невисокою ціною, а також малою схильністю до термошокового руйнування, завдяки чому з них можливо виготовити монолітний ФЕ, проте відносно низькою температурою кипіння (1200 °С), що істотно збільшує їхню схильність до оплавлення при тривалій або неконтрольованій мимовільній (пасивній) термічній регенерації й переповненій ТЧ.

С2. З карбіду кремнію. Вирізняються істотно більш високою температурою плавлення (2700 °С), але дорожчі за кордієлітові, з якими взаємозамінні при рівних габаритних розмірах. Однак є термічно нестабільними, що зумовлює необхідність виготовлення великих і середніх за розмірами ФЕ з окремих сегментів, що скріп-

люються спеціальним термоеластичним цементом. Затримують до 95 % ТЧ з розмірами 0,2–150 мкм.

С3. З керамічного волокна. Зазвичай складаються з декількох видів керамічних волокон, змішаних (переплетених) таким чином, щоб отримати оптимальне поєднання ГО і ефективної пористості газопроникних стінок ФЕ довільної форми. Створюють менший ГО, ніж попередні види матеріалів ФЕ, при найвищій ефективності очищення ВГ (в діапазоні розмірів ТЧ менше 100 нм до 95 % за масою і до 99 % за числом) у широкому діапазоні робочих режимів дизеля.

С4. З металевих волокон. ФЕ таких ФТЧ складається з шарів тканих або нетканих металевих (сталевих) сіток. Основною перевагою такого ФЕ є можливість його нагрівання шляхом пропускання крізь нього електричного струму, що сприяє створенню умов, необхідних для регенерації ФТЧ при низьких температурі або швидкості потоку ВГ на вході у фільтр. Однак ФЕ з цих матеріалів істотно дорожчі, ніж з керамічних, і абсолютно не взаємозамінні з ними, оскільки є провідниками.

С5. З паперу. Це одноразові проточні фільтри, які використовуються в тих випадках, коли АТЗ, що не оснащене ФТЧ з необхідним ступенем очищення ВГ, короткочасно використовується у вибухо- і пожежонебезпечних і торгово-складських приміщеннях. Регенерація таких ФТЧ не передбачена, вони потребують попереднього охолодження ВГ.

Вищенаведеної класифікації на цьому етапі розвитку науково-технічної думки та для вирішення поставлених у дисертації задач недостатньо для узагальнення і систематизації інформації про принципи роботи систем і пристроїв очищення ВГ від ТЧ. Це пов'язано з тим, що в пристроях і системах нейтралізації ВГ дизелів, зокрема очищення від ТЧ, як виявлено у результаті дослідження, використовують ряд фізико-хімічних способів оброблення ВГ (рис. 1.4).

Відповідно до вищевиділених способів, покладених в основу роботи таких систем і пристроїв, у дисертації пропонується багаторівнева класифікація, побудована із застосуванням принципів десятинного поділу, принципово описана у [1]. У дисертації наведено розширений, вдосконалений і проілюстрований варіант запропонованої класифікації. За принципом дії пристрої і системи очищення ВГ від ТЧ поділено на типи (рис. 1.5).



Рисунок 1.4 – Класифікація фізико-хімічних способів оброблення відпрацьованих газів для нейтралізації в них твердих частинок



Рисунок 1.5 – Класифікація пристроїв і систем очищення відпрацьованих газів від твердих частинок за типами

1. Механічний тип. Змінюють вектор швидкості руху ТЧ відносно лінії току потоку аерозолю «ВГ–ТЧ» як за напрямком, так і за модулем (бажано – зменшують до нуля). Побудовані на механічних, електричних, рідинних способах оброблення ВГ.

2. Хімічний (окислюючий) тип. Перетворюють горючі складові ТЧ у нетоксичні або менш токсичні забруднюючі речовини за допомогою окисно-відновлювальних реакцій. Побудовані на хімічних, термічних, плазмових і рідинних способах оброблення ВГ.

3. Комбінований тип. Поєднують два або більше з вищенаведених способів оброблення ВГ.

Типи пристроїв і систем поділено на підтипи.

1.11.1 Механічні пристрої і системи очищення відпрацьованих газів дизельних двигунів від твердих частинок

Механічні пристрої й системи, що побудовані на механічних способах оброблення ВГ, за принципом роботи можна поділити на такі підтипи [1]:

1.1. фільтрувальні, або такі, що використовують спосіб фільтрації, що затримують ТЧ при безпосередньому контакті їх з матеріалом ФЕ за допомогою явищ адсорбції та/або адгезії. У іноземній термінології це «the wall-flow type», або системи закритого типу;

1.2. інерційні, або такі, що використовують інерційний спосіб, що змінюють напрямок спеціальним чином приготовлених сукупностей ТЧ і відокремлюють від потоку ВГ за допомогою сил інерції. У іноземній термінології це «the separation type», або системи відкритого типу.

Пристрої, у яких використовуються *спосіб фільтрації* (згідно з класифікацією підтип 1.1), за відповідністю розмірів отворів у матриці матеріалу ФЕ і розмірів ТЧ, які мають відфільтровуватися (тобто за структурою ФЕ), можна поділити на види:

1.1.1. твердотільні дрібнопористі з отворами, що не перевищують розміри ТЧ, або власне фільтрувальні. Такі ФЕ поглинають і утримують порівняно крупні фракції ТЧ переважно зовнішніми поверхнями каналів ФЕ з газопровідними стінками і додатково простором в отворах у матеріалі ФЕ;

1.1.2. твердотільні крупнопористі з отворами, що перевищують розміри ТЧ. Поглинають і утримують порівняно дрібні фракції ТЧ простором в отворах у матеріалі ФЕ при зміні форм ліній току потоку ВГ при проходженні його крізь пористий матеріал ФЕ;

1.1.3. з суцільним середовищем (рідинні). Поглинають ТЧ й газоподібні шкідливі фракції ВГ при проходженні їхнього потоку крізь товщу робочої рідини;

1.1.4. твердотільні змочені (суцільні пористі або з намоткою). Поглинають ТЧ й газоподібні шкідливі фракції ВГ при омиванні їхнім потоком поверхонь твердих елементів ФЕ з нанесеним на них тонким шаром робочої рідини (або гелеподібної субстанції);

1.1.5. твердотільні напилені (суцільні непористі або з намоткою). Поглина-

ють ТЧ й газоподібні шкідливі фракції ВГ при омиванні їхнім потоком поверхонь твердих елементів ФЕ з нанесеним на них тонким шаром напиленої (наклеєної) твердотільної пористої речовини.

За будовою матеріалу матриці ФЕ види пристроїв і систем очищення ВГ 1.1.1 і 1.1.2 можна поділити на такі форм-фактори [1]: 1.1.1.1. чи 1.1.2.1. монолітні керамічні; 1.1.1.2 чи 1.1.2.2. монолітні металокерамічні; 1.1.1.3 чи 1.1.2.3. навиті, або ФЕ з навивкою; 1.1.1.4 чи 1.1.2.4. насипні, або ФЕ з насипкою; 1.1.1.5 чи 1.1.2.5. комбінації з будь-яких вищенаведених.

Монолітні керамічні ФЕ (згідно з класифікацією форм-фактори 1.1.1.1 і 1.1.2.1) виготовляють методами спікання, осадження і спінювання. За своєю конфігурацією монолітні керамічні ФЕ можуть належати до: 1.1.1.1.1 чи 1.1.2.1.1. суцільного пористого твердого тіла або 1.1.1.1.2 чи 1.1.2.1.2. твердого тіла стільникової (коміркової) структури.

У ФЕ з суцільного пористого твердого тіла процес очищення потоку ВГ відбувається при проходженні крізь усе тіло фільтра, яке може мати такі геометричні форми призми, циліндра, кільця або конуса [1].

ФЕ з твердого тіла стільникової структури мають канали з газопроникними стінками, які заглушено на кінцях у шаховому порядку. Одні з них, заглушені з боку виходу потоку ВГ з ФЕ, призначені для входу неочищеного потоку ВГ у ФЕ. Інші, заглушені з боку входу потоку ВГ у ФЕ, призначені для виходу очищеного потоку ВГ з ФЕ. Очищення потоку ВГ від ТЧ відбувається при його проходженні крізь газопроникні стінки каналів [1].

За геометричною конфігурацією напрямку каналів такі ФЕ можуть бути повздовжні (сам ФЕ має форму призми або циліндра) або радіальні (сам ФЕ має форму конуса або кільця) [1].

Канали можуть мати геометричні форми призми, циліндра, піраміди або конуса. Їхні стінки можуть розподілятися у перерізі ФЕ рівномірно або нерівномірно [1]. За площею поперекового перетину канали між собою можуть бути однаковими й неоднаковими (наприклад, вхідні канали більші за вихідні) [1]. Площа фільтрувальної поверхні таких ФЕ зазвичай становить 1 $м^2$ на 1 $дм^3$ об'єму ФЕ, при цьому товщина

стінок 0,3–0,5 мм, а щільність розміщення каналів у ФЕ – 15–50 каналів на 1 $см^2$ перетину ФЕ [1].

Монолітні металокерамічні ФЕ (згідно з класифікацією форм-фактори 1.1.1.2 і 1.1.2.2) виготовляють способами порошкової металургії. Вони можуть складатися з такого: 1.1.1.1.1 або 1.1.2.1.1. цільного шматка пористого матеріалу; 1.1.1.1.2 або 1.1.2.1.2. окремих блоків з геометричними формами, як у ФЕ.

Навиті ФЕ (згідно з класифікацією форм-фактори 1.1.1.3 і 1.1.2.3) мають регулярну або хаотичну навивку або путанку з волокнистих матеріалів, ниток, дроту, металевих мікросіток (тканих або нетканих) або їхніх комбінацій. Навиті ФЕ за своєю конфігурацією можуть мати такий вигляд: 1.1.1.3.1 або 1.1.2.3.1. намотки на каркасах [1], де каркас може мати вигляд барабану з дроту (або вузьких сталевих стрічок) або з перфорованого сталевого листа. За сортом матеріалу намотка може бути дротова, волокниста, путанкова, сітчаста; за видом матеріалу – сталева, з керамічного волокна, з вуглецевої тканини; за кількістю шарів – одношарова, багатошарова; за напрямком – односпрямована або схрещена; 1.1.1.3.2 або 1.1.2.3.2. плоский пакет, який складається з шарів гофрованого і/або перфорованого сталевого листа, що напрямляє та перерозподіляє потік ВГ, і шарів листового тканого або нетканого матеріалу або сітки. Листи або сітка, що обмежують пакет, відрізняються від деталей усередині пакета більшою міцністю [1]; 1.1.1.3.3 або 1.1.2.3.3. пакет, згорнутий у рулон по спіралі (пакет-спіраль) за будовою шарів аналогічний до плоского пакету 1.1.1.3.2 або 1.1.2.3.2 [1]; 1.1.1.3.4 або 1.1.2.3.4. набір пакетів, згорнутих у зсічені конуси різних розмірів, що зібрані коаксиально і заглушені (пакет-конус) за будовою шарів аналогічний до плоского пакету 1.1.1.3.2 або 1.1.2.3.2 [1].

Насипні ФЕ (згідно з класифікацією форм-фактори 1.1.1.4 і 1.1.2.4) мають вид набору спеціальних елементів – патронів або касет, що складаються з корпусу з газопроникними стінками і насипки [1].

Насипка – це порошок (сипка суха субстанція) з вираженими сорбційними властивостями певної фракційності за розмірами гранул. Насипка у касеті за ступенем зв'язаності може бути вільна, спресована, брикетована або зв'язана спеціальними речовинами. Гранули насипки за способом виготовлення можуть бути гранульо-

вані (штучно отримані), обкатані й подрібнені. За походженням матеріалу насипка може бути з природних матеріалів або зі штучних, за видом матеріалів [1] – з цеолітів різного виду і походження або з терморозширеного графіту, за кількістю застосованих матеріалів – мононасипка або композиційна насипка.

Насипні ФЕ можуть складатись з: а) моноконтейнера; б) моноконтейнера, розділеного на відсіки нерознімно сполученими перетинками; в) декількох окремих контейнерів (касет), сполучених рознімно.

За матеріалом касети поділяють на пористі керамічні, перфоровані металеві листи й сітки. За геометричною формою корпус насипного ФЕ поділяють на циліндричні, коробчасті й конічні.

Твердотільні крупнопористі ФЕ з отворами, що перевищують розміри ТЧ (згідно з класифікацією вид пристроїв 1.1.2), використовують тільки спільно з інерційними або електричними способами, а також із засобами, що організують потік ВГ спеціальним чином або ж використовують самоорганізацію потоку ВГ в довгих і витіюватих каналах зі сполучених пор або отворів (комірок) намоток і сіток.

Залежно від властивостей матеріалу ФЕ за місцем утримання ТЧ їх можна поділити на такі класи: 1.1.1.а. поверхнеутримуючі (адсорбційні); 1.1.2.б. обє'мнопоглинаючі (абсорбційні). Поверхнеутримуючі (адсорбційні) – це такі, що поглинають і утримують дрібні фракції ТЧ своїм поверхневим шаром і конструктивно відповідають твердотільним дрібнопористим ФЕ з отворами, що не перевищують розміри ТЧ (вид пристроїв 1.1.1). До них слід віднести такі ФЕ: 1.1.1.а.1. з напиленнями з різноманітних керамічних матеріалів певної товщини, міцності й пористості на стінках з непористого матеріалу [1]; 1.1.1.а.2. з навивкою або намоткою мокрого типу (зрошених рідинами для підвищення адгезивних якостей, що у тонкій плівці рідини еквівалентно явищу адсорбції). Обє'мнопоглинаючі (абсорбційні) – поглинають і утримують ТЧ всім своїм об'ємом. За агрегатним станом тіла ФЕ можуть бути монолітні пористі (1.1.2.б.1) або рідинні (1.1.2.б.2) [1].

Інерційні способи (згідно з класифікацією підтип пристроїв 1.2) змінюють напрямок руху спеціальним чином приготовлених сукупностей ТЧ. За способом зміни вектора руху ТЧ інерційні способи слід поділити на: 1.2.1. газодинамічні, які змінюють

вектор швидкості руху ТЧ шляхом впливу на гідродинамічні показники всього потоку ВГ і 1.2.2. електромагнітні, які змінюють вектор швидкості руху ТЧ, що мають електричний заряд, шляхом впливу електромагнітним полем на потік ВГ.

За способом формування частинок з достатньою масою усі інерційні способи можуть бути таких видів [1]: 1.2.1.1 або 1.2.2.1. крапельні; б) 1.2.1.2 або 1.2.2.2. коагуляційні; в) 1.2.1.3 або 1.2.2.3. конденсуючі.

ФЕ, побудовані на використанні крапельних інерційних способів, формують сукупності з ТЧ і крапель, розпилених у потоці ВГ рідин – води або моторної оливи [1]. ФЕ, що побудовані на використанні коагуляційних інерційних способів, формують сукупності лише з ТЧ завдяки введенню у склад палива або ВГ спеціальних присадок [1]. ФЕ, що побудовані на використанні конденсуючих інерційних способів, формують сукупності з ТЧ і крапель рідини, які утворюються з продуктів згоряння палива (води й незгорілих вуглеводнів), що конденсуються при їх примусовому охолодженні [1].

У механічних пристроях й системах з ФЕ, що побудовані на використанні електричних способів, зміна вектора руху ТЧ відносно лінії току потоку ВГ відбувається завдяки наявності електростатичного заряду у ТЧ і наведенню у матеріалі ФЕ слабкого електромагнітного поля. Тому для забезпечення їхньої роботи їхні ФЕ виготовляють з матеріалів-провідників. Це також сприяє утворенню сукупностей ТЧ крапельним, коагуляційним або конденсуючим способом [1].

До ФЕ, що використовують електричні способи безпосередньо для очищення ВГ від ТЧ, слід також віднести такі, у яких каталізатором окисно-відновлювальних реакцій між ТЧ і киснем у ВГ слугують металеві сітки з голками, до яких підведено постійну електричну напругу [1].

1.11.2 Хімічні пристрої і системи очищення відпрацьованих газів дизельних двигунів від твердих частинок

У пристроях, що використовують хімічні (або окислювальні) способи (згідно з класифікацією тип пристроїв 2 – хімічний), горючі складові ТЧ перетворюються у нетоксичні або менш токсичні забруднюючі речовини за допомогою окисно-віднов-

них реакцій [1]. Їх за принципом роботи поділено на такі підтипи: 2.1. каталітичні; 2.2. термічні; 2.3. плазмові; 2.4. оксидні, або пост-каталітичні.

У системах очищення ВГ від ТЧ з ФЕ, принцип дії яких побудовано на використанні каталітичних способів (згідно з класифікацією підтип пристроїв 2.1), застосовують каталізатори – речовини, що змінюють швидкість і/чи умови перебігу окисно-відновлювальних реакцій. При цьому ФЕ каталітичних пристроїв за місцем розміщення каталізатора можуть бути поділені на такі види [1]: 2.1.1. з нанесенням каталізатора на поверхні ФЕ у вигляді напилення або гелеподібної субстанції; 2.1.2. з введенням у паливо; 2.1.3. з подачею безпосередньо у ВГ.

Системи очищення ВГ від ТЧ, побудованих на використанні термічних способів їхнього оброблення (згідно з класифікацією підтип пристроїв 2.2), забезпечують необхідну температуру ВГ, за якої горючі компоненти ТЧ самовільно окислюються залишковим киснем у ВГ. При цьому, такі ФЕ можна поділити за видом джерела теплоти таким чином [1]: 2.2.1. паливо, що додатково подається у камеру згоряння дизеля або безпосередньо у ВГ; 2.2.2. електричні нагрівальні елементи, що конструктивно входять до складу тіла або корпусу ФЕ (спіралі розжарювання), або ж є окремими агрегатами (свічки розжарювання); 2.2.3. стороннє джерело, що знаходиться поза бортом АТЗ.

Системи очищення ВГ від ТЧ з ФЕ, принцип дії яких побудовано на використанні плазмових способів (згідно з класифікацією підтип пристроїв 2.3), використовують для окислення ТЧ у потоці ВГ низькотемпературну плазму, яку генерують спеціальними пристроями – плазмотронами або використовують плазму електричної дуги (іскрового розряду) між електродами ФЕ, сформованими з металевої сітки. За часом генерування плазми існують: 2.3.1. іскророзрядні способи, тобто безперервні у мікромасштабі і переривчасті у макромасштабі часу, і 2.3.2. способи з тривалим (безперервним у макромасштабі часу) наведенням плазми. При цьому, за видом речовини – носія плазми ці ФЕ можна поділити на такі види [1]: 2.3.1.1 або 2.3.2.1. з використанням відпрацьованих газів; 2.3.1.2 або 2.3.2.2. з використанням повітря, що окремо подається у ВГ.

Системи очищення ВГ від ТЧ з ФЕ, принцип дії яких побудовано на використа-

нні оксидних способів (згідно з класифікацією підтип пристроїв 2.4), використовують для окислення ТЧ у потоці ВГ діоксиди азоту NO_2, що отримують надлишково у каталітичному доокислювачі продуктів неповного згоряння палива, встановленому вище ФТЧ по потоку ВГ у випускній системі дизеля [1].

У пристроях, де використовується рідинний спосіб очищення ВГ, видаляються розчинні компоненти ВГ шляхом їх розчинення у робочій рідині ФТЧ, якщо вони змочуються нею. Нерозчинні й незмочувані компоненти ВГ (в тому числі і ТЧ) видаляються з потоку ВГ за допомогою поглинання їх робочою рідиною нейтралізатора за умови попереднього створення на поверхні ТЧ її суцільного шару і утримання його за рахунок поверхневого натягу рідини – так званих рідинних фільтрів [1].

Ефективність очищення ВГ дизеля від ТЧ для ФТЧ, що використовують у своїй роботі різні способи, подано на рис. 1.6 [1, 58].

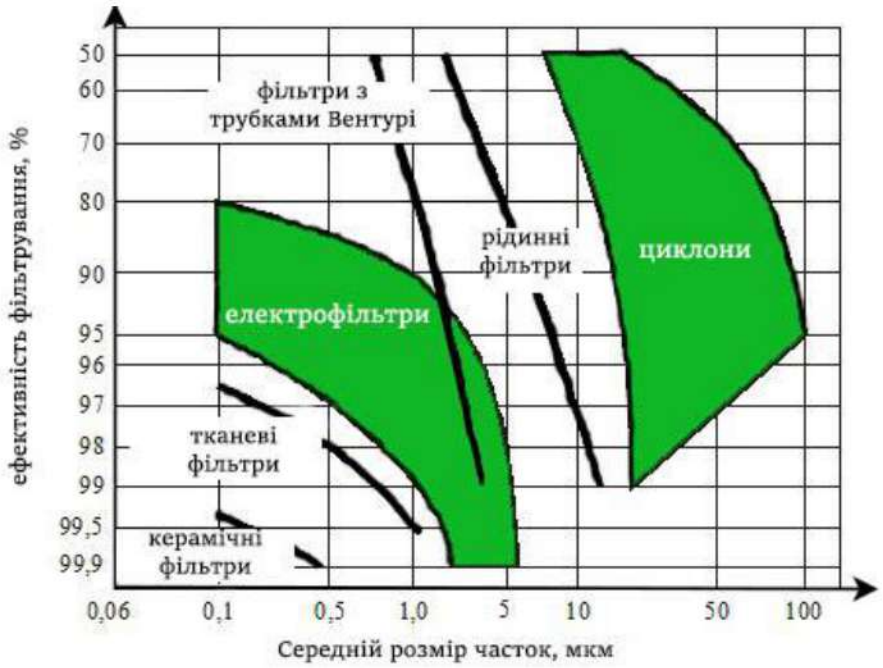


Рисунок 1.6 – Ефективність очищення відпрацьованих газів дизельних двигунів від твердих частинок фільтрами з різними принципами роботи [1, 58]

На практиці використовують тільки комбіновані способи (тип пристроїв 3 – комбіновані), зважаючи на те, що в ТЧ входять різноманітні речовини як за своїми хімічними, так і за фізичними властивостями. Через коштовність ФТЧ їх після засмічення не замінюють, а регенерують, тобто ТЧ, накопичені фільтрацією, видаляють з самого фільтра термічним чи іншими способами (див. підрозділ 1.12).

Крім ФТЧ для очищення ВГ дизеля від продуктів неповного згоряння палива використовують окислювальні каталітичні або термічні нейтралізатори, в яких частково окислюються і ТЧ, але в повному обсязі їх окислити там важко, тому цей спосіб застосовують тільки в комбінації з ФТЧ.

Пристрої очищення ВГ стаціонарних потужних дизелів – скрубери з водними струменями або трубками Вентурі й рідинні фільтри, розраховані на зменшення емісій продуктів неповного згоряння палива і ТЧ, – можна віднести до механічних пристроїв з ФЕ, які побудовані на використанні крапельних інерційних способів (згідно з класифікацією, вид 1.2.1.1 або 1.2.2.1 – крапельні ФЕ) [1].

Найчастіше використовують ФТЧ з керамічним пористим ФЕ, на поверхні якого нанесено каталізатор для часткового доокислення ПНЗП, зменшення температури регенерації ФТЧ і каталітичного поглинача NO_X, і т. д.

Таким чином, у цьому підрозділі рукопису дисертації описано розроблену нову класифікацію способів і засобів очищення потоку ВГ дизелів від ТЧ, що принципово відрізняється від існуючих раніше як за кількістю класифікаційних ознак, так і за номенклатурою класифікованих об'єктів. Узагальнену інформацію наочно подано на рис. 1.7.

1.12 Класифікація способів та засобів реалізації процесу регенерації фільтрів твердих частинок дизельних ДВЗ

1.12.1 Передумови побудови класифікації

Як було зазначено у попередніх підрозділах, створення ефективного, технологічного і надійного ФТЧ для очищення ВГ ПДВЗ від ТЧ як виконавчого пристрою ТЗНС як матеріальної основи відповідної СУЕБ є актуальною задачею, що постає перед спеціалістами у сферах двигунобудування і експлуатації такого виду ЕУ з ПДВЗ, як АТЗ і СТ, що входять до автопарку нашої країни взагалі й використовуються ДСНС України зокрема. Через особливу небезпеку деяких компонентів такої складової ВГ, як ТЧ, а саме ПАВ, які адсорбовані на сажових ядрах ТЧ, вдосконалення екологічних показників дизелів не слід обмежувати лише процесом очищення їхніх ВГ від ТЧ.

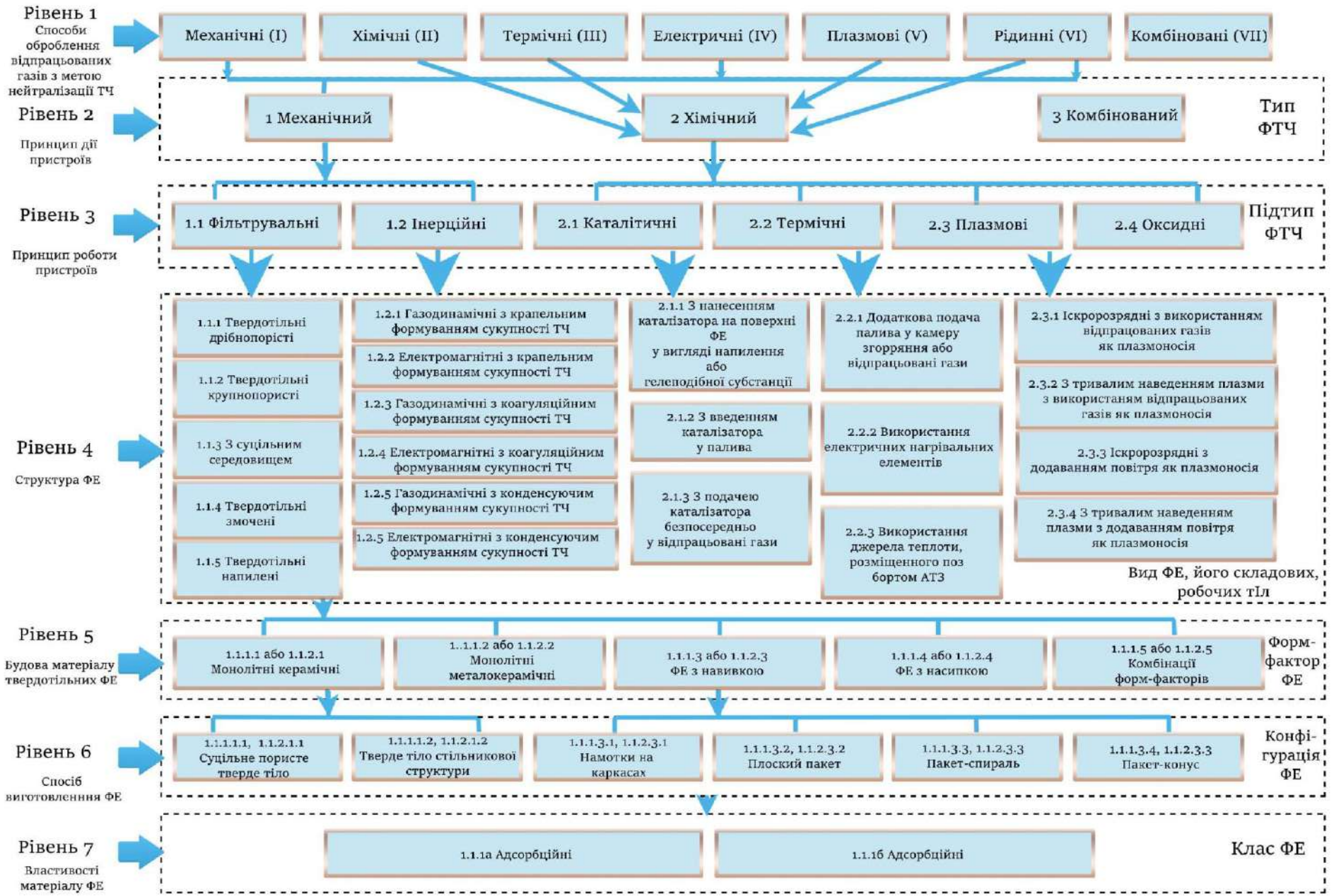


Рисунок 1.7 – Класифікація систем комплексного очищення аерозолю відпрацьованих газів дизельних поршневих ДВЗ від твердих частинок

Вочевидь, пильної уваги заслуговують процеси очищення ФЕ ФТЧ від накопичених у ньому ТЧ і знешкодження самих ТЧ. Потреба у періодичному очищенні ФЕ від накопичених ТЧ – регенерації (процесу відновлення функціональних якостей ФТЧ) – принципово непереборна і є невід'ємним етапом ЖЦ ФТЧ будь-якої конструкції, як традиційної, так і нетрадиційної [1].

Аналіз літературних джерел у [1] щодо питань регенерації ФТЧ показав, що достатньо повної класифікації способів і засобів реалізації цього процесу в закордонній і вітчизняній спеціалізованій науково-технічній літературі не виявлено. Можна припустити, що така ситуація склалася через велике розмаїття АТЗ і СТ, що оснащені дизелями та відповідають нормам різних екологічних стандартів (наприклад, Правил ЄЕК ООН № 49 і № 96 [21, 22]), і пов'язане з цим розмаїття конструктивних рішень ФТЧ.

Це проявляється на тлі обмеженості обміну актуальною і достовірною науково-технічною інформацією, пов'язаною з поняттями «об'єкт авторського права», «ноу-хау» і «комерційна таємниця». При цьому велика частина технічних рішень, поданих у патентах і авторських свідоцтвах за тематикою ФТЧ, що докладно проаналізованих у [1], носять декларативний характер і з різних причин важко реалізуються на практиці, а то і заздалегідь не можуть бути реалізованими на даному етапі розвитку наукової думки і технологій, проте вже є законодавчо захищеним об’єктом права інтелектуальної власності.

У зв'язку з вищенаведеним дослідження фізико-хімічних явищ, що становлять суть і супроводжують процес регенерації ФТЧ, є актуальним і являє собою науково-практичний інтерес. При цьому виявлення, узагальнення і класифікація інформації, отриманої при аналізі спеціалізованих літературних джерел за тематикою регенерації ФТЧ, є невід'ємною частиною і створює передумови і базу для дослідження явищ, пов’язаних з цим процесом. Дослідження і моделювання цих процесів є невід'ємною частиною НДР зі створення, доведення і впровадження у виробництво і експлуатацію нових, а також модернізації та вдосконалення відомих систем і пристроїв з очищення ВГ дизелів від законодавчо нормованих полютантів.

Запропоновану у дисертації класифікацію принципово описано у [1]. При її роз-

робці проаналізовано більше 550 науково-технічні джерела інформації, серед яких: 80 підручників, навчальних посібників, довідників, аналітичних довідок і монографій, 15 звітів про НДР, 35 рукописів дисертацій, 350 статей, 8 нормативно-правових актів, 45 патентів і авторських свідоцтв, контент 10 офіційних сайтів компаній-виробників систем очищення ВГ і/або систем регенерації ФТЧ. Ці джерела інформації містять фундаментальний доробок вітчизняних та іноземних спеціалістів з питань техніко-технологічних заходів щодо екологізації поршневих ДВЗ.

1.12.2 Основний принцип класифікації способів і засобів здійснення процесу регенерації фільтрів твердих частинок

Як виявлено під час літературно-патентного пошуку, процес регенерації ФТЧ являє собою складну інженерну задачу і може проходити різними шляхами і за різних умов, тому розробники таких систем перш за все вибирають стратегію регенерації при заданих умовах експлуатації дизеля і ФТЧ, при цьому враховуються розподіл режимів роботи дизеля, умови нестаціонарного теплопереносу у ФЕ, хімізм і кінетика процесу вигоряння сажі (С), тобто аморфного пористого вуглецю [1].

З тих же джерел стає зрозумілим, що ТЧ містять окислювані й неокислювані фракції (рис. 1.8). До окислюваних належать всі фракції ТЧ, які можуть бути окислені залишковим киснем у ВГ при температурі не вище за 1000 °С (межа жароміцності найбільш розповсюджених у цих пристроях конструктивних матеріалів) – це продукти неповного згоряння палива і моторної оливи: а) рідкі незгорілі вуглеводні C_nH_m палива і моторної оливи; б) сажові ядра з аморфного пористого вуглецю С.

До неокислюваних фракцій ТЧ належать всі інші їхні складові: а) мінеральний абразивний пил з повітря свіжого заряду; б) продукти зносу деталей ПДВЗ; в) сполуки сірки з палива; г) зола від згоряння металовмісних присадок палива і оливи. Неокислюваних фракцій за масою у ТЧ істотно менше, ніж окислюваних, проте їх неможливо видалити з ФЕ будь-яким способом, на основі яких побудовано функціонування бортової системи регенерації (БСР) ФТЧ АТЗ (у тому числі й термічним або термокаталітичним) [1]. Таким чином, класифікація способів і засобів регенерації ФТЧ у дисертації побудована за вищенаведеною фундаментальною ознакою.

Залежно від типу фракції ТЧ, від яких має очищуватись ФЕ, у класифікації виділено такі процеси регенерації (рис. 1.9) [1].



Рисунок 1.8 – Класифікація фракцій твердих частинок за ознакою окиснюваності

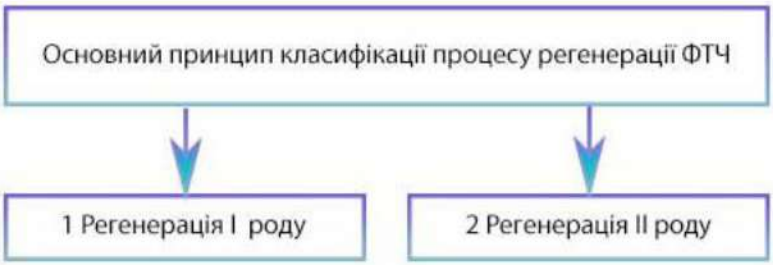


Рисунок 1.9 – Основний принцип класифікації способів
і засобів здійснення процесу регенерації фільтрів твердих частинок

1. Регенерація ФТЧ I роду (позиція 1 класифікатора) – це періодичний процес очищення ФТЧ від накопичених упродовж його експлуатації окислюваних фракцій ТЧ, що є невід'ємною частиною життєвого циклу ФТЧ.

2. Регенерація ФТЧ II роду (позиція 2 класифікатора) – це процес очищення ФТЧ від накопичених упродовж його експлуатації неокислюваних фракцій ТЧ і продуктів коксування окислюваних фракцій ТЧ. Процес вирізняється значно більшим міжрегенераційним періодом (або бути взагалі неперіодичним) і може не входити до життєвого циклу ФТЧ (бути довільним).

Міжрегенераційний період роботи ФТЧ – це тривалість роботи ФТЧ від моменту, коли можна вважати його повністю незаповненим ТЧ (пустим, очищеним від ТЧ), до моменту, коли можна умовно вважати (за значеннями характерних показників роботи ФТЧ або ПДВЗ), що у ФТЧ треба здійснити процес регенерації. Його тривалість може бути виражено у одиницях часу або пробігу АТЗ, у одиницях кіль-

кості використаного палива або виробленої енергії ПДВЗ, у одиницях напрацювання (мотогодинах). Запропонована у дисертації класифікація сучасних способів і засобів реалізації процесу регенерації ФТЧ дизелів побудована на основі цього принципу. Детальне описання такої класифікації наведено у наступних двох пунктах.

1.12.3 Класифікація способів і засобів здійснення процесу регенерації фільтрів твердих частинок І роду

За видом об'єкти, для яких процес регенерації І і ІІ роду є необхідним поділяються таким чином [1]: а) ФТЧ традиційної конструкції, що містять керамічні ФЕ стільникової структури з газопроникними стінками, а також подібні їм за принципом роботи нетрадиційні ФТЧ, що містять ФЕ зі сталевої фольги, сталевої тканої сітки або сталевої мікрофібри; б) ФТЧ нетрадиційної конструкції (рідинні, паперові й деякі інші).

Регенерація І роду може здійснюватись одним з таких шляхів (рис. 1.10).

Очищення ФЕ на борту АТЗ (згідно з класифікацією шлях 1.1). Регенерація, що здійснюється за цим шляхом, проводиться для твердотільних ФТЧ і потребує наявності БСР. Може бути здійснена одним з способів [1]: 1.1. механічним (без застосування підвищення температури ВГ); б) термічним (окисленням ТЧ з підвищеною температурою ВГ) і 1.2. термокаталітичним (окисленням ТЧ з підвищеною температурою ВГ у присутності каталітичних речовин).



Рисунок 1.10 – Класифікація процесів регенерації І роду за шляхами здійснення

Механічне очищення ФЕ БСР досить рідкісне технічне рішення серед ФТЧ, що перебувають у експлуатації, яке наразі не знайшло застосування на практиці з об'єктивних причин. До видів механічного очищення ФЕ від ТЧ слід віднести такі

[1]: 1.1.1.1. очищення ФЕ у вигляді барабана з сітчастою поверхнею постійно обертаючимися щітками, які приводяться до руху енергією потоку ВГ за допомогою газової турбіни найпростішої конструкції або ФТЧ з рухомим ФЕ, що має поздовжнє переміщення уздовж нерухомих щіток; 1.1.1.2. фільтрація робочої рідини рідинного ФТЧ, що працює за рахунок фільтрації потоку ВГ при проходженні крізь шар стаціонарної або перемішуваної робочої рідини або з упорскуванням туману робочої рідини в потік ВГ форсунками або трубками Вентурі; 1.1.1.3. змив робочої рідини або видалення щітками ТЧ, що осіли на поверхнях електричного ФЕ; 1.1.1.4. змивання робочої рідини або видалення щітками зі змочуваних поверхонь ФЕ адгезованих або адсорбованих на них конгломератів ТЧ, сформованих спеціальними способами, і відсіювання з потоку ВГ мультициклонними ФТЧ; 1.1.1.5. накопичення ТЧ у додатковому об'ємі корпусу ФТЧ, крізь який не проходить основний потік ВГ, і подальше механічне очищення цього об'єму. При цьому ТЧ коагулюють завдяки дії на потік ВГ різних фізичних чинників: 1) присадок, які введені у ВГ або паливо; 2) звукових коливань; 3) електромагнітного поля; 4) сил інерції; 1.1.1.6. зворотне продування ФЕ потоком ВГ з власною газорозподільною системою у ФТЧ в поєднанні з упорскуванням туману робочої рідини чи без нього; 1.1.1.7. комбінації з попередніх.

Термічне або термокаталітичне очищення ФЕ БСР найбільш розповсюджене технічне рішення, може здійснюватись за допомогою таких видів окислювача [1]: 1.1.2.1. залишковий кисень у ВГ – традиційний вид; 1.1.2.2. те саме з додатковою подачею повітря у випускний тракт дизеля; 1.1.2.3. низькотемпературна плазма, яка генерується плазмотронами з повітря, що спеціально подається у випускний тракт, що призводить до підвищеної емісії оксидів азоту; 1.1.2.4. те саме, але плазма наводиться з ВГ, що зменшує енерговитрати, добре поєднується з каталітичним покриттям ФЕ, дозволяє істотно знизити температуру займання сажі; 1.1.2.5. діоксид азоту NO_2, отриманий у каталітичному доокислювачі оксидів азоту, який встановлений за потоком ВГ вище, ніж ФТЧ – так звані постійно регенеровані ФТЧ.

При термічній або термокаталітичній регенерації необхідна підвищена температура ВГ, що може досягатися: 1.1.2,а. пасивно (мимовільно) або 1.1.2,б. активно

(примусово). Пасивний спосіб підвищення температури ВГ передбачає переведення дизеля на номінальний режим роботи або режим максимального крутного моменту. Тому подальші пункти класифікації належать до пункту 1.1.2.б і літера «б» у позначеннях цих пунктів вказуватися не буде.

Активний спосіб підвищення температури ВГ передбачає один з таких заходів [1]: 1.1.2.1. подачу порцій палива у камеру згоряння дизеля на такті розширення і/або випуску й ініціалізацією його дифузного окислення у ВГ залишковим киснем при проходженні потоку ВГ через каталітичний окислювач продуктів неповного згоряння палива, розташований вище ФТЧ за потоком ВГ; 1.1.2.2. подачу палива в спеціальну камеру згоряння у випускному тракті з ініціалізацією його дифузного окислення залишковим киснем у ВГ за допомогою свічок запалювання, свічок розжарювання, окислення у каталітичному допалювачі (доокислювачі, конверторі, перетворювачі) продуктів неповного згоряння палива з подальшим автономним підтриманням полум'я; 1.1.2.3. використання теплоізоляції корпусу ФТЧ і електронагрівних елементів у конструкції ФТЧ, тобто свічок розжарювання або ніхромових спіралей (з подачею додаткового повітря у ФЕ або без нього). При цьому електронагрівні елементи можуть бути металевими і поєднаними з циклонами і теплоізольованими камерами згоряння у ФТЧ; 1.1.2.4. підвищення водневого числа палива за рахунок подачі водню в свіжий заряд; 1.1.2.5. використання НВЧ-випромінювачів, що впливають на потік ВГ з метою підвищення їхньої температури і ТЧ або на самі ТЧ з метою термічної деградації вуглеводнів, адсорбованих на сажових ядрах ТЧ.

Зміна робочого тіла ФЕ (згідно з класифікацією шлях 1.2). Регенерація, що здійснюється за цим шляхом, проводиться для рідинних і паперових ФТЧ, а також для монолітних керамічних і некерамічних типів ФТЧ за умов відсутності БСР, з подальшим очищенням ФЕ (або його робочого тіла) від ТЧ або утилізацією ФЕ разом з ТЧ на спеціалізованому підприємстві у ході виконання чергового технічного обслуговування (в тому числі і щоденного) АТЗ і ДВЗ. При цьому застосовується термічний або механічний спосіб очищення ФЕ. Є такі способи регенерації І роду шляхом зміни робочого тіла ФЕ [1]: 1.2.1. термічне окислення ТЧ у ФЕ на спеціальному стенді – відпал; 1.2.2. зміна робочої рідини з подальшим впливом на неї послідовно способами 1.1.1.2 (фільтрації робочої рідини) і 1.2.1 (відпалом на стенді) для утво-

рення сухого залишку; 1.2.3. зміна насипки або намотки з подальшим впливом на неї послідовно способами 1.2.1 (відпалом на стенді) і 2.1.2 (механічним очищенням зворотним продуванням повітрям під тиском); 1.2.4. зміна насипки або намотки з подальшим впливом на неї послідовно способами 1.2.1 (відпалом на стенді) і 2.1.3 (механічним очищенням зворотним продуванням водою під тиском).

Дублювання ФТЧ на борту АТЗ (згідно з класифікацією шлях 1.3) і почергова термічна або термокаталітична регенерація рівноцінних або нерівноцінних між собою ФТЧ за допомогою бортової системи регенерації. Отже, цей спосіб є комбінуванням двох шляхів 1.1 і 1.2 (згідно с класифікацією) поперемінно для двох ФЕ [1]. Є такі способи регенерації I роду шляхом дублювання ФЕ на борту АТЗ: 1.3.1. реалізація шляху 1.1 – очищення ФЕ на борту АТЗ – поперемінно для обох ФЕ; 1.3.2. реалізація шляху 1.2 – зміна робочого тіла ФЕ – поперемінно для обох ФЕ.

Типові бортові системи термокаталітичної регенерації I роду ФТЧ проілюстровано у [1] – фірми Bosch з упорскуванням порцій палива у випускну систему дизеля, без подачі додаткового повітря у випускну систему дизеля, окремим контуром у системі автоматичного керування дизелем, фірми Engelhart з упорскуванням порцій палива у камеру згоряння дизеля, без подачі додаткового повітря у випускну систему дизеля, з системою рециркуляції ВГ дизеля, окремою гілкою у алгоритмі паливоподачі електронного блока керування у системі автоматичного керування дизелем та фірми Econix-DPF з подачею додаткового повітря до камери згоряння у корпусі ФТЧ, упорскуванням до неї палива окремою системою паливоподачі під керуванням окремою системою автоматичного керування з власним ЕБК. Термічне окислення ТЧ киснем у ВГ починається при 550–650 °С, при використанні каталітичного покриття ФЕ, подачі каталітичних присадок у паливо або ВГ при 300–400 °С. Окислення ТЧ низькотемпературною плазмою або NO_2 відбувається вже при 200–250 °С [1].

Присадки до моторного палива для прискорення регенерації Wynns Diesel Power 3 або EOLYS фірми Rhodia [1] – це 4,2 % органічний розчин церину (окису церію), що подається у паливний бак спеціальною форсункою одноразово в кількості, відповідній об'єму заправленого у АТЗ палива (при заглушеному двигуні). Присадку розроблено для зниження температури горіння сажі нижче порогу горіння з

450 до 350 °С і нижче за рахунок розпушення ТЧ, що робить умови регенерації більш пожежобезпечними і економічними. Однак при згорянні ТЧ окис церію не окислюється і осідає у ФЕ, що знижує його ресурс.

Регенерацію І роду також слід поділити за способом ініціації на такі види [1], що є також альтернативним підходом до пунктів 1.1.2.а і 1.1.2.б (рис. 1.11).

А. Мимовільна (неконтрольована, пасивна) ініціація процесів регенерації реалізується при створенні умов (досягненні певних параметрів ВГ), необхідних для початку і підтримання процесу окислення ТЧ у ФТЧ, при роботі дизеля без участі БСР. Залежно від кількості накопичених ТЧ у ФЕ цей процес може перебігати в таких режимах: А.а. штатний, за якого умови перебігу процесу не спричиняють негативних наслідків для матеріалу ФЕ, його каталітичного покриття і корпусу ФТЧ; А.б. аварійний, за якого відбувається швидке згоряння великої кількості накопичених ТЧ, що нерівномірно підвищує температуру матеріалу ФЕ і призводить до його термошокового руйнування: замикання ФЕ, що відбувається при зміщенні каналів для руху ВГ та їхнього перекриття після їх розтріскування; пробій ФЕ, що відбувається при утворенні наскрізного отвору у ФЕ після його оплавлення або розтріскування; руйнування каталітичного покриття ФЕ; прогорання корпусу ФТЧ.



Рисунок 1.11 – Поділ процесів регенерації І роду за способом ініціації на види

Наприклад, у 2011 р. компанія Ford відкликала 37400 одиниць вантажних АТЗ серії F з дизелями у зв'язку з пожежонебезпекою їхніх ФТЧ, чутливих до витоків палива при порушеннях процесу регенерації та схильних до спонтанної регенерації ФТЧ з великою кількістю накопичених ТЧ; фірма Jaguar у 2005–2007 рр. з аналогічної причини відкликала всі АТЗ марки S-Type з дизелями XJ [1].

Б. Примусова (контрольована, активна) ініціація процесів регенерації реалізується при створенні умов (досягненні певних параметрів ВГ), необхідних для початку і підтримання процесу окислення ТЧ у ФТЧ за допомогою засобів БСР. Залежно від кількості накопичених ТЧ у ФЕ і ряду інших факторів процес примусової регенерації І роду може здійснюватися в таких режимах: Б.а. штатний – при досягненні розрахункового рівня кількості накопичених ТЧ у ФЕ (або інших показників – див. далі), який нижче критичного, небезпечного для безаварійного здійснення процесу, проте створює такий ГО ФТЧ, вище якого електронний блок керування дизелем визначає режим його роботи як аварійний (принцип дії бортової системи регенерації І роду системи зниження токсичності ВГ фірми Woodward і конструкцію її камери згоряння подано у [1]); Б.б. аварійно-штатний – при досягненні критичного значення розрахункового рівня кількості накопичених ТЧ у ФЕ (або інших показників), при якому є небезпека виходу з ладу елементів ФТЧ або переривання процесу регенерації, але регенерацію все ще можливо здійснити засобами бортової системи регенерації при переведенні дизеля на особливий режим роботи; Б.в. аварійний – такий самий, що й попередній, але здійснення процесу штатною системою регенерації при заводських налаштуваннях електронного блока керування або на борту АТЗ взагалі неможливе.

Такий режим також реалізується при регенерації ФТЧ, ресурс яких вичерпано з причини фізичного зносу (через газову високотемпературну ерозію і абразивний знос, руйнування каталітичного покриття), або у зв'язку з необхідністю здійснення регенерації ІІ роду, коли рівень накопичених нерозчинних і закоксованих розчинних фракцій ТЧ у ФЕ досягає критичного значення.

Здійснення примусової регенерації І роду в аварійно-штатному режимі можливе у таких локаціях [1]: а) на борту АТЗ засобами БСР при ініціації процесу безпосереднім керуванням електронним блоком керування на станції технічного обслуговування; б) на борту АТЗ при використанні засобів перетворення (розчинення і перерозподілу в тілі ФЕ) накопичених ТЧ спеціальними засобами; в) поза бортом АТЗ промиванням ФЕ робочою рідиною (водою) під тиском до 1,5 МПа вручну або на спеціалізованому автоматичному стенді або здійсненням термічної регенерації на

спеціальному обладнанні.

Так, наприклад, система очищення ФТЧ від ТЧ виробництва фірми LIQUI MOLY [1] містить такі компоненти: а) рідину-розчинник Pro Line DPF Reiniger; б) промивач-ополіскувач Pro Line DPF Spülung; в) комплект розпилювальних зондів і розпилювач-пістолет. Вона використовується у випадку неможливості (або небажання) проведення примусової аварійної регенерації ФТЧ у складі АТЗ. Рідина-розчинник (1 дм^3) подається в ФТЧ безпосередньо на поверхню ФЕ розпилювачем-пістолетом порційно (по 5–10 упорскувань з перервами в 5–10 с) через один із спеціальних зондів, що вводиться в корпус ФТЧ через штуцер датчика температури, під тиском 6–8 бар. Після цього аналогічним чином ФЕ обробляється промивачем-ополіскувачем (0,5 дм^3). Обидві рідини самостійно випаровуються з поверхонь ФЕ і виводяться з випускної системи дизеля. Система придатна тільки для очищення ФТЧ легкових автомобілів і легких вантажівок (що обмежується довжиною каналів у ФЕ) відразу після зупинки дизеля, що не знаходиться в безпосередній близькості від турбокомпресора і випускного колектора, оскільки реагенти агресивні до матеріалів випускних клапанів і деталей камери згоряння дизеля. У процесі обробки ТЧ розчиняються і в такому вигляді перерозподіляються в об'ємі ФЕ таким чином, що стає можливою примусова або пасивна регенерація ФТЧ у штатному режимі після пробної поїздки АТЗ тривалістю 20 хв. Рекомендована частота процедури – при кожній другій заміні моторної оливи або при кожному технічному обслуговуванні АТЗ [1].

Виробляються також системи очищення-розчинення-промивання ФЕ від ТЧ у форм-факторі аерозольних балонів, подібні до вищеописаної. Ці системи вирізняються такими недоліками [1]: а) низький тиск розпилювання; б) низька ефективність для аварійної регенерації; в) форма струменя допускає втрати до 1/3 реагентів; г) оснащення пластиковими зондами невисокої жорсткості (змінює характеристики струменя) і жаростійкості (потребує зупину АТЗ і дизеля, охолодження ВГ до температури нижче 100 °С); д) мінливість тиску впорскування, неможливість використання реагенту після досягнення тиску в аерозольному балоні нижче 1 бар унаслідок перевитрати інертного газу; е) не містять ополіскувача, агресивні до матеріалів ФТЧ.

Примусова регенерація ФТЧ І роду в штатному режимі поза бортом АТЗ ши-

роко використовується на промислових підприємствах і у гірничодобувній галузі, особливо у вугільних шахтах, де наявність бортової системи регенерації (і, відповідно, здійснення цього процесу в шахті) заборонено вимогами техніки безпеки. Для автотранспортних підприємств з парком міського транспорту, будівельних і дорожніх машин, сільськогосподарської техніки стратегія регенерації ФТЧ поза бортом АТЗ не тільки можлива, а й широко застосовується, оскільки дозволяє здійснювати її централізовано і передбачає щоденний огляд ФЕ як однієї з найдорожчих і ненадійних деталей АТЗ [1].

Усі БСР, що здійснюють примусову регенерацію, потребують витрат енергії (а фактично – палива), ускладнюють конструкцію і компонування ПДВЗ і АТЗ і потребують певного рівня автоматизації: а) окремої ЕСАК; б) контуру управління у ЕБК ЕСАК дизелем; в) окремої гілки алгоритму керування у ЕБК системи автоматичного керування дизелем.

Переважна більшість АТЗ, що відповідають нормам токсичності рівня EURO IV – EURO VI, і оснащених у зв'язку з цим ЕСАК паливоподачею, турбокомпресором і системою рециркуляції ВГ, мають БСР ФТЧ, яка реалізується на базі вже наявних ЕСАК і виконавчих пристроїв цих систем [1]. Так, наприклад, в ЕБК ЕСАК автомобіля VolksWagen Tuareg з дизелем VW 3.0 V6 TDI (з робочим об'ємом $z \cdot V_h = 3{,}2$ л і номінальною ефективною потужністю $N_e =$ 220 к.с.) виконується визначення прогнозованого рівня засмічення ФТЧ двома видами розрахунку одночасно [1] і обирається більше значення: 1) за показаннями датчика перепаду тиску на ФТЧ, датчиків температури ВГ на вході і виході з ФТЧ і масових витрат ВГ; 2) за статистичною інформацією про стиль кермування (пробіг АТЗ, витрати ВГ, час експлуатації), показання датчиків кисню у ВГ і температури ВГ на вході й виході з ФТЧ. Для здійснення пасивної регенерації ФТЧ I роду зазначеного АТЗ слід дотримуватися швидкості руху АТЗ не нижче за 60 км/год при $n_{кв}$ дизеля не менше за 2000 rpm.

Примусова регенерація I роду [1] у описаного АТЗ автоматично починається при досягненні одної з таких умов: 1) розрахункового рівня заповнення ФТЧ 80 %; 2) перепаду тиску ВГ на ФТЧ, рівного 25 кПа; 3) різниці температур ВГ на ФТЧ

34 °С; 4) певної величини пробігу АТЗ без регенерації; 5) певної величини часу роботи дизеля без регенерації.

При цьому необхідними умовами для початку процесу регенерації І роду є: 1) тривалість роботи дизеля після запуску – більше за 2 хв.; 2) температура охолоджуючої рідини дизеля – не менше за 70 °С протягом останніх 2 хв., але не вище за 90 °С; 3) у ЕБК відсутня інформація про відмови елементів систем паливоподачі, впуску і очищення ВГ; 4) досягнуто мінімально необхідної швидкості АТЗ, що залежить від ступеня заповнення ФТЧ (для 80 % – 100 км/год); 5) рівень палива в баку – вище за 1/4.

При активній регенерації І роду його ЕБК подає такі керуючі імпульси: 1) закриття клапана системи рециркуляції ВГ; 2) зміна нахилу лопаток напрямного апарата турбокомпресора; 3) подача дозованих порцій палива до камери згоряння дизеля після основної паливоподачі, які окислюються в каталітичному нейтралізаторі продуктів неповного згоряння палива, унаслідок чого підвищується температура ВГ.

При цьому додаткова доза палива частково потрапляє в картер і систему змащення дизеля, що при частому повторенні ситуації аварійного переривання процесу примусової регенерації може призвести до істотної втрати кондиції моторної оливи.

Умови закінчення примусової регенерації І роду: 1) досягнуто максимальний час, відведений на процес, визначений з умови термостійкості деталей ФТЧ і мінімізації витрат палива на здійснення процесу (20–25 хв); 2) дизель зупинено (аварійно); 3) дизель переведено на режим холостого ходу на 5–10 хв; 4) температура ВГ досягла значення 1000 °С; 5) виявлено перебої в роботі систем паливоподачі, впуску і очищення ВГ. При виконанні всіх умов, необхідних для примусової або пасивної регенерації І роду, процес повністю завершується за 10 хв, при найменш сприятливому збігу чинників – за 25 хв.

Середньоексплуатаційні питомі ефективні витрати палива дизелем при використанні примусової регенерації І роду зазвичай підвищуються не більш, ніж на 10 г/(кВт·год) і збільшуються в міському циклі експлуатації, а викиди CO_2 (парниковий газ) дизелем зростають не більш, ніж на 0,05 %. При перших 1000 км пробігу

АТЗ частота примусової регенерації у 2–3 рази більша, ніж у ході подальшої експлуатації. Це дозволяє компенсувати явища, що супроводжують припрацювання дизеля і самого ФТЧ [1].

При тривалій неможливості здійснення примусової регенерації I роду в штатному режимі ЕБК сигналізує водієві АТЗ (індикатор «Check DPF» на контрольній панелі) і переводить дизель на аварійний режим роботи з обмеженням номінальної потужності на 30–40 %, про що також сигналізується водієві АТЗ (індикатор «Check Engine»). Межею заповнення ФТЧ ТЧ, обмеженою з міркувань пожежної безпеки, є 105–125 % від його номінальної ємності [1].

Аварійна примусова регенерація в умовах СТО (ініціюється штучно) для того ж АТЗ здійснюється на режимі холостого ходу (стоянкове гальмо ввімкнено, коробка зміни передач – в положенні нейтрально передачі або в положенні «Parking») при $n_{кв}$ = 1500 rpm при досягненні розрахункового рівня накопичених ТЧ у ФТЧ більше за 68 г і температурі моторної оливи не нижче 70 °С. При цьому температура ВГ перед турбокомпресором повинна перевищувати 690 °С, а коефіцієнт надлишку повітря у ВГ α має бути в межах 1,0–2,0. Процес здійснюється при включеному запаленні, але виключених споживачах електроенергії, що не беруть участі в процесі, і при закритому капоті. Час здійснення процесу – до 40 хв [1].

Примусова регенерація дизеля Isuzu 4HL1 на відміну від попереднього прикладу, в штатному і аварійно-штатному режимах [1] здійснюється після інформування водія про її необхідність і постановки АТЗ на стоянкове гальмо, ініціюється відповідною кнопкою (після чого водієві не слід робити які-небудь дії) – на режимі холостого ходу з $n_{кв}$ = 900 хв$^{-1}$, при цьому включається автомат прогрівання ВГ, тривалість процесу 20–40 хв [1].

Ресурс системи очищення ВГ від ТЧ визначається ресурсом його ФЕ і ставить 120–200 тис. км пробігу АТЗ; вичерпується з причини заповнення ФЕ продуктами коксування ТЧ і їхніми неокислюваними компонентами, а також абразивного зносу матеріалу ФЕ і можливого його термошокового пошкодження зі втратою пропускної здатності. Цей показник визначається умовами експлуатації й технічного обслуговування АТЗ [1]. Наприклад, при використанні неякісного палива строк експлуатації

ФТЧ знижується до споживання 10 повних заправок паливом АТЗ. При експлуатації АТЗ у міському циклі в умовах мегаполісу термін служби ФТЧ становить 50 тис. км пробігу [1].

Оскільки найгірша модель експлуатації з точки зору заповнення ФТЧ і можливості його регенерації I роду передбачає велику кількість нетривалих поїздок у міському циклі без великих навантажень (таксі, кур'єрська служба, міський громадський транспорт), це призводить до збільшеного викиду ТЧ, підвищеної витрати палива, розбавлення ним моторної оливи і частого переривання початку процесів примусової регенерації I роду, відсутності пасивної регенерації I роду. За такої моделі експлуатації АТЗ водієві необхідно кожні 700 км пробігу не менш ніж на 20 хв при русі АТЗ виводити дизель на режим роботи з $n_{кв}$ = 3000 rpm [1]. При цьому, якщо температура ВГ у ФТЧ не досягає 450 °С протягом 1 години після пуску дизеля, він автоматично переводиться в аварійний режим роботи.

ЕБК відстежує динаміку засмічення ФТЧ не тільки між регенераціями I роду, але й протягом всього терміну експлуатації. При цьому механічне очищення ФЕ від неокислюваних фракцій ТЧ під час чергового ремонту або технічного обслуговування АТЗ при досягненні граничного стану ФТЧ не обнуляє лічильник, що призводить до автоматичного переведення дизеля на аварійний режим роботи і може потребувати ручного обнулення кожні 500–600 км пробігу АТЗ. Також ЕБК може дати рекомендації щодо заміни ФЕ або всього ФТЧ [1]. Типовий алгоритм роботи БСР I роду ФТЧ подано у [1].

1.12.4 Класифікації способів і засобів здійснення процесу регенерації фільтрів твердих частинок II роду

При регенерації II роду здійснюється очищення ФЕ від неокислюваних фракцій ТЧ і продуктів коксування окислюваних фракцій при досягненні ним критичного стану, що й є причиною необхідності здійснення регенерації II роду. Процес може бути неперіодичним або взагалі не входити до ЖЦ ФТЧ [1].

Для ФТЧ традиційної конструкції процес регенерації II роду здійснюється поза бортом АТЗ при черговому технічному обслуговуванні або при досягненні крити-

чного рівня ГО ФТЧ. Для ФТЧ нетрадиційної конструкції процес регенерації ІІ роду ідентичний процесу регенерації І роду, тобто відбувається шляхом зміни робочої рідини з її подальшою фільтрацією або шляхом зміни одноразового робочого тіла (наприклад, паперового) з подальшим його знешкодженням.

Для ФТЧ традиційної конструкції процес регенерації ІІ роду здійснюють одним з таких способів: 2.1.1. способом 1.2.4 (згідно з класифікацією) з подальшим очищенням зворотнім потоком атмосферного повітря; 2.1.2. те саме, що й 2.1.1, але без відпалу; 2.1.3. шляхом зворотного промивання ФЕ робочою рідиною (водою) під тиском до 1,5 МПа вручну.

Спосіб 2.1.3 може здійснюватися за допомогою таких пристроїв [1]: 2.1.3.1. портативновної установки, наприклад OTC Portable Diesel DPF Cleaner; 2.1.3.2. спеціалізованому стаціонарному автоматичному стенді, наприклад FSX Complete Cleaning Package.

Для ФТЧ нетрадиційної конструкції, що містять різного виду насипки і/або намотки, є подібними до традиційних за принципом роботи, процес регенерації ІІ роду здійснюється шляхом зміни насипки з подальшим очищенням самої насипки і знешкодженням її продуктів – аналогічно до об'єктів регенерації традиційної конструкції. Іноді, коли таку процедуру виконують у місцях централізованого технічного обслуговування АТЗ з дизелями, досягнення кожним конкретним ФТЧ критичного стану не відстежують, а проводять регенерацію ФЕ превентивно. Однак для отримання інформації про режими і тривалість процесу, попередньо визначають стан кожного ФЕ на спеціальних стендах, наприклад компанії DPG [1]. На тому ж стенді проводять регенерацію ФЕ, що знятий з АТЗ і демонтований з корпусу ФТЧ термічним способом. Як джерело енергії використовують очищене дизельне паливо.

Усіма вищенаведеними позабортовими способами і засобами здійснення регенерації ІІ роду можливо здійснити й регенерацію І роду. Те саме відноситься і до випадку реалізації регенерації І роду шляхом застосування БСР зі зворотним продуванням ФЕ потоком ВГ [1] – таким чином можливо реалізувати і регенерацію ІІ роду механічним способом.

Узагальнену схему класифікації сучасних способів і засобів реалізації процесу

регенерації ФТЧ дизелів, яку побудовано у дисертації з використанням методів аналізу ієрархій та десятинного поділу подано на рис. 1.12.

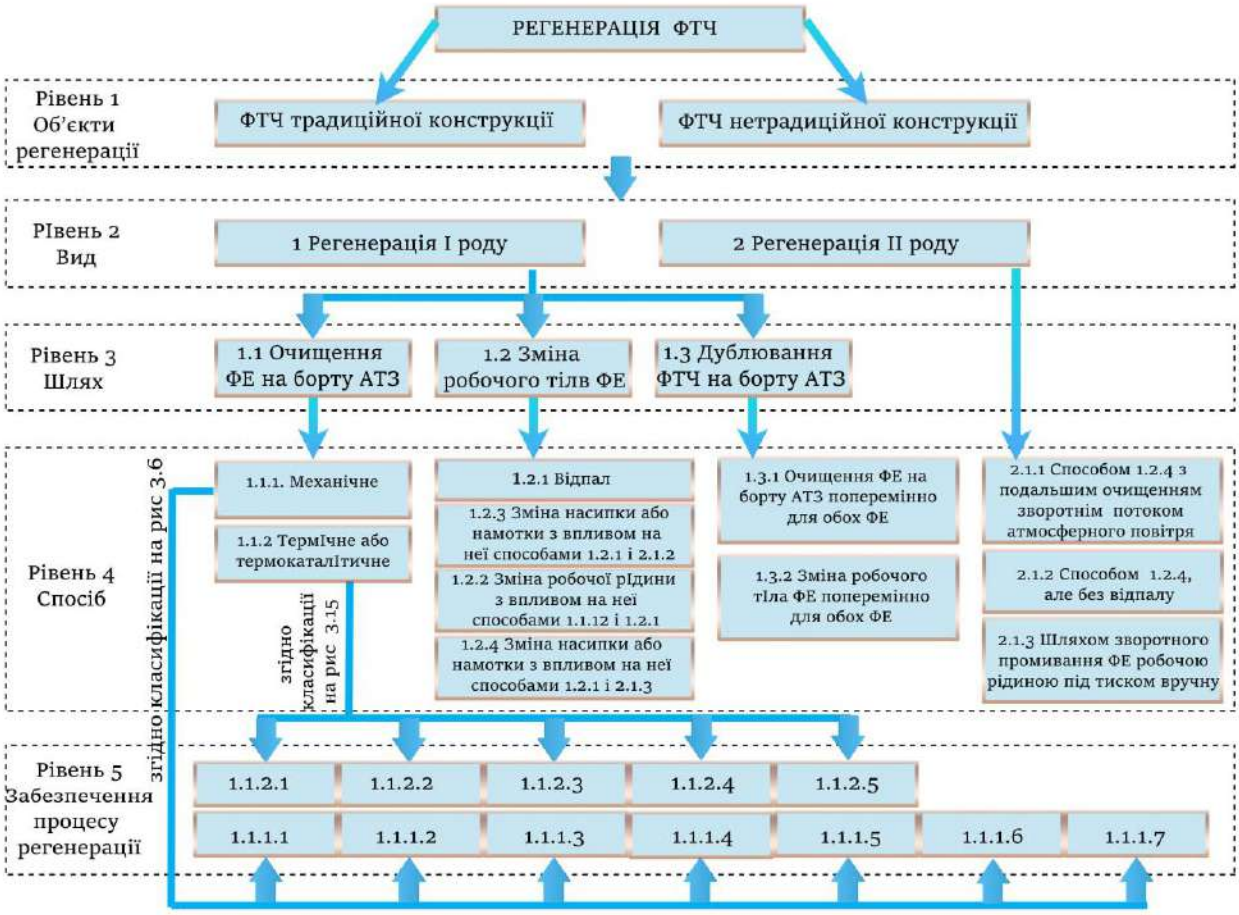


Рисунок 1.12 – Узагальнена схема узагальненої класифікації сучасних способів і засобів реалізації процесу регенерації ФТЧ дизелів

1.13 Висновки по розділу 1

Таким чином, у даному розділі рукопису кваліфікаційної роботи отримано такі результати.

1. Здійснено аналіз науково-технічної, довідникової, нормативної та патентної літератури за темою дисертаційного дослідження.

Встановлено, що ПДВЗ займають наразі провідне місце як джерела механічної енергії на транспорті і особливо у спеціальній техніці – аварійно-рятувальній, пожежній, військовій тощо. Явище дизелізації парку АТЗ і спеціальної техніки набуває широкого розповсюдження. У колі першочергових завдань при створенні нової або модернізації існуючої одиниці парку АТЗ і спеціальної техніки є її екологізація.

У розвинених країнах світу ці показники переважають над іншими через те, що вони закріплені на законодавчому рівні і тому часто виступають головним критерієм оптимізації конструкції ПДВЗ.

Обґрунтовано актуальність наукових досліджень з підвищення рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ, обладнаних ПДВЗ, особливо такими, що оснащені системами рециркуляції ВГ. Описано тенденції у питанні екологізації АТЗ і спеціальної техніки, обладнаних ПДВЗ за останні 25 років. Виокремлено роботи провідних вітчизняних і закордонних фахівців і організацій у галузі екології та ЕБ транспорту і спеціальної техніки, альтернативних палив і гібридних АТЗ.

Проаналізовано і описано особливості ПДВЗ як джерела забруднення НПС. Розроблено загальну класифікацію видів чинників ЕНБ, джерелом яких є ПДВЗ.

2. Проаналізовано та описано структуру парку АТЗ і спеціальної техніки України як чинник ЕНБ та екологічні показники його одиниць порівняно з нормативно встановленими і виявлено значну долю морально застарілої та фізично зношеної техніки у ньому, що не відповідає чинному екологічному законодавству, але не може бути виведеною з експлуатації через різноманітні причини.

3. Проаналізовано основні проблеми забезпечення виконання законодавчо встановлених норм показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ в Україні.

Виявлено проблему протиріччя між наявними законодавчо встановленими нормами токсичності транспорту й відсутності контролю за їх додержанням, обґрунтовано її актуальність, проаналізовано її причини і запропоновано шляхи її вирішення.

4. Сформульовано та обґрунтовано визначення поняття «безаварійна експлуатація» як частини життєвого циклу ЕУ з ПДВЗ на основі положень Правил дорожнього руху України.

5. Побудовано третє, найбільш повне і вичерпне, наближення класифікації видів забруднення НПС, джерелом яких є ЕУ з ПДВЗ та відповідний класифікатор, побудований на ієрархічному принципі. Проаналізовано вплив споживання моторного палива двигуном на усі інші чинники ЕНБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ, на основі чого обґрунтовано введення такого чинника ЕНБ у відповідний класифікатор.

6. Надано загальну характеристику особливостей ВГ дизельних ПДВЗ як чинника негативного впливу на складові НПС взагалі та ТЧ як їх основного компоненту зокрема. Виявлено, що розподіли характеристик ТЧ мають характер, різко відмінний від закону нормального розподілу, та запропоновано використання математичного апарату бета-розподілу для описання цих розподілів.

Серед числа компонентів ВГ ПДВЗ присутні забруднюючі речовини 1 (безн(а)пірен), 2 (NO_2), 3 (PM, C_nH_m, SO_2) та 4 (CO) класу небезпеки, внесені до у списків приорітетності спостереження забруднюючих речовин у повітрі, та мають законодавчо встановлені гранично допустимі значення питомих викидів, а самі викиди визначаються за стандартизованими методиками.

7. Побудовано класифікацію способів та засобів очищення потоку ВГ дизельних ПДВЗ від ТЧ та відповідний їх ієрархічний класифікатор. Розкрито зміст і проілюстровано окремі пункти запропонованої класифікації, подано її узагальнену схему, побудовану на основі принципу багаторівневої декомпозиції методом ієрархічних структур і методологічного підходу.

Виявлено, що способів, заснованих на удосконаленні конструкції ПДВЗ, оптимізації його робочого процесу та підвищенні якості дизельного палива і моторної оливи, а також організаційно-технічних і законодавчих способів недостатньо для задоволення сучасних норм токсичності викиду забруднюючих речовин, а тому необхідним є безпосередній вплив на ВГ ПДВЗ (очищення від ТЧ, перетворення, нейтралізація) у комплексі з вищезгаданими способами.

Встановлено, що системи і пристрої, які здійснюють цей процес, у своїй роботі використовують різні способи оброблення ВГ, побудовані на принципово різних фізико-хімічних процесах: механічні, хімічні, термічні, електричні, плазмові, рідинні, які найчастіше комбінують. Пристрої систем очищення потоку ВГ від ТЧ розділено на типи за принципом дії на механічні, хімічні й комбіновані. Механічні ФТЧ поділено на підтипи за принципом роботи – на фільтрувальні й інерційні, а хімічні – на каталітичні, термічні, плазмові й оксидні. Фільтрувальні ФТЧ поділено на види за структурою (з отворами, що більші й менші за розміри ТЧ), інерційні – за способом формування частинок з достатньою масою (крапельні, коагуляційні й конденсуючі).

Механічні ФТЧ поділено також на форм-фактори за будовою і конфігурацією фільтрувального елемента, класи – за місцем утримання ТЧ (поверхнеутримуючі й об'ємнопоглинаючі). Каталітичні ФТЧ класифіковано за місцем розташування каталізатора, термічні – за видом джерела теплоти, плазмові – за видом носія плазми.

8. Визначено стратегії досягнення оптимальних екологічних показників дизельних ПДВЗ. Описано склад повного комплексу засобів для очищення ВГ дизелів від законодавчо нормованих полютантів. Визначено види компонування агрегатів у системі зниження токсичності ВГ дизельних ПДВЗ.

9. Побудовано класифікацію способів та засобів реалізації процесу регенерації ФТЧ дизельних ПДВЗ та відповідний їх ієрархічний класифікатор. Розкрито зміст і проілюстровано окремі пункти запропонованої класифікації, подано її узагальнену схему, побудовану на основі принципу багаторівневої декомпозиції методом ієрархічних структур і десятинного підходу.

Виявлено, що процеси, які становлять сутність і супроводжують процес регенерації ФТЧ, що являє собою очищення ФТЧ від накопичених у ньому ТЧ, є не менш важливими, різноманітними й складними, ніж власне процеси очищення потоку ВГ від ТЧ, і чинять значний вплив на рівень ЕБ експлуатації АТЗ.

Встановлено, що ТЧ слід поділити на окислювані й неокислювані фракції. Дослідження показало, що слід розрізняти процес регенерації I і II роду – відповідно процес очищення ФЕ від окислюваних і неокислюваних фракцій ТЧ. Для ФТЧ традиційної конструкції й нетрадиційної конструкції з подібним першим принципом роботи це розходження є принциповим через відмінності в методах і засобах реалізації цих процесів. Для деяких типів ФТЧ нетрадиційної конструкції ці процеси ідентичні.

Регенерацію I роду поділено на шляхи реалізації за місцем здійснення на такі, що здійснюються очищенням на борту АТЗ, зміною робочого тіла ФЕ (поза бортом АТЗ) і дублюванням ФТЧ. Перша поділена за способами здійснення – на такі, що здійснюються механічним очищенням ФЕ, термічним або термокаталітичним. Механічну регенерацію класифіковано за способами здійснення, термічну – за видом окислювача, способом підвищення температури ВГ. Також процеси регенерації I роду класифіковано за видами ініціалізації на самовільну і примусову, а за режимами – на штатну, аварі-

йно-штатну і аварійну. Описано умови і алгоритми початку, перебігу і завершення процесу регенерації I роду.

Регенерацію I та II роду класифіковано за об'єктами – на ФТЧ традиційної і нетрадиційної конструкції. Обидва види регенерації можуть здійснюватись як на борту АТЗ так і поза ним, їх поділено за способами і засобами здійснення.

Виявлено, що серед числа найбільш широко вживаних та комерційно успішних систем видалення ТЧ з аерозолю ВГ є фільтри фірм Bosch, Engelhard, Econix, DCL і Johnson Matthey, які обмежено придатні як засоби захисту АП від негативного впливу при роботі ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу.

10. Таким чином, встановлено, що особливістю негативного впливу ЕУ на атмосферне повітря є наявність у їх складі ПДВЗ високим рівнем фізичного зносу. Це потребує додаткових наукових досліджень з визначення методологічних основ обґрунтованого розв'язання задач екологічної безпеки з позицій зваженого прийняття рішень щодо захисту атмосферного повітря від негативного впливу і комплексної оцінки чинників його забруднення.

Відповідно до результатів аналітичного огляду і обробки інформації з аналізу напрямів науково-методологічних досліджень із захисту АП від техногенного впливу при роботі енергоустановок з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу сформульовано мету, завдання та визначені основні етапи дисертаційної роботи.

Метою роботи є розробка науково-методологічних основ системи комплексного оцінювання рівня екологічної безпеки технології захисту атмосферного повітря при безаварійній експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу та впровадження її в управління технології захисту навколишнього середовища.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких *задач*:

1. Надати системний аналіз науково-методологічних розробок щодо визначення екологічно ефективних процесів роботи енергоустановок з поршневим ДВЗ на етапі життєвого циклу «безаварійна експлуатація» для захисту атмосферного повітря від фізичних чинників впливу та викиду екологічно небезпечних речовин на базі огляду науково-технічної, довідникової, патентної та нормативної літератури.

2. Розробити наукові засади для обґрунтування методологічних положень

комплексного дослідження негативного впливу енергоустановок з поршневим ДВЗ на атмосферне повітря для удосконалення процесу їх безаварійної експлуатації при впровадженні нових технічних рішень з метою побудови системи управління екологічною безпекою енергогенеруючих об'єктів названого виду.

3. Розробити наукові основи та методологічні засади для розробки систем комплексної оцінки рівня екологічної безпеки та управління безаварійною експлуатацією енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу.

4. Розробити комплекс технологічних і технічних рішень з організації та впровадження екобезпечних робочих процесів «безаварійної експлуатації» енергоустановок з поршневим ДВЗ, що забезпечують заданий рівень екологічної безпеки, та комплексну систему екологічного управління процесом при їх експлуатації.

5. Надати результати підвищення рівня екологічної безпеки в ЕУ з ПДВЗ із високим рівнем зносу при застосуванні комплексу технологічних і технічних рішень щодо роботи ТЗНС стосовно очищення відпрацьованих газів від твердих частинок на конструктивно удосконаленому фільтрі. Встановити індикаторну функцію ефективності роботи фільтру твердих частинок до досягнення нормативних вимог екологічної безпеки для поршневого ДВЗ тривалої експлуатації.

6. Визначити переваги застосування комплексної системи управління екологічно безпечною експлуатацією енергоустановок з поршневим ДВЗ відповідно до розробленої функції оцінювання їх безпечності у вигляді інтегративного показника рівня екологічної безпеки в умовах негативного впливу таких енергогенеруючих об'єктів на атмосферне повітря.

2 НАУКОВІ ЗАСАДИ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ НА АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ

2.1 Загальні міркування

Процес експлуатації ЕУ, джерелом механічної енергії в якій є ПДВЗ, являє собою лише частину ЖЦ такого об'єкта. Однак, саме ця частина, і тільки вона, являє собою практичний інтерес для кінцевого споживача, оскільки тільки в протягом її ЕУ та її ПДВЗ виконують покладені на них функції – продукує корисну роботу, приносить прибуток і т.д. Перебіг і особливості етапів ЖЦ, що передують експлуатації – розробки, випробувань, доведення, виробництва й обкатки – практичного інтересу для споживача собою не являють, а тільки лише їх результати – технічні характеристики нових, котрі ще не перебували в експлуатації, ЕУ й ПДВЗ, а також їх вартість. Саме по співвідношенню цих показників з показниками інших, конкуруючих, пропозицій на ринку споживач і віддає свою перевагу при виборі необхідного для нього обладнання. Забезпечення конкурентоспроможних значень показників роботи ПДВЗ для ЕУ, перелік яких утворює технічну характеристику, та їх вартості – завдання фахівців в галузі двигунобудування. Перебіг і особливості етапів ЖЦ, що слідують за експлуатацією, тобто після досягнення ЕУ з ПДВЗ граничного технічного стану – утилізація, знешкодження та захоронення – практичного інтересу для споживача не мають. Тільки законодавчий примус за заохочення власника таких об'єктів, що вичерпали свій ресурс і являють собою в зв'язку з цим джерело безсумнівної й істотної екологічної небезпеки для НПС та урбосистем; до забезпечення комплексу заходів з їх переробки і постійний контроль за виконанням таких заходів, є дієвими організаційними способами підвищення рівня ЕБ стану НПС і функціонування урбосистем. Забезпечення законодавчо встановлених показників цих етапів ЖЦ ЕУ з ПДВС – завдання фахівців в області екологічної безпеки.

Забезпечення певного рівня ЕБ компонентів НПС та урбосистем, джерелом

небезпеки в яких є об'єкти техносфери, має базуватися на відповідному методологічному забезпеченні. Для кількісної оцінки ефективності застосування заходів щодо забезпечення ЕБ урбосистем з урахуванням техногенного навантаження на них потрібні відповідні критерії. Також за допомогою таких критеріїв можливим є порівнювати конкуруючі розробки та окремі технічні рішення для однієї розробки.

Таким чином, розробка критеріїв ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, що характеризуються як можна більшою універсальністю і враховують в зв'язку з цим якомога більше чинників ЕНБ, є актуальним завданням, що вирізняється науковою новизною. Необхідність зміни загальних підходів до якісної і кількісної ідентифікації складу ВГ ПДВЗ як джерел екологічної небезпеки, зокрема введенням поняття супертоксикантов, описана і обґрунтована в роботах [6, 11]. Понятійний апарат областей наукового знання «Цивільний захист», «Екологічна та техногенна безпека» розкритий в роботах [59, 60].

2.2 Розробка класифікації критеріальних математичних апаратів для оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

Для якісної та кількісної оцінки ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ та застосування вже існуючих або нових розроблених виконавчих пристроїв її матеріальної основи – ТЗНС, необхідним є застосування відповідного математичного апарату та методики його застосування. У зв'язку з цим актуальним є обґрунтування вибору такого апарату, придатного для виконання такого оцінювання, з відповідною методикою його застосування на основі аналізу існуючих. Аналіз науково-технічної літератури за темою дослідження дозволяє визначити дев’ять вже існуючих різних критеріальних математичних апаратів, які потенційно можуть бути застосовані для комплексного досягнення мети дослідження. На основі результатів цього аналізу запропонована класифікація критеріальних математичних апаратів, подана на рис. 2.1.

Розглянемо математичні апарата критеріїв, поданих на рис. 2.1.

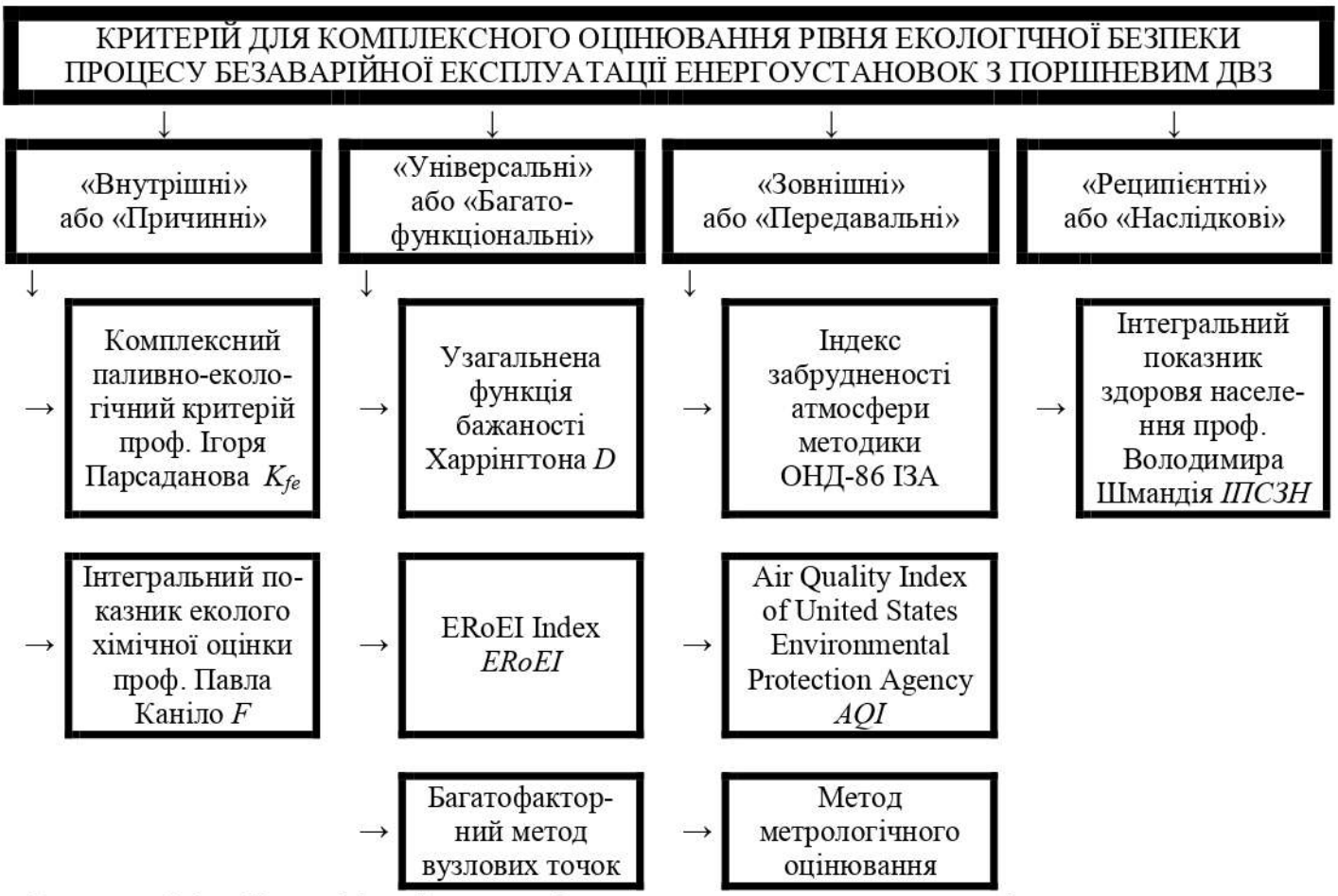


Рисунок 2.1 – Класифікація критеріальних математичних апаратів для комплексного розрахункового оцінювання рівня екологічної безпеки процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ

Комплексний паливно-екологічний критерій проф. Ігоря Парсаданова K_{fe} описується формулою (2.1) та її складові – формулами (2.2)–(2.8), і в решті решт, це зводиться до формули (5.9) [6] (тут і далі по рукопису дисертації позначення складових формул наведено у редакції для публікації у закордонних виданнях).

$$K_{feme} = \eta_{eme} \cdot (1-\beta) = \eta_{eme} \cdot \left(1 - Z_{eme} / \left(Z_{fme} + Z_{eme}\right)\right); \quad (2.1)$$

$$\eta_{eme} = 3600 / \left(H_u \cdot g_{eme}\right); \quad (2.2)$$

$$g_{eme} = \sum_{i=1}^{z} \left(G_{fueli} \cdot WF_i\right) / \sum_{i=1}^{z} \left(N_{ei} \cdot WF_i\right); \quad (2.3)$$

$$Z_{fme} = g_{eme} \cdot P_f; \quad (2.4)$$

$$Z_{eme} = \sum_{i=1}^{z} \left(G_{fueli} \cdot WF_i \cdot U_{ei}\right) / \sum_{i=1}^{z} \left(N_{ei} \cdot WF_i\right); \quad (2.5)$$

$$N_{ei} = M_{кpi} \cdot n_{csi} / 9550; \quad (2.6)$$

$$U_{ei} = \delta \cdot \sigma \cdot f \cdot g_{pri}; \quad (2.7)$$

$$g_{pri} = \sum_{k=1}^{h} \left(A(k) \cdot G(k)_i / G_{fueli} \right);\ k = \{NO_x, PM, C_n H_m, CO\}, \qquad (2.8)$$

$$K_{feme} = \frac{3600}{H_u \cdot \sum_{i=1}^{z} \left(G_{fueli} \cdot \overline{P}_i \right) / \sum_{i=1}^{z} \left(N_{ei} \cdot \overline{P}_i \right)} \times \frac{\sum_{i=1}^{z} \left(G_{fueli} \cdot \overline{P}_i \right)}{\sum_{i=1}^{z} \left(G_{fueli} \cdot \overline{P}_i \right) + \delta \cdot f \cdot \sum_{i=1}^{z} \left[G_{fueli} \cdot \overline{P}_i \cdot \sum_{m=1}^{h} \left(A(k) \cdot G(k)_i \right) / G_{fueli} \right]}, \qquad (2.9)$$

де індексом i позначено i-й режим роботи моделі експлуатації; η_{eme} – середньоексплуатаційне значення ефективного ККД ПДВЗ; g_{eme} – середньоексплуатаційне значення питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ, кг/(кВт·год); H_u – нижча теплота згоряння моторного палива (H_u = 42,7 МДж/кг [6]); N_{ei} – ефективна потужність ПДВЗ, кВт; G_{fi} – масова годинна витрата палива ПДВЗ, кг/год; U_{Ei} – грошова оцінка компенсації екологічної шкоди, \$/кг; G(k)i – масовий годинний викид k-го полютанту з потоком ВГ ПДВЗ, кг/год; $g_{pr.i}$ – приведений питомий ефективний масовий годинний викид полютанту з потоком ВГ ПДВЗ, кг/(кВт·год); $A(k)$ – безрозмірний показник відносної агресивності m-го полютанту як компоненту ВГ ПДВЗ ($A(NO_x)$ = 41,1; A(PM) = 200; $A(C_nH_m)$ = 3,16; A(CO) = 1,0 [6]); h – кількість законодавчо нормованих полютантів у ВГ ПДВЗ; (h = 4 [1–22]); σ – безрозмірний показник відносної небезпеки забруднення для різних територій (для дизельного ПДВЗ АТЗ δ = 1,0, для тракторного дизеля δ = 0,25 [6]); f – безрозмірний коефіцієнт, що враховує характер розсіювання ВГ у атмосфері (для території України f = 1,0 [6]); δ – розмірний коефіцієнт для перетворення бальної оцінки шкоди в грошову (σ = P_f [6]); WF_i – ваговий фактор робочого режиму у моделі експлуатації (відносне напрацювання ПДВЗ на i-му полігоні (режимі) моделі експлуатації); η_e – ефективний ККД ПДВЗ; β – коефіцієнт відносних експлуатаційних екологічних грошових витрат; Z_e, Z_f та Z_{fe} – грошові витрати на компенсацію екологічної шкоди, на спожите моторне паливо та сумарні паливно-екологічні відповідно, \$/(кВт·год); g_e – питома ефективна масова годинна витрата палива дизельним ПДВЗ, кг/(кВт·год); P_f – ціна одиниці маси моторного палива (результати вибору одиниць вартісних еквівалентів складових критерію K_{fe} наведено у дослідженні [5], P_f = 0,871 \$/кг при P_f = 20,0 грн/л, ρ_f = 0,85 кг/м^3 та обмінному курсі станом на грудень 2016 р. 27,0 грн/\$); M_{kpi} – крутний момент ПДВЗ, Н·м; n_{csi} – частота обертання колінчастого валу ПДВЗ, хв$^{-1}$.

Інтегральний показник екологохімічної оцінки проф. Павла Каніла F описується формулою (2.10) у м^3/тест [11].

$$F_j = 10^{-6} \cdot \left\{ \frac{M_{CO}}{[CO]} + \frac{M_{CH}}{[CH]} + a \cdot \frac{M_{NO_x}}{[NO_x]} + b \cdot \frac{M_{Soot}}{[Soot]} \right\} + \left\{ c \cdot \frac{M_{SO_2}}{[SO_2]} + d \cdot \frac{M_{b(a)p}}{[b(a)p]} \right\}, \quad (2.10)$$

де M_j – загальний масовий викид полютанта з потоком ВГ ПДВЗ впродовж періоду випробувань за Європейським їздовим циклом, г/тест; $[j]$ – гранично допустима денна концентрація (ГДК) j-го полютанту у повітрі населених пунктів, мг/м^3; a, b, c, d – коефіцієнти, їх значення приймаються за результатами експериментів.

Індекс забрудненості атмосфери методики ОНД-86 *ІЗА* (або безрозмірна концентрація q) описується формулою (2.11), а її складові – формулою (2.12) [61].

$$q = \sum_{i=1}^{n} c_i / MPC_i; \quad (2.11)$$

$$c = A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta / \left(H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T} \right), \quad (2.12)$$

де індексом i позначено i-й полютант, що викидається у повітря; c – масова концентрація полютанта, мг/м^3; MPC – ГДК полютанта, мг/м^3; A – безрозмірний коефіцієнт, значення якого залежать від температурної стратифікації атмосфери; M – масовий секундний викид полютанта, г/с; F – безрозмірний коефіцієнт, значення якого враховують швидкість осадження полютантів у атмосферному повітрі; m та n – безрозмірні коефіцієнти, значення яких враховують умови виходу газоповітряної суміші з витоку джерела викиду; η – безрозмірний коефіцієнт, значення якого враховують вплив рельєфу місцевості; H – висота джерела викиду над рівнем землі, м; ΔT – різниця між температурою газоповітряної суміші у викиді та температурою повітря НПС, °С; V_1 – обємні секундні витрати газоповітряної суміші, м^3/с.

Air Quality Index of United States Environmental Protection Agency *AQI* описується формулою (2.13) [62].

$$AQI = \left(AQI_{high} - AQI_{low} \right) / \left(C_{high} - C_{low} \right) \cdot \left(C - C_{low} \right) + AQI_{low}, \quad (2.13)$$

де C – кратність перевищення нормативного значення ПДК; C_{high} – межа кратності перевищення нормативного значення ПДК, яка більша чи дорівнює C; C_{low} – межа

кратності перевищення нормативного значення ПДК, яка менша за C; AQI_{high} – значення індекса, що відповідає значенню C_{high}; AQI_{low} – значення індекса, що відповідає значенню C_{low}.

ERoEI Index (Energy Returned on Energy Invested) *ERoEI* описується формулою (2.14), а її складові – формулою (2.15) [63].

$$ERoEI = E_{Consumable} / E_{Expended} = NEG / E_{Expended} + 1; \quad (2.14)$$

$$NEG = E_{Consumable} - E_{Expended}, \quad (2.15)$$

де $E_{Consumable}$ – енергія (робота), вироблена джерелом (ресурсом), що придатна для використання (корисна, ексергія); $E_{Expended}$ – енергія (робота), витрачена для отримання джерела; NEG – чистий виграш у енергії (Net Energy Gain), Дж.

Узагальнена функція бажаності Харрінгтона D описується формулою (2.16), а її складові – формулами (2.17)–(2.18) [64, 65].

$$D = \sum_{i=1}^{n} (D_i \cdot WF_i) / \sum_{i=1}^{n} WF_i ; \quad (2.16)$$

$$D_i = \sqrt[\sum_{k=1}^{n} \upsilon(k)]{\prod_{k=1}^{n} d(k)_i^{\upsilon(k)}} , \quad (2.17)$$

$$d(k)_i = \exp[-\exp(a(k)_i + b(k)_i \cdot r(k)_i)], \; k = \{g(NO_x), g(PM), g(C_nH_m), g(CO), g_e\} \quad (2.18)$$

де індексом k позначено k-й впливаючий фактор; $d(k)$ – часткова функція бажаності; $r(k)$ – значення впливаючого фактора; $a(k)$ та $b(k)$ – постійні коефіцієнти, що співвідносять значення впливаючого фактора з реперними точками шкали бажаності; $\nu(k)$ – показник ступеня, за допомогою якого враховується вагомість фактора.

Інтегральний показник здоров'я населення проф. Володимира Шмандія *ІПСЗН* описується формулою (2.19), а її складові – формулами (2.20)–(2.21) [66].

$$IIPHS = ABA - IBA, \quad (2.19)$$

де ABA – дійсний біологічний вік, років; IBA – незалежний біологічний вік, років.

$$ABA = \gamma + \sum_{i=1}^{5} (\alpha_i \cdot \Pi_i) - \sum_{j=1}^{3} (\beta_j \cdot I_j); \quad (2.20)$$

$$IBA = 0{,}58 \cdot CE + 17{,}24; \quad (2.21)$$

де α, β, γ – емпіричні коефіцієнти; $П_1$ – суб'єктивний показник здоров'я за опитуванням; $П_2$ – систолічний кров'яний тиск, мм. рт. ст.; $П_3$ – діастолічний кров'яний тиск, мм. рт. ст.; $П_4$ – пульсовий кров'яний тиск, мм. рт. ст.; $П_5$ – тривалість затримки дихання після глибокого вдихання, хв; $І_1$ – живий об'єм легень, дм^3; $І_2$ – тривалість затримки дихання після глибокого видихання, хв; $І_3$ – статичне балансування, хв.; *СЕ* – календарний вік, р.

Метод метрологічного оцінювання описується формулами (2.22)–(2.24) [67].

$$\begin{cases} V = (-\infty; V_{me} - \sigma_V) \Rightarrow G = 4; V = [V_{me} - \sigma_V; V_{me}] \Rightarrow G = 3; \\ V = [V_{me}; V_{me} + \sigma_V] \Rightarrow G = 2; V = (V_{me} + \sigma_V; +\infty) \Rightarrow G = 1; \end{cases} \quad (2.22)$$

де V – приведений викид полютанта, т/км^2; V_{me} – математичне очікування величини викиду полютанта, т/км^2; σ_V – стандартне (середньоквадратичне) відхилення величини викиду полютанта, т/км^2; G – номер групи локалізації за рівнем ЕБ (1 – висока; 2 – середня; 3 – низька; 4 – мінімальна).

$$V_{me} = (1/N) \cdot \sum_{i=1}^{N} V_i ; \quad (2.23)$$

$$\sigma_V = \sqrt{1/(N-1) \cdot \sum_{i=1}^{N} (V_i - V_{me})^2} ; \quad (2.24)$$

де N – кількість вимірювань приведеного викиду полютанта; i – номер вимірювання.

Багатофакторний метод вузлових точок [68] дозволяє комплексно оцінити вплив відносних значень впливаючого на рівень ЕБ чинника на значення деяких критеріїв рівня ЕБ за допомогою внутрішньої універсальної шкали з одною реперною (вузловою) точкою. Багатовимірна поверхня, яка відображає такий вплив описується формулою (2.25), а для отримання абсолютних значень критерію можливо за допомогою формули (2.26).

$$g = \prod_{i=1}^{n} \varphi_i(x_i), \quad (2.25)$$

$$G = G_0 \cdot g, \quad (2.26)$$

де g – відносне значення критерію рівня ЕБ; φ – функція, що дозволяє врахувати вплив значення i-го чинника ЕНБ на значення критерію рівня ЕБ; x – значення i-го чинника ЕНБ; G – абсолютне значення критерію рівня ЕБ; G_0 – значення i-го

чинника ЕНБ у вузловій точці.

Як видно з даних, відображених на рис. 2.1, основною класифікаційною ознакою у запропонованій класифікації є тип набору вихідних даних для розрахункової оцінки. Відповідно до запропонованого принципу:

– до числа «внутрішніх» або «причинного» критеріальних апаратів пропонується віднести такі, що оперують режимними та/або середньоексплуатаційними значеннями даних про вміст полютантів у потоці ВГ ПДВЗ, отриманому шляхом розрахунку або експериментально, наприклад, як у дослідженнях [27–30];

– до числа «зовнішніх» або «передавальних» критеріальних апаратів пропонується віднести такі, що оперують даними про вміст полютантів у атмосферному повітрі урбосистеми, отриманих шляхом розрахунку або експериментально;

– до числа «універсальних» або «багатофункціональних» критеріальних апаратів пропонується віднести такі, що однаково успішно оперують з обома типами наборів вихідних даних.

– до числа «реципієнтних» або «результуючих» («наслідкових») критеріальних апаратів які пропонується віднести такі, що оперують з даними про значення відгуки (реакції) об'єктів впливу чинників ЕБ.

До числа переваг «внутрішніх» критеріїв можна віднести можливість індивідуального оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації окремих одиниць техніки. Це особливо актуально для техніки спеціального призначення, парк якої складає невелику частину автопарку населеного пункту або його району, де розташовується пожежна частина, і порівнювати отримані результати зі вимогами стандартів токсичності ВГ ПДВЗ. До числа недоліків «внутрішніх» критеріїв можна віднести складність отримання набору вихідних даних, отримуваних експериментальним шляхом, а саме необхідність наявності випробувального моторного стенду з навантажувальним пристроєм та спеціальним вимірювальним обладнанням.

До числа переваг «зовнішніх» критеріїв, на відміну від «внутрішніх», можна віднести можливість оцінки рівня ЕБ урбаністичної системи в цілому та порівняння отриманих результатів зі значеннями гранично допустимих концентрацій забруднювачів в атмосферному повітрі НПС. Ці критеріальні апарати також використовують як набори вихідних даних з мережі метеорологічних станцій та пунктів спосте-

реження, від дистанційного супутникового сканування поверхні Землі, ГІС-систем й ін. До числа недоліків «зовнішніх» критеріїв можна віднести принципову неможливість оцінювання індивідуального внеску окремих одиниць спеціальної техніки й АТЗ в забруднення НПС.

Спільною перевагою «внутрішніх» та «зовнішніх» критеріїв є вузькоспеціалізована усталена структура їх математичного апарату і добре відпрацьована (а іноді й ГОСТована) методика застосування. Але ця особливість водночас робить їх непридатними для оцінки рівня ЕБ будь-яких інших об'єктів.

«Універсальні» критерії, на відміну від двох попередніх пунктів класифікації, відрізняються саме гнучкістю їх математичних апаратів і варіативності методики застосування. Враховуючи, що для врахування чинників ЕНБ, котрі принципово за фізичною суттю відрізняються від масових годинних викидів полютантів у потоці ВГ ПДВЗ (а саме, шум, вібрація, інформаційне та енергетичне забруднення, викиди рідких полютантів та виділення твердих відходів [1, 3–5]) неможливо обійтися без використання «універсальних» критеріальних апаратів. Але в цьому випадку необхідним є налаштування параметрів математичного апарату та коректування методики його застосування.

«Реципієнтні» або «результуючі» критеріальні апарати характеризуються тими перевагами, що безпосередньо описують кінцевий результат дії проявів чинників ЕНБ на об’єкт впливу, тобто на частини НПС, на захист яких спрямовані заходи, розроблені у відповідній СУЕБ. Таким чином, аналіз такої інформації може дати найбільш об'єктивну картину рівня ЕБ урбосистеми та її компонентів. Але такий підхід характеризується суттєвими недоліками, головними з яких є складність та висока вартість отримання наборів вихідних даних, а також істотні відмінності між типом наборів вихідних даних для різних видів об’єктів впливу чинників ЕНБ (реципієнтів), а також для різних одиниць та особин одних і тих самих реципієнтів.

2.3 Аналіз особливостей роботи відомих підходів до здійснення комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що відомим є декілька підходів та відповідних їм математичних апаратів для здійснення комплексного критеріального оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ. Серед таких математичних апаратів вузькоспеціалізованих критеріїв найбільшого розповсюдження набули такі:

а) комплексний паливно-екологічний критерій проф. І.В. Парсаданова (НТУ «ХПІ») K_{fe};

б) інтегральний індекс еколого-хімічного оцінювання проф. П.М. Каніла (ХНАДУ) F;

в) індекс Air Quality Index Агентства із захисту навколишнього середовища США (US EPA) AQI.

Окремо слід виділити стандартизований підхід згідно до Правил ЄЕК ООН № 49 незалежно від встановленого з ними рівня екологічних вимог EURO.

Крім того, серед математичних апаратів критеріїв з високим ступенем абстрагування чи універсальності, котрі можуть оперувати довільним набором вихідних даних, доцільно розглянути такі відомі підходи:

а) узагальнена функція бажаності Харрінгтона D;

б) індекс ERoEI Index, запропонований проф. Charles A. S. Hall з State University of New York у 1984 р.

Результати аналізу алгоритму застосування вказаних критеріальних апаратів наведено на рис. 2.2–2.5.

З аналізу випливає перелік переваг і недоліків досліджених альтернатив критеріальних апаратів для комплексного оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ взагалі та для випадку ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу зокрема. Порівняння переваг і недоліків зведено до табл. 2.1.

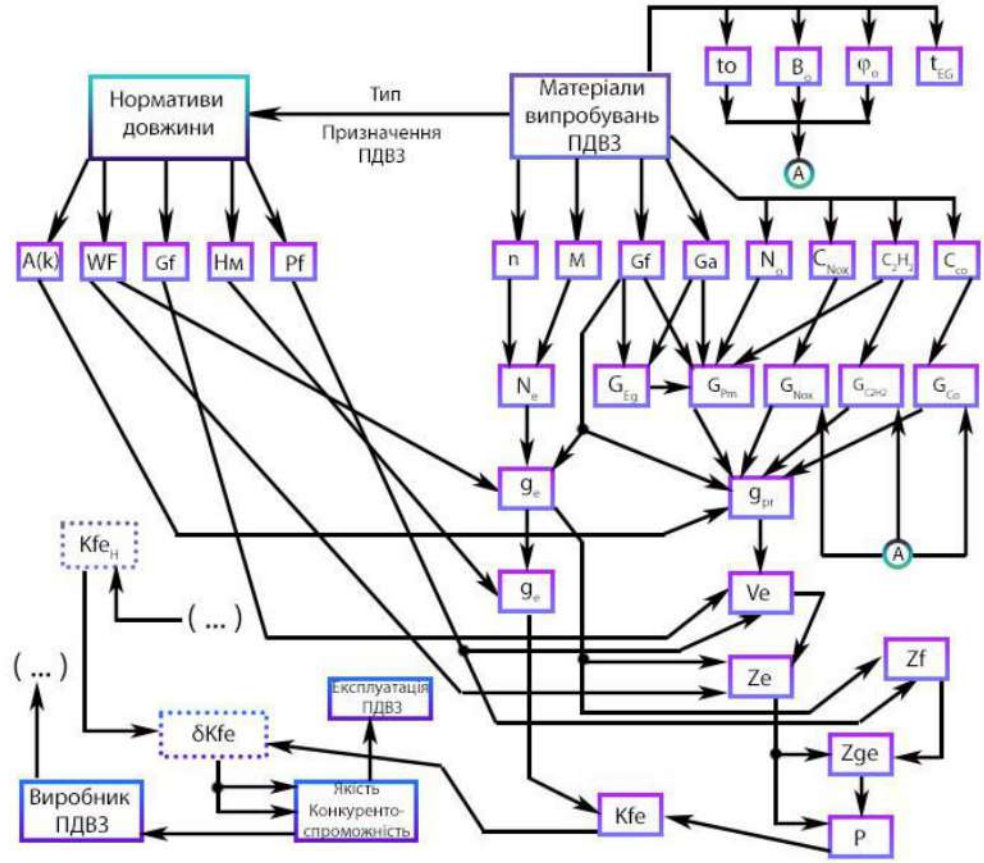


Рисунок 2.2 – Алгоритм комплексного критеріального оцінювання за допомогою комплексного паливно-екологічному критерію проф. І.В. Парсаданова

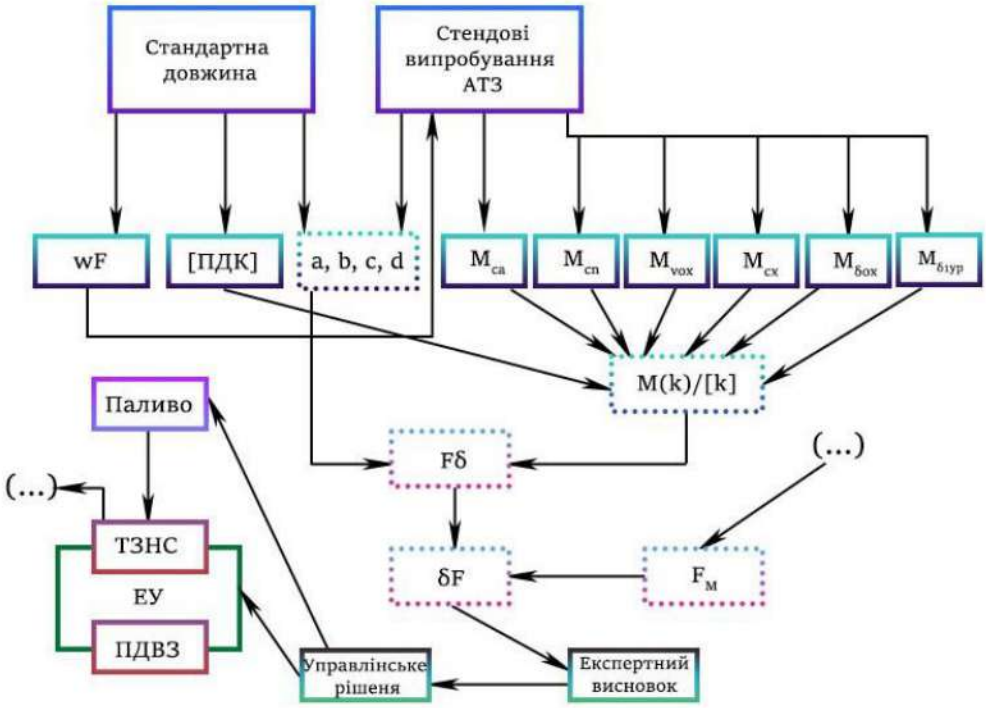


Рисунок 2.3 – Алгоритм комплексного критеріального оцінювання за допомогою інтегрального індексу еколого-хімічного оцінювання проф. П.М. Каніла

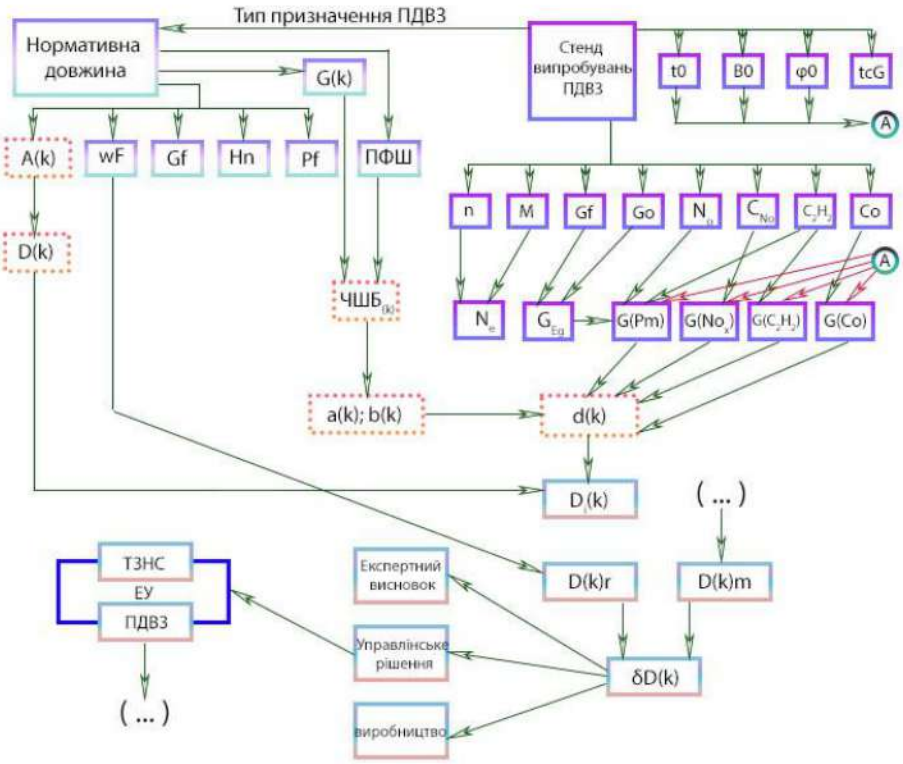


Рисунок 2.4 – Алгоритм комплексного критеріального оцінювання за допомогою узагальненої функції бажаності Харрінгтона зі структурою впливаючих чинників, аналогічній комплексному паливно-екологічному критерію проф. І.В. Парсаданова

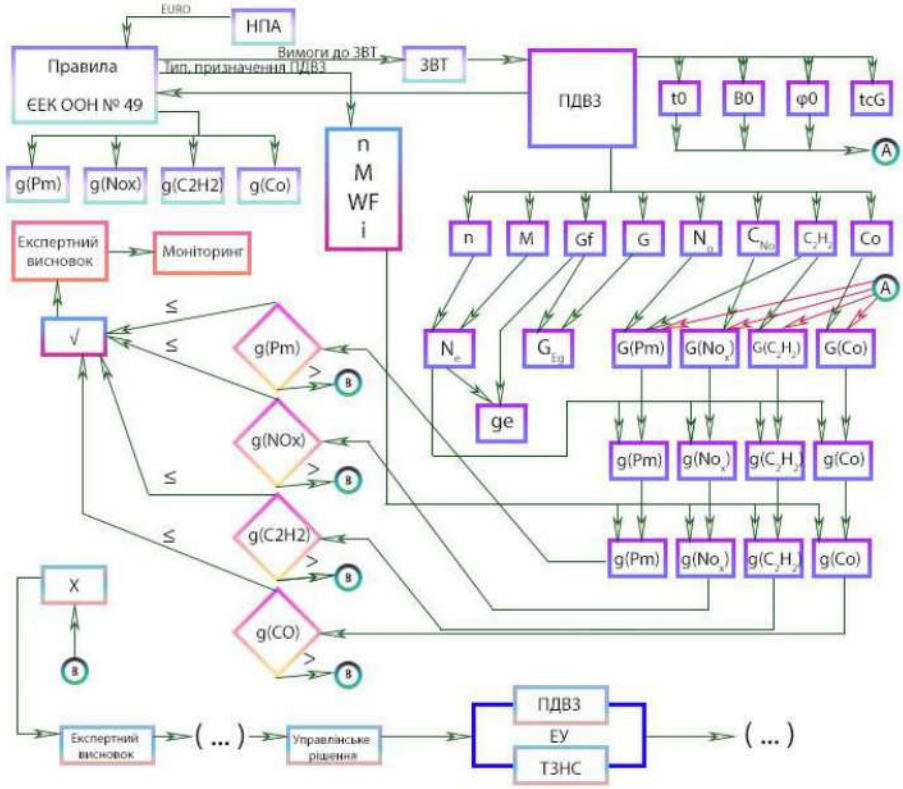


Рисунок 2.5 – Алгоритм комплексного критеріального оцінювання згідно до Правил ЄЕК ООН № 49

Таблиця 2.1 – Порівняння можливостей альтернативних критеріальних апаратів для комплексного оцінювання рівня екологічної безпеки процесу безаварійної експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

Переваги і недоліки критеріального апарату	Критерій K_{fe}	Індекс F	Індекс AQI	Індекс ERoEI	Функція D	Правила ЄЕК ООН № 49
1. Наявність фізичного змісту	+	–	–	+	–	+
2. Врахування повного набору законодавчо нормованих чинників ЕБ	+	–	–	–	+	+
3. Оперування питомими значеннями чинників ЕБ	–	–	–	–	+	+
4. Врахування витрат моторного палива ПДВЗ	+	–	–	–	+	–
5. Врахування умов експлуатації ПДВЗ	+	–	–	–	–	–
6. Врахування особливостей моделі експлуатації ПДВЗ	+	+	–	–	–	+
7. Врахування властивостей і вартості моторного палива і моторної оливи	+	–	–	–	–	–
8. Наявність складових, що мають вартісні еквіваленти, та явища інфляції	+/–	–	–	–	–	–
9. Наявність внутрішньої шкали і реперних точок	+/–	–	+	+/–	+	+
10. Врахування вагомості витрати моторного палива	+	–	–	–	+	–
11. Врахування законодавчо ненормованих чинників ЕБ	–	+	–	+	+	–
12. Можливість надати окрему оцінку екологічній якості роботи ПДВЗ і ТЗНС	–	–	–	–	–	–
13. Врахування пріоритетності екологічних показників роботи ПДВЗ над техніко-економічними	–	–	–	–	–	–
14. Визначеність метрологічних характеристик складових критерію та наданої оцінки	–	–	–	–	–	–
15. Можливість отримати порежимні значення	–	–	+	+	+	–
16. Можливість отримати середньоексплуатаційні значення	+	+	–	–	–	+
17. Врахування вагомості законодавчо ненормованих чинників ЕБ	–	+	–	–	+	–
18. Врахування чинників ЕБ різної фізичної природи	–	–	–	+	+	–
19. Врахування чинників ЕБ, які притаманні джерелу техногенного впливу на атмосферне повітря	+	+	–	+	+	+
20. Врахування чинників ЕБ, які притаманні атмосферному повітрю як передавальному середовищу	–	–	+	+	+	–
21. Врахування чинників ЕБ, які притаманні реципієнту техногенного впливу через атмосферне повітря	–	–	–	+	+	–
22. Врахування нормативно встановлених значень, ГДК тощо	–	+	+	–	+	+
23. Можливість надання комплексної оцінки	+	+	–	–	+	–

Встановлено, що основними недоліками вказаних підходів з оцінки безпечності техногенного впливу ЕУ з ПДВЗ з підвищеним фізичним зносом при їх експлуатації на АП є відсутність розгляду чинників негативної дії на НПС при роботі ПДВЗ, що не враховані у зв'язку з розбіжністю вимог законодавчих екологічних обмежень щодо складу моторного палива і ВГ; неможливість надати окремої оцінки екологічній якості роботи ПДВЗ і ТЗНС у складі ЕУ; неврахування пріоритетності екологічних показників роботи ЕУ на основі ПДВЗ над техніко-економічними на етапі ЖЦ «безаварійна експлуатація».

Схема класифікації критеріальних апаратів для оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ (а) наведена на рис. 2.6.

Традиційний інтегральний (А) та пропонований інтегративний (Б) підходи до здійснення комплексного критеріального оцінювання рівня екобезпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ проілюстровано на рис. 2.7.

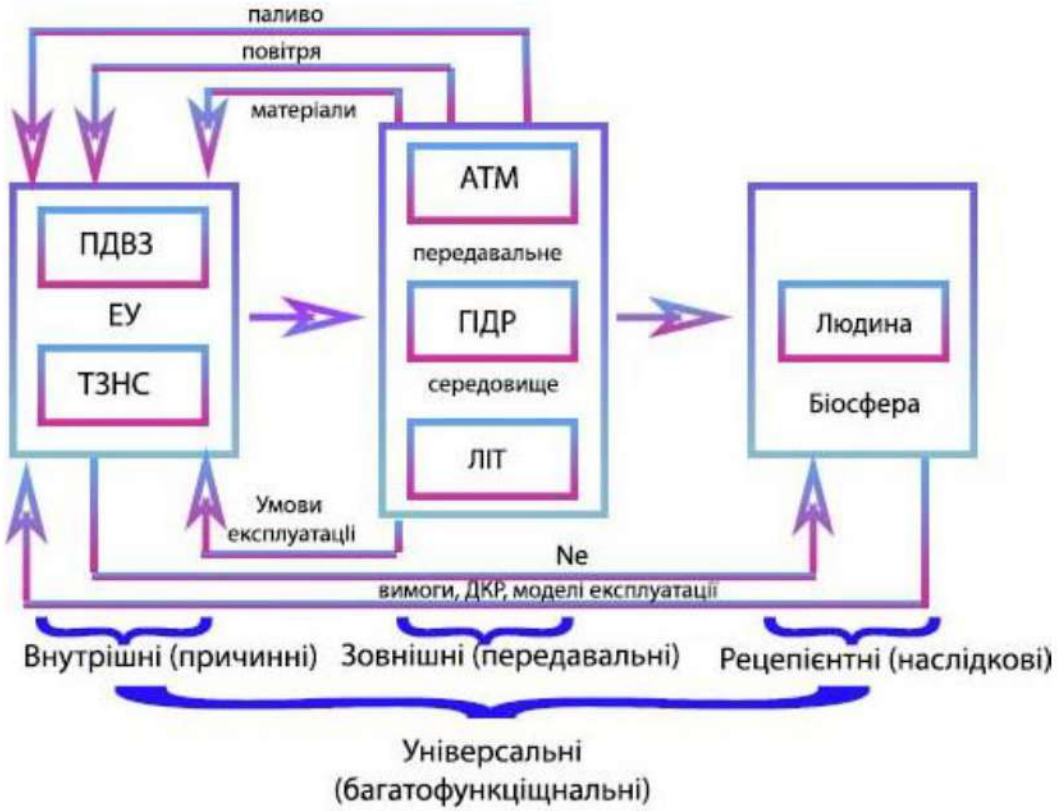


Рисунок 2.6 – Схема класифікації критеріальних апаратів для оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

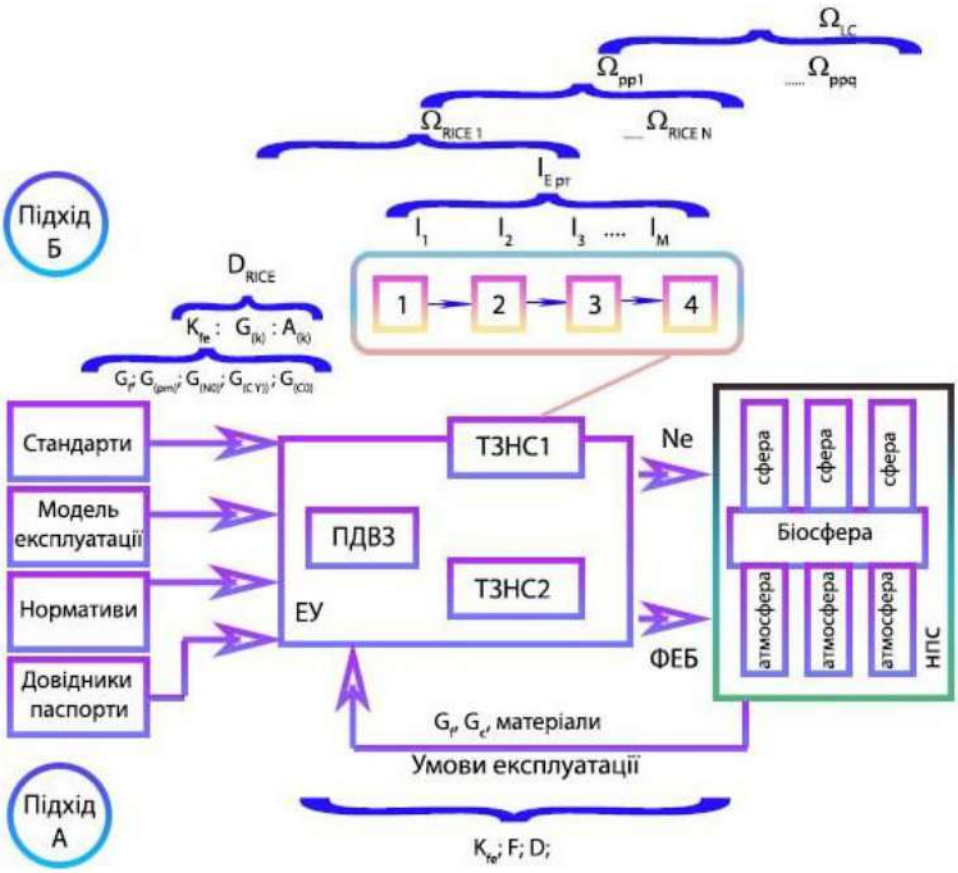


Рисунок 2.7 – Схема застосування традиційного інтегрального (А) та пропонованого інтегративного (Б) підходів до здійснення комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

2.4 Визначення пріоритетності застосування критеріїв

Виходячи з наведеного вище, слід зазначити, що об'єктивно існує пріоритет застосування критеріальних апаратів у порядку зменшення для випадку ЕУ з ПДВЗ, що особливо актуально для випадку техніки й АТЗ спеціального призначення (пожежна, аварійна та рятувальна техніка тощо), як показано на рис. 2.8.

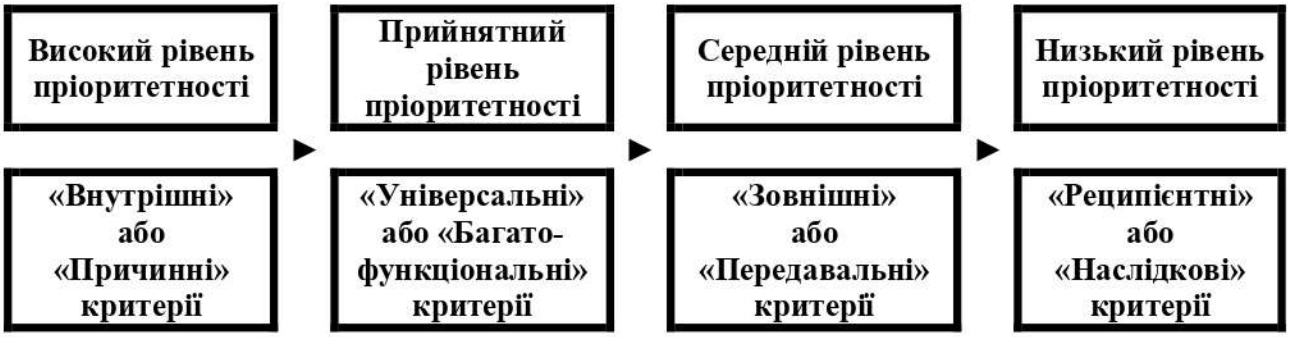


Рисунок 2.8 – Пріоритетність застосування критеріальних математичних апаратів у порядку зниження для випадку ЕУ з ПДВЗ

При цьому перед налаштуванням математичних апаратів «універсальних» критеріїв (як більш перспективних і гнучких) слід оцінити окремі аспекти математичного апарату «внутрішніх» критеріїв (як більш пріоритетних) та коригувати методику її застосування для випадків нових і вже існуючих моделей і одиниць ПДВЗ спеціальної техніки та агрегатів систем нейтралізації полютантів у потоці їх ВГ, як це показано в дослідженнях [2, 3].

У зв'язку з викладеним вище, слід обрати за пріоритетністю застосування між двома «внутрішніми» критеріальними апаратами, відображеними на рис. 2.1, а саме комплексним паливно-екологічними критерієм проф. Ігоря Парсаданова K_{fe} та інтегральним показником екологохімічної оцінки проф. Павла Каніла F, а їх переваги можна об'єднати і взаємно посилити за допомогою використання математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона D.

Результати аналізу їхніх математичних апаратів дає можливість рекомандувати використання критерію K_{fe} як такого, який, на відміну від критерію F, працює з набором вихідних даних, що містить виключно показники токсичності ВГ ПДВЗ (тобто чинники ЕНБ процесу експлуатації ПДВЗ), вимоги до яких законодавчо нормовані на території України (Правила ЄЕК ООН № 49 та № 96 [21, 22]), при цьому їх перелік є повним набором. Крім того, з двох порівнюваних критеріальних апаратів тільки критерій K_{fe} має фізичний зміст, а саме середньоексплуатаційне значення ефективного ККД ПДВЗ з урахуванням грошових витрат для компенсації екологічної шкоди від забруднення НПС нормативними забруднюючими речовинами в потоці ВГ. Для випадку ПДВЗ з ідеальними екологічними показниками, тобто з нульовим викидом полютантів, величина критерію K_{fe} дорівнює середньоексплуатаційному значенню ефективного ККД ПДВЗ η_{ete}.

У зв'язку з цим можна стверджувати, що математичний апарат критерію K_{fe} містить внутрішню шкалу і співставляє отримані результати розрахункового оцінювання з реперними точками цієї шкали автоматично, що вигідно вирізняє цей критерій з числа інших «внутрішніх». Крім того, ця шкала містить лише одну реперну точка, а саме величину коефіцієнта η_{ete}, яка не пов'язана із законодавчо нормованими параметрами, при цьому значення цієї величини у реперній точці є різними для

різних типів та моделей ПДВЗ, хоча і наближаються до об'єктивно зумовленої межі. З числа «універсальних» критеріальних апаратів таким атрибутом характеризується узагальнена функція бажаності Харрінгтона D, але його внутрішня шкала набагато гнучкіша і може містити будь-які дві реперні точки для будь-якого врахованого впливаючого фактора.

Важливим є той факт, що лише математичний апарат критерію K_{fe} ураховує споживання палива ПДВЗ як у формі середньоексплуатаційного значення питомої ефективної масової годинної витрати палива g_{eme}, так і у формі порежимних значень масової годинної витрати палива G_{fuel} як міри порежимних значень масових годинних викидів законодавчо нормованих полютантів. Але було виявлено, що рекомендований вище критерійний апарат позбавлений таких важливих можливостей: а) врахування законодавчо встановлених норм або інших особливих значень впливаючих факторів; б) отримання порежимних значень (дає лише середньоексплуатаційні значення); в) врахування більш широкого спектру чинників ЕНБ.

2.5 Покоління критеріїв для комплексного оцінювання показників рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

З аналізу наведеного вище у цьому розділі рукопису випливає, що у питанні комплексного оцінювання показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ історично можливо виділити три ступеня наближення, описані у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Наближення комплексного оцінювання показників рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

Покоління критерію	**I (перше)**	**II (друге)**	**III (третє)**
Номенклатура чиників	1. Викиди, питомі викиди. 2. ПДК, нормативи.	1. Викиди, питомі викид. 2. ПДК, нормативи. 3. Витрата палива.	1. Викиди, питомі викиди. 2. ПДК, нормативи. 3. Витрата палива. 4. Інші.
Тип чинників	Законодавчо нормовані прямо	Законодавчо нормовані прямо і опосередковано	Законодавчо нормовані прямо і опосередковано та ненормовані
Спосіб врахування	Нарізно	Комплексно	Комплексно
Період	серед. 80-х рр. – кін. 90-х рр. XX ст	кін. 90-х рр. XX ст. – серед. 10-х рр. XXI ст.	серед. 10-х рр. XXI ст. – тепер. час

2.6 Концепція вдосконалення математичного апарату і методики застосування комплексного паливно-екологічного критерію

Основними перевагами математичного апарату і методики застосування комплексного паливно-екологічного критерію є такі: а) врахування значень повного набору законодавчо встановлених показників токсичності ВГ ПДВЗ – питомі масові годинні викиди з потоком ВГ незгорілих вуглеводнів моторного палива і мастила C_nH_m $g(C_nH_m)$, оксидів азоту NO_x $g(NO_x)$, монооксиду вуглецю CO g(CO) та твердих частинок g(PM) у г/(кВт·год); б) врахування значень питомих ефективних масових годинних витрат палива ПДВЗ g_e у г/(кВт·год), які чинить суттєвий вплив на усі показники ЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ; в) наявність фізичного змісту – середньоексплатаційний ефективний ККД ПДВЗ η_{ete} з урахуванням грошових витрат на компенсацію екологічної шкоди НПС, джерелом якої є ПДВЗ; г) врахування особливості моделі експлуатації ЕУ з ПДВЗ; д) врахування питомих значень чинників ЕНБ; е) наявність складових з виразом у вартісних еквівалентах.

Альтернативою такому критеріальному апарату може виступити математичний апарат узагальненої функції бажаності Харрінгтона, що має такі переваги: а) наявність внутрішньої психо-фізичної шкали з двома довільно призначеними реперними точками; б) однаково успішне оперування усіма типами наборів вихідних даних, що характеризують відповідно джерело екологічної небезпеки, НПС та реципієнта; в) можливість врахування особливостей моделі експлуатації, значень витрат палива двигуном та законодавчо встановлених нормативів токсичності ВГ; г) можливість оперування довільним набором питомих значень чинників ЕНБ.

Пропонований підхід базується на аналізі математичного апарату і методики застосування комплексного паливно-екологічного критерію передбачає здійснити означене вдосконалення за такими напрямками і визначення значень відповідних складових методичної похибки: а) вибір раціональних одиниць для вираження вартісних еквівалентів складових критерію; б) вибір раціонального складу набору вихідних даних при незмінній їх кількості; в) вибір раціонального складу набору вихідних даних при розширенні їх кількості до врахування нових чинників ЕНБ; г) вибір раціональної формули перерахунку для отримання значень масового викиду ТЧ в потоці ВГ з числа відомих; д) вибір раціонального типу внутрішньої шкали крите-

рію та її реперних точок, що враховує нормативно встановлені вимоги до значень його складових; е) вибір раціональних критеріїв вагомості окремих складових набору однотипних і різнотипних вихідних даних (врахованих чинників ЕНБ); ж) вибір раціонального закону розподілу точності вихідних даних, отриманих за обраною формулою перерахунку для отримання значень масового викиду ТЧ в потоці ВГ з урахуванням точності доступних засобів вимірювальної техніки і кількості повторних вимірювань в ході стендових моторних досліджень; к) вибір раціональних одиниць вимірювання складових критерію – ppm чи % для об'ємних концентрацій газоподібних полютантів; %, 1/м чи одиниці шкали Bosch для димності; л) вибір раціонального значення рівнів варіювання координат поля робочих режимів ПДВЗ (щільності розрахункової сітки) в ході отримання набору вихідних даних стендових моторних досліджень стендових моторних досліджень; м) розробка і вибір раціональних способів отримання порежимних значень критерію та його складових; н) розробка і вибір раціональних способів отримання середньоексплуатаційних значень критерію та його складових за наявності закону розподілу значень критерію на всьому полі робочих режимів ПДВЗ; п) розробка раціональної моделі експлуатації ПДВЗ для ЕУ особливого призначення (наприклад одиниць пожежної та аварійно-рятувальної техніки, військової техніки тощо); р) розробка методики оцінювання методичної точності формул перерахунку показників токсичності й димності ВГ у показники масового годинного викиду ТЧ в потоці ВГ дизельного ПДВЗ.

2.7 Вдосконалення базового варіанту комплексного паливно-екологічного критерію

Питання критеріального оцінювання показників рівня ЕБ різних об'єктів в процесі їх функціонування і окремих робочих процесів в їх агрегатах і системах актуальні й знаходять досить широке висвітлення в публікаціях [69–98]. Монографія [6] цілком присвячена питанням комплексного критеріального паливно-екологічного оцінювання процесу експлуатації дизельних ПДВЗ різного призначення при роботі на різних видах палива. Результати робіт [69–86] щодо критеріального оцінювання рівня ЕБ різних об'єктів та робіт [69–97] щодо оцінювання різних ЕУ закордонних дослідників непридатні для досягнення мети цього дослідження.

Більшість з описаних критеріальних апаратів (окрім робіт [87–92, 97]) оперують наборами вихідних даних, що містять інформацію про концентрації полютантів в повітрі НПС урбосистеми, отриману розрахунком, моделюванням або від мережі метеорологічних станцій та дистанційного супутникового сканування земної поверхні у поєднанні з ГІС-технологіями, а не від моторних стендових випробувань ПДВЗ. Іншою причиною є відсутність серед набору вихідних даних для оцінювання інформації про витрату палива ПДВЗ (крім робіт [93, 97]) та неврахування особливостей моделі експлуатації ПДВЗ (крім робіт [88, 96]). Третьою причиною виступає відсутність можливості виділити процес безаварійної експлуатації ЕУ на тлі тривалості її життєвого циклу (всі роботи [69–97]). Четвертою причиною є відсутність можливості комплексного врахування повного набору таких чинників ЕНБ [3] для ЕУ з ПДВЗ, як енергетичне забруднення НПС (теплота, шум, вібрації), інформаційне забруднення НПС, забруднення НПС викидами рідких полютантів (моторне паливо і масло, інші технічні рідини) і твердими відходами (деталі, що вичерпали свій ресурс) (всі роботи [69–97]). Очевидно, що повне усунення вищеописаних принципових проблем можливо тільки шляхом створення нового критеріального апарату. При цьому найближче до задоволення вищеописаних вимог з відомих побудований математичний апарат комплексного паливно-екологічного критерію проф. Ігоря Парсаданова, описаний в монографії [6]. Реалізації окремих пунктів концепції вдосконалення такого апарату присвячене дане дослідження.

2.7.1 Отримання порежимних значень комплексного паливно-екологічного критерію

Аналіз формул (2.1) – (2.9) показує наступне. За ними можливим є розрахункове отримання всього одного значення основних складових критерію K_{fe}, а саме витрат Z_f, Z_e і коефіцієнта β, так само як і власне значення самого критерію, для конкретної моделі експлуатації ПДВЗ, що містить 8 – 30 полігонів (індивідуальних представницьких режимів роботи ПДВЗ). Таке значення називається середньоексплуатаційним. При цьому для його розрахунку використовуються значення впливових чинників – питомих ефективних масових часових витрат палива і викидів законодав-

чо нормованих полютантів, для кожного індивідуального представницького режиму роботи ПДВЗ. Такі значення називають порежимними. Це випливає з наявності операції підсумовування по всіх режимів в формулах (2.3), (2.5) і (2.9), а також вмісту таблиць в додатках монографії автора критерію проф. Ігоря Парсаданова [6]. Це означає, що порівняння різних типів ПДВЗ, однотипних ПДВЗ різних торгових марок, модернізованих і не модернізованих ПДВЗ однієї і тієї ж моделі і т.д. можливо тільки в термінах середньоексплуатаційних значень критерію K_{fe} і його складових.

У монографії [6] значення критерію K_{fe} і його складових отримані для різних моделей експлуатації для дизелів різного призначення і працюють на різному паливі (солярова олива, стиснений природний газ, водопаливна емульсія, рапсовометиловий ефір), що характеризують ці моделі експлуатації в цілому (середньоексплуатаційне значення), а не окремі їх режими (порежимні значення). Це обумовлено тим, що у всіх моделях експлуатації присутні «проблемні» режими нульової (холостого ходу) і малої ефективної потужності. Для режимів холостого ходу, згідно до класичних уявлень дисципліни «Теорія ПДВЗ», вважається, що $N_e \to 0$ кВт і тому $\eta_e \to 0$, $g_e \to \infty$ кг/(кВт·год), тоді Z_e, Z_f і $Z_{fe} \to \infty$ \$/(кВт·год), $\beta \to 1{,}0$ і $K_{fe} \to 0$ (див. формули (2.1) – (2.9)). Для режимів малої ефективної потужності значення критерію K_{fe} і його складових неінформативні.

Однак чималий науковий і практичний інтерес викликає порівняння між собою і порежимних значень критерію K_{fe}, і його складових, що дозволить виявити закономірності та особливості оцінюваного рівня паливно-екологічного досконалості оцінюваних ПДВЗ при роботі їх по окремим режимам моделей експлуатації. Тоді можна виділити чотири основні способи модифікації математичного апарату критерію K_{fe} і методики його застосування для переходу від середньоексплуатаційних до порежимних значень критерію і його складових, які відображені на рис. 2.9.

Способи переходу від середньоексплуатаційних до порежимних значень критерію K_{fe} і його складових можна описати таким чином.

Спосіб № 1 «Ненульового холостого ходу». Передбачає перехід від визначення поняття «холостий хід» з використанням понятійного апарату дисципліни «Теорія ПДВЗ» до використанням понятійного апарату дисципліни «Експлуатація ЕУ» і

надання в зв'язку з цим ненульових значень крутному моменту, а значить і ефективної потужності, режимам холостого ходу моделі експлуатації ПДВЗ.



Рисунок 2.9 – Способи переходу від середньоексплуатаційних до порежимних значень критерію K_{fe} і його складових [3]

Спосіб № 2 «Індикаторних складових». Передбачає використання питомих індикаторних значень всіх складових критерію.

Спосіб № 3 «Комбінований». Передбачає використання порежимних значень приведених питомих ефективних масових часових викидів законодавчо нормованих полютантів і середньоексплуатаційних значень ефективного ККД і питомої ефективної масової годинної витрати палива.

Спосіб № 4 «Виключеного холостого ходу». Передбачає присвоєння режимам холостого ходу нульових або негативних значень паливно-екологічної ефективності й неврахування режимів холостого ходу при підрахунку середньоексплуатаційного значення критерію. Спосіб № 4 в подальшому дослідженні застосовується не буде через невідповідність меті й задачам критериального оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ взагалі, і даного дослідження зокрема.

Для реалізації способу № 2 потрібно інформація щодо порежимних значень індикаторного ККД η_i та індикаторної потужності N_i ПДВЗ. Дане розрахункове дослідження, як і дослідження [1–5], виконано на прикладі автотракторного дизеля 2Ч10,5/12, а в якості моделі експлуатації використано 13-режимний стандартизований стаціонарний випробувальний цикл, то така інформація наведена у джерелі [5].

Для реалізації способу № 1 необхідно задатися значенням ефективної потужності N_e на режимах холостого ходу (при частоті обертання колінчастого вала $n_{кв}$ = = 800–1800 хв$^{-1}$), зокрема для 13-режимного циклу – режиму мінімального холостого ходу. Приймаємо значення, рівне 0,5 % від паспортного максимального значен-

ня крутного моменту $M_{кр}$ по ЗШХ ($M_{кр\max}$ = 110 Н·м при частоті обертання КВ $n_{кв}$ = = 1200 хв$^{-1}$), що для частоти обертання колінчастого вала дизеля 2Ч10,5/12 на режимі мінімального холостого ходу $n_{кв}$ = 800 хв$^{-1}$ приймає значення 0,56 Н·м, а N_e при цьому складе 47 Вт.

Ця ефективна потужність при роботі ПДВЗ в складі ЕУ, зокрема одиниці пожежної або аварійно-рятувальної техніки, витрачається на забезпечення дозарядки електричного акумулятора, дозаправки газового балона пневмопривода системи відкриття дверей, створення надлишкового тиску в акумуляторі гідравлічного сервоприводу системи підсилювача рульового управління, створення розрядження у вакуумних системах сервоприводу гальмівної системи, забезпечення роботи систем освітлення, запалювання, електронного автоматичного управління, GPS-навігації, радіо- і стільникового зв'язку з диспетчером, кондиціонування, системи запобігання викраденню, мультимедійної системи, приладової панелі, роботи склоочисників й склопідйомників тощо. Тобто, для забезпечення енергією і підтримки робочих параметрів агрегатів систем, безпосередньо не беруть участь у виконанні основних функцій одиниці такої техніки (тобто обслуговуючих), наприклад приводу насоса подачі вогнегасної рідини, гідравлічної пожежної драбини, автокрана, кузова самоскида і т.д., і не приводять у рух саму ЕУ.

Характер розподілу по режимам обраної моделі експлуатації ПДВЗ порежимних значень критерію K_{fe} для усіх запропонованих способів отримано, проаналізовано і проілюстровано у [3], він має принципово відмінний характер.

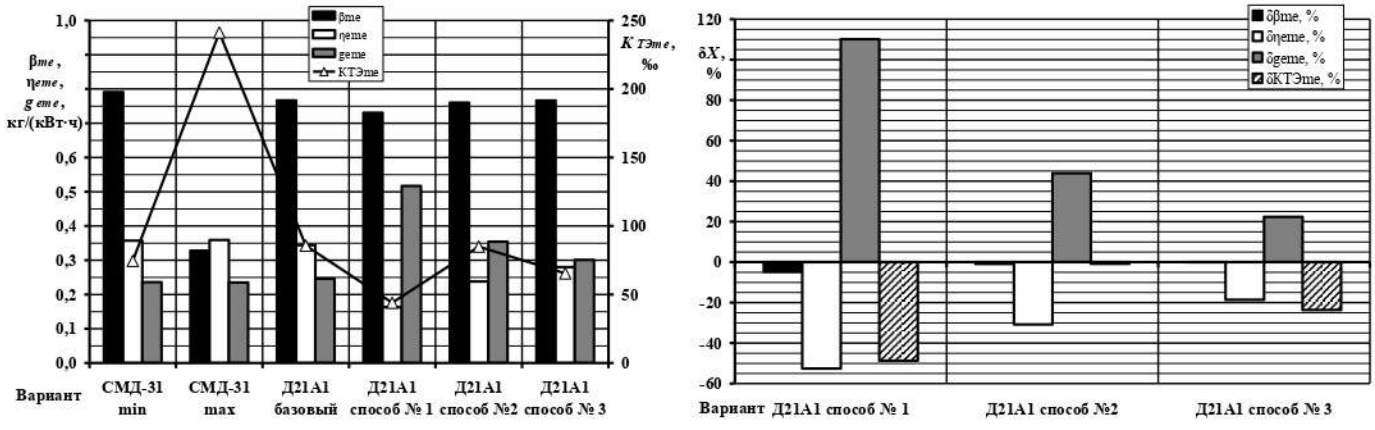
Безпосереднє порівняння результатів застосування всіх трьох досліджуваних способів отримання порежимних значень критерію K_{fe} і його складових між собою і, найголовніше, з базовим варіантом – дизелем СМД-31, що працює на дизельному паливі для моделей експлуатації, що характеризуються мінімальними і максимальними значеннями критерію K_{fe} – це 28-режимний (дизель вантажного автомобіля) та 27-режимний (комбайновий дизель) стаціонарні випробувальні цикли відповідно, (див. [6]), можливо тільки за середньоексплуатаційними значеннями оскільки базовий варіант не забезпечує можливість отримання порежимних значень.

Величина критерію K_{fe} суттєво залежить від виду моделі експлуатації. Так, для

дизеля СМД-31, що працює як по 28, так і по 27-режимному циклу, відрізняються один від одного в три рази. Для дизеля Д21А1 величина критерію K_{fe}, оцінена за базовим варіантом методики з [6], знаходиться в межах максимального і мінімального значень для дизеля СМД-31. Відмінності значень критерію K_{fe} для способів отримання їх порежимних значень №№ 1 – 3 від значення для базового варіанту приймають значення –48,7, –0,85 (з урахуванням середньоексплуатаційного значення механічного ККД цього дизеля) і –23,7 % відповідно, тобто всі три способи дають занижену оцінку величини критерію K_{fe}.

Таким чином, з аналізу вищенаведених міркувань випливає, що розрахункове оцінювання рівня паливно-екологічної ефективності процесу експлуатації дизеля 2Ч10,5/12 по 13-режимному стаціонарному стандартизованому випробувальному циклу за базовою методикою, описаною в [6], виконано вірно, на що прямо вказують результати порівняння середньоексплуатаційних значень критерію K_{fe} для досліджуваного дизеля і дизеля СМД-31.

Також стає зрозумілим, що всі три досліджувані способи отримання порежимних значень критерію K_{fe} і його складових спотворюють еталонні значення, отримані за базовою методикою. Результати порівняльного розрахункового дослідження такого спотворення відображені на рис. 2.10.



а б

Рисунок 2.10 – Результати розрахункового порівняльного дослідження середньоексплуатаційних абсолютних (а) та відносних (б) значень величин K_{feme}, β_{me}, η_{eme}, g_{eme} для дизеля СМД-31 та дизеля Д21А1 для базового варіанту і всіх способів отримання їх порежимних значень [3]

Недоліками способу № 2 є необхідність мати інформацію про значення механічного ККД ПДВЗ на всіх режимах роботи моделі його експлуатації, що не завжди є доступним, а для деяких моделей ПДВЗ є комерційною та/або військовою таємницею. Отримані на рис. 2.10 дані можна вважати результатами оцінюванню методичної похибки досліджуваних способів в порівнянні з базовим варіантом.

За результатами проведеного дослідження слід зробити висновок, що однозначно рекомендувати до застосування будь-якої з досліджуваних способів отримання порежимних значень критерію K_{fe} і його складових й одночасно відкинути інші неможливо. Такий висновок підтверджується вищенаведеними напрямами подальших досліджень. Кожен із способів має певні переваги і суттєві недоліки. Однак, можливо ранжувати ці способи по величині методологічної похибки. Тоді найбільшою пріоритетністю характеризується спосіб № 2 «Індикаторні складових», за ним слідує спосіб № 3 «Виключеного холостого ходу», а найменшою пріоритетністю характеризується спосіб № 1 «Ненульового холостого ходу». При їх використанні слід враховувати величину методологічної похибки, отриману в даному дослідженні.

2.7.2 Отримання середньоексплуатаційних значень комплексного паливно-екологічного критерію

У дослідженні [3] наведено результати вирішення проблеми вибору раціонального способу отримання порежимних значень комплексного паливно-екологічного критерію (як і будь-якого іншого критерію, придатного для комплексного оцінювання рівня ЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ – див. класифікацію таких апаратів у тому ж джерелі). Логічним продовженням такого підходу було отримання результатів апроксимації порежимних значень критерію для усього поля робочих режимів ПДВЗ, що відображені у [3]. Наступним кроком такого алгоритму є отримання середньоексплуатаційних значень критерію та його складових для обраної моделі експлуатації чи стаціонарного випробувального циклу ПДВЗ з використанням параметрів самої моделі – кількості, номенклатури та послідовності реалізації стаціонарних режимів роботи ПДВЗ (кожен з яких характеризується сукупністю значень координат поля робочих режимів ПДВЗ – $n_{кв}$ у об/хв, хв$^{-1}$

чи rpm та $M_{кр}$ у Н·м), а також значенням їх вагового фактора *WF*. Однак, як показано у [3], оригінальна формула для отримання середньоексплуатаційних значень цього критерію, отримана з [6], дає значення, відмінні від значень, що дає формула для отримання середнього арифметичного зваженого чи питомого зваженого середнього арифметичного значення (запропоновані як заміна оригінальної у [3]), причому значення такої різниці (яка являє собою частину методичної складової результуючої систематичної похибки отримання таких значень критерію K_{fe}) є різним для різних моделей експлуатації. У зв'язку з вищенаведеним, постають таке питання: якою формулою можна замінити (апроксимувати) оригінальну формулу критерію K_{fe} для отримання його середньоексплуатаційних значень при наявності даних щодо розподілу порежимних значень критерію K_{fe} по всьому полю робочих режимів ПДВЗ та параметрів довільної стаціонарної моделі експлуатації, з мінімальною відповідною складовою результуючої систематичної похибки.

Зі спеціалізованої літератури [99, 100] відомо декілька різновидів середнього значення фізичної величини чи вибірки числових даних. Середнє геометричне x_{mg} визначається формулою (2.27), зважене середнє геометричне x_{mgw} – формулою (2.28), середнє арифметичне x_{ma} – формулою (2.29), зважене середнє арифметичне x_{maw} – формулою (2.30), середнє квадратичне x_{mq} – формулою (2.31), зважене середнє квадратичне x_{mqw} – формулою (2.32), середнє кубічне x_{mc} – формулою (2.33), зважене середнє кубічне x_{mcw} – формулою (2.34), середнє гармонічне x_{mh} – формулою (2.35), зважене середнє гармонічне x_{mhw} – формулою (2.36), середнє логарифмічне електротехнічне x_{mlg} і x_{mln} – формулою (2.37), середнє логарифмічне теплотехнічне x_{maln} – формулою (2.38). При використанні математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона *D* для отримання середньоексплатаційних її значень використовується сума зважених значень $x_{\Sigma w}$ – формула (2.39), що є особливим випадком формули (2.40) при сумі вагових факторів, рівній одиниці (вони нормовані по одиниці). Подекуди використовується питоме зважене середнє арифметичне x_{maw}, описане формулою (2.41). Середнє гармонічне, геометричне, арифметичне, квадратичне та кубічне, як звичайні, так і зважені, є окремими випадками середнього ступеневого x_{mm} і x_{mmw} – див. формули (2.42) і (2.43) – відповідно

для ступенів $m = -1; 0; 1; 2$ і 3.

Результати застосування формул (2.27) – (2.43) слід порівняти з результатами застосування формули (2.9) – власне оригінальною формулою.

$$x_{mg}(x_1, x_2, ..., x_n) = (x_{\max} + x_{\min})/2, [x]; \tag{2.27}$$

$$x_{mgw}(x_1, x_2, ..., x_n) = \exp\left(\sum_{i=1}^{n}(w_i \cdot \ln x_i)/\sum_{i=1}^{n} w_i\right), [x]; \tag{2.28}$$

$$x_{ma}(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{i=1}^{n} x_i / n, [x]; \tag{2.29}$$

$$x_{maw}(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{i=1}^{n}(w_i \cdot x_i)/\sum_{i=1}^{n}(w_i), [x]; \tag{2.30}$$

$$x_{mq}(x_1, x_2, ..., x_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 / n}, [x]; \tag{2.31}$$

$$x_{mqw}(x_1, x_2, ..., x_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(w_i \cdot x_i^2)/\sum_{i=1}^{n}(w_i)}, [x]; \tag{2.32}$$

$$x_{mc}(x_1, x_2, ..., x_n) = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{n} x_i^3 / n}, [x]; \tag{2.33}$$

$$x_{mqcw}(x_1, x_2, ..., x_n) = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{n}(w_i \cdot x_i^3)/\sum_{i=1}^{n}(w_i)}, [x]; \tag{2.34}$$

$$x_{mh}(x_1, x_2, ..., x_n) = n/\sum_{i=1}^{n}(1/x_i), [x]; \tag{2.35}$$

$$x_{mhw}(x_1, x_2, ..., x_n; w_1, w_2, ..., w_n) = 1/\sum_{i=1}^{n}(w_i / x_i), [x]; \tag{2.36}$$

$$\log_a x_m(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{i=1}^{n}(\log_a x_i)/\sum_{i=1}^{n}(x_i) =$$

$$\begin{cases} a = 10 \Rightarrow \lg x_m = \sum_{i=1}^{n}(\lg x_i)/\sum_{i=1}^{n}(x_i) \\ a = e \Rightarrow \ln x_m = \sum_{i=1}^{n}(\ln x_i)/\sum_{i=1}^{n}(x_i) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_{m\lg} = 10^{\sum_{i=1}^{n}(\lg x_i)/\sum_{i=1}^{n}(x_i)}, [x]; \\ x_{m\ln} = e^{\sum_{i=1}^{n}(\ln x_i)/\sum_{i=1}^{n}(x_i)} \end{cases} \tag{2.37}$$

$$x_{ma\ln}(x_1, x_2, ..., x_n) = (x_{\max} - x_{\min})/\ln(x_{\max}/x_{\min}), [x]; \tag{2.38}$$

$$x_{\Sigma w} = \sum_{i=1}^{n}(x_i \cdot w_i), [x]; \tag{2.39}$$

$$x_{maw}(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{i=1}^{n}(w_i \cdot x_i)/\left(n \cdot \sum_{i=1}^{n}(w_i)\right), [x]; \tag{2.40}$$

$$x_{mm}(x_1, x_2, ..., x_n) = \sqrt[m]{\sum_{i=1}^{n} x_i^m / n}, [x]; \tag{2.41}$$

$$x_{mmw}(x_1, x_2, ..., x_n) = \sqrt[m]{\sum_{i=1}^{n}(w_i \cdot x_i^m)/\sum_{i=1}^{n}(w_i)}, [x]; \tag{2.42}$$

Питання, поставлене у даному розділі рукопису дисертації буде вирішено

шляхом розрахункового визначення значення ступеня m середнього зваженого ступеневого, за якого відносна різниця значень, отриманих за формулою (2.42), та отриманих за формулою (2.9), буде мінімальною для якомога більшої кількості стаціонарних моделей експлуатації, бажано – усіх.

Дані про найуживаніші моделі експлуатації ПДВЗ з числа відомих наведено у [6]. Концепція моделі експлуатації одиниць пожежних автомобілів розроблена у дослідженні [5], а вихідні дані для побудови моделі у роботах [5, 29, 30] експлуатації побутового та промислового дизель-генератора містяться у роботі [101] і використані у роботі [102]. Взагалі моделей експлуатації ПДВЗ відомо близько 30, у дослідженнях [3–5] більшість з них досліджена у дисертації. Сформовано перелік варіантів розрахункового дослідження, що міститься у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Варіанти розрахункового дослідження

Познач.	**Назва**	**Клк. реж.**	**Джерело параметрів**	**Джерело вихідних даних**
A	13-реж. стаціонарний стандартизований випробувальний цикл	13	[21]	[3]
B	8-реж. стаціонарний стандартизований випробувальний цикл	8	[22]	[3]
C	Колісний трактор	19	[6]	[3]
D	Гусеничний трактор	19	[6]	*
E	Вантажний АТЗ у місті	28	[6]	[3]
F	Вантажний АТЗ на заміському шосе	28	[6]	[3]
G	Вантажний АТЗ у місті та на шосе	28	[6]	[3]
H	Комбайн	27	[6]	*
J	Міський автобус	28	[113]	*
K	Дизель-генератор промисловий	15	*	[29]
L	Дизель-генератор побутовий	24	*	[29]
M	Аварійно-рятувальний АТЗ	5	*	[5]
N	Магістральний тепловоз	16	[103]	*
P	Вивізний тепловоз	9	[103]	*
Q	Маневровий тепловоз	6	[103]	*

Примітка: знаком «*» позначено моделі експлуатації чи їх дані, запропоновані у дисертації

Результати розрахункового дослідження для 29 варіантів таких формул, включно з оригінальною та середніх ступеневих звичайних й зважених за формулами (2.41) і (2.42) для ступенів m = 4…10 (для ступенів m = –1; 0; 1; 2 і 3 ці значення визначаються формулами (2.27) – (2.40)) описано, проаналізовано і проілюстровано у [5], а також значень відповідних відносних різниць отримання середньоексплуатаційних значення коефіцієнту K_{fe} та різновидів середнього δx_m і δx_{mw}. Така

різниця δx_{mw} може розглядатися як відповідна частина методичної складової результуючої систематичної відносної похибки.

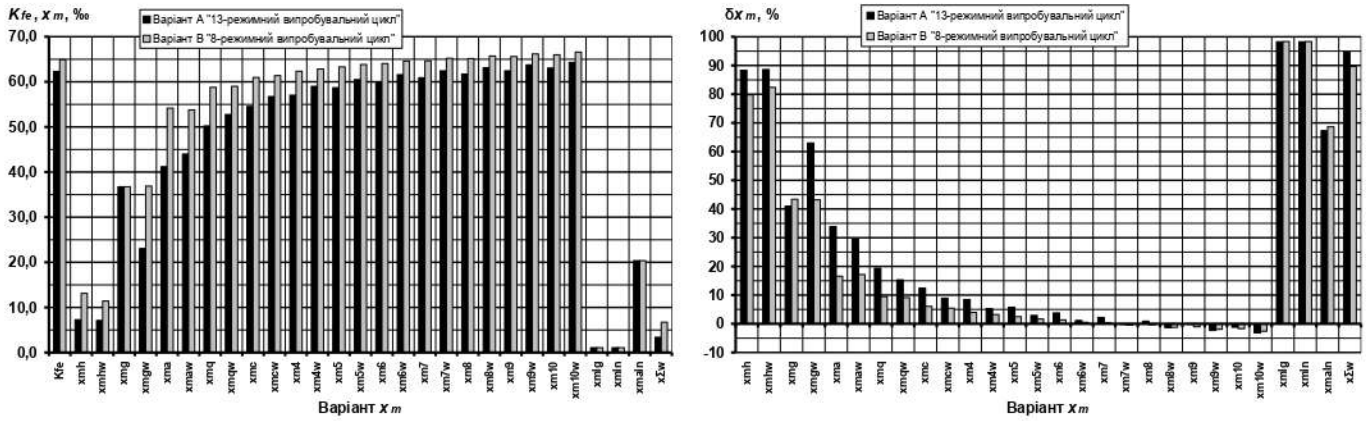
На рис. 2.11,а видно, що середньоексплуатаційні значення критерію K_{fe} та усіх досліджених різновидів середнього, як звичайного, так і зваженого, для двох стандартизованих стаціонарних випробувальних циклів не є однаковими між собою. На цьому ж рисунку видно, що усі різновиди середнього можна поділити на дві групи, окрім вже згаданого поділу на звичайні та зважені: 1) ступеневі зі значенням ступіня $m = -1; 0; 1; \ldots; 10$; та 2) специфічні – усі різновиди логарифмічних, питоме середнє та сума зважених значень (далі досліджуватись не будуть). Перший різновид є послідовністю значень для різних цілих значень ступеня m. Очевидною є наявність залежності значень середніх від значень ступеня m.

На рис. 2.11,б видно, що значення відносної різниці усіх досліджених різновидів середніх значень та середньоексплуатаційних значень критерію K_{fe} (тобто відповідної частини методичної складової результуючої систематичної відносної похибки визначення середньоексплуатаційних значення критерію K_{fe}) δx_m і δx_{mw} для двох стандартизованих стаціонарних випробувальних циклів повністю віддзеркалює описані вище особливості співвідношень значень отриманих розрахунком абсолютних середніх величин та критерію K_{fe}. Так, простежується залежність значень величин δx_m і δx_{mw} від величини ступеня m є нелінійною: такі величини, різні для 8-режимного та 13-режимного циклів, змінюються від 88 % при $m = -1{,}0$ до приблизно –3,5 % при $m = 10$, переходячи через нульове значення при $m \approx 7$.

Аналіз даних дослідження щодо моделей експлуатації, не проілюстрованих на рис. 2.11, показує, що для усіх них виконується умова, за якою значення величини δx_{mw} переходить через нульове значення при $m \approx 7$.

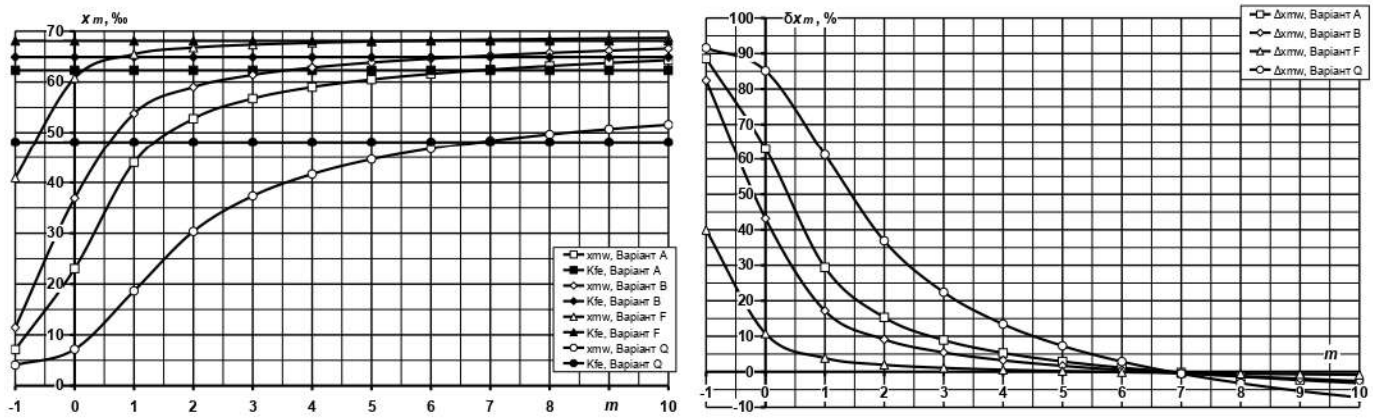
На рис. 2.12,а проілюстровано графіки залежності значень зваженого середнього ступіневого значення критерію x_{mmw} від значення ступеня ступіня m для діапазону значень $m = [-1, 0, 1, \ldots, 10]$ для варіантів розрахункового дослідження A і B (стандартизовані випробувальні цикли) та F і Q (характеризуються крайніми середньоексплуатаційними значеннями критерію K_{fe}). Також на рисунку наведено власне середньоексплуатаційні значення критерію K_{fe}, відповідні варіантам A, B, F і Q. На

рис. 2.12,б проілюстровано графіки залежності значень відносної різниці отримання середньоексплуатаційних значення коефіцієнту K_{fe} та різновидів середнього δx_{mw} (частини відносної методичної похибки) для тих самих моделей експлуатації та того ж діапазону значень показника m.



а б

Рисунок 2.11 – Результати дослідження для стандартизованих моделей експлуатації



а б

Рисунок 2.12 – Графіки залежності значень зваженого середнього ступіневого значення критерію x_{mmw} і відносної похибки δx_{mw} від значення ступеня m та середньоексплуатаційні значенням критерію K_{fe} для варіантів дослідження A, B, F і Q

На рис. 2.12,а видно, що залежності значень величин x_{mmw} від значень ступеня m є нелінійними, їх графіки мають вид експонент з різним ступенем пологості для різних моделей експлуатації, зростають зі зростанням значення ступеня m, перетинають вісь ординат (при $m = 0$) за різних додатних значень, перетинаються відповідними ізолініями середньоексплатаційних значення критерію K_{fe} при значенні $m \approx 7$.

На рис. 2.12,б видно, що залежності значень величин похибок δx_{mw} від значень

ступіня m є нелінійними, зменшуються зі зростанням значення ступеня m, перетинають вісь ординат за різних для різних моделей експлуатації додатних значень, а вісь абсцис перетинають (приймають нульові значення) при значенні ступеня $m \approx 7$.

Зважаючи на кількість й різнотипність проаналізованих моделей експлуатації ПДВЗ, можна надати відповідь на питання, поставлене у цьому дослідженні: апроксимувати (замінити) оригінальну формулу для отримання його середньоексплуатаційних значень критерію K_{fe} при наявності даних щодо розподілу порежимних значень цього критерію по всьому полю робочих режимів ПДВЗ та параметрів довільної стаціонарної моделі експлуатації ПДВЗ, з мінімальною відповідною складовою результуючої систематичної похибки їх отримання можливо формулою для отримання середнього ступеневого зваженого значення з набору порежимних значень критерію K_{fe} при значенні ступеня $m = 7$.

2.7.3 Вибір складу набору врахованих чинників комплексного паливно-екологічного критерію

Досліджуваний математичний апарат критерію K_{fe} знайшов широкого застосування для оцінювання ефективності розробки і впровадження заходів щодо модернізації конструкції та поліпшення принципів роботи ПДВЗ [18, 102–109]. Двома головними перевагами математичного апарату такого критерію є врахування 5 чинників ЕНБ значень повного набору законодавчо встановлених показників токсичності ВГ ПДВЗ – питомі масові годинні викиди з потоком ВГ незгорілих вуглеводнів моторного палива і мастила C_nH_m $g(C_nH_m)$, оксидів азоту NO_x $g(NO_x)$, монооксиду вуглецю CO g(CO) та твердих частинок g(PM) у г/(кВт·год), а також врахування значень питомі ефективні масові годинні витрати палива ПДВЗ g_e у г/(кВт·год), який чинить суттєвий вплив на усі показники ЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ, як показано у роботі [3].

Проте, у деяких дослідженнях, наприклад у [6, 102], висловлюються припущення про те, що при використанні математичного апарату паливно-екологічного критерію можливим є використання неповного набору вихідних даних. Обґрунтуванням застосування такого припущення, по-перше, виступав порівняльний характер дослі-

джень – однаково неповний набір вихідних даних для комплексного критеріального розрахункового дослідження використовувався як для модернізованого оцінюваного об'єкту, так і для базового (не модернізованого). По-друге, в деяких з таких досліджень використовувались засоби вимірювальної техніки, зокрема багатокомпонентні газоаналізатори, що технічно неспроможні здійснювати вимірювання повного набору вихідних даних для оцінювання, зокрема величини $g(C_nH_m)$. При цьому кількісних результатів розрахункового обґрунтування придатності для використання вказаного припущення у цих роботах не наводилось. Тому, здійснення порівняльного розрахункового оцінювання значень цього критерію з усіма можливими і не позбавленими фізичного сенсу варіантами складу набору вихідних даних з метою підтердження чи не підтвердження обґрунтованості застосування означеного припущення, а також визначення значень методичної похибки такого застосування, є доцільним.

Фізичний зміст критерію K_{fe} – середньоексплуатаційне значення ефективного ККД ПДВЗ η_{eme} з урахуванням екологічної шкоди, що спричиняє ЕУ з ПДВЗ при роботі [6]. З цього випливає, що для ПДВЗ з ідеальними показниками екологічності, тобто нульовими значеннями годинних масових викидів законодавчо нормованих полютантів з потоком ВГ $G(C_nH_m)$, $G(NO_x)$, $G(CO)$, $G(PM)$ у кг/год значення критерію K_{fe} сягають теоретичного максимуму, рівного значенню η_{eme}. При ненульових значеннях величин $G(C_nH_m)$, $G(NO_x)$, $G(CO)$, $G(PM)$ значення критерію K_{fe} завідома менші, ніж значення η_{eme} і тим менші, чим більшими є значення викидів, тобто більшою має бути грошова компенсація на відшкодування екологічної шкоди і менш досконалим з екологічної точки зору є робочий процес ПДВЗ. При цьому слід відмітити, що при досягненні нульового значення величини масової годинної витрати палива дизелем G_{fuel} у кг/год позбавляють сенсу власне процедуру розрахункового комплексного критеріального оцінювання. Це зумовлено, по-перше, тим, що за нульового значення витрати палива ПДВЗ, вочевидь, не здійснює робочий процес, тобто не спалює паливо, а значить не виділяє потоку ВГ з полютантами у них. Хоча, при холодній прокрутці викидаються у НПС вуглеводні моторної оливи, що змащує циліндро-поршневу групу. При холодному пуску ПДВЗ деякий час паливо у камеру згоряння подається, але умов для його займання ще не створено, і воно викидається у ПНС у вигляді дисперсної фази аерозолю ВГ, що не містить продуктів згоряння.

По-друге, це зумовлено особливостями математичного апарату критерію K_{fe} (див. [3, 6]), де у формулах для визначення значень приведеного питомого ефективного масового годинного викиду полютанту з потоком ВГ ПДВЗ g_{pr}(k) у кг/(кВт·год) та середньоексплуатаційного ефективного ККД ПДВЗ η_{eme} значення величини G_{fuel} знаходяться у знаменнику.

З теорії комбінаторного аналізу відомо, що при наявності у вибірці вихідних даних п'яти різнорідних незалежних одне від одного об'єктів існує 32 варіанта їх комбінацій за умови, що варіювання здійснюється шляхом виключення одного чи кількох об'єктів з вибірки. Оскільки один з п'яти згаданих чинників ЕНБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ, що їх враховує математичний апарат критерію K_{fe}, а саме величина g_e, не може приймати нульові значення, тобто не може бути вилученим з вибірки (набору вихідних даних), тоді для розрахункового порівняльного дослідження залишаються доступними 16 варіантів комбінації решти чотирьох чинників ЕНБ – величин $g(C_nH_m)$, $g(NO_x)$, g(CO), g(PM). Перелік, склад і позначення варіантів для розрахункового порівняльного дослідження зведено до табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Варіанти для розрахункового порівняльного дослідження [3]

Варіант		Прим.	g_e	g(PM)	$g(NO_x)$	$g(C_nH_m)$	g(CO)
№	позн.	од. вим.	кг/(кВт·год)				
1	A	Повний набір чинників (базовий варіант)	+	+	+	+	+
2	B	Виключено один чинник	+	+	+	+	–
3	C		+	+	+	–	+
4	D		+	+	–	+	+
5	E		+	–	+	+	+
6	F	Виключено два чинники	+	+	+	–	–
7	G		+	+	–	–	+
8	H		+	+	–	+	–
9	I		+	–	+	+	–
10	J		+	–	+	–	+
11	K		+	–	–	+	+
12	L	Виключено три чинники	+	+	–	–	–
13	M		+	–	+	–	–
14	N		+	–	–	+	–
15	O		+	–	–	–	+
16	P	Виключено чотири чинники (ідеальний варіант)	+	–	–	–	–

Результати розрахункового порівняльного дослідження проілюстровано на рис. 2.13–2.14. На рис. 2.13 містяться гістограми розподілів значень критерію K_{fe} у

‰ за режимами 13-режимного циклу для усіх варіантів комбінації врахованих чинників ЕНБ – відповідно за всіма режимами (рис. 5.13,а), за особливими режимами (рис. 5.13,б): максимального крутного моменту (режим № 6), мінімального холостого ходу (режим № 7) та номінальної потужності (режим № 8).

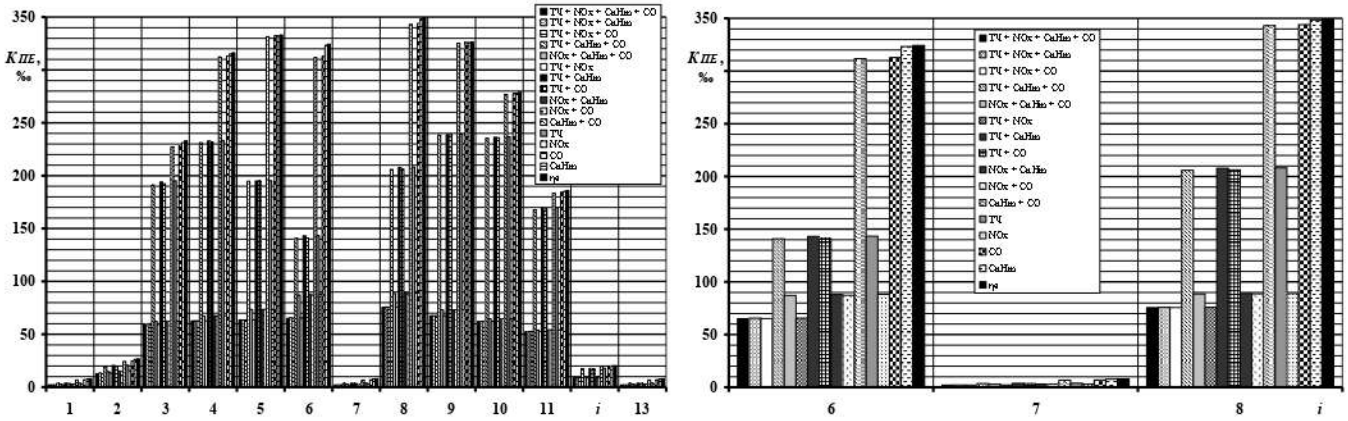
На рис. 5.14 містяться гістограми розподілів значень методичної похибки неповноти складу набору вихідних даних δK_{fe} у % у порівнянні з базовим варіантом (з повним набором вихідних даних у пакеті) за режимами 13-режимного циклу для усіх варіантів комбінації врахованих чинників ЕНБ – відповідно за всіма режимами (рис. 5.14,а), за особливими режимами (рис. 5.14,б).

З наведеного на рис. 5.13,а видно, що значення критерію K_{fe} за режимами 13-режимного циклу для базового варіанту розрахунку змінюється у межах 2,1 (режим мінімального холостого ходу) … 75,5 (режим номінальної потужності) ‰. При цьому значення величини η_{eme}, що являє собою протилежний випадок, коли усі чинники ЕНБ окрім витрат палива з розрахунку виключено, змінюється у межах 7,9 … 349,7 ‰. На рис. 5.13 видно, що максимальна різниця значень критерію K_{fe} за базовим варіантом розрахунку спостерігається між режимами номінальної потужності та мінімального холостого ходу і сягає значення 73,4 ‰ або 35 разів. На режимі номінальної потужності також сягає максимуму різниця значень критерію K_{fe} за базовим (варіант А) та за ідеальним (варіант Р) варіантом розрахунку і складає 274 ‰ або 4,6 р.

Результати розрахунку за усіма варіантами можливо поділити на чотири групи: I – одного порядку з базовим варіантом (≈ 75 ‰) – варіанти A, B, C, F; II – близькі до базового варіанту (≈ 90 ‰) – варіанти E, I, J, M; III – проміжні (200…210 ‰) – варіанти D, G, H, L; IV – одного порядку з ідеальним варіантом (340…350 ‰) – варіанти K, N, O, P. Ці групи, вочевидь, формуються за ознакою виключення з набору вихідних даних певних чинників ЕНБ: I – $g(C_nH_m)$, g(CO) чи їх сукупності; II – g(PM), III – $g(NO_x)$; IV – сукупності g(PM) і $g(NO_x)$. Для режиму максимального крутного моменту (режим № 6) різниця між значеннями для I та II груп більш виражена – 65 та 90 ‰.

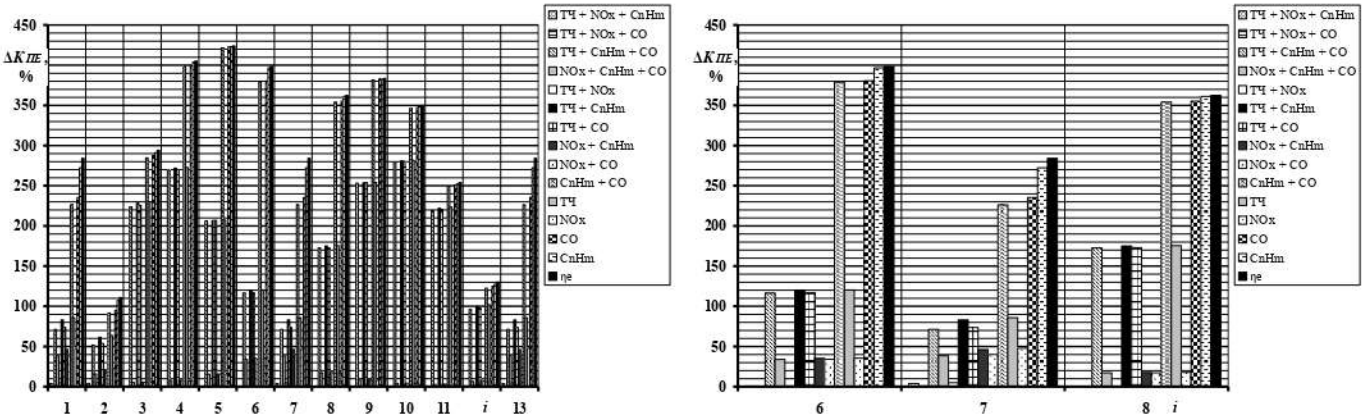
З наведеного на рис. 5.14,а видно, що значення методичної похибки визначення критерію K_{fe} від неповноти складу набору вихідних даних δK_{fe} за режимами 13-

режимного циклу у порівнянні з базовим варіантом розрахунку сягає максимумів для ідеального варіанту розрахунку і змінюється у межах 284 (режим мінімального холостого ходу) … 398,5 (режим максимального крутного моменту) %. Для інших варіантів такі дані показано у [3]. На рис. 5.14,б видно, що максимальна різниця значень похибки ΔK_{fe} за ідеальним варіантом розрахунку спостерігається між режимами максимального крутного моменту та мінімального холостого ходу і сягає значення 114,5 % або 1,4 рази.



а б

Рисунок 2.13 – Розподіл значень критерію K_{fe} за режимами 13-режимного циклу для усіх варіантів комбінації врахованих чинників ЕНБ (а) та такий розподіл за особливими режимами (б) [3]



а б

Рисунок 2.14 – Розподіл значень методичної похибки за режимами 13-режимного циклу для усіх варіантів комбінації врахованих чинників ЕНБ (а) та такий розподіл за особливими режимами (б) [3]

Поділ варіантів розрахунку на групи зберігається, для них характерні такі діа-

пазони значень похибки δK_{fe}: I – незначні (менше 1,0 %) – варіанти A, B, C, F; II – суттєві (до 40 %) – варіанти E, I, J, M; III – значні (від 70 до 170 %) – варіанти D, G, H, L; IV – максимальні (від 250 до 350 %) – варіанти K, N, O, P.

Слід зауважити, що усі варіанти розрахунку, що відрізняються від базового, для усіх режимів обраної моделі експлуатації дають завищені у порівнянні з ним значення критерію K_{fe}, тобто більш оптимістичний прогноз рівня ЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ. Такий ефект є негативним, оскільки виробник ЕУ з ПДВЗ застосувавши отримані результати такого оцінювання у якості аргументу в конкурентній боротьбі в офіційно об'явлених тендерах, ризикує ввести в оману кінцевого споживача та піддатися у зв'язку з цим накладанню штрафних санкцій.

Не менш важливим є також той факт, що групи варіантів розрахунку можливо розділити на типи: Тип 1 – зі зневажливо малим значенням методичної похибки ΔK_{fe} – це група I, тобто варіанти A, B, C, F, а отже з виключенням з набору вихідних даних $g(C_nH_m)$, $g(CO)$ чи їх сукупності; Тип 2 – з недопустимо великим значенням методичної похибки ΔK_{fe} – це групи II, III та IV, тобто варіанти D, E, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, а отже з виключенням з набору вихідних даних $g(PM)$, $g(NO_x)$ чи, тим більше, їх сукупності. Недопустимість використання варіантів розрахунку Типу 2 є очевидною. Це зумовлено тим, що за приведеною токсичністю саме g_{PM} та g_{NOx} посідають перші місця. Питання щодо допустимості використання варіантів розрахунку Типу 1 носить дискусійний характер термінологічної невизначеності.

2.7.4 Вибір одиниць вираження складових комплексного паливно-екологічного критерію, що мають вартісні еквіваленти, та врахування явища інфляції

Вартісні еквіваленти компонентів критерію K_{fe} у [6] виражені в гривнях, що пов'язано з деякими проблемами, описаними у [3], де були висунуті певні гіпотези. У даній роботі ці гіпотези знайдуть своє підтвердження за результатами розрахункового дослідження.

Вербальне та логічне обґрунтування вибору одиниць вимірювання для складових критерію K_{fe} – долари США (USD) як вільноконвертованої світової резервної ва-

люти, історія якої повністю охоплює історію існування ПДВЗ – у формі гіпотези, запропоновано і описано у роботі [3]. Підтверджує вищесказане історія зміни офіційного середньомісячиного курсу гривні до долара США Національного банку України (НБУ) у період з 1998 по 2016 рік, проаналізована і проілюстрована у [3] на основі аналізу джерел [98, 110–111]. Те саме стосується історії зміни офіційних середньомісячиних курсів гривні до євро (EUR) та до російського рубля в той же період, історіями зміни офіційних середньорічних обмінних курсів: рубля СРСР до долара США Державного банку СРСР у період з 1924 до 1992 рр.; українського купоно-карбованця до долара США НБУ у період з 1992 до 1995 рр.; неденомінованого російського рубля до долара США Центрального банку Російської Федерації у період з 1991 до 1997 рр.; деномінованого російського рубля до долара США Центрального банку Російської Федерації у період з 1998 до 2017 рр. [3].

У зв'язку з викладеними вище міркуванням раціонально виражати значення грошових витрат Z_e, Z_f та Z_{fe} у формулах (2.1)–(2.9), які формують значення критерію K_{fe}, в одиницях одної з широковикористовуваних в Україні вільноконвертованих світових резервних валют – Євро або Долар США. Однак, при цьому лише долара США має історію, яка повністю охоплює історію існування ПДВЗ як таких – від народження ідеї і до наших днів [3]. Євро як валюта була введена в безготівкові операції тільки в 1999 р., а в готівковий товарообіг – у 2001 р. У 1785 р. долар США було схвалено як національну валюту США, в 1794 р. долар США почали карбувати в США. Наразі приймають до оплати будь-які випущені банкноти та монети починаючи з 1861 року, але з 1971 року відмінено забезпечення долара США за рахунок золотого запасу США.

У цьому випадку слід враховувати, що купівельна спроможність долара США протягом усього свого існування з моменту створення першого ПДВЗ і до нашого часу не була постійною через прояв явища інфляції, який можна враховувати, застосовуючи Індекс споживчих цін *CPI* [111, 112], який описується такою формулою (2.43), у якій де індексом i позначено види продукції; індексом 0 позначено значення для базового періоду (для долара США це 1982 – 1984 рр.); індексом t позначено поточний рік; Q – сумарна кількість випущеної продукції; P – ціна виробленої продукції. Тоді величини Z_e, Z_f та Z_{fe} з врахуванням явища інфляції – неінфльовані грошові

витрати z_e, z_f та z_{fe} – можна описати формулою (2.44), у якій індексом j позначено види грошових витрат ($j = e, f$ чи fe); t – поточна дата; Z_j – грошові витрати як частина критерію K_{fe}, \$. Середньорічні значення індексу CPI для України, згідно до інформації з джерела [110] та середньорічні значення індексу CPI для США, згідно до інформації з джерела [111], показані у [3]. Зміну значення індексу CPI для долара США пропонується у першому наближенні описати шляхом апроксимації формулою (2.45), тобто поліномом 3-го ступеня. Значення індексу CPI для долара США у 2003 р складав 175, а наразі становить 254 [111].

$$CPI = \sum\left(Q_i^t \cdot P_i^t\right) / \sum\left(Q_i^0 \cdot P_i^0\right) \cdot 100\%; \quad (2.43)$$

$$z_j = Z_j(t) \cdot 100 / CPI_{\$}(t); \quad (2.44)$$

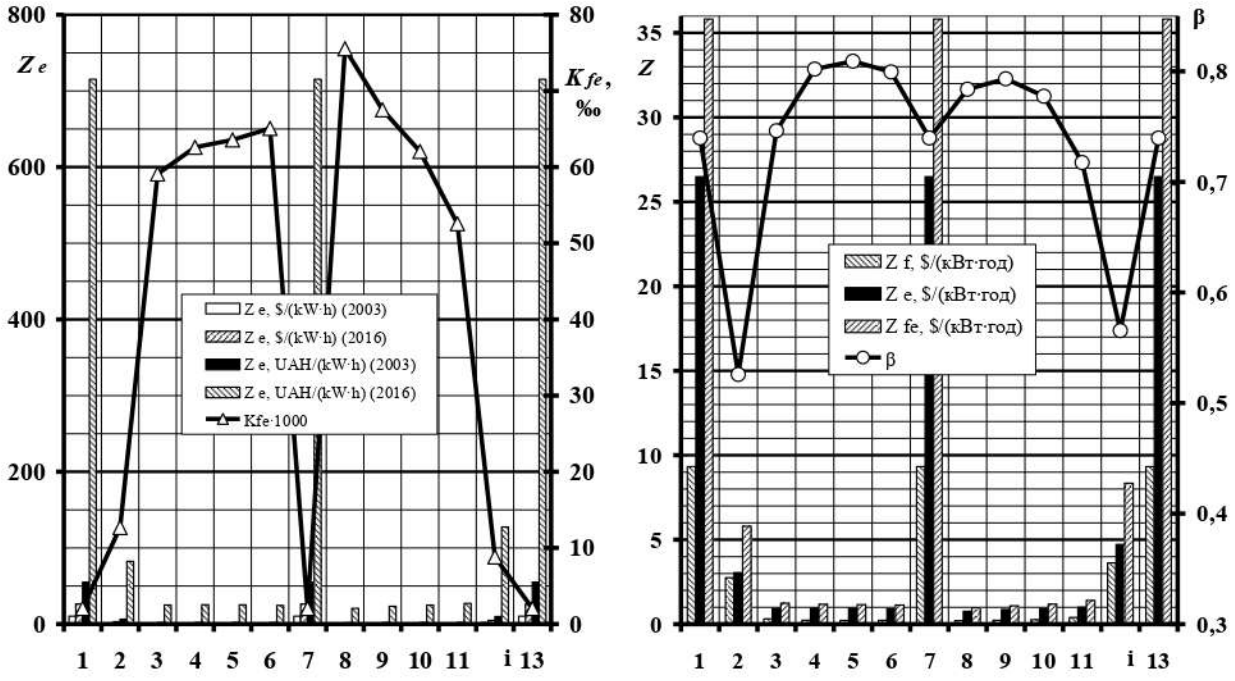
$$CPI(USD) = 2{,}105 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 1{,}205 \cdot t^2 + 2{,}297 \cdot 10^3 \cdot t - 1{,}460 \cdot 10^6; R^2 = 0{,}994. \quad (2.45)$$

У даному дослідженні проведені розрахункове оцінювання значень компонентів критерію K_{fe} для автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 для 13-режимного стаціонарного стандартизованого випробувального циклу. Розрахунково досліджувались такі варіанти вираження одиниць вартості одиниці ваги дизельного палива P_f:

а) 1,81 ₴/кг; б) 0,34 \$/кг (значення на момент публікації джерела [6] – 2003 р.); в) 23,53 ₴/кг; г) 0,871 \$/кг (значення на момент публікації джерела [3] – 2018 р.). При цьому враховано, що рідке моторне паливо розповсюджується у мережах автозаправних станцій у об'ємних одиницях, тобто у ₴/дм^3, а щільність дизельного моторного палива ρ_{fuel} становить 840–850 кг/м^3. Результати такого розрахункового оцінювання значень критерію K_{fe} та його складових для вищевказаних варіантів значення величини P_f наведено у табл. 2.5 на рис. 2.15.

Таблиця 2.5 – Результати порівняльного розрахункового дослідження

Грошові витрати	**Рік**	**Одиниці вираження**					
		UAH/(кВт·год)			**\$/(кВт·год)**		
Z_e	**2003**	2,081	2,729	2,553	0,391	0,513	0,480
	2018	27,050	35,472	33,185	0,567	0,744	0,696
Z_f	**2003**	0,574	0,685	0,899	0,108	0,129	0,169
	2018	7,463	8,903	11,681	0,156	0,187	0,245
Режим роботи ДВЗ		$N_{еном}$	$M_{кр\max}$	**min х.х.**	$N_{еном}$	$M_{кр\max}$	**min х.х.**



а б

Рисунок 2.15 – Результати порівняльного розрахункового дослідження

Так, на рис. 2.15,а наведено розподіл значень грошових витрат на компенсація екологічної шкоди довкіллю та людині Z_e для усіх варіантів дослідження (див. табл. 2.5) по режимах обраної моделі експлуатації. Також на ньому наведено такий розподіл для значень комплексного паливно-екологічного критерію K_{fe}. На рис. 2.15,а видно, що найбільшими значеннями грошових витрат характеризується режим мінімального холостого ходу (тобто режим зі значенням ефективної потужності двигуна, близькій до нуля) – №№ 1, 7 і 13 (min х.х. у табл. 2.5), а найменшими – на режимах максимального крутного моменту (№ 6, $M_{кр\max}$ у табл. 2.5) та номінальної ефективної потужності (№ 8, $N_{еном}$ у табл. 2.5). Також на ньому видно, що різниця між значеннями однієї і тієї ж фізичної величини – грошових витрат Z_e – для різних одиниць вираження їх вартісних еквівалентів та за різні історичні періоди для тих самих робочих режимів моделі експлуатації незмінного об'єкту оцінювання відрізняються кратно (для однакових одиниць за різні періоди) та на порядки (для різних одиниць).

Так, на рис. 2.15,б наведено розподіл значень грошових витрат Z_f, Z_e та Z_{fe} в обраній одиниці вираження – $/(кВт·год) – для усіх варіантів дослідження (див. табл. 2.5) по робочих режимах обраної моделі експлуатації. Також на цьому рисунку наведено такий розподіл для значень коефіцієнту експлуатаційних екологічних гро-

шових витрат β. На рис. 2.15,б видно, що співвідношення між значеннями витрат Z_f та Z_e (що також виражає значення коефіцієнта β), тобто між паливною та екологічною складовою критерію K_{fe}, не є постійним по робочих режимах обраної моделі експлуатації, що зумовлено характером розподілу (якісна характеристика) числових значень (кількісна характеристика) чинників ЕНБ, врахованих математичним апаратом критерію K_{fe}. Також на ньому видно, що найбільшою вагомістю екологічна вартісна складова критерію досягає на режимі № 5 (β = 0,810), а найменшу – на режимі № 2 (β = 0,540).

Як стає зрозумілим, долар США як світова резервна валюта через прояви феномену інфляції не може бути абсолютним грошовим еквівалентом компонентів критерію K_{fe}. Тому у подальших дослідженнях необхідно звернути увагу на зміну вартості банківського золота (чи інших дорогоцінних металів) та нафти.

2.8 Висновки по розділу 2

Таким чином, у цьому розділі рукопису дисертаційної роботи отримано такі результати.

1. Побудовано класифікацію відомих критеріальних математичних апаратів для оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

Виконано аналіз дев'яти відомих критеріальних математичних апаратів, які придатні для надання комплексної оцінки техногенному впливу на атмосферне повітря при експлуатації ЕУ з ПДВЗ. Зокрема найбільш придатними для вирішення поставленої у роботі задачі визнано: комплексний паливно-екологічний критерій, інтегральний індекс екологохімічної оцінки, узагальненої функції бажаності, EPA Air Quality Index, ERoEI Index, а також стандартизований підхід згідно до Правил ЄЕК ООН № 49. У якості класифікаційної ознаки у класифікації критеріїв використано джерела вихідних даних для здійснення оцінювання, відповідно до неї критерії розділено на внутрішні, зовнішні, реципієнтні та універсальні.

Визначено пріоритетність застосування критеріїв. Виділено наближення комплексного оцінювання показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ у історичній ретроспективі.

2. Виконано порівняльний аналіз алгоритмів роботи та можливостей виділених при побудові класифікації критеріїв.

Встановлено, що основними недоліками проаналізованих підходів з точки зору оцінки безпечності техногенного впливу на АП саме ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу при їх експлуатації є відсутність розгляду чинників негативної дії на НПС при роботі ПДВЗ, які не враховані у зв'язку з розбіжністю вимог законодавчих екологічних обмежень щодо складу моторного палива і ВГ, окремої оцінки екологічній якості роботи ПДВЗ і ТЗНС у складі ЕУ, врахування пріоритетності екологічних показників роботи ЕУ на основі ПДВЗ на етапі життєвого циклу «безаварійна експлуатація».

3. Зважаючи на необхідність при оцінці впливу ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем зносу враховувати вказані чинники, запропоновано інтегративний показник рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE}. Показник відображає запропонований інтегративний підхід до оцінювання екологічної якості роботи окремо ПДВЗ і окремо його ТЗНС у структурі ЕУ, а потім надання загальної оцінки екологічній якості експлуатації ЕУ. Також за таким показником можливим є оцінювання ефективності функціонування СУЕБ вказаного процесу експлуатації та здійснювати керування як ПДВЗ, так і виконавчими пристроями ТЗНС.

Запропоновано до складу запропонованого інтегративного показника ввести комплексний паливно-екологічний критерій, який за визначенням характеризує рівень якості та конкурентоспроможності ПДВЗ у складі ЕУ, враховує повний набір законодавчо нормованих чинників ЕБ, враховує вагомість складових чинників та враховує витрату моторного палива як самостійний чинник.

4. Сформульовано концепцію вдосконалення математичного апарату і методики застосування комплексного паливно-екологічного критерію як складової розробленого інтегративний показник рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ.

Розроблено, застосовано підходи до отримання порежимних і середньоексплуатаційних значень критерію, до вибору складу набору врахованих чинників ЕНБ критерію, до вибору одиниць вираження складових комплексного паливно-екологічного

критерію, що мають вартісні еквіваленти та врахування явища інфляції і проаналізовано результати їх застосування.

Обґрунтовано доцільність здійснення подальших досліджень у напрямі створення методологічних основ розробки систем комплексної оцінки рівня екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ із високим ступенем фізичного зносу на базі критеріального оцінювання чинників їх екологічно небезпечного техногенного впливу на атмосферне повітря за інтегративним принципом визначення.

Таким чином, надано наукові засади для обґрунтування методологічних положень комплексного дослідження негативного впливу ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу на атмосферне повітря у вигляді критеріального оцінювання за інтегративним показником екологічної безпеки.

Тобто, вирішено задачу дослідження № 2.

3 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ

3.1 Загальні міркування

Попередній розділ рукопису дисертації присвячений аналізу відомих критеріїв щодо можливостей застосування для побудови наукових основ здійснення комплексного критеріального оцінювання рівня ЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ. У якості методологічної основи забезпечення рівня ЕБ такого процесу має бути розроблена відповідна СУЕБ на стратегічному рівні, ТЗНС як матеріальна основа СУЕБ на тактичному рівні. Здійснено порівняльний аналіз апаратів комплексного паливно-екологічного критерію K_{fe}, інтегрального індексу екологохімічного оцінювання F та узагальненої функції бажаності D. На основі цього запропоновано новий інтегративний підхід до комплексного критеріального оцінювання екологічної якості експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу за допомогою запропоновано інтегративний показник рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE}. При цьому встановлено за доцільне застосування критерію K_{fe} як складової інтегративного показника D_{RICE}.

Даний розділ присвячений розробці математичного апарату інтегративного показника рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} та вдосконаленню математичного апарату критерію K_{fe} як окремої самостійної складової інтегративного показника D_{RICE}.

Зокрема, для забезпечення можливості при здійсненні критеріального оцінювання врахування якомога більшої кількості чинників ЕНБ, перерахованих у запропонованій розділі 1 класифікації з ієрархічним класифікатором раціональним є застосування математичного апарату узагальненої функції бажаності зі структурою впливаючих чинників, ідентичною критерію K_{fe}, а також використання цього критерію як окремого самостійний чинник ЕНБ у структурі функції бажаності, тобто мова йде про використання обох апаратів при взаємному посиленні переваг та послабленні недоліків.

Оскільки основною перевагою критерію K_{fe} є врахування масових годинних витрат палива ПДВЗ G_{fuel}, то для її використання слід визначити вагомість цього чинника ЕНБ у порівнянні з іншими – викидами законодавчо нормованих полютантів з потоком ВГ G(k), відповідно до класифікатора чинників ЕНБ з розділу 1, де розкрито характер впливу величини G_{fuel} на усі інші чинники ЕНБ у класифікаторі.

Зважаючи на те, що паливна складова критерію K_{fe} повністю зумовлює його екологічну складову, як встановлено у [4], при використанні критерію K_{fe} як окремого впливаючого чинника у структурі узагальненої функції бажаності D, можливим стає враховувати показники вібрації (ступінь нерівномірності обертання колінчастого валу δ_{cs}, критерії Клімова-Стечкіна ξ_{cs} і η_{cs}), шуму (еквівалентний L_{Aequ} та максимальний $L_{A\max}$ рівень шуму), теплового забруднення (масові годинні витрати палива G_{fuel} окремо від паливної складової критерію K_{fe}), викидів оксидів сірки $G(SO_2)$ (спричинюють кислотні дощі), вуглекислого газу $G(CO_2)$ (парниковий газ), водяної пари $G(H_2O)$ (підвищує вологість повітря), поліциклічних ароматичних вуглеводнів G(PAH), у тому числі й бенз(а)пірена G(B(a)P) (канцерогенні й мутагенні речовини), картерних газів G(CG), парів моторного палива і оливи G(RB) тощо.

Для реалізації цього підходу необхідною є наявність даних щодо значень такого врахованого чинника (тобто відгуку локального критерію якості r), які можуть бути співвіднесеними з реперними точками психофізичної шкали оцінки бажаності значення відгуку r «добре» та «погано», а також відповідними їх значеннями шкали значень базової оцінки значення часткової функції бажаності d(k) = 0,63 … 0,8 та d(k) = 0,2 … 0,32. При цьому за зразкові значення показників екологічної складової критерію K_{fe} пропонується обрати значення викидів законодавчо нормованих полютантів, що містяться у відповідних стандартах (наприклад у [21]), для поточного (оцінки «добре», d(k) = 0,8) та попередніх (оцінки «погано», d(k) = 0,2) рівнів EURO.

Однак, різні ПДВЗ, що наразі перебувають в експлуатації, відносяться до різних поколінь такої техніки та знаходяться у різному поточному технічному стані (що відповідає ступеню фізичного і морального зносу, дисципліни дотримання черговості регламентних робіт з обслуговування і ремонту) і тому характеризуються різним рівнем паливної економічності, тобто значенням питомих ефективних масо-

вих годинних витрат палива g_e. Тому слід отримати залежності значень критерію K_{fe}, у структурі якого показники екологічної складової набувають законодавчо встановлених значень, від значення паливної складової критерію для різних рівнів екологічних нормативів EURO.

3.2 Розробка індикатора екобезпеки поршневого ДВЗ і його технології захисту навколишнього середовища

Розроблено індикатор екобезпеки ПДВЗ і його ТЗНС Ω_{RICE} (див. формулу (3.1)), величина якого є сумою двох інтегративних показників екологічної якості J_{RICE} та J_{EPT}, що оцінюють окремо рівень екологічної якості функціонування ПДВЗ і ТЗНС. Значення інтегративного показника екологічної якості ПДВЗ J_{RICE} визначається величиною розробленого інтегративного показника рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} (формули (3.2) і (3.3)). Значення інтегративного показника екологічної якості ТЗНС J_{EPT} залежить від величини індексу ефективності функціонування ТЗНС I_{EPT} (формулу (3.4)). Це відображає розроблений новий у порівнянні з усіма розглянутими вище підхід до оцінювання рівня екологічної безпеки, згідно до якого ЕУ диференційовано на ПДВЗ (джерело чинників негативного впливу на АП) та його ТЗНС, екологічна якість першої і ефективність роботи другої складової оцінюється нарізно показником D_{RICE} та індексом I_{RICE}, а загальний рівень екологічної безпеки при експлуатації ЕУ оцінюється індикатором Ω_{RICE} (див. рис. 2.7). Це дозволяє здійснювати окреме управління ПДВЗ і його ТЗНС для досягнення заданого рівня екологічної безпеки. Особливістю розробленого підходу є використання у структурі врахованих показником D_{RICE} чинників значення комплексного паливно-екологічного критерію K_{fe}, який поєднує в своїй структурі показники викиду повного набору законодавчо нормованих полютантів у складі ВГ ПДВЗ та такий специфічний чинник екологічної безпеки, як споживання моторного палива як невідновного енергоресурсу. Структура інтегрального показника D_{RICE} визначається особливостями устрою математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона, що описується формулами (3.5)–(3.9). Це дозволяє ввести у структуру показника інші у порівнянні з критерієм K_{fe} чинники екологічної безпеки, що

містяться у розробленому класифікаторі. Функція бажаності, що за структурою впливаючих чинників є аналогічною такій структурі критерію K_{fe}, описується формулою (3.10).

$$\Omega_{RICE} = J_{RICE} + J_{EPT} = D_{RICE} + \left(1 - D_{RICE}\right)^{I_{EPT}}. \quad (3.1)$$

$$D_{RICE} = \sqrt[\upsilon(Kfe)+\sum_{k=1}^{h}\upsilon(k)]{d\left(K_{fe}\right)^{\upsilon(Kfe)} \cdot \prod_{k=1}^{h} d\left(G(k)\right)^{\upsilon(k)}}; k = SO_x; CO_2; CO_{2GH}; H_2O; CG; RB; Q. \quad (3.2)$$

$$\upsilon\left(K_{fe}\right) = A(PM) + A(NO_x) + A(C_nH_m) + A(CO) + A(G_{fuel}) = 200 + 41{,}1 + 3{,}2 + 1 + 38{,}4 = 238{,}7;$$

$$\upsilon(k) = 1/A(k); A(SO_x) = 22; A(CO_2) = 0{,}02; A(CO_2)_{GH} = 0{,}0004;$$
$$A(H_2O) = 0{,}002; A(CG) = 25{,}5; A(RB) = 38{,}4; A(Q) = 28{,}8. \quad (3.3)$$

$$I_{EPT} = \sum_{y=1}^{m}\left(\frac{1}{I_{EDy} \cdot WF_{EDy}}\right) = \sum_{y=1}^{m}\left(\left(I_{EDy} \cdot A(k) / \sum_{k=1}^{h+5} A(k)\right)^{-1}\right); \quad (3.4)$$

$$D_i = \sqrt[\sum_{k=1}^{n}\upsilon(k)]{\prod_{k=1}^{n} d(k)_i^{\upsilon(k)}} = \sqrt[(\upsilon(k_1)+\upsilon(k_2)+\ldots+\upsilon(k_n))]{d_i\left(k_1\right)^{\upsilon(k_1)} \cdot d_i\left(k_2\right)^{\upsilon(k_2)} \cdot \ldots \cdot d_i\left(k_n\right)^{\upsilon(k_n)}}, \quad (3.5)$$

$$d(k)_i = \exp\left[-\exp\left(a(k)_i + b(k)_i \cdot r(k)_i\right)\right]; k = \left\{K_{fe}, G_{SO_x}, \delta_{cs}, \xi_{cs}, \eta_{cs}, L_{Aequ}, L_{A\max}, \ldots\right\}, \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} d(k)_{idn} = \exp\left[-\exp\left(a(k)_i + b(k)_i \cdot r(k)_{idn}\right)\right] \\ d(k)_{iup} = \exp\left[-\exp\left(a(k)_i + b(k)_i \cdot r(k)_{iup}\right)\right]; \end{cases} \quad (3.7)$$

$$a(k) = \left(\ln(-\ln(d(k)_{up})) \cdot r(k)_{dn} - \ln(-\ln(d(k)_{dn})) \cdot r(k)_{up}\right) / \left(r(k)_{dn} - r(k)_{up}\right), \quad (3.8)$$

$$b(k) = \left(\ln(-\ln(d(k)_{dn})) - \ln(-\ln(d(k)_{up}))\right) / \left(r(k)_{dn} - r(k)_{up}\right), \quad (3.9)$$

$$D = \sqrt[\sum_{k=1}^{n}\upsilon(k)]{\prod_{k=1}^{n} d(k)^{\upsilon_k}} = \sqrt[\left(\begin{smallmatrix}\upsilon_{NOx}+\upsilon_{PM}+\\+\upsilon_{CnHm}+\upsilon_{CO}+\\+\upsilon_{Gfuel}\end{smallmatrix}\right)]{\begin{matrix} d\left(G(NO_x)\right)^{\upsilon_{NOx}} \cdot d\left(G(PM)\right)^{\upsilon_{PM}} \cdot d\left(G(C_nH_m)\right)^{\upsilon_{CnHm}} \times \\ \times d\left(G(CO)\right)^{\upsilon_{CO}} \cdot d\left(G_{fuel}\right)^{\upsilon_{Gfuel}} \end{matrix}}, \quad (3.10)$$

де d(k) – часткова функція бажаності, що відповідає k-му критерію якості, d(k) = [0 …1,0], причому $k_1 = K_{fe}$; n – кількість критеріїв якості, що розглядаються; υ_k – коефіцієнт вагомості k-го критерію якості, що розглядаються, $0 < \upsilon(k) \le 1$, причому $\upsilon(k)_1 = 38{,}4 + 245{,}3 = 283{,}7$; $r(k)_i$ – дійсне значення k-го критерію якості на i-му режимі роботи ПДВЗ у моделі його експлуатації; $a(k)_i$ та $b(k)_i$ – коефіцієнти, що визначаються на основі встановлення відповідності між парою характерних значень $r(k)_i$ та $d(k)_i$ згідно до вмісту таблиці психофізичної шкали; індексами *up* і *dn* позначено характерні парні значення $r(k)_i$ та $d(k)_i$, що відповідають обраним оцінкам за психофізичною шкалою «добре» (тобто $d(k)_{iup} = 0{,}63…0{,}8$) і «погано» (тобто $d(k)_{idn} = 0{,}2…0{,}32$) з урахуванням особливостей величин $r(k)_i$; I_{ED} – індексу ефективності функціонування у-го виконавчого пристрою ТЗНС, зокрема для ФТЧ це I_{DPF}, (див. розділ 5).

3.3 Визначення вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію у якості показника вагомості витрат палива

3.3.1 Постановка задачі

За результатами аналізу відомих критеріальних математичних апаратів, здійсненим і описаним у [3], виділено два найбільш пріоритетних для оцінювання рівня ЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ – комплексний паливно-екологічний критерій K_{fe} та узагальнена функція бажаності D. Останній апарат, що побудований на використанні апарату нечіткої логіки та психофізичних шкал, має деякі переваги та особливості, недоступні першому. Гнучкість, як одна з переваг такого апарату, дозволяє використовувати у його структурі складові – часткові функції бажаності $d(\mathrm{k})$, які враховують набір будь-який різнорідних впливаючих чинників ЕНБ, у тому числі й ідентичний набору незмінної структури, що використовує апарат критерію K_{fe}. Застосування до одного і того ж об'єкту одразу обох згаданих критеріальних математичних апаратів з ідентичною структурою набору впливаючих чинників являє собою перспективний напрямок досліджень.

Проте, незважаючи на те, що математичний апарат критерію K_{fe} являє собою представника II наближення (тобто покоління) таких апаратів (див. [3]), тобто враховує витрати палива ПДВЗ, повноцінним чинником ЕНБ така фізична величина у цьому апараті не є. І у першу чергу, неповноцінність витрат палива ПДВЗ як чинника ЕНБ саме у структурі критерію K_{fe} проявляється у тому, що його вагомість на фоні інших факторів є невизначеною. Проте, у [3] показано, що витрати палива ПДВЗ є значущим чинником ЕНБ як безпосередньо – споживання невідновного ресурсу, так і, що більш важливо, опосередковано через вплив на усі інші чинники ЕНБ, джерелом яких є ПДВЗ у складі ЕУ, класифіковані у тому ж джерелі. Математичний апарат узагальненої функції бажаності може враховувати значення величини витрат палива ПДВЗ як чинник ЕНБ, рівноцінний іншим, наприклад викидам нормованих полютантів. Узагальнена функція бажаності з структурою впливаючих чинників, ідентичною критерію K_{fe}, описується формулою (3.11) [3].

$$D\left(K_{fe}\right)=\sqrt[\sum_{k=1}^{n}\upsilon(k)]{\prod_{k=1}^{n}d(k)^{\upsilon_k}}=\sqrt[\left(\begin{smallmatrix}\upsilon_{NOx}+\upsilon_{PM}+\\+\upsilon_{CnHm}+\upsilon_{CO}+\\+\upsilon_{Gfuel}\end{smallmatrix}\right)]{\begin{matrix}d\left(G\left(NO_x\right)\right)^{\upsilon_{NOx}}\cdot d\left(G\left(PM\right)\right)^{\upsilon_{PM}}\cdot d\left(G\left(C_nH_m\right)\right)^{\upsilon_{CnHm}}\times\\\times d\left(G\left(CO\right)\right)^{\upsilon_{CO}}\cdot d\left(G_{fuel}\right)^{\upsilon_{Gfuel}}\end{matrix}}, \quad (3.11)$$

де $d(k)$ – часткова функція бажаності, що відповідає k-му критерію якості; n – кількість критеріїв якості, що розглядаються; $\upsilon(k)$ – коефіцієнт вагомості k-го критерію якості, що розглядаються, $0 < \upsilon(k) \le 1$.

Для реалізації вищевказаного напрямку досліджень потрібною є наявність інформації щодо значення коефіцієнту вагомості $\upsilon(k)$ для такого критерію якості, як витрата палива ПДВЗ. Проте, при аналізі науково-технічної літератури результатів чисельного оцінювання такого коефіцієнту вагомості для випадку критерію K_{fe} не виявлено, а у загальному випадку підходи різних спеціалістів у галузі досить сильно різняться [6–20].

3.3.2 Методика розрахункового оцінювання вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію

Формулу (3.11), що описує комплексний паливно-екологічний критерій та міститься у монографії [6], у даному дослідженні перетворено для більшої зручності оперування нею до виду формули (3.12).

$$K_{fe} = \frac{3600 \cdot M_{кр} \cdot n_{кв}}{9550 \cdot H_u \cdot G_{fuel}} \cdot \frac{3600 \cdot M_{кр} \cdot n_{кв} \cdot \sigma \cdot \delta \cdot \sum_{k=1}^{h}\left(A_k \cdot G_k\right)}{9550 \cdot H_u \cdot G_{fuel}^2 + 9550 \cdot H_u \cdot G_f \cdot \sigma \cdot f \cdot \sum_{k=1}^{h}\left(A_k \cdot G_k\right)} =$$
$$= \left|\Sigma = \sum_{k=1}^{h}\left(A_k \cdot G_k\right)\right| = \frac{3600 \cdot M_{кр} \cdot n_{кв}}{9550 \cdot H_u \cdot G_{fuel}} \cdot \left(1 - \frac{\sigma \cdot f \cdot \Sigma}{\sigma \cdot f \cdot \Sigma + G_{fuel}}\right) = \quad ; \quad (3.12)$$
$$= \left|D = \sigma \cdot f \cdot \Sigma + G_{fuel}\right| = \frac{3600 \cdot M_{кр} \cdot n_{кв}}{9550 \cdot H_u \cdot D} = f_1\left(M_{кр}, n_{кв}, H_u, G_{fuel}, \sigma, f, \Sigma\right)$$

Для виявлення вагомості паливної складової критерію K_{fe} пропонується підхід, згідно якого на першому етапі дослідження раціональним є здійснення математичного аналізу частинних похідних критерію K_{fe} за значенням величин масової годинної витрати палива ПДВЗ G_{fuel} (у кг/год) – $\partial K_{fe}/\partial G_{fuel}$, масового годинного викиду k-го законодавчо нормованого полютанта з потоком ВГ ПДВЗ G_k (кг/год) – $\partial K_{fe}/\partial G_k$, сумарного приведеного масового годинного викиду таких полютантів з потоком ВГ $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ (у кг/год) – $\partial K_{fe}/\partial \Sigma(A_k \cdot G_k)$, сумарного масового годинного викиду таких полютантів з потоком ВГ ПДВЗ $\Sigma(G_k)$ (у кг/год) – $\partial K_{fe}/\partial \Sigma(G_k)$.

Величину $\partial K_{fe}/\partial G_{fuel}$ описує формула (3.13), величину $\partial K_{fe}/\partial G_k$ – формула (3.14). Як видно з формули (3.13), значення частинної похідної $\partial K_{fe}/\partial G_{fuel}$ залежить від значень $n_{кв}$, $M_{кр}$, G_{fuel}, G_k, H_u, f, σ, $\Sigma(A_k \cdot G_k)$. Як видно з формули (3.14), значення частинної похідної $\partial K_{fe}/\partial G_{fuel}$ залежить від $n_{кв}$, $M_{кр}$, G_{fuel}, G_k, H_u, f, σ, $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ та A_k.

$$\frac{\partial K_{fe}}{\partial G_{fuel}} = -\frac{3600 \cdot M_{кр} \cdot n_{кв}}{9550 \cdot H_u \cdot G_{fuel}^2} \cdot \left(1 + \frac{\sigma \cdot f \cdot \Sigma \cdot \left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma + 2 \cdot G_{fuel}\right)}{\left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma + G_{fuel}\right)^2}\right) =$$

$$= -\frac{3600 \cdot M_{кр} \cdot n_{кв}}{9550 \cdot H_u \cdot G_{fuel}^2} \cdot \frac{\left(G_{fuel} + 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma\right)^2 - 2 \cdot \left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma\right)^2}{\left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma + G_{fuel}\right)^2} = \quad \text{, ‰·год/кг; (3.13)}$$

$$= \left| C = \left(G_{fuel} + 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma\right)^2 - 2 \cdot \left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma\right)^2 \right| = -\frac{K_{fe}}{D} \cdot \frac{C}{G_{fuel}^2} =$$

$$= f_2\left(M_{кр}, n_{кв}, H_u, G_{fuel}, \sigma, f, \Sigma\right)$$

$$\frac{\partial K_{fe}}{\partial G_k} = -\frac{3600 \cdot M_{кр} \cdot n_{кв} \cdot \sigma \cdot f \cdot A_k}{9550 \cdot H_u \cdot \left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma + G_{fuel}\right)^2} = -\frac{3600 \cdot M_{кр} \cdot n_{кв} \cdot \sigma \cdot f \cdot A_k}{9550 \cdot H_u \cdot D^2} =$$

$$= \left| \frac{\partial\left(\sum_{k=1}^{h}\left(A_k \cdot G_k\right)\right)}{\partial G_k} = A_k \right| = -\frac{K_{fe}}{D} \cdot \sigma \cdot f \cdot A_k = f_3\left(M_{кр}, n_{кв}, H_u, G_{fuel}, \sigma, f, \Sigma, A_k\right) \quad \text{, ‰·год/кг. (3.14)}$$

Як видно з формули (3.14), частинні похідні $\partial K_{fe}/\partial G_k$ для різних полютантів (тобто, різних k = [PM, NO_x, C_nH_m, CO] [6]) відрізняються одне від одного значеннями величини безрозмірного показника відносної агресивності k-го законодавчо нормованого полютанта у потоці ВГ ПДВЗ A_k (A_{PM} = 200; A_{NOx} = 41,1; A_{CnHm} = 3,16; A_{CO} = = 1,0 [6]). При цьому очевидним є те, що у якості базового полютанта обрано монооксид вуглецю CO, для якого A_k = 1,0 (див. формулу (3.15) з [26]). Тобто усі представники екологічної складової критерію K_{fe} (G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO}) ранжовані між собою за значенням величини A_k у порівнянні зі значенням A_k для базового полютанта.

$$A_k = \sqrt{ПДК_{сс}(CO) \cdot ПДК_{рз}(CO) / (ПДК_{сс}(k) \cdot ПДК_{рз}(k))}\,. \quad (3.15)$$

На другому етапі дослідження доцільним є здійснення математичного аналізу співвідношень між величиною частинною похідної $\partial K_{fe}/\partial G_{fuel}$ та величинами частинних похідних $\partial K_{fe}/\partial G_k$, $\partial K_{fe}/\partial\Sigma(A_k \cdot G_k)$, $\partial K_{fe}/\partial\Sigma(G_k)$ – це частинні похідні $\partial G_k/\partial G_{fuel}$, $\partial\Sigma(A_k \cdot G_k)/\partial G_{fuel}$, $\partial\Sigma(G_k)/\partial G_{fuel}$. Співвідношення величин $\partial K_{fe}/\partial G_{fuel}$ та $\partial K_{fe}/\partial G_k$ описує

формула (3.16). У формулі (3.16) присутня величина A_{fuel}, фізичний і математичний зміст якою буде пояснено далі.

$$\frac{\partial K_{fe}}{\partial G_{fuel}} / \frac{\partial K_{fe}}{\partial G_k} = \frac{\partial G_k}{\partial G_{fuel}} = \frac{\left(G_{fuel} + 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma\right)^2 - 2 \cdot \left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma\right)^2}{A_k \cdot \sigma \cdot \delta \cdot G_{fuel}^2} = \\ = \frac{C}{A_k \cdot \sigma \cdot f \cdot G_{fuel}^2} = \frac{A_{fuel}}{A_k} = f_6\left(A_k, G_{fuel}, \sigma, f, \Sigma\right) \tag{3.16}$$

де $n_{кв}$, $M_{кр}$, G_{fuel}, G_k, H_u, A_k, δ, σ, $\Sigma(A_k \cdot G_k)$, $\Sigma(G_k)$, $\Sigma(A_k)$ – впливаючі фактори; $\partial K_{fe}/\partial G_{fuel}$, $\partial K_{fe}/\partial G_k$, $\Sigma(A_k \cdot G_k)$, $\partial K_{fe}/\partial \Sigma(A_k \cdot G_k)$, $\partial G_k/\partial G_{fuel}$, $\partial \Sigma(A_k \cdot G_k)/\partial G_{fuel}$, $\partial \Sigma(G_k)/\partial G_{fuel}$ – частинні похідні.

Оскільки паливна складова критерію K_{fe} – величина G_{fuel} – являє собою величину, подібну за фізичним змістом до усіх представників екологічної складової критерію K_{fe} і вимірюється у тих самих одиницях – кг/год, то логічним є охарактеризувати шукану вагомість паливної складової критерію K_{fe} величиною, по-перше, ідентичною за математичним змістом величині A_k, та, по-друге, співвіднесенною з її значенням базового полютанта $A_{CO} = 1{,}0$. Таку величину будемо позначати A_{fuel}.

На третьому етапі дослідження раціональним є відшукання формули для визначення значення величини A_{fuel}. Пропонується таку формулу отримати шляхом прирівняння формул для частинних похідних $\partial K_{fe}/\partial G_{fuel}$ (3.13) та $\partial K_{fe}/\partial G_k$ (3.14), при цьому у формулі (3.14) величина A_k заміняється на величину A_{fuel} – див. формулу (3.17). Таким чином отримано формулу (3.18). Як видно з формули (3.18), значення величини A_{fuel} залежить від значень $n_{кв}$, $M_{кр}$, G_{fuel}, G_k, H_u, f, σ, $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ та A_k.

Четвертий етап дослідження полягає у пошуку раціонального фізичного змісту співвідношенню величин паливної та екологічної складової критерію K_{fe} шляхом здійснення математичного аналізу співвідношень A_{fuel}/A_k, $A_{fuel}/\Sigma(A_k)$, $A_{fuel}/(A_{fuel}+\Sigma(A_k))$ за формулами (3.19)–(3.21).

$$\frac{\partial K_{fe}}{\partial G_{fuel}} = \frac{\partial K_{fe}}{\partial G_k} \Rightarrow -\frac{3600 \cdot M_{кр} \cdot n_{кв} \cdot \sigma \cdot f \cdot A_{fuel}}{9550 \cdot H_u \cdot \left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma + G_{fuel}\right)^2} = \\ = -\frac{3600 \cdot M_{кр} \cdot n_{кв}}{9550 \cdot H_u \cdot G_{fuel}^2} \cdot \left(1 + \frac{\sigma \cdot \delta \cdot \Sigma \cdot \left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma + 2 \cdot G_{fuel}\right)}{\left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma + G_{fuel}\right)^2}\right), \tag{3.17}$$

$$A_{fuel}=\frac{\left(G_{fuel}+2\cdot\sigma\cdot f\cdot\Sigma\right)^2-2\cdot\left(\sigma\cdot f\cdot\Sigma\right)^2}{\sigma\cdot f\cdot G_{fuel}^2}=\frac{C}{\sigma\cdot f\cdot G_{fuel}^2}=f_9\left(G_{fuel},\sigma,f,\Sigma\right), \quad (3.18)$$

$$\frac{A_{fuel}}{A_k}=\frac{\partial G_k}{\partial G_{fuel}}=\frac{C}{A_k\cdot\sigma\cdot f\cdot G_{fuel}^2}=f_{10}\left(A_k,G_{fuel},\sigma,f,\Sigma\right); \quad (3.19)$$

$$\frac{A_{fuel}}{\Sigma_A}=\left(\frac{\partial K_{fe}}{\partial G_{fuel}}/\sum_{k=1}^{h}\frac{\partial K_{fe}}{\partial G_k}\right)=\frac{C}{\Sigma_A\cdot\sigma\cdot f\cdot G_{fuel}^2}=f_{11}\left(A_k,G_{fuel},\sigma,f,\Sigma\right); \quad (3.20)$$

$$\frac{A_{fuel}}{\Sigma_A+A_{fuel}}=\frac{C}{\left(\Sigma_A+A_{fuel}\right)\cdot\sigma\cdot f\cdot G_{fuel}^2}=f_{12}\left(A_k,G_{fuel},\sigma,f,\Sigma\right); \quad (3.21)$$

Далі дослідження передбачає здійснення пошуку залежностей значення вагомості паливної складової критерію K_{fe} від параметрів моторного палива (нижчої теплотворної здатності H_u у МДж/кг) та умов експлуатації ПДВЗ (безрозмірного показника відносної небезпеки забруднення на різних територіях σ, безрозмірного коефіцієнта, що враховує характер розсіювання ВГ в атмосфері *f*) розрахунковим шляхом.

Безрозмірний коефіцієнт, використаний у математичному апараті критерію [6], що враховує характер розсіювання ВГ в атмосфері *f*, згідно до наведеного у документі «Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хазяйству загрязнением окружающей среды» [26], визначається за формулою (3.22).

$$f=100/\left(100+\varphi\cdot h\right)\cdot 4/\left(1+u\right); \quad (3.22)$$

$$\varphi=1+\Delta T/75; \quad (3.23)$$

де φ – безрозмірна поправка на підйом факела викидів у атмосфері (див. формулу (3.23)); h – геометрична висота витоку джерела викидів по відношенню до зони активного забруднення, м; u – середньорічне значення модуля швидкості віьру на рівні флюгера, м/с (при невизначеності цього параметру приймається значення 3 м/с); ΔT – середньорічне значення різниці температур у витоці джерела викидів та у повітрі НПС, °С. Результати розрахунку значень коефіцієнтів *f*, φ у залежності від значень величин h, ΔT, u наведено у [4].

При варіюванні значенням нижчої теплотворної здатності моторного палива H_u моделюється переведення ПДВЗ на споживанні альтернативного палива. Значен-

ня величини H_u для різних видів моторного палива, отримані з джерела [113], зведено до табл. 3.1. Для традиційного дизельного палива H_u = 42,7 МДж/кг.

Таблиця 3.1 – Значення величини H_u різних видів моторного палива [113]

Паливо	**Бензин**	**Керосин**	**Дизпаливо**	**Нафта**	**Етиловий спирт**
H_u, **МДж/кг**	45	44	42,7	46	27
Паливо	**Природний газ**	**Метан**	**Водень**	**Ріпакова олія**	**Мазут**
H_u, **МДж/кг**	47	50	120	37	41

При цьому задля додержання принципу незмінності значень ефективної потужності ПДВЗ (див. формулу (3.24)), значення величин G_{fuel} та G_k визначаються за формулами (3.25) та (3.26).

$$N_e = M_{кр} \cdot n_{кв} / 9550 = G_{fuel} / g_e = G_{fuel} \cdot H_u \cdot \eta_e / 3600; \quad (3.24)$$

$$N_{eTf} = N_{eAf} \Rightarrow G_{Af} = G_{Tf} \cdot H_{uTf} / H_{uAf}; \quad (3.25)$$

$$\left(G_k / G_{fuel}\right)_{Tf} = \left(G_k / G_{fuel}\right)_{Af} \Rightarrow G_{kAf} = G_{kTf} \cdot G_{Af} / G_{Tf} = G_{kTf} \cdot H_{uTf} / H_{uAf}; \quad (3.26)$$

Результати застосування такого підходу для базового та крайніх значень величини H_u проілюстровано на рис. 3.1 та у [4]. На рис. 3.1 видно, що зміна значення величини H_u при застосуванні запропонованого підходу на значення критерію K_{fe} впливу не чинить.

Таблиця 3.2 – Параметри впливаючих факторів як вихідних даних

Величина	**Од. вим.**	**Значення**				
σ	**–**	0,025	0,5	1,0	4,0	10,0
f	**–**	0,5	1,0	1,5	2,0	
H_u	**МДж/кг**	25	42,7	125		

На рис. 3.2 наведено розподіл значень критерію K_{fe} по всьому полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 у виді тривимірних графіків. Ці значення отримано у [3] та використано у якості вихідних даних для розрахункового дослідження. Рекомендовані значення величини безрозмірного показника відносної небезпеки забруднення на різних територіях σ наведено у документі [26]. У цьому дослідженні використано розроблений у дисертації і описаний у [3] спосіб отримання порежимних значень критерію K_{fe} «Ненульового холостого ходу». Значення крутного моменту і ефективної потужності, надані режимами характеристики холостого ходу автотракторного дизеля 2Ч10,5/12, містяться у [4].

Таким чином, впливаючі фактори, що характеризують параметри моторного палива і умови експлуатації ПДВЗ, у даному дослідженні варіюватимуться у межах їх крайніх можливих значень (згідно до рекомендацій у джерелах [6, 26, 113]), а саме (див. табл. 6.2): H_u = 25…125 МДж/кг; f = 0,5…2,0 при φ = 2,33…5,0 при h = 0,5 …4,0 м, u = 1…5 м/с, ΔT = 100…300 °С; σ = 0,025…10,0. При цьому, у монографії [6] усі розрахунки наведено для випадку H_u = 42,7 МДж/кг; f = 1,0; σ = 1,0. Такий варіант прийнято за базовий.

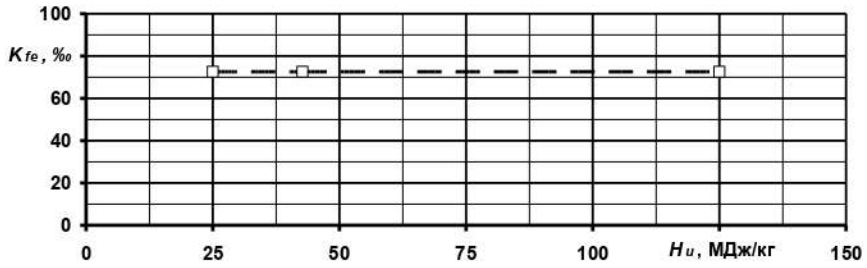
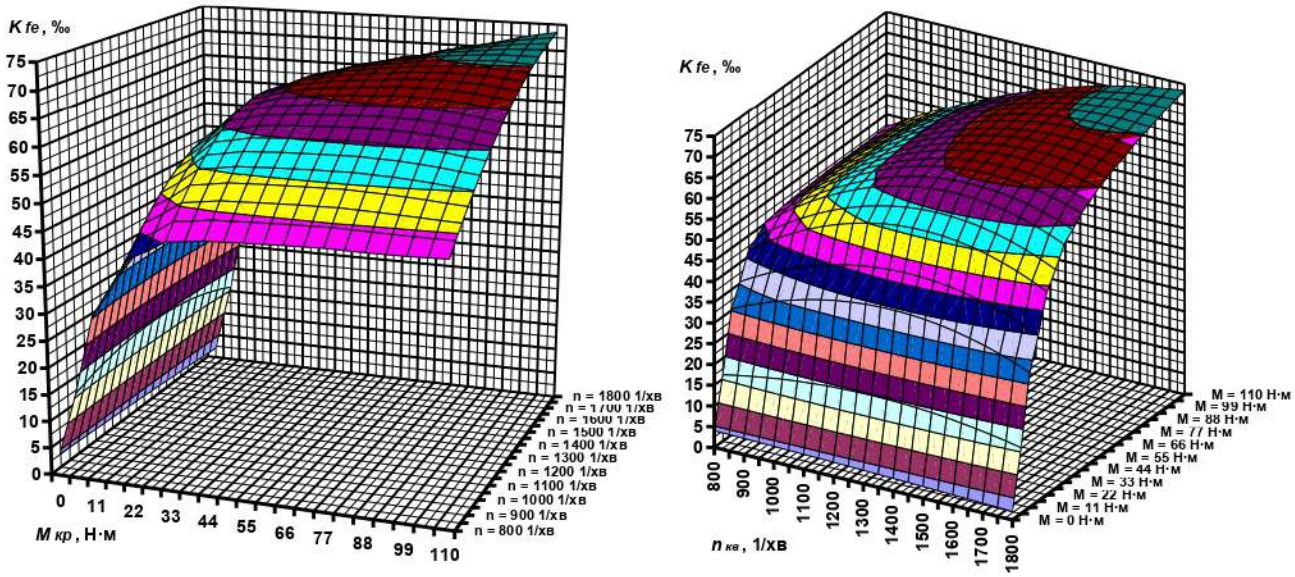


Рисунок 3.1 – Графік залежності осереднених значень критерію K_{fe} для базових значень коефіцієнтів σ та f для різних видів моторного палива



а б

Рисунок 3.2 –Розподіл значень критерію K_{fe} по всьому полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12

3.3.3 Результати оцінювання вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію

На рис. 3.3 розміщено результати розрахункового оцінювання значень величин A_{fuel}, A_{fuel}/A_{CO}, $A_{fuel}/\Sigma A_k$ і $A_{fuel}/\Sigma(A_k+A_{fuel})$ для базового варіанту розрахунку та

всього поля робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 у вигляді тривимірних графіків залежностей значень вказаних величин від значень координат поля робочих режимів для базового варіанту розрахунку, тобто при H_u = 42,7 МДж/кг, σ = 1,0 і f = 1,0.

На рис. 3.3,а видно, що значення коефіцієнта вагомості паливної складової критерію K_{fe} A_{fuel}, а також рівна їй за значенням величина відношення його значення до значення коефіцієнта вагомості еталонного законодавчо нормованого полютанта A_{fuel}/A_{CO}, розподіляються по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 нерівномірно, а їх залежність від значень координат цього поля є нелінійною. Графіки таких залежностей є сімейством кубічних парабол. Коефіцієнт вагомості A_{fuel} набуває значень у діапазоні від 6,1 ($n_{кв}$ = 1200 rpm, $M_{кр}$ = 0,55 Н·м – режим А) до 60,0 ($n_{кв}$ = 800 rpm і $M_{кр}$ = 88 Н·м – режим Б), тобто зростає у 9,8 разів зі зростанням величини N_e у 450 разів, величини $M_{кр}$ у 200 разів, величини $n_{кв}$ у 2,3 рази, величини G_{fuel} у 9,8 разів, величини $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ у 21,7 разів.

На рис. 3.3,б видно, що значення величини $A_{fuel}/\Sigma(A_k)$, тобто відношення значення коефіцієнта вагомості паливної складової критерію K_{fe} до значення суми коефіцієнтів вагомості усіх законодавчо нормованих полютантів, розподіляються по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 так само, як і величина A_{fuel}, приймає значення від 0,025 (режим А) до 0,245 (режим Б), тобто зростає у 9,8 разів від мінімального значення ефективної потужності ПДВЗ до максимального.

На рис. 3.3,в видно, що значення величини $A_{fuel}/\Sigma(A_k+A_{fuel})$ розподіляються по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 нерівномірно, а їх залежність від значень координат цього поля є нелінійною. Такі значення розподіляються по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 так само, як і величина A_{fuel}. Величина відношення коефіцієнтів вагомості $A_{fuel}/\Sigma(A_k+A_{fuel})$ набуває значень у діапазоні від 0,024 (режим А) до 0,197 (режим Б), тобто зростає у 8,2 рази при зміні ефективної потужності ПДВЗ у діапазоні від мінімального значення до максимального її значення.

На рис. 3.3,г наведено структуру вагомості впливаючих чинників ЕНБ у критерії K_{fe} з урахуванням отриманих значень вагомості витрат палива A_{fuel}.

З наведених вище міркувань випливає, що можна виділити три наближення у визначенні шуканого значення коефіцієнта вагомості паливної складової критерію

K_{fe}: 1) перше (найгрубіше) – усереднене по всьому полю робочих режимів значення величин A_{fuel}, A_{fuel}/A_{CO}, $A_{fuel}/\Sigma(A_k)$ і $A_{fuel}/\Sigma(A_k+A_{fuel})$; 2) друге (звичайної точності) – як функція значення ефективної потужності ПДВЗ – величини N_e; 3) третє (найточніше) – апроксимована залежність від координат поля робочих режимів ПДВЗ – величин $n_{кв}$ і $M_{кр}$. Реалізація третього наближення відображена на рис. 3.3.

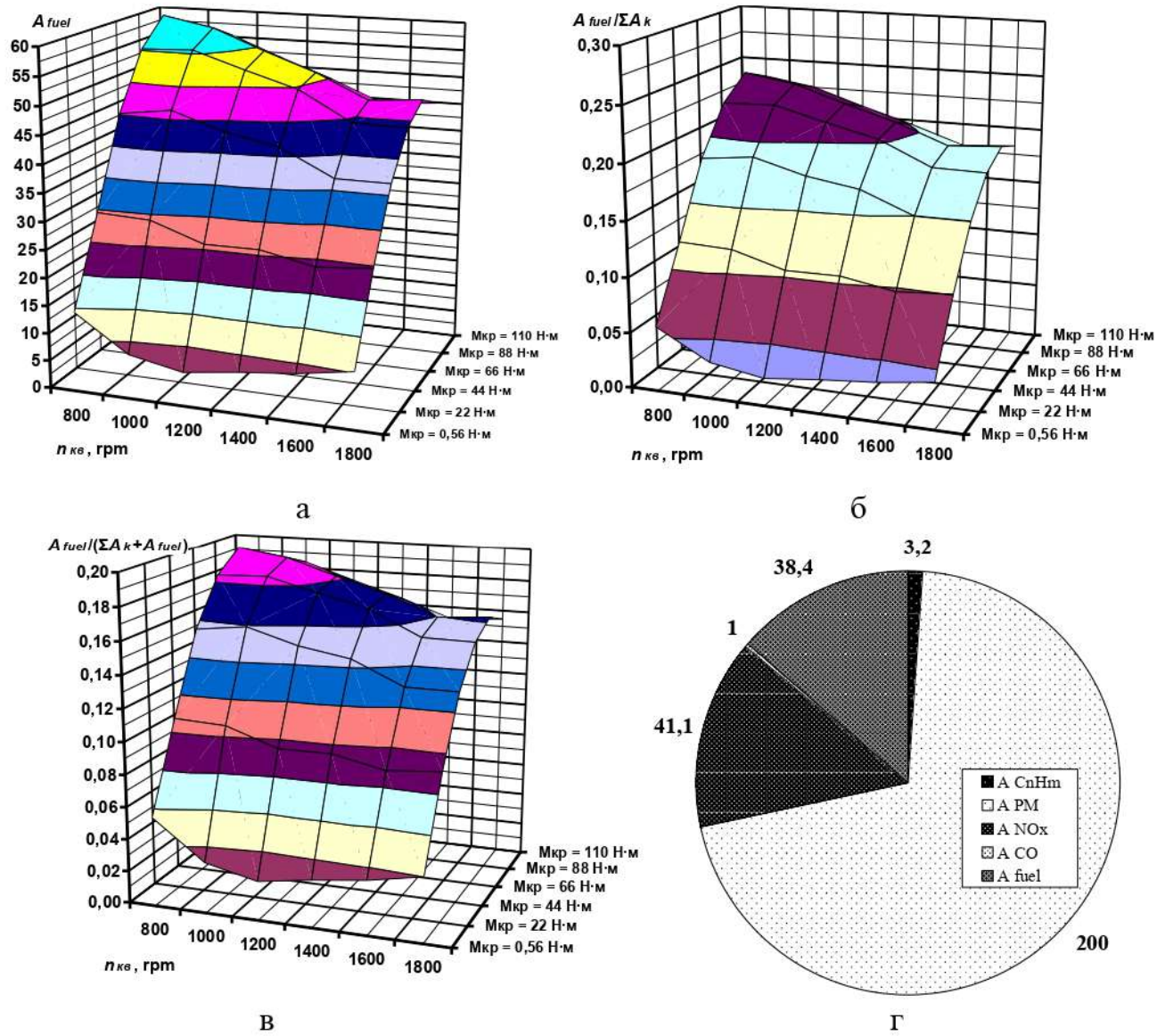


Рисунок 3.3 – Графіки залежності значень величини A_{fuel} (а), $A_{fuel}/\Sigma A_k$ (б) та $A_{fuel}/\Sigma(A_k+A_{fuel})$ (в) від координат поля робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для H_u = 42,7 МДж/кг, σ = 1,0 і f = 1,0 та структура вагомості чинників екологічної небезпеки у критерії K_{fe} з урахуванням вагомості A_{fuel} (г)

Для реалізації першого наближення можна використовувати такі усереднені по всьому полю робочих режимів значення величин: $A_{fuel} = A_{fuel}/A_{CO} = 38{,}4$;

$A_{fuel}/\Sigma A_k = 0{,}157$ та $A_{fuel}/\Sigma(A_k+A_{fuel}) = 0{,}132$. Для реалізації другого наближення побудовано графіки залежності значення величин A_{fuel}, A_{fuel}/A_{CO} від значень ефективної потужності ПДВЗ N_e, викладені у [4].

У дослідженні також виконано виявлення впливу на значення вагомості паливної складової A_{fuel} комплексного паливно-екологічного критерію K_{fe}, самого критерію та його паливної Z_f та екологічної Z_e складових параметрів моторного палива (тобто значення величини H_u) і умов експлуатації ПДВЗ (тобто значення коефіцієнту σ і показника f), результати якого описано у [4]. Такий вплив проаналізовано для всього діапазону можливих значень величин H_u, σ та f, проілюстровано графіками залежності, які описано методом найменших квадратів формулами.

3.4 Розширення номенклатури врахованих математичним апаратом комплексного паливно-екологічного критерію чинників екологічної небезпеки відповідно до розробленого класифікатора

3.4.1 Загальний підхід до врахування викиду полютанта з потоком відпрацьованих газів при комплексному критеріальному оцінюванні

Врахування викиду полютанта – G(k) у складі потоку ВГ дизельного ПДВЗ пропонується за допомогою доповнення формули (3.27) як частини формули (3.28), для визначення величини $\Sigma(A(\text{k})\cdot G(\text{k}))$ доданком $A(\text{k})\cdot G(\text{k})$, що є добутком величини безрозмірного індексу відносної агресивності k-го полютанта A(k) та величини масового годинного викиду k-го полютанта G(k).

$$K_{fe} = \eta_e \cdot (1-\beta) = \frac{3600}{H_u \cdot g_e} \cdot \left(1 - \frac{Z_e(P_f)}{Z_f(P_f) + Z_e(P_f)}\right) = \\ = \frac{3600 \cdot N_e(M_{кр}, n_{кв})}{H_u \cdot G_{fuel}} \cdot \frac{1}{1 + \sigma \cdot f \cdot \sum_{m=1}^{h}(A_k \cdot G_k)/G_{fuel}}, \text{‰}. \qquad (3.27)$$

$$\sum_{m=1}^{h}(A_k \cdot G_k) = A(PM)\cdot G(PM) + A(NO_x)\cdot G(NO_x) + \\ + A(C_nH_m)\cdot G(C_nH_m) + A(CO)\cdot G(CO) + A(k)\cdot G(k), \text{ кг/год}. \qquad (3.28)$$

Вагомість величини викиду G(k) у порівнянні з вагомістю викиду еталонного полютанта G(CO) визначає величина A(k), що згідно до методики [26] визначається

формулами (3.29) і (3.30).

$$A_k = a_k \cdot \alpha_k \cdot \beta_k \cdot \delta_k, \tag{3.29}$$

$$a_k = \sqrt{ГДК_{сд}(CO) \cdot ГДК_{рз}(CO) / \left(ГДК_{сд}(k) \cdot ГДК_{рз}(k)\right)}, \tag{3.30}$$

де a_k – показник відносної небезпеки присутності k-го газоподібного чи аерозольного полютанта у повітрі, яким дихає людина; α_k – поправка, що враховує ймовірність накопичення вихідного k-го газоподібного чи аерозольного полютанта у компонентах НПС, трофічних ланцюгах та його надходження в організм людини неінгаляційним шляхом; β_k – поправка, що враховує ймовірність утворення за участю вихідного викинутого у атмосферу k-го газоподібного чи аерозольного полютанта інших (вторинних) полютантів, більш шкідливих, аніж вихідний; δ_k – поправка, що враховує дію k-го газоподібного чи аерозольного полютанта на інших реципієнтів, окрім людини; $ГДК_{сд}(CO)$ і $ГДК_{рз}(CO)$, $ГДК_{сд}(k)$ і $ГДК_{рз}(k)$ – гранично допустима концентрація еталонного (CO, оскільки A_{CO}= 1,0, $ГДК_{сд}(CO)$ = 3,0 мг/м^3, $ГДК_{рз}(CO)$ = 20,0 мг/м^3) та k-го полютанта у повітрі середньодобова і максимальна разова, мг/м^3.

У джерелі [11] міститься інформація щодо складових формул (3.29) і (3.30), отримана з аналізу вмісту джерела [24], та зведена до табл. 3.3. Структура вагомості чинників ЕНБ базового варіанту математичного апарату критерію K_{fe} наведена на рис. 3.4. У якості моделі експлуатації автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 [67], на прикладі якого виконувались усі дослідження у цій дисертаційній роботі, у даній серії досліджень використано стаціонарний стандартизований випробувальний цикл ESC, описаний у Правилах ЄЕК ООН № 49 [21].

Таблиця 3.3 – Параметри полютантів у складі ВГ дизельного ПДВЗ [11]

Полютант	**Показник**				
	a_k	α_k	β_k	δ_k	A_k
CO	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C_nH_m	0,63	1,0	5,0	1,0	3,16
NO_2	27,4	1,0	1,0	1,5	41,1
SO_2	11,0	1,0	1,0	2,0	22,0
C	17,5	2,0	1,0	1,2	41,5
PM	–	–	–	–	200

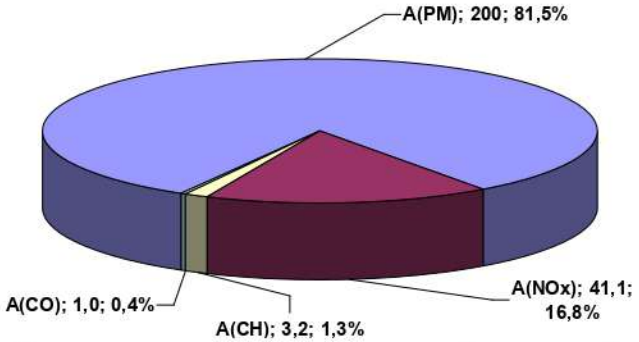


Рисунок 3.4 – Структура вагомості чинників екологічної небезпеки базового варіанту математичного апарату критерію K_{fe}

3.4.2 Врахування викидів оксидів сірки з потоком відпрацьованих газів

У джерелі [4] розроблено і описано методику визначення значення викиду оксидів сірки з потоком ВГ $G(SO_x)$ у залежності від вмісту сірки у моторному паливі й оливі, значення витрати оливи на угар та поточного технічного стану ПДВЗ за даними з джерел [115–129]. Результати її застосування для базового варіанту дослідження проілюстровано на рис. 3.5,а. Структура вагомості чинників ЕНБ варіанту математичного апарату критерію K_{fe} з урахуванням викиду оксидів сірки наведена на рис. 3.5,е.

Досліджено такі варіанти: Варіант А «Еталонний», без врахування величини $G(SO_x)$, за якого C_{Sf} = 0 %, C_{So} = 0 %, C_{fob} = 0 %, k_{SOx} = 0. Варіант В «Базовий», величина $G(SO_x)$ враховується для типового випадку для дизеля 2Ч10,5/12, за C_{Sf} = = 0,5 %, C_{So} = 0,5 %, C_{fob} = 0,5 %, k_{SOx} = 0,015. Варіант С «Оптимістичний», величина $G(SO_x)$ враховується для найвигіднішого з екологічної точки зору випадку, за C_{Sf} = = 0,05 %, C_{So} = 0,1 %, C_{fob} = 0 %, k_{SOx} = 0,001. Варіант D «Песимістичний», величина $G(SO_x)$ враховується для найменш сприятливого з екологічної точки зору випадку, за C_{Sf} = 5,0 %, C_{So} = 1,0 %, C_{fob} = 5,0 %, k_{SOx} = 0,200.

Результати розрахункового дослідження значень викиду $G(SO_x)$ та критерію K_{fe} для усіх варіантів та циклу випробувань ESC проілюстровано на рис. 3.5,б–г. Результати дослідження залежності середньоексплуатаційного значення критерію K_{fe} від значення запропонованого коефіцієнта викиду сірки $k(SO_x)$ – на рис. 3.5,д. На рис. 3.5,б–г видно, що за значенням критерію усі варіанти, де враховується викид оксидів сірки поступаються варіанту А. Вплив врахування викиду оксидів сірки на

середньоексплуатаційні значення величини K_{fe} у порівнянні з варіантом А для варіанту В складає –6,5 %, варіанту С –0,5 %, варіанту D –48 %.

3.4.3 Врахування викидів діоксиду вуглецю як полютанта з потоком відпрацьованих газів

У джерелі [4] розроблено і описано методику визначення значення викиду діоксиду вуглецю як полютанту з потоком ВГ $G(CO_2)$ у залежності від перебігу процесу згоряння у ПДВЗ та компонентного складу моторного палива, а також визначено значення величини $A(CO_2)$ як полютанту, що склало 0,002, за даними з джерел [23, 162, 130–134]. Результати її застосування для базового варіанту дослідження проілюстровано на рис. 3.6,а. Структура вагомості чинників ЕНБ варіанту математичного апарату критерію K_{fe} з урахуванням викиду викидів діоксиду вуглецю як полютанту наведена на рис. 3.6,д.

Досліджено такі варіанти: Варіант А – еталонний – без урахування величин $G(CO_2)$ і $G(SO_x)$, Варіант В – з урахуванням величини $G(SO_x)$, Варіант С – з урахуванням величини $G(CO_2)$, Варіант D – з урахуванням величин $G(CO_2)$ і $G(SO_x)$.

На рис. 3.6,б–г видно, що за значенням критерію усі варіанти, де враховується викид діоксиду вуглецю як полютанта поступаються еталонному варіанту А незначно – до 0,15 %. Вплив врахування викиду діоксиду вуглецю як полютанта на середньоексплуатаційні значення величини K_{fe} у порівнянні з варіантом А для варіанту В складає –6,6 %, варіанту С –0,1 %, варіанту D –6,7 %.

3.4.4 Врахування викидів діоксиду вуглецю з потоком відпрацьованих газів як парникового газу

У роботі [4] розроблено і описано методику визначення значення викиду діоксиду вуглецю як парникового газу з потоком ВГ $G(CO_2)$ у залежності від структури споживання різних видів вуглецевовмісного палива у світі та світового балансу викидів парникових газів антропогенного і природного походження, а також визначено значення величини $A(CO_2)$ як парникового газу, що склало $4{,}0 \cdot 10^{-5}$, за даними з джерел [135–137]. Результати її застосування для базового варіанту

дослідження проілюстровано на рис. 3.7,а. Структура вагомості чинників ЕНБ варіанту математичного апарату критерію K_{fe} з урахуванням викиду викидів діоксиду вуглецю як парникового газу наведена на рис. 3.7,е.

Досліджено такі варіанти: Варіант А – еталонний – без урахування викиду CO_2, Варіант В – полютант – врахування викиду CO_2 як полютанта, Варіант С – парниковий газ – врахування викиду CO_2 як парникового газу, Варіант D – повний – врахування викиду CO_2 як полютанта і як парникового газу.

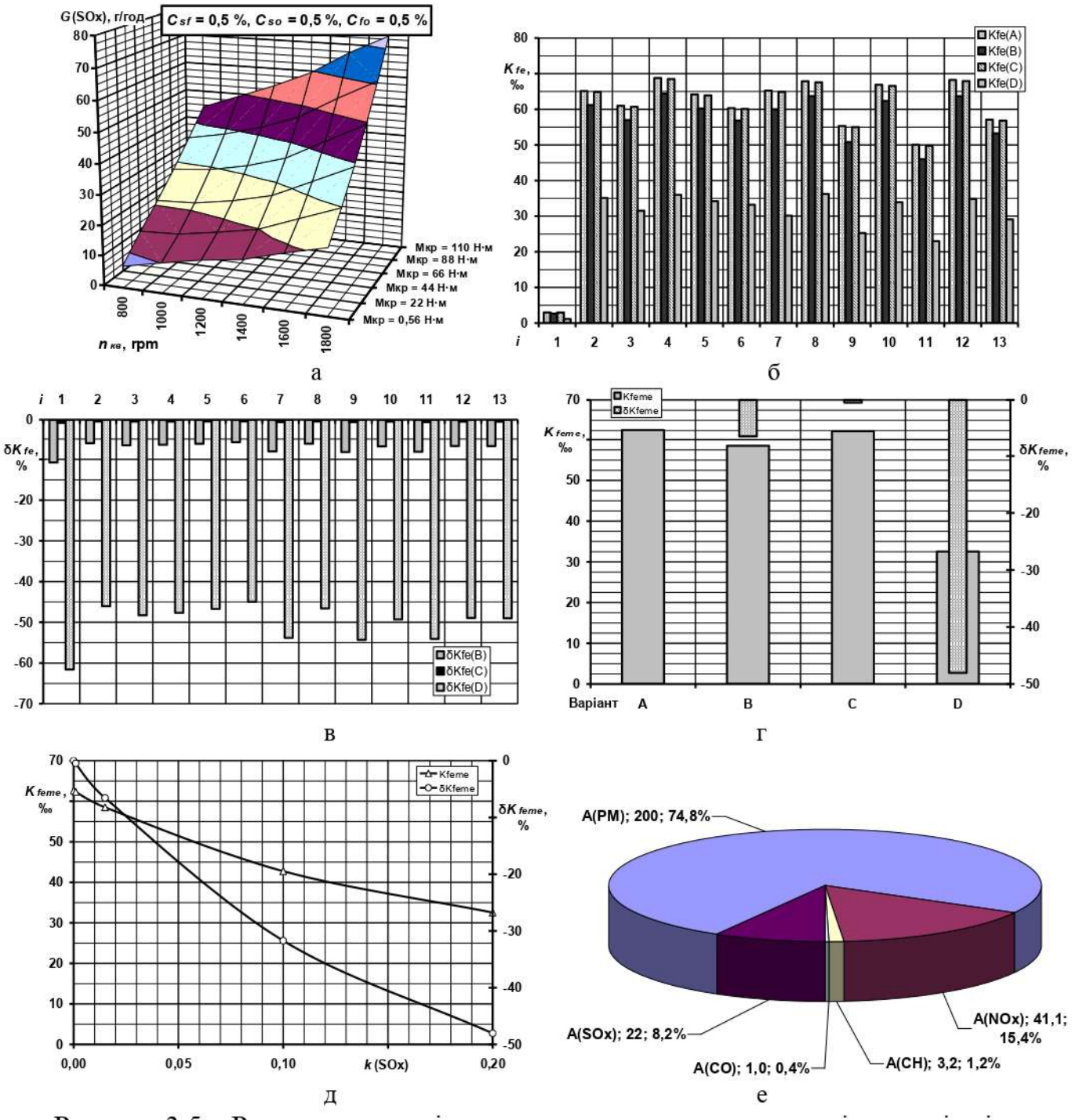


Рисунок 3.5 – Результати дослідження щодо врахування викидів оксидів сірки з потоком ВГ у критеріальному оцінюванні

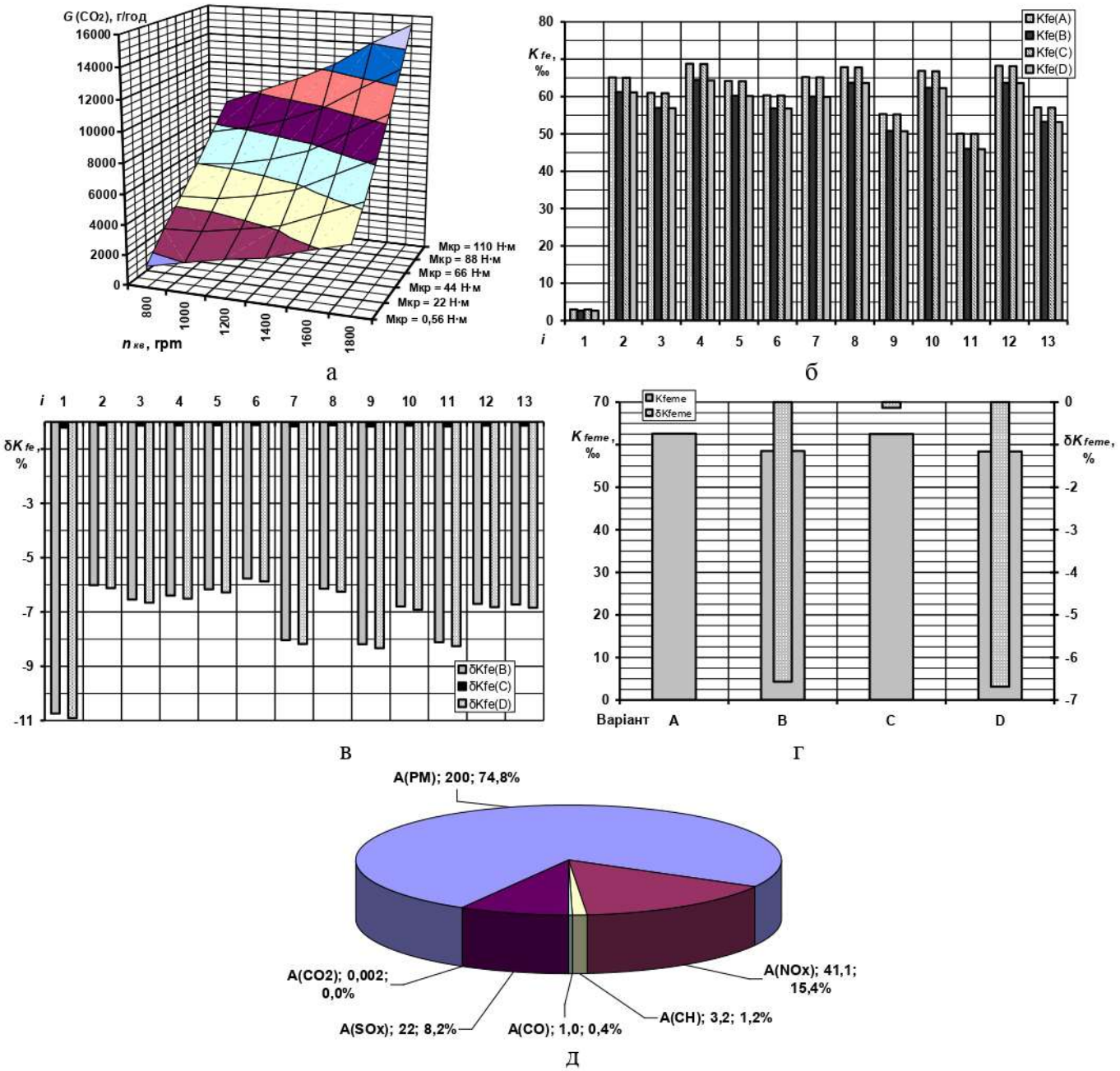


Рисунок 3.6 – Результати дослідження щодо врахування викидів діоксиду вуглецю з потоком ВГ як полютанту в критеріальному оцінюванні

На рис. 6.7,б–г видно, що за значенням критерію усі варіанти, де враховується викид діоксиду вуглецю як парникового газу поступаються еталонному варіанту А вкрай незначно – до 0,01 %. Вплив врахування викиду діоксиду вуглецю як парникового газу на середньоексплуатаційні значення величини K_{fe} у порівнянні з варіантом А для варіанту В складає –0,135 %, варіанту С –0,003 %, варіанту D –0,138 %.

Результати дослідження залежності середньоексплуатаційного значення критерію K_{fe} від значення запропонованого коефіцієнта викиду парникового газу $k(CO_2)$ – на рис. 6.12,д.

3.4.5 Врахування викидів бенз(а)пірену та поліциклічних ароматичних вуглеводнів з потоком відпрацьованих газів і застосування вдосконаленого математичного апарату інтегрального індексу екологохімічної оцінки

У праці [4] розроблено і описано методику визначення значення викиду Б(а)П та інших ПАВ з потоком ВГ G(B(a)P) та G(PAH) на основі вдосконаленого підходу проф. Павла Каніла, описаного у роботах [11, 138–149], а також визначено значення величини A(B(a)P) та A(PAH), що склало відповідно $12{,}6\cdot10^5$ та $12{,}6\cdot10^3$ результати її застосування для базового варіанту дослідження проілюстровано на рис. 3.8,а–б. Структура вагомості чинників ЕНБ варіанту математичного апарату критерію K_{fe} з урахуванням викиду викидів Б(а)П та інших ПАВ наведена на рис. 3.9.

Досліджено такі варіанти: Варіант А – еталонний – без урахування величин G(Б(а)П) і G(PAH), Варіант В – з урахуванням величини G(B(a)P), що розподіляється по полю робочих режимів дизеля аналогічно величині $G(C_nH_m)$, Варіант С – з урахуванням величини A(B(a)P) та A(PAH), що розподіляються по полю робочих режимів дизеля аналогічно величині $G(C_nH_m)$, Варіант D – з урахуванням величини G(B(a)P), що розподіляється по полю робочих режимів дизеля аналогічно величині G(PM), Варіант Е – з урахуванням величини G(B(a)P) та G(PAH), що розподіляються по полю робочих режимів дизеля аналогічно величині G(PM).

На рис. 3.8,г–е видно, що за значенням критерію усі варіанти, де враховується викид Б(а)П та інших ПАВ поступаються еталонному варіанту А вкрай суттєво – від 20 до 90 %. Вплив врахування викиду діоксиду вуглецю як парникового газу на середньоексплуатаційні значення величини K_{fe} у порівнянні з варіантом А для варіанту В складає –31,0 %, варіанту С –33,1 %, варіанту D – 30,2 %, варіанту Е –32,0.

Також у розділі проаналізовано, вдосконалено і застосовано математичний апарат інтегрального індексу екологохімічного оцінювання F як одної з альтернатив комплексного паливно-екологічного критерію, за формулою (3.31), результати чого проілюстровано на рис. 3.8,в.

$$F_j = 10^{-3} \cdot \left\{ \left(\frac{M_{CO}}{[CO]} + \frac{M_{CH}}{[CH]} + a \cdot \frac{M_{NO_2}}{[NO_2]} + b \cdot \frac{M_{Сж}}{[Сж]} \right) + \left(c \cdot \frac{M_{SO_2}}{[SO_2]} + d \cdot \frac{\Sigma KA_{(ВГ)}}{[Б(a)П]} \right) \right\}_{ВИП} \quad (3.31)$$

де $[i] = [ГДК_i]_{СД}$; $a = 3{,}0$; $b = 3{,}0$; $c = 2{,}0$; $d = 4{,}0$ – коефіцієнти, що враховують подальше посилення сумарного впливу токсичних і канцерогенних забруднюючих речовин у складі ВГ ПДВЗ на людину.

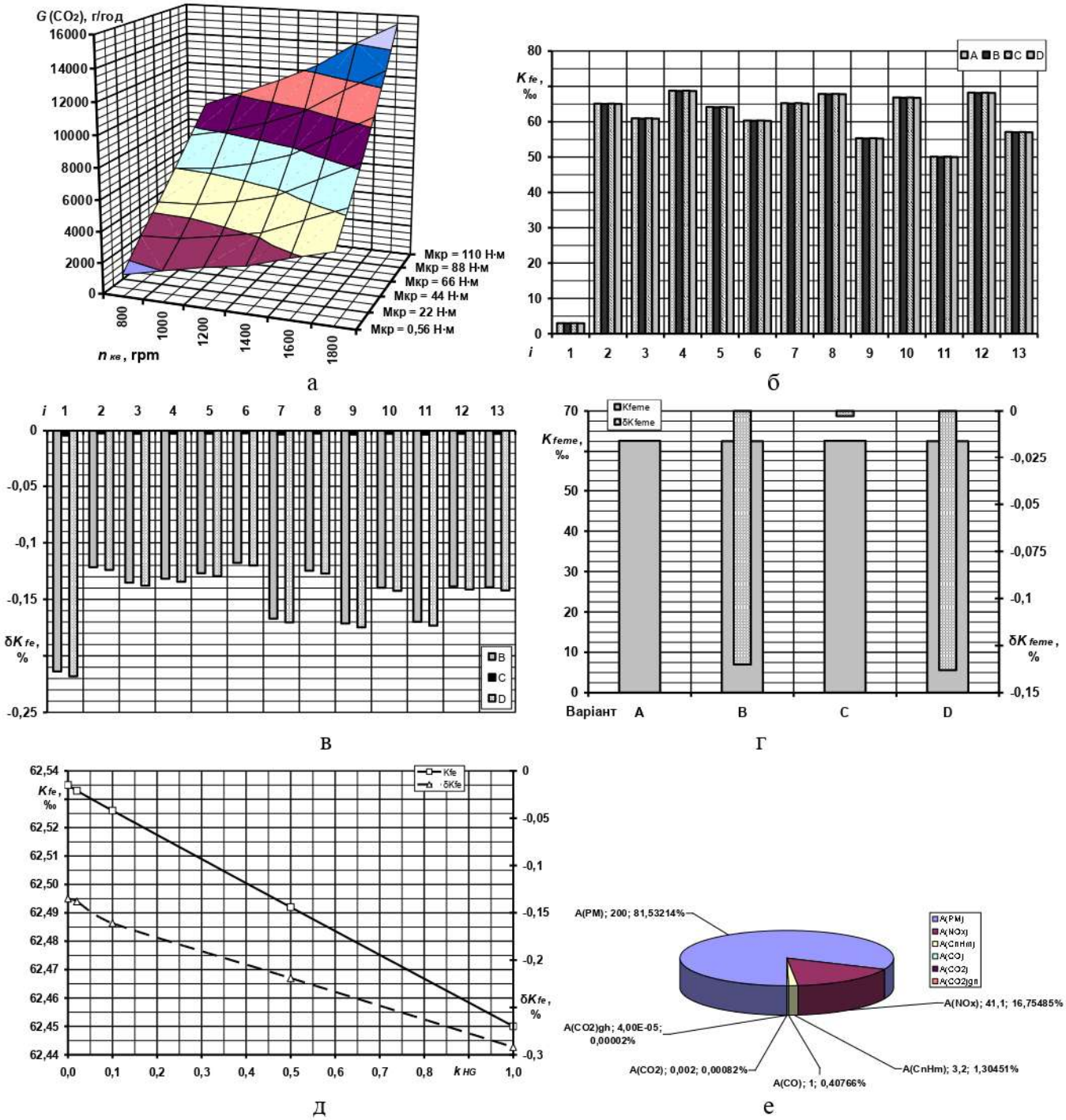


Рисунок 3.7 – Результати дослідження щодо врахування викидів діоксиду вуглецю як парникового газу з потоком ВГ в критеріальному оцінюванні

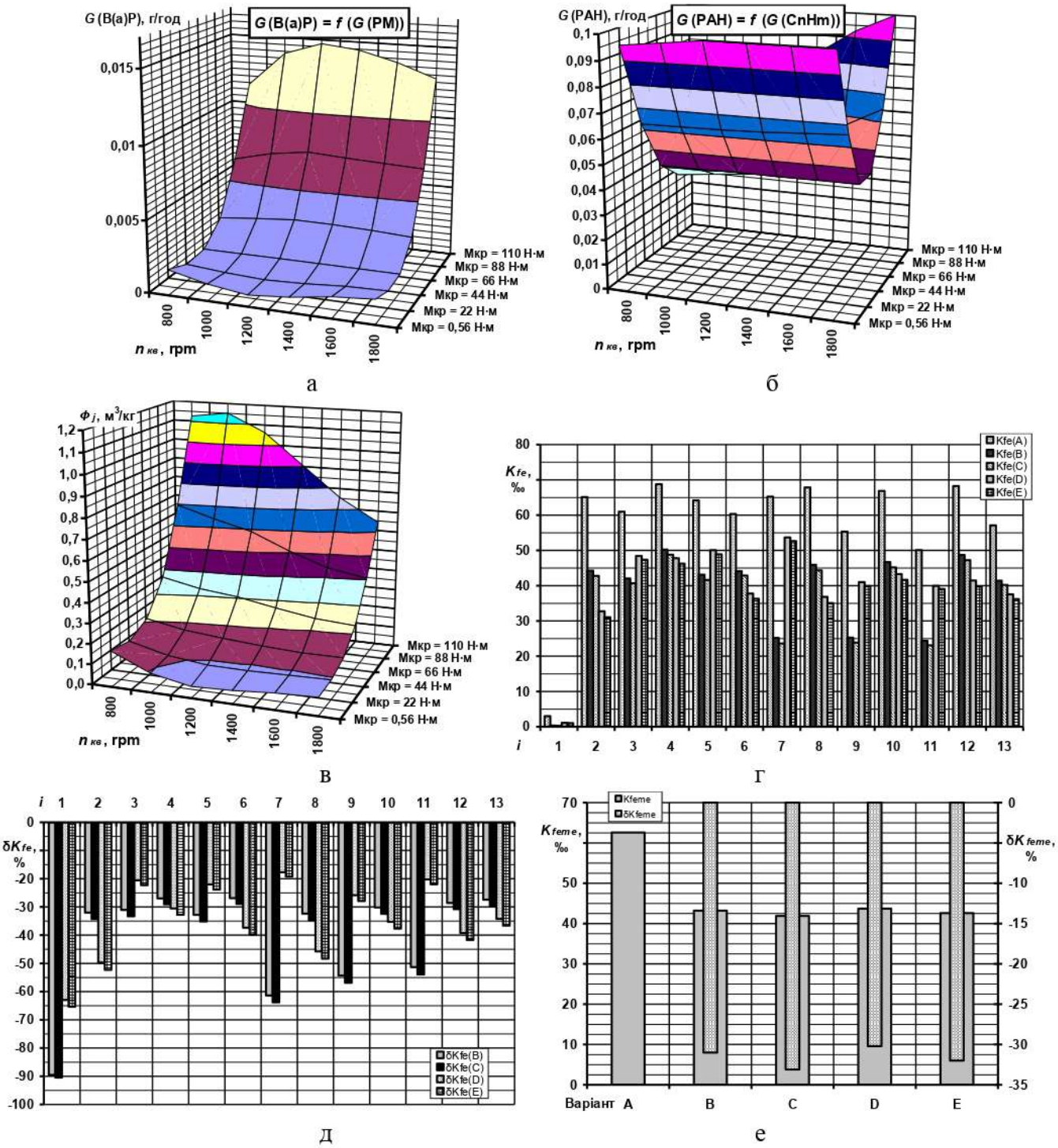


Рисунок 3.8 – Результати дослідження щодо врахування викидів Б(а)П та інших ПАВ з потоком ВГ в критеріальному оцінюванні та результати розрахунку значень інтегрального індексу екологохімічної оцінки

На рис. 3.8,в видно, що максимального значення критерій $F = 1{,}029$ досягає на режимі максимального крутного моменту, а мінімального $F = 0{,}091$ – на режимі з малою ефективною потужністю, при цьому на режимі номінальної ефективної потужності $F = 0{,}500$, а на режимі мінімального холостого ходу $F = 0{,}178$. Середньоекс-

плуанаційним значенням критерію F для циклу ESC є 0,373. Зауважимо, що зі структури формули (3.31) видно, що чим більші значення приймає критерій F, тим нижчим є рівень ЕБ процесу експлуатації ПДВЗ на окремому режимі роботи, на відміну від критеріїв K_{fe} та D.

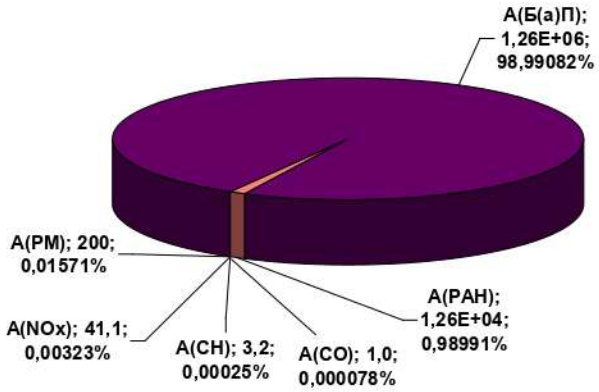


Рисунок 3.9 – Структура вагомості чинників ЕНБ варіанту математичного апарату критерію K_{fe} з урахуванням викиду викидів Б(а)П та інших ПАВ

3.4.6 Врахування викидів аерозолю картерних газів

У праці [4] розроблено і описано методику визначення значення викиду аерозолю картерних газів G(CG) на основі аналізу особливостей перебігу робочого процесу чотиритактного дизеля, роботи системи суфлювання картерних газів ПДВЗ, положень дисципліни «Технічна механіка рідини та газу», показників випаровуваності технічних рідин, поточного технічного стану ПДВЗ, описаного у роботах [150–162], а також визначено значення величини A(CG) і A(EG) як її складової за розробленими методиками – див. формули (3.32) і (3.33), що проілюстровано на рис. 3.10,а–б, результати її застосування для базового варіанту дослідження проілюстровано на рис. 3.10,в. Структура вагомості чинників ЕНБ варіанту математичного апарату критерію K_{fe} з урахуванням викиду викидів аерозолю картерних газів наведена на рис. 3.11,б.

Досліджено такі варіанти: Варіант А – еталонний – без урахування викиду $G(\text{CG}) = G(\text{CG})_{б} = 0$ кг/год; Варіант В – бажаний – викид G(CG) відповідає рекомендованому для справних дизельних ПДВЗ сучасної конструкції, тобто $G(\text{CG}) = G(\text{CG})_{Д21А1} \cdot 0{,}05$; Варіант С – базовий – викид G(CG) відповідає типовому для справного дизеля 2Ч10,5/12, тобто $G(\text{CG}) = G(\text{CG})_{Д21А1}$; Варіант D – граничний – ви-

кид G(CG) відповідає рекомендованому для дизельних ПДВЗ, що перебувають у граничному технічному стані, тобто $G(\mathrm{CG}) = G(\mathrm{CG})_{Д21А1} \cdot 2{,}0$.

Значення A_{CG} пропонується визначати як середнє зважене від значень усіх компонентів картерних газів – ВГ з ТЧ A_{EG}, повітря свіжого заряду A_{air}, пари моторної оливи A_{oil}, тобто за формулою (3.32)

$$A_{CG} = \left(A_{EG} \cdot G_{EG}^{CG} + A_{air} \cdot G_{air}^{CG} + A_{oil} \cdot G_{oil}^{CG}\right) / G_{CG}, \qquad (3.32)$$

де G_{EG}^{CG} – масовий годинний викид ВГ з ТЧ у складі картерних газів,кг/год; G_{air}^{CG} – масовий годинний викид повітря у складі картерних газів, кг/год; G_{oil}^{CG} – масовий годинний викид парів моторної оливи у складі картерних газів, кг/год; G_{CG} – масовий годинний викид картерних газів, кг/год. Величина показника $A_{air} = 0$, величина показника A_{oil} приймається рівною величині такого показника для моторного палива $A_{fuel} = 38{,}4$. Величину A_{EG} пропонується також визначати як середнє зважене значення таких показників для усіх законодавчо нормованих полютантів ВГ, а саме A_{PM}, A_{NOx}, A_{CnHm} і A_{CO}, тобто за формулою (3.33).

$$A_{EG} = \frac{g_{prEG}}{G_{\Sigma k}} = \frac{A_{PM} \cdot G_{PM} + A_{NOx} \cdot G_{NOx} + A_{CnHm} \cdot G_{CnHm} + A_{CO} \cdot G_{CO}}{G_{PM} + G_{NOx} + G_{CnHm} + G_{CO}}, \qquad (3.33)$$

де g_{prEG} – сумарний приведений викид полютантів у складі ВГ, кг/год; $G_{\Sigma k}$ – сумарний викид полютантів у складі ВГ, кг/год.

На рис. 3.10,г–е видно, що за значенням критерію усі варіанти, де враховується викид Б(а)П та інших ПАВ поступаються еталонному варіанту А вкрай суттєво – від 20 до 90 %. Вплив врахування викиду діоксиду вуглецю як парникового газу на середньоексплуатаційні значення величини K_{fe} у порівнянні з варіантом А для варіанту В складає –9,2 %, варіанту С –66,4 %, варіанту D –79,7 %.

Результати дослідження залежності середньоексплуатаційного значення критерію K_{fe} від значення запропонованого коефіцієнта технічного стану дизеля k_{TC} – на рис. 3.11,а.

3.4.7 Врахування викидів випарів моторного палива, спричинених явищами великого та малого дихання резервуарів

У джерелі [4] розроблено і описано методику визначення значення викиду випарів моторного палива, спричинених явищами великого та малого дихання резервуарів G(RB) на основі аналізу режиму роботи ПДВЗ, роботи системи суфлювання парів палива резервуарів, положень дисципліни «Технічна механіка рідини та газу», показників випаровуваності технічних рідин (див. рис. 3.12,а), динаміки зміни добового перепаду температури атмосферного повітря за рік (див. рис. 3.13,д), описаного у роботах [114, 160, 162–169], а також визначено значення величини A(RB), результати її застосування для базового варіанту дослідження проілюстровано на рис. 3.13,а–б. Структура вагомості чинників ЕНБ варіанту математичного апарату критерію K_{fe} з урахуванням викиду випарів моторного палива, спричинених явищами великого та малого дихання резервуарів, наведена на рис. 3.12,б.

Велике дихання резервуару з моторним паливом – це явище викиду пари моторного палива у повітря НПС, що носить залповий характер, зумовлене витісненням газоподібного середовища з резервуару рідиною при його повному чи частковому заповненні (заправці) крізь або відкритий запірний орган резервуара, або спеціальний відповідним чином налаштований клапан у ньому.

Мале дихання резервуару з моторним паливом – це таке ж явище, зумовлене циклічною зміною температурного режиму (зокрема добового коливання температури повітря та барометричного тиску) в експлуатації АТЗ чи резервуару, яка призводить до поперемінної інтенсифікації процесів випаровування та конденсації моторного палива й відповідної зміни значення тиску його насиченої пари у резервуарі, надлишок і нестача якої компенсується шляхом масообміну з повітрям НПС крізь відповідно налаштований двосторонній клапан у запірному органі резервуара.

Досліджено такі варіанти: Варіант А – еталонний – без врахування викиду пари моторного палива як з великим диханням, так і з малим диханням резервуару, Варіант В – великий – з урахуванням викиду пари моторного палива з великим диханням резервуару, Варіант С – малий – з урахуванням викиду пари моторного палива з малим диханням резервуару, Варіант D – повний – з урахуванням викиду пари моторного палива як з великим диханням, так і з малим диханням резервуару.

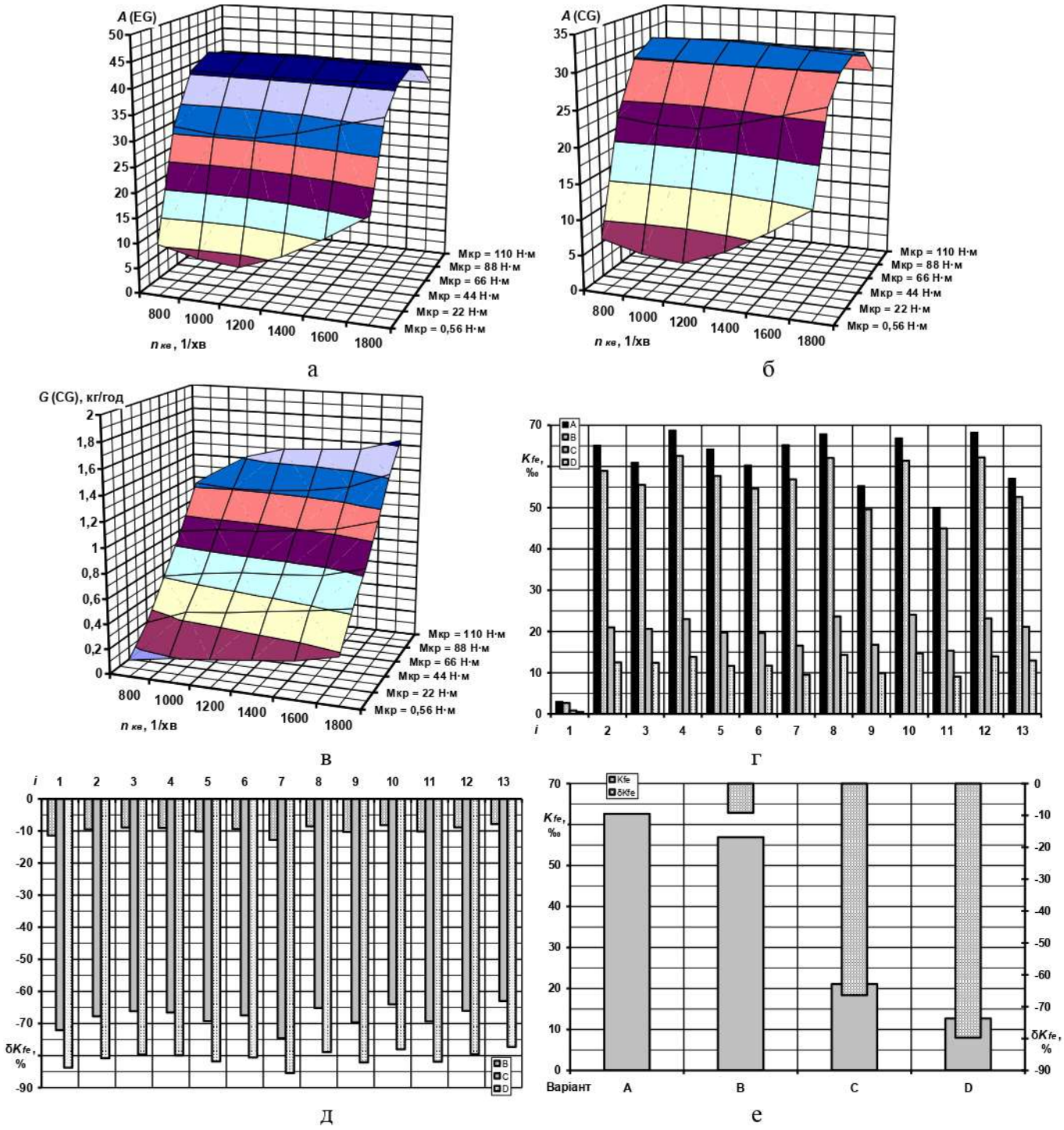
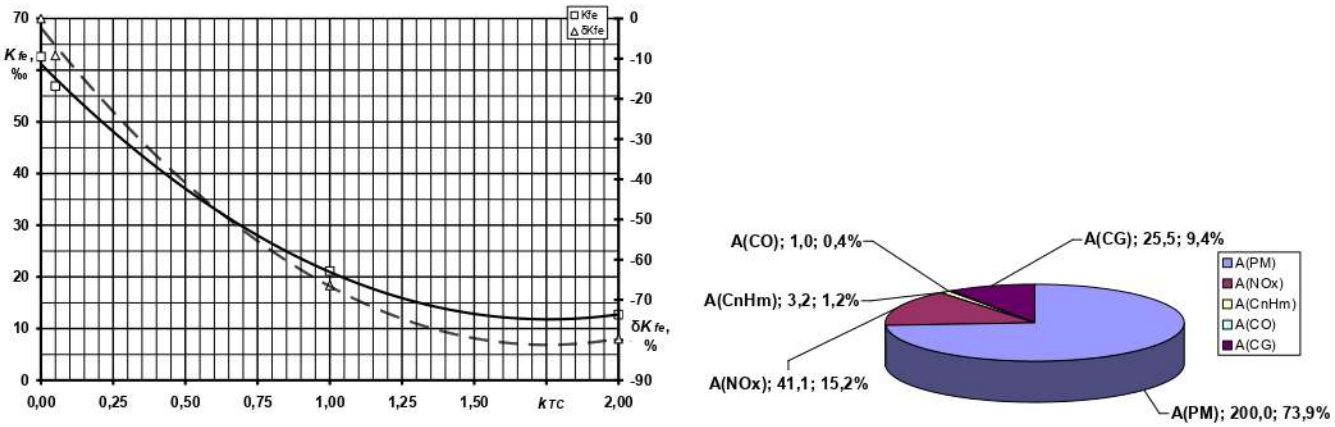


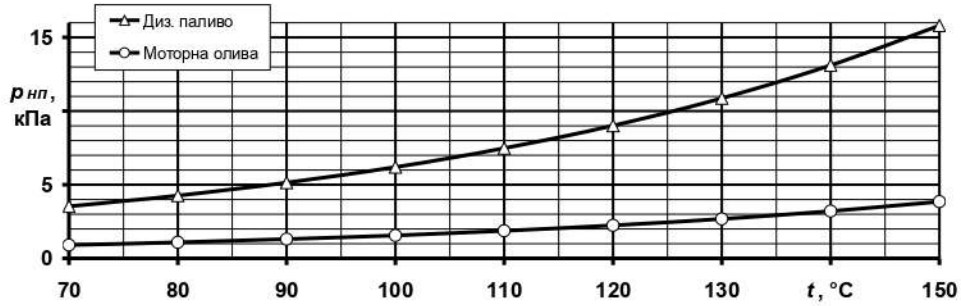
Рисунок 3.10 – Результати дослідження щодо урахування викиду картерних газів в критеріальному оцінюванні

На рис. 3.13,в,г,е видно, що за значенням критерію усі варіанти, де враховується викид випарів моторного палива, спричинених явищами великого та малого дихання резервуарів поступаються еталонному варіанту А помітно – від 5 до 12 %. Вплив врахування викиду діоксиду вуглецю як парникового газу на середньоексплуатаційні значення величини K_{fe} у порівнянні з варіантом А для варіанту В складає – 6,3 %, варіанту С –0,3 %, варіанту D –6,6 %.

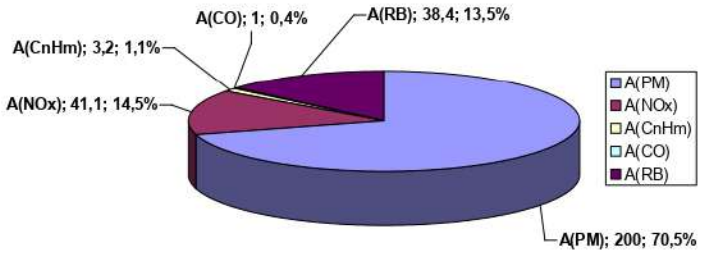


а б

Рисунок 3.11 – Результати дослідження щодо урахування викиду картерних газів



а



б

Рисунок 3.12 – Проміжні результати дослідження щодо врахування викиду випарів моторного палива, спричинених явищами великого та малого дихання резервуарів

3.4.8 Врахування викидів пари води у потоці відпрацьованих газів

У джерелі [4] розроблено і описано методику визначення значення викидів пари води у потоці ВГ $G(H_2O)$ у залежності від нормативів вологості атмосферного повітря, режиму роботи ПДВЗ, перебігу робочого процесу дизеля, а також визначено значення величини $A(H_2O)$ як агенту підвищеної вологості повітря за розробленою методикою, що максимально склало $1{,}976 \cdot 10^{-3}$, за даними з джерел [162, 130, 170–179]. Результати її застосування для базового варіанту дослідження проілюстровано на рис. 6.15,а. Структура вагомості чинників ЕНБ варіанту математичного апарату критерію K_{fe} з урахуванням викиду парів води як агенту під-

вищеної вологості атмосферного повітря наведена на рис. 6.14,а.

Досліджено такі варіанти, які згруповано таким чином, щоб можливим було отримати залежності значень критерію K_{fe} та величини його відносної різниці δK_{fe} від значень відносної вологості повітря φ (варіанти B, C, D) та температури повітря t (варіанти C, E, G).

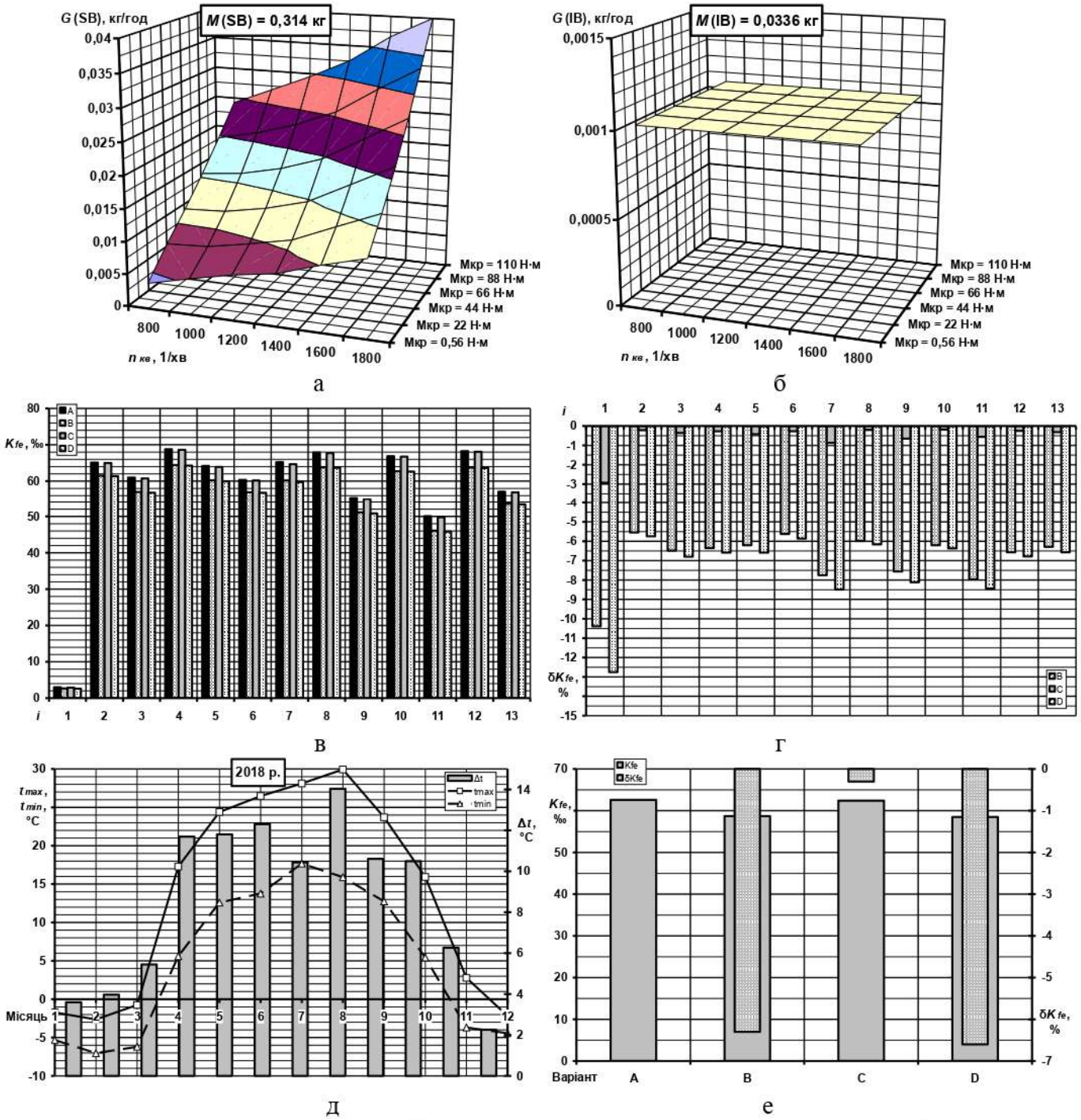
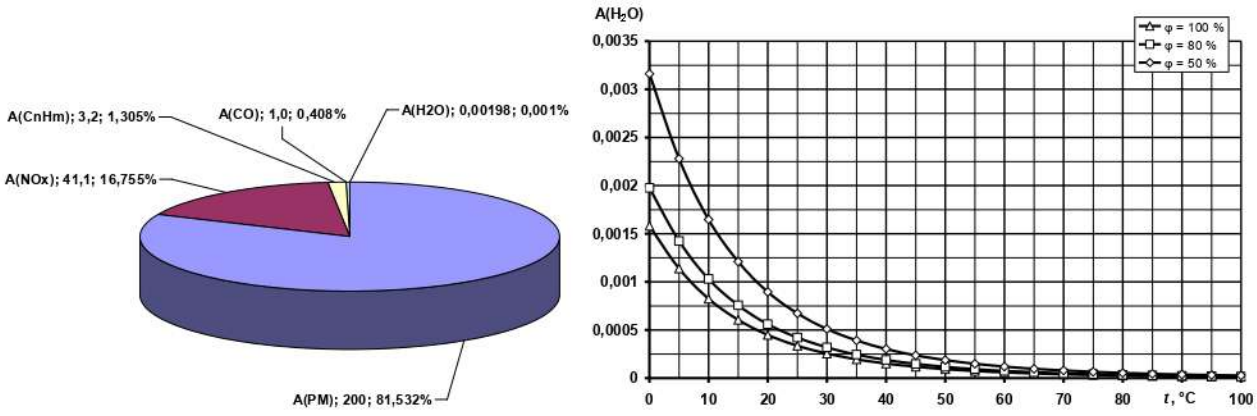


Рисунок 3.13 – Результати дослідження щодо урахування викиду випарів моторного палива, спричинених явищами великого та малого дихання резервуарів у критеріальному оцінюванні



а б

Рисунок 3.14 – Результати дослідження щодо урахування викиду парів води як агенту підвищеної вологості атмосферного повітря у критеріальному оцінюванні

На рис. 3.15,б–г видно, що за значенням критерію усі варіанти, де враховується викид парів води як агенту підвищеної вологості атмосферного повітря поступаються еталонному варіанту А достатньо помітно – від 2,0 до 57 %. Вплив врахування викиду парів води як агенту підвищеної вологості атмосферного повітря на середньоексплуатаційні значення величини K_{fe} у порівнянні з варіантом А для варіанту В складає –26,5 %, варіанту С –31,0 %, варіанту D –41,8 %, варіанту Е –8,8 %, варіанту G –2,6 %. Результати дослідження залежності середньоексплуатаційного значення критерію K_{fe} від нормативного значення вологості атмосферного повітря φ та температури повітря t_0 – на рис. 3.15,д–е.

3.4.9 Врахування викидів теплової енергії

У роботі [4] розроблено і описано методику визначення значення викиду G(Q) на основі положень наукової дисципліни «Теорія ПДВЗ» у залежності від долі ПДВЗ у структурі світового балансу виробленої енергії, а також визначено значення величини A(Q) за розробленою методикою, що максимально склало 28,8 (див. формулу (3.34)), за даними з джерел [6, 162], результати її застосування для базового варіанту дослідження проілюстровано на рис. 3.16,а. Структура вагомості чинників ЕНБ варіанту математичного апарату критерію K_{fe} з урахуванням викиду теплової енергії наведена на рис. 3.16,е.

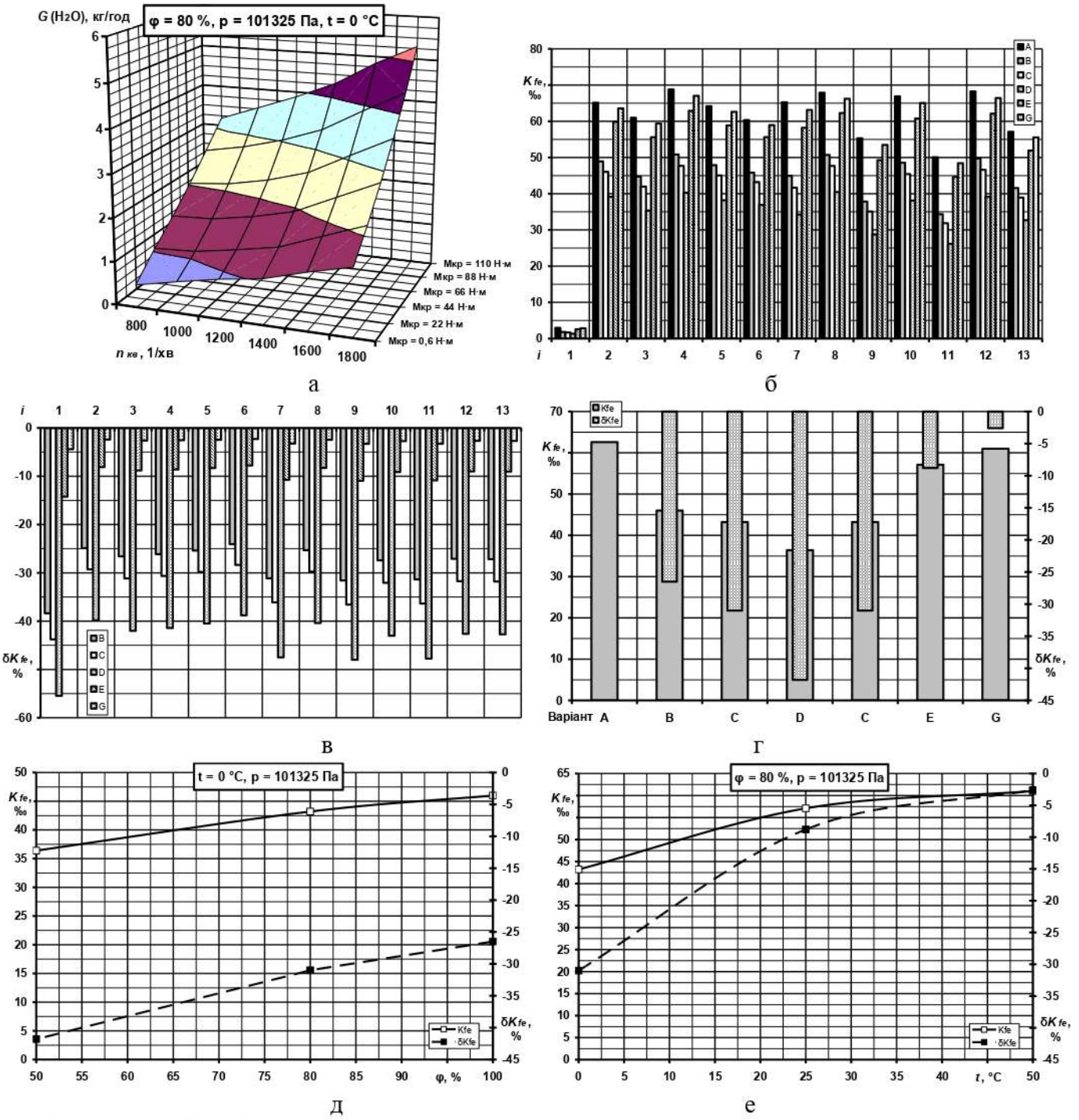
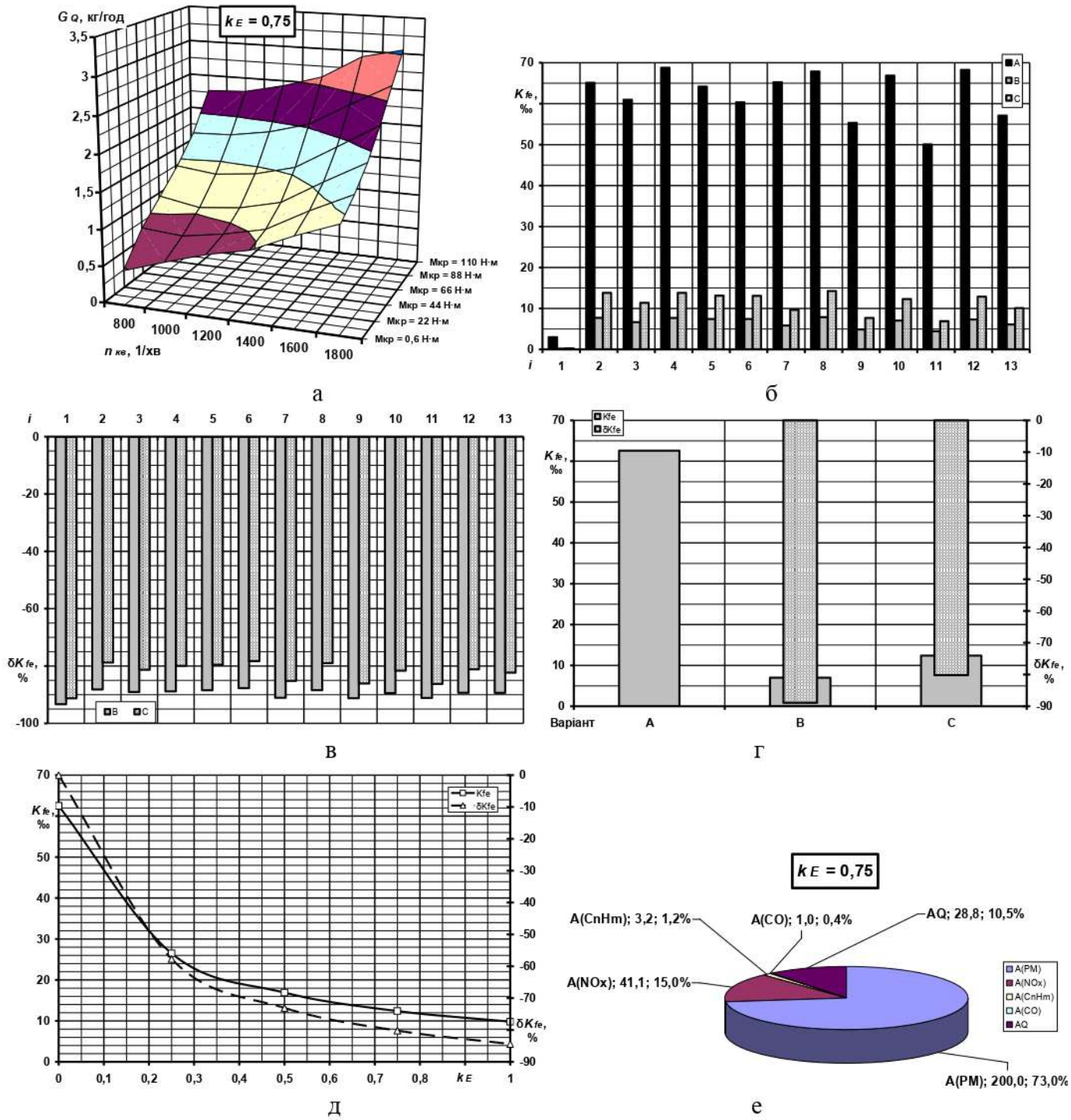


Рисунок 3.15 – Результати дослідження щодо урахування викиду парів води як агенту підвищеної вологості повітря у потоці ВГ у критеріальному оцінюванні

Досліджено такі варіанти: Варіант А – еталонний – без врахування викиду G(Q), Варіант В – песимістичний – зі значенням ефективного ККД двигуна, що відповідає крайньому ступеню його фізичного зносу, Варіант С – актуальний – зі значенням ефективного ККД двигуна, що відповідає теперішньому ступеню його фізичного зносу.



а б в г д е

Рисунок 3.16 – Результати дослідження щодо урахування викиду теплової енергії у критеріальному оцінюванні

Значення вагомості викиду теплової енергії:

$$A_Q = A_{fuel} \cdot k_E = A_{fuel} \cdot E_{RICE} / E_W, \qquad (3.34)$$

де A_{fuel} = 38,4 – коефіцієнт вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію K_{fe}; k_E – енергетичний коефіцієнт; E_{RICE} – сумарна кількість енергії, що виробляється ПДВЗ, у світовому енергетичному балансі, МДж;

E_W – сумарна кількість енергії, що виробляється антропогенними ЕУ, у світовому енергетичному балансі, МДж.

На рис. 3.16,б–г видно, що за значенням критерію усі варіанти, де враховується викид теплової енергії поступаються еталонному варіанту А дуже суттєве – від 79 до 94 %. Вплив врахування викиду теплової енергії на середньоексплуатаційні значення величини K_{fe} у порівнянні з варіантом А для варіанту В складає –88,9 %, варіанту С –80,2 %. Результати дослідження залежності середньоексплуатаційного значення критерію K_{fe} від введеного енергетичного коефіцієнту – на рис. 3.16,д.

3.5 Аналіз поточного стану врахованості чинників екологічної небезпеки при комплексному критеріальному оцінюванні

Таким чином, підбиваючи загальний підсумок досліджень, викладених у попередньому підрозділі рукопису дисертації, можна відмітити наступні дані.

Оригінальний математичний апарат комплексного паливно-екологічного критерію K_{fe} враховує 4 чинники ЕНБ – масові годинні викиди повного набору законодавчо нормованих полютантів G(PM), $G(NO_x)$, $G(C_nH_m)$, G(CO) – безпосередньо, а також 1 чинник ЕНБ – масова годинна витрата палива палива G_{fuel} – опосередковано. Чинників ЕНБ у розробленій в дисертації класифікації, формалізованій у виді класифікатора ієрархічного типу, містить 24 позиції (див. табл. 3.4), з яких 14 полютантів, 7 шкідливих факторів впливу та 3 види відходів. Оригінальним математичним апаратом враховані такі позиції класифікатора: A.a.1.1, A.a.1.2 і частково B.c.

Розширення функціоналу вказаного критеріального математичного апарату можливе лише такими шляхами: а) чинниками ЕНБ, що являють собою виділення (викид, емісію) ПДВЗ яких-небудь небезпечних чи шкідливих речовин. Це позиції A.a.2.1, A.a.2.2, A.a.2.3, A.a.3.1, A.a.3.2, A.a.3.3, A.b.1.1, A.b.1.2, A.b.2.1, A.b.2.2, A.b.3.1, A.b.3.2, C.a, C.b і C.c класифікатора; б) чинниками ЕНБ, що являють собою споживання (витрату) ПДВЗ яких-небудь цінних, дефіцитних чи невідновних речовин. Це позиція B.c класифікатора; в) чинниками ЕНБ, що мають фізичний зміст, відмінний від вищевказаних двох пунктів, але у відповідність яким можна поставити викид чи витрату якої-небудь речовини-аналога (еквівалента) тим чи іншим чином. Це позиція B.a.2 та, можливо, B.a.1 і B.a.3 класифікатора.

Оскільки дані дослідження здійснено як методологічна основа для здійснення оцінювання ефективності функціонування відповідної СУЕБ та, водночас, ефекту від застосування ТЗНС і пристроїв (виконавчих органів), на основі яких ця технологія реалізується. Вказана СУЕБ розроблена не для всього ЖЦ ЕУ з ПДВЗ, а лише для частини його II етапу «Експлуатація», зокрема його частини «Безаварійна експлуатація», що виключає такі складові етапу, як плановий поточний і капітальний ремонт, планове технічне обслуговування, позаплановий ремонт, порушення у роботі паливної системи та системи нейтралізації законодавчо нормованих полютантів у потоці ВГ (див. ППД [32]) тощо. У зв'язку зі сказаним вище деякі з перелічених у класифікації чинників ЕНБ не є обов'язковими для врахування, оскільки проявляються лише на виключених з розгляду складових етапів ЖЦ ЕУ з ПДВЗ. Це позиції A.b.1.1, A.b.1.2, A.b.2.1, A.b.2.2, A.b.3.1, A.b.3.2, C.a, C.b і C.c класифікатора. Тобто з наявних 24 позицій класифікатора для виділеної частини ЖЦ ЕУ з ПДВЗ актуальними залишаються лише 15.

Для конкретної моделі ПДВЗ деякі з чинників ЕНБ не є актуальними, зокрема для дизеля 2Ч10,5/12, не оснащеного системами електронного керування й запалювання, такими позиціями класифікатора є B.a.3, B.b.1, B.b.2 і B.b.3. Тобто з актуальних 15 позицій класифікатора для дизеля 2Ч10,5/12 значущими залишаються 11 – це позиції A.a.1.1, A.a.1.2, A.a.2.1, A.a.2.2, A.a.2.3, A.a.3.1, A.a.3.2, A.a.3.3, B.a.1, B.a.2 і B.c класифікатора, 3 з яких враховані оригінальним математичним апаратом критерію K_{fe} – це позиції A.a.1.1, A.a.1.2 і B.c класифікатора.

Отже, актуальним науково-технічним завданням є вдосконалення математичного апарату критерію K_{fe} шляхом розширення номенклатури врахованих їм чинників ЕНБ, бажано до повного їх набору, відображеного в цій класифікації, а саме позицій A.a.2.1, A.a.2.2, A.a.2.3, A.a.3.1, A.a.3.2, A.a.3.3, B.a.1 і B.a.2 класифікатора. Власне виконанню саме такого завдання присвячено дослідження, описане у попередньому підрозділі роботи. Так, запропоновано підходи та побудовані на їх основі методики й здійснено розрахункове дослідження на прикладі автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 щодо розширення функціоналу оригінального математичного апарату критерію K_{fe} шляхом врахування додаткових чинників ЕНБ, а саме позицій A.a.2.1,

A.a.2.2, A.a.2.3, A.a.3.1, A.a.3.2, A.a.3.3, B.a.2 класифікатора. Отже, з до повного набору таких чинників для конкретного типу дизелів (без систем електронного керування й запалювання), що перебуває у процесі безаварійної експлуатації, необхідним є врахування лише однієї позиції класифікатора – B.a.2 «Забруднення НПС шумом та вібрацією». Проте, оскільки такий чинників ЕНБ не є за своєю суттю викидом чи витратою якої-небудь речовини, а також якому не вдалося однозначно поставити у відповідність фізичну величину-аналог (еквівалент) з таким фізичним змістом, крім того, показники такого чинника ЕНБ для дизеля 2Ч10,5/12 – ступінь нерівномірності обертання КВ δ_{cs}, критерії Клімова–Стєчкіна ξ_{cs} і η_{cs}, еквівалентний L_{Aequ} та максимальний $L_{A\max}$ рівень шуму тощо – наразі розрахунково та/або експериментально у дисертації не досліджувались, його врахування при здійсненні розрахункового комплексного критеріального оцінювання математичним апаратом критерію K_{fe} не є можливим. Для здійснення такого оцінювання пропонується використовувати математичний апарат узагальненої функції бажаності Харрінгтона D. Ця обставина відкриває перспективу подальших досліджень у вказаному напрямку.

Крім того, для ПДВЗ, оснащених електронною системою керування, системою запалювання, що є джерелом механічної енергії для АТЗ, обладнаного приладами освітлення, системою кондиціювання, мультимедійною системою, системами супутникової навігації, протиугінною системою та іншими електронними компонентами, або має гібридний привід рушія, тобто постійно діюче джерело електричної енергії, акумулятор та тяговий електромотор з системою керування ними, доцільним є врахування при комплексному критеріальному оцінюванні також чинників ЕНБ, котрі є показниками пунктів класифікації B.a.3 «Забруднення НПС електромагнітними полями», B.b.1 «Забруднення НПС хибною інформацією», B.b.2 «Забруднення НПС інформаційним шумом», B.b.3 «Забруднення НПС турбуючими факторами».

При цьому ще одним перспективним напрямком досліджень, що зумовлює інтеграцію положень наукової дисципліни «Екологічна безпека» до наукової дисципліни «Технології захисту навколишнього середовища», є розробка методологічних основ, систем та пристроїв для зменшення чи усунення проявів вказаних чинників ЕНБ. При цьому, вочевидь, найбільш перспективними є пристрої, котрі здатні чинити

вплив одразу на декілька чинників ЕНБ. Так, наприклад, ФТЧ модульної конструкції, розроблений, виготовлений і досліджений у дисертації, окрім зниження викиду ТЧ також знижує рівень викиду C_nH_m, а також знижуэ рівень шуму випуску двигуна, а рідинний ФТЧ, описаний у [1], до того ж дозволяє здійснити нейтралізацію NO_x та SO_x, а також знизити рівень забрудненості ПНС тепловою енергією.

Для підбиття загального підсумку комплексу виконаних у дисертації розрахункових досліджень пропонується введення поняття питомого безрозмірного індексу відносної агресивності k-го полютанта a_k – див. формулу (3.35), а також поняття безрозмірного індексу відносної агресивності ефективного ККД дизеля $A(\eta_e)$ – див. формулу (3.36), розподіл його значень по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 показано на рис. 3.17.

$$a_k = A_k / \sum_{k=1}^{M} A_k \cdot 100\,,\ \%, \qquad (3.35)$$

$$A(\eta_e) = \frac{3600 \cdot N_e^2}{H_u \cdot A_{fuel}} = 84{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{N_e^2}{A_{fuel}}\,,\ \%, \qquad (3.36)$$

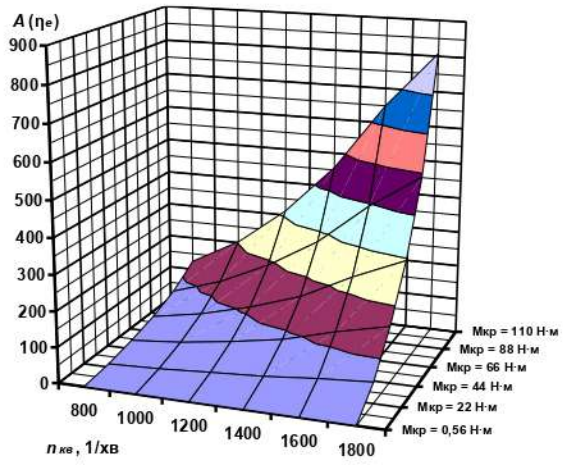


Рисунок 3.17 – Розподіл безрозмірного індексу відносної агресивності ефективного ККД дизеля $A(\eta_e)$ значень по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12

Кількісні аспекти порівняння базового та запропонованого у дисертації математичного апарату критерію K_{fe} за складом врахованих чинників ЕНБ зведено до табл. 6.4 та проілюстровані на рис. 6.23. На рис. 6.4. як Опція А позначено пропонований варіант з урахуванням 14 чинників ЕНБ, а як Опція Б – базовий варіант з урахуванням 5 чинників ЕНБ.

Таблиця 3.4 – Результати досліджень

Шифр класифікатора	Чинник екологічної небезпеки	Поточний статус
A	**ПОЛЮТАНТИ**	**8 з 14**
A.a	***Газоподібні й аерозольні речовини-полютанти***	***8 з 8***
A.a.1	*Законодавчо нормовані прямо*	*2 з 2*
A.a.1.1	Викид продуктів неповного згоряння моторного палива, у потоці аерозолю ВГ (C_nH_m, CO, PM)	так
A.a.1.2	Викид продуктів повного згоряння моторного палива, у потоці аерозолю ВГ (NO_x)	так
A.a.2	*Законодавчо нормовані опосередковано*	*3 з 3*
A.a.2.1	Викид оксидів сірки у потоці аерозолю ВГ (SO_x)	так
A.a.2.2	Викид ПАВ та сполук важких металів у потоці аерозолю ВГ (бенз(а)пірен, ПАУ, ТЕС)	так
A.a.2.3	Викид парникових газів у потоці аерозолю ВГ (CO_2, H_2O, CH_4, NO_x)	так
A.a.3	*Законодавчо ненормовані*	*3 з 3*
A.a.3.1	Викид випарів моторного палива та оливи, спричинені явищами великого та малого дихання резервуару	так
A.a.3.2	Викид аерозолю картерних газів	так
A.a.3.3	Підвищення вологості атмосферного повітря (H_2O)	так
A.b	***Рідкі речовини-полютанти***	***0 з 6***
A.b.1	*Горючі й вибухонебезпечні*	*0 з 2*
A.b.1.1	Забруднення НПС моторним паливом	ні
A.b.1.2	Забруднення НПС моторною оливою	ні
A.b.2	*Негорючі*	*0 з 2*
A.b.2.1	Забруднення НПС охолоджуючою рідиною	ні
A.b.2.2	Забруднення НПС гальмівною рідиною	ні
A.b.3	*Консистентні*	*0 з 2*
A.b.3.1	Забруднення НПС консистентними змазками	ні
A.b.3.2	Забруднення НПС консерваційними рідинами	ні
B	**ШКІДЛИВІ ФАКТОРИ ВПЛИВУ**	**1 з 6**
B.a	***Енергетичне забруднення НПС***	***1 з 3***
B.a.1	Забруднення НПС шумом та вібрацією	ні
B.a.2	Забруднення НПС теплотою	так
B.a.3	Забруднення НПС електромагнітними полями	ні
B.b	***Інформаційне забруднення НПС***	***0 з 3***
B.b.1	Забруднення НПС хибною інформацією	ні
B.b.2	Забруднення НПС інформаційним шумом	ні
B.b.3	Забруднення НПС турбуючими факторами	ні
B.c	***Споживання невідновного джерела енергії***	***так, 1 з 1***
C	**ВІДХОДИ (ТВЕРДІ РЕЧОВИНИ-ПОЛЮТАНТИ)**	**0 з 3**
C.a	Забруднення НПС сплавами чорних та кольорових металів	ні
C.b	Забруднення НПС полімерними та композиційними матеріалами	ні
C.c	Забруднення НПС склом та керамічними речовинами	ні

Таблиця 3.5 – Підсумки дослідження

№	Чинник ЕНБ	Показник						Режим	
		A_k	$A_k/\Sigma A_k$	*	G_k	$A_k \cdot G_k$	$A_k \cdot G_k/\Sigma$	$n_{кв}$	$M_{кр}$
		–	%	–	г/год	кг/год	%	хв$^{-1}$	Н·м
1	G(PM)	200,0	$1{,}571 \cdot 10^{-2}$	max	22,7	4,540	1,247	1200	110
				aver	7,0	1,400	0,816	–	–
				min	1,2	0,240	0,636	1200	0,6
2	$G(NO_x)$	41,1	$3{,}229 \cdot 10^{-3}$	max	352,9	14,504	3,985	1800	110
				aver	164,6	6,765	3,943	–	–
				min	5,4	0,222	0,061	800	0,6
3	$G(C_nH_m)$	3,2	$2{,}514 \cdot 10^{-4}$	max	5,7	0,018	0,00501	1800	0,6
				aver	3,2	0,010	0,00597	–	–
				min	1,7	0,005	0,00149	800	66
4	G(CO)	1,0	$7{,}855 \cdot 10^{-5}$	max	133,5	0,134	0,037	1800	110
				aver	46,6	0,047	0,027	–	–
				min	7,0	0,007	0,002	800	66
5	G_{fuel}	38,4	$3{,}017 \cdot 10^{-3}$	max	4904,0	188,314	51,734	1800	110
				aver	2249,5	86,381	50,344	–	–
				min	483,0	18,547	5,095	800	0,6
6	$G(SO_x)$	22,0	$1{,}728 \cdot 10^{-3}$	max	73,6	1,619	0,445	1800	110
				aver	33,7	0,741	0,432	–	–
				min	7,2	0,158	0,044	800	0,6
7	$G(CO_2)$	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$	$1{,}571 \cdot 10^{-7}$	max	15407,5	0,031	0,00847	1800	110
				aver	7094,6	0,014	0,00827	–	–
				min	1411,4	0,003	0,00078	800	0,6
8	$G(CO_2)_{HG}$	$4{,}0 \cdot 10^{-5}$	$3{,}142 \cdot 10^{-9}$	max	15407,5	0,00062	0,000169	1800	110
				aver	7094,6	0,00028	0,000165	–	–
				min	1411,4	0,00006	0,000016	800	0,6
9	G(B(a)P)	$12{,}6 \cdot 10^{5}$	98,979	max	0,0147	18,522	5,088	1200	110
				aver	0,0045	5,670	3,305	–	–
				min	0,0008	1,008	0,277	1200	0,6
10	G(PAH)	$12{,}6 \cdot 10^{3}$	0,989	max	0,161	2,029	0,557	1200	110
				aver	0,049	0,617	0,360	–	–
				min	0,009	0,113	0,031	1200	0,6
11	G(CG)	25,5	$2{,}003 \cdot 10^{-3}$	max	1636,8	41,738	11,467	1800	110
				aver	865,5	22,070	12,863	–	–
				min	134,2	3,422	0,940	800	0,6
12	G(RB)	38,4	$2{,}702 \cdot 10^{-3}$	max	41,3	1,586	0,436	1800	110
				aver	19,5	0,749	0,436	–	–
				min	5,0	0,192	0,053	800	0,6
13	G(Q)	28,8	$2{,}262 \cdot 10^{-3}$	max	3158,2	90,956	24,988	1800	110
				aver	1635,8	47,111	27,457	–	–
				min	480,1	13,827	3,799	800	0,6
14	$G(H_2O)$	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$	$1{,}571 \cdot 10^{-7}$	max	5296,3	0,011	0,00291	1800	110
				aver	2429,5	0,005	0,00283	–	–
				min	521,6	0,001	0,00029	800	0,6
–	η_e	158,3	$1{,}516 \cdot 10^{-2}$	max	0,356	–	–	1800	110
				aver	0,237			–	–
				min	0,006			800	0,6
–	ΣA_k	1272994,4	100,0						
–	$\Sigma(A_k \cdot G_k)$			max		**364,002**			
				aver		**171,581**			
				min		**37,746**			
–	$\Sigma(A_k \cdot G_k)_б$			max		**19,196**			
				aver		**8,222**			
				min		**0,474**			

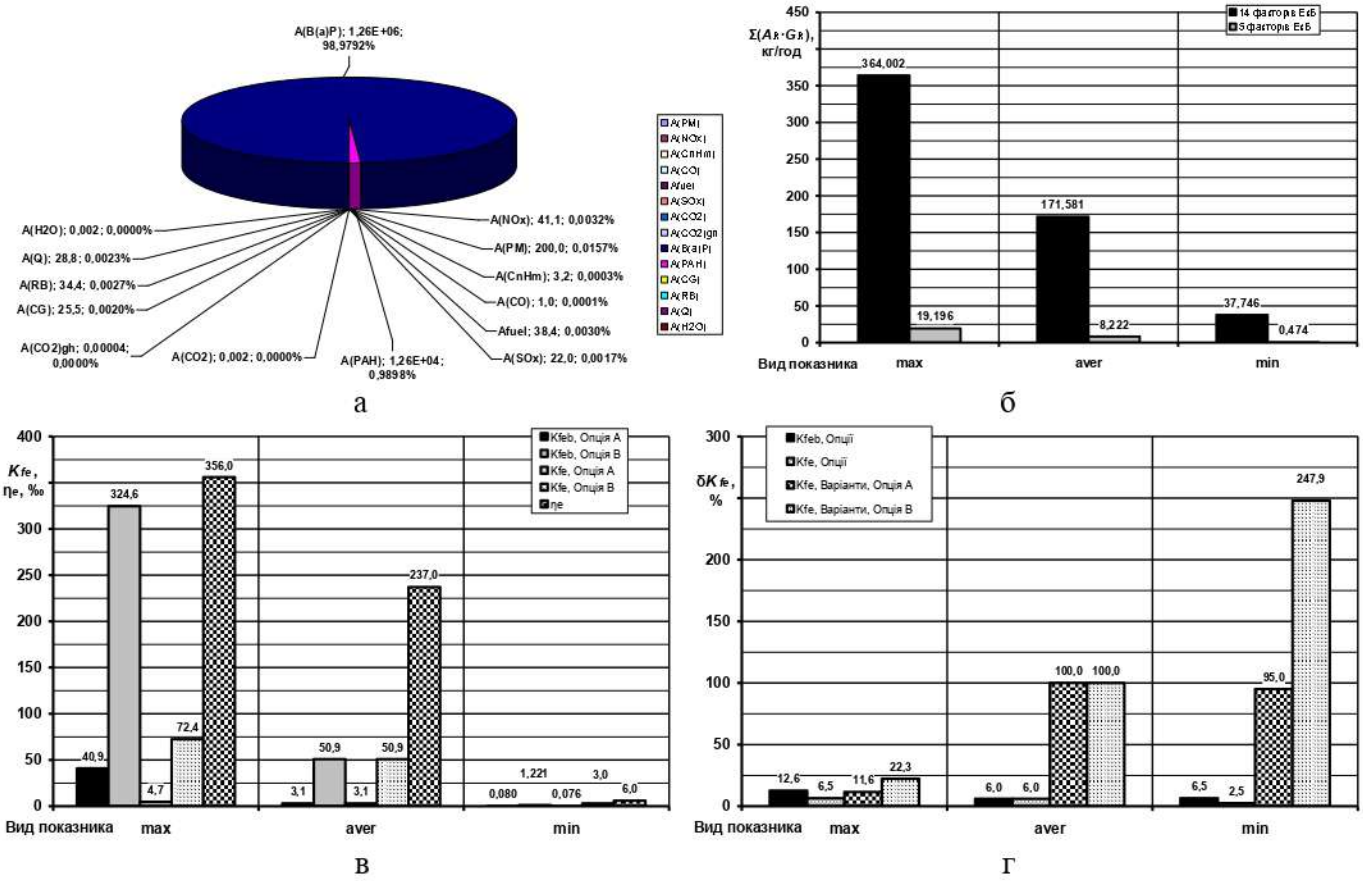


Рисунок 3.18 – Структура вагомості чинників екологічної складової критерію K_{fe} з урахуванням усіх чинників ЕНБ, розглянутих у роботі

3.6 Визначення еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію як реперних точок психофізичної шкали відповідної йому часткової функції бажаності

3.6.1 Аналіз математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона

Математичний апарат узагальненої функції бажаності D, що відноситься до нечіткої логіки, викладено у джерелах [3–5]. Ця функція є кількісним, однозначним, єдиним та універсальним показником якості досліджуваного об’єкту, а також характеризується адекватністю і статистичною чутливістю. Значення узагальненої функції бажаності D для i-го представницького режиму роботи ПДВЗ у моделі його експлуатації, у структурі якої у якості впливаючого чинника ЕНБ виступає комплексний паливно-екологічний критерій K_{fe}, визначається за формулою (3.37).

$$D_i = \sum_{k=1}^{n} \upsilon_k \sqrt{\prod_{k=1}^{n} d_{ki}^{\upsilon_k}} = \left(\upsilon_{k_1} + \upsilon_{k_2} + \ldots + \upsilon_{k_n}\right) \sqrt{d_i(k_1)^{\upsilon_{k_1}} \cdot d_i(k_2)^{\upsilon_{k_2}} \cdot \ldots \cdot d_i(k_n)^{\upsilon_{k_n}}}, \quad (3.37)$$

де d(k) – часткова функція бажаності, що відповідає k-му критерію якості, d(k) = =[0 …1,0], причому $k_1 = K_{fe}$; n – кількість критеріїв якості, що розглядаються; υ(k) – коефіцієнт вагомості k-го критерію якості, що розглядаються, $0 < \upsilon(k) \leq 1$, причому $\upsilon(k)_1 = 38{,}4 + 245{,}3 = 283{,}7$ (див. [4, 5]).

Математичний апарат цієї функції передбачає перетворення значень відгуків локальних критеріїв якості r(k) у безрозмірну шкалу бажаності – значення часткових функцій бажаності d(k) – згідно до таблиці базової оцінки шкали бажаності, тобто табл. 3.6, яка також містить психофізичну шкалу [4]. У даному дослідженні у якості часткових функцій бажаності d(k) обрано такі, котрі відповідають, по-перше, паливно-екологічному критерію K_{fe} (позначено індексом k_1 у формулі (3.37)), а по-друге, величини, що потенційно можуть виступати показниками інших чинників ЕНБ, внесених до вдосконаленої класифікації у джерелі [3], які втім не враховуються математичним апаратом критерію K_{fe} (тобто усі, окрім масових годинних викидів законодавчо нормованих полютантів – G(PM), $G(NO_x)$, $G(C_nH_m)$, G(CO), а також опосередковано – масових годинних витрат палива дизелем G_{fuel}), а саме показники шуму (еквівалентний L_{Aequ} та максимальний $L_{A\max}$ рівень шуму), вібрації (ступінь нерівномірності обертання колінчастого валу δ_{cs}, критерії Клімова-Стечкіна ξ_{cs} і η_{cs}), теплового забруднення (масові годинні витрати палива G_{fuel}), викидів оксидів сірки $G(SO_x)$ тощо (позначено індексами k_2 … k_n у формулі (3.37)). Чинник ЕНБ у структурі функції бажаності D, обраний основним – критерій K_{fe}, являє собою випадок реального однобічного обмеження і описуються формулою (3.38).

$$d(k)_i = \exp\left[-\exp\left(a(k)_i + b(k)_i \cdot r(k)_i\right)\right]; k = \left\{K_{fe}, G_{SO_x}, \delta_{cs}, \xi_{cs}, \eta_{cs}, L_{Aequ}, L_{A\max}, \ldots\right\}, \quad (3.38)$$

де $r(k)_i$ – дійсне значення k-го критерію якості на i-му представницькому режимі роботи ПДВЗ у моделі його експлуатації; $a(k)_i$ та $b(k)_i$ – коефіцієнти, що визначаються на основі встановлення відповідності між парою характерних значень $r(k)_i$ та $d(k)_i$ згідно до вмісту табл. 3.7.

Таблиця 3.6 – Базові оцінки шкали реальної бажаності $d(\mathrm{k})$ [4]

Оцінка бажаності значення відгуку r_{ki}	**Кількісне значення за шкалою бажаності $d(\mathrm{k})_i$**
Дуже добре	1,0 … 0,8
Добре	0,8 … 0,63
Задовільно	0,63 … 0,37
Погано	0,37 … 0,2
Дуже погано	0,2 … 0,0

Дані, що дозволяють обрати параметри складових формул (3.38) для часткових функцій бажаності $d(\mathrm{k})$ отримуються шляхом вирішення систем з двох рівнянь (див. формули (3.39) – (3.41)) для випадків, що ставлять у відповідність одне одному характерні значення $r(\mathrm{k})_i$ та $(\mathrm{k})_i$, відомі з практики чи нормативних документів.

$$\begin{cases} d(\mathrm{k})_{idn} = \exp\left[-\exp\left(a(\mathrm{k})_i + b(\mathrm{k})_i \cdot r(\mathrm{k})_{idn}\right)\right] \\ d(\mathrm{k})_{iup} = \exp\left[-\exp\left(a(\mathrm{k})_i + b(\mathrm{k})_i \cdot r(\mathrm{k})_{iup}\right)\right] \end{cases}; \tag{3.39}$$

$$a(\mathrm{k}) = \left(\ln(-\ln(d(\mathrm{k})_{up})) \cdot r(\mathrm{k})_{dn} - \ln(-\ln(d(\mathrm{k})_{dn})) \cdot r(\mathrm{k})_{up}\right) / \left(r(\mathrm{k})_{dn} - r(\mathrm{k})_{up}\right), \tag{3.40}$$

$$b(\mathrm{k}) = \left(\ln(-\ln(d(\mathrm{k})_{dn})) - \ln(-\ln(d(\mathrm{k})_{up}))\right) / \left(r(\mathrm{k})_{dn} - r(\mathrm{k})_{up}\right), \tag{3.41}$$

де індексами *up* і *dn* позначено характерні парні значення $r(\mathrm{k})_i$ та $d(\mathrm{k})_i$, що відповідають обраним оцінкам за психофізичною шкалою «добре» (тобто $d(\mathrm{k})_{iup} = 0{,}63 \ldots 0{,}8$) і «погано» (тобто $d(\mathrm{k})_{idn} = 0{,}2 \ldots 0{,}32$) з урахуванням особливостей величин $r(\mathrm{k})_i$.

Сутність пропонованого підходу полягає у тому, що у якості значень $r(\mathrm{k})_{iup}$ буде використано порежимне значення критерію K_{fe} (див. формулу (3.42)), чинники екологічної складової якого (G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO}) відповідають сучасним чинним законодавчо встановленим нормативам (тобто рівню EURO VI, найбільш жорстким з точки зору історичної ретроспективи), а у якості значень $r(\mathrm{k})_{idn}$ – значення критерію K_{fe}, чинники екологічної складової якого відповідають менш жорстким з точки зору історичної ретроспективи нормативам (тобто рівнів EURO I … VI). Такі вимоги у історичній ретроспективі зведено у таблицю 3.8.

$$K_{fei} = \frac{3600 \cdot N_{ei}}{H_u \cdot G_{fueli}} \cdot \frac{G_{fueli}}{G_{fueli} + \sigma \cdot f \cdot \sum_{k=1}^{h} (A_k \cdot G_{ki})} \cdot 1000, \text{‰} \tag{3.42}$$

Таблиця 3.7 – Норми токсичності відпрацьованих газів дизелів [1–22]

Рівень EURO	Рік введення	Питомий ефективний масовий годинний викид g(k), г/(кВт·год)			
		ТЧ	NO_x	C_nH_m	CO
I	1992	0,612	8,0	1,1	4,5
II	1996	0,25…0,15	7,0	1,1	4,0
III	2000	0,10	5,0	0,66	2,1
IV	2005	0,02	3,5	0,46	1,5
V	2008	0,02	2,0	0,25	1,5
VI	2012	0,01	0,5	0,2	1,0

У нормативах токсичності ВГ ПДВЗ [21, 22] вказано гранично допустимі значення питомих ефективних масових викидів полютантів з потоком ВГ (g(PM), $g(NO_x)$, $g(C_nH_m)$, g(CO) у кг/(кВт·год)), а не значення їх масового годинного викиду ($G(C_nH_m)$, $G(NO_x)$, G(CO), G(PM) у кг/год), які фігурують у формулі для визначення значення критерію K_{fe}. Такі величини співвідносяться між собою за формулою (3.43), тобто значення величини масового годинного викиду k-го полютанта G(k), що відповідає нормативно встановленому значенню величини питомого ефактивного масового годинного викиду того ж полютанту g(k), залежать від значення ефективної потужності ПДВЗ N_e у кВт, а отже від координат поля робочих режимів двигуна (частоти обертання колінчастого валу $n_{кв}$ у хв$^{-1}$ та крутного моменту $M_{кр}$ у Н·м) що відображає формула (3.44).

$$G(k) = g(k) \cdot N_e, \text{ кг/год;} \quad (3.43)$$

$$N_e = n_{кв} \cdot M_{кр} / 9550, \text{ кВт.} \quad (3.44)$$

3.6.2 Отримання еталонних значень екологічних показників роботи поршневого ДВЗ

Залежності значень еталонних значень величин викидів $G(C_nH_m)$, $G(NO_x)$, G(CO), G(PM), $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ та $\Sigma(G_k)$ від значень потужності N_e, описані формулою (3.43) для різних рівнів EURO проілюстровані у вигляді графіків на рис. 3.19. Розподіл значень величини потужності N_e, описаних формулою (3.44), по полю робочих режимів дизеля Д21А1 наведено у джерелі [5]. Розподіл значень еталонних значень величин викидів $G(C_nH_m)$, $G(NO_x)$, G(CO), G(PM) та $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ по полю робочих режимів дизеля для крайніх рівнів EURO I та VI проілюстровано на рис. 3.20 і 3.21.

На рис. 3.19 видно, що такі залежності для будь-якого ПДВЗ носять лінійний

характер, еталонні значення викидів зростають зі збільшенням значення ефективної потужності. Так при зростанні величини N_e з 0,05 до 25 кВт: а) значення G_{nPM} збільшуються від 0,03 до 15,3 г/год для EURO I та від 0,001 до 0,25 г/год для EURO VI; б) значення G_{nNOx} – від 0,4 до 200 г/год (EURO I) та від 0,025 до 12,5 г/год (EURO VI); в) значення G_{nCnHm} – від 0,055 до 27,5 г/год (EURO I) та від 0,01 до 5,0 г/год (EURO VI); г) значення G_{nCO} – від 0,023 до 112,5 г/год (EURO I) та від 0,05 до 25,0 г/год (EURO VI); д) значення $\Sigma(A_k \cdot G_k)_n$ – від 23,0 до 11480,5 г/год (EURO I) та від 1,2 до 604,8 г/год (EURO VI); е) значення $\Sigma(G_k)_n$ – від 0,71 до 355,3 г/год (EURO I) та від 0,09 до 24,8 г/год (EURO VI).

На рис. 3.20 – 3.21 видно, що такі розподіли для дизеля 2Ч10,5/12 мають вид площин, нахилених до осей обох координат поля робочих режимів двигуна: а) величина G_{nPM} змінюється від 0,001 (EURO VI) і 0,029 (EURO I) (при $n_{кв}$ = 800 хв$^{-1}$ і $M_{кр}$ = 0,56 Н·м – режим А) до 0,207 (EURO VI) і 12,7 (EURO I) г/год (при $n_{кв}$ = 1800 хв$^{-1}$ і $M_{кр}$ = 110 Н·м – режим Б); б) величина G_{nNOx} – від 0,023 (EURO VI) і 0,38 (EURO I) (реж. А) до 10,4 (EURO VI) і 165,9 (EURO I) г/год (реж. Б); в) величина G_{nCnHm} – від 0,009 (EURO VI) і 0,052 (EURO I) (реж. А) до 4,1 (EURO VI) і 22,8 (EURO I) г/год (реж. Б); г) величина G_{nCO} – від 0,047 (EURO VI) і 0,211 (EURO I) (реж. А) до 20,7 (EURO VI) і 93,3 (EURO I) г/год (реж. Б); д) величина $\Sigma(A_k \cdot G_k)_n$ – від 1,0 (EURO VI) і 2,2 (EURO I) (реж. А) до 502 (EURO VI) і 9521 (EURO I) г/год (реж. Б).

3.6.3 Результати попередніх розрахунків та їх аналіз

Формула для визначення порежимного значення комплексного паливно-екологічного критерію у цьому дослідженні перетворена до виду формули (3.45).

$$K_{fei} = \frac{3600 \cdot N_{ei}}{H_u \cdot \left(G_{fueli} + \sigma \cdot f \cdot N_{ei} \cdot \sum_{k=1}^{h} (A_k \cdot g_{ki}) \right)} = \left| \begin{array}{l} U = 3600 / H_u = const; \\ V = \sigma \cdot f \cdot \sum_{k=1}^{h} (A_k \cdot g_{ki}) = f(EURO) \end{array} \right| =$$

$$= \frac{U \cdot N_{ei}}{G_{fueli} + V \cdot N_{ei}} = \frac{U \cdot N_{ei}}{g_{ei} \cdot N_{ei} + V \cdot N_{ei}} = \frac{U}{g_{ei} + V} = f(g_{ei}; EURO), \text{‰} \quad (3.45)$$

де U = 84,3 кг/(кВт·год) – постійна величина; V – підстановка, що є постійною для певного рівня EURO, кг/(кВт·год).

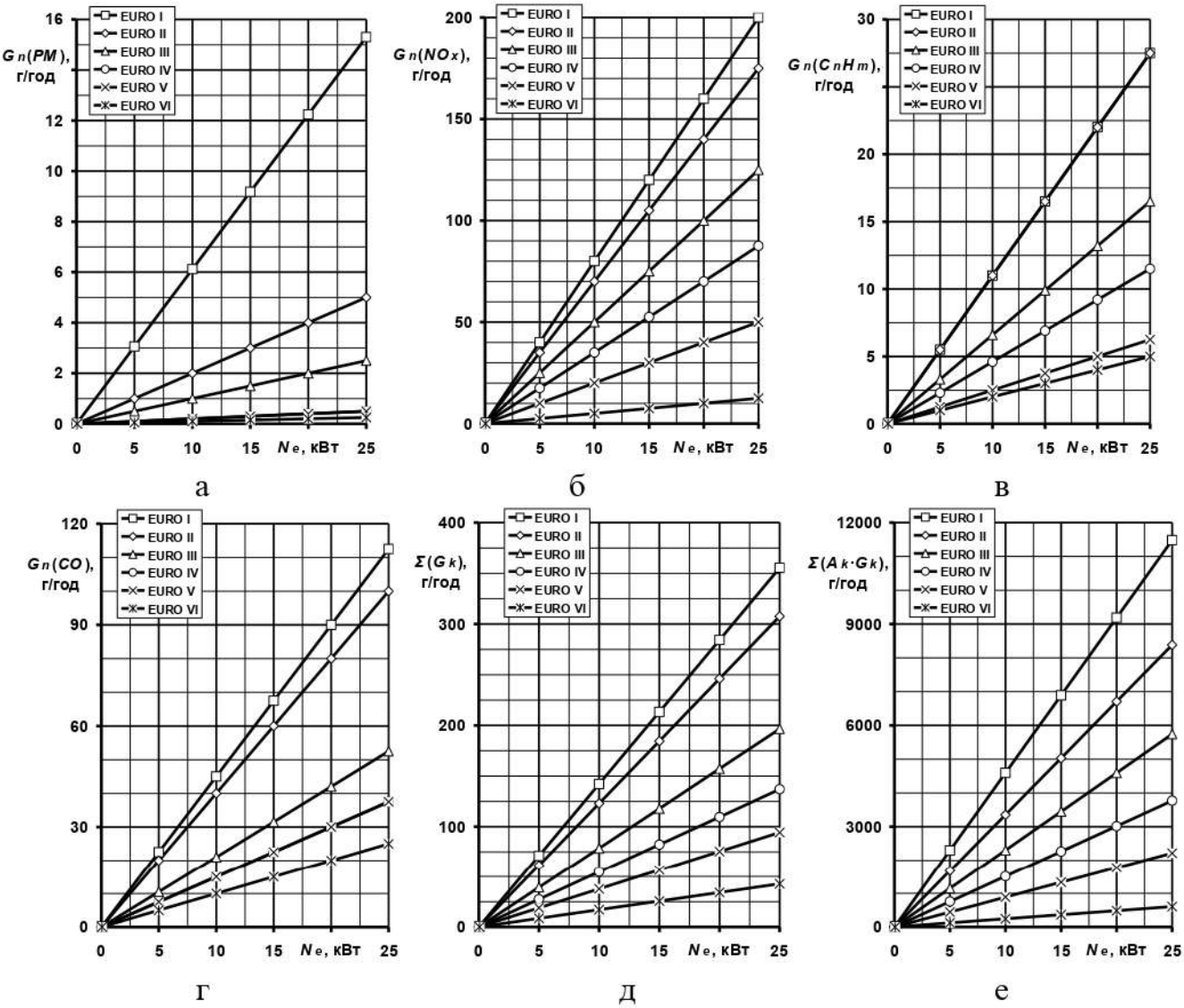


Рисунок 3.19 – Залежності значень еталонних значень величин масових годиних викидів $G(\mathrm{PM})$, $G(\mathrm{NO_x})$, $G(\mathrm{C_nH_m})$, $G(\mathrm{CO})$, (а – г) та еталонних значень величин масових годиних викидів $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ та $\Sigma(G_k)$ (д, е) від значень ефективної потужності N_e поршневого ДВЗ для різних рівнів EURO

Введені величини U та V мають такий фізичний зміст: U – значення питомої ефективної масової годинної витрати палива дизелем за умови рівності його ефективного ККД η_e одиниці; V – значення приведеного ефективного масового годинного викиду повного набору законодавчо нормованих полютантів за певних умов експлуатації ПДВЗ. Еталонні значення величини V та значення її відносної зміни δV для різних рівнів EURO для базових значень величин $\sigma = 1{,}0$ і $f = 1{,}0$ та $H_u = 42{,}7$МДж/кг проілюстровано на рис. 3.22 у вигляді гістограми.

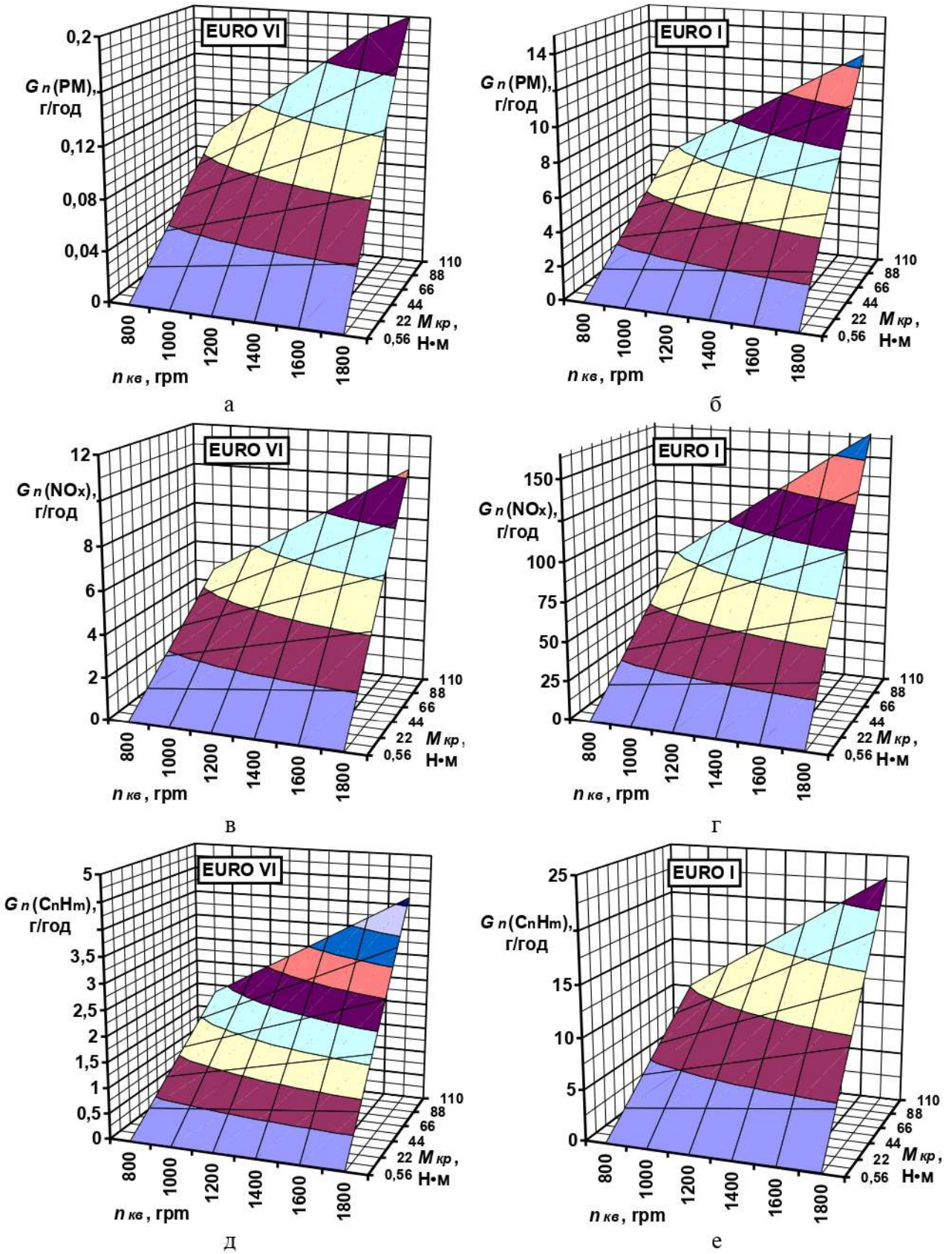


Рисунок 3.20 – Розподіл еталонних значень викидів G(PM) (а, б), $G(NO_x)$ (в, г) та $G(C_nH_m)$ (д, е) по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для крайніх рівнів EURO I та VI

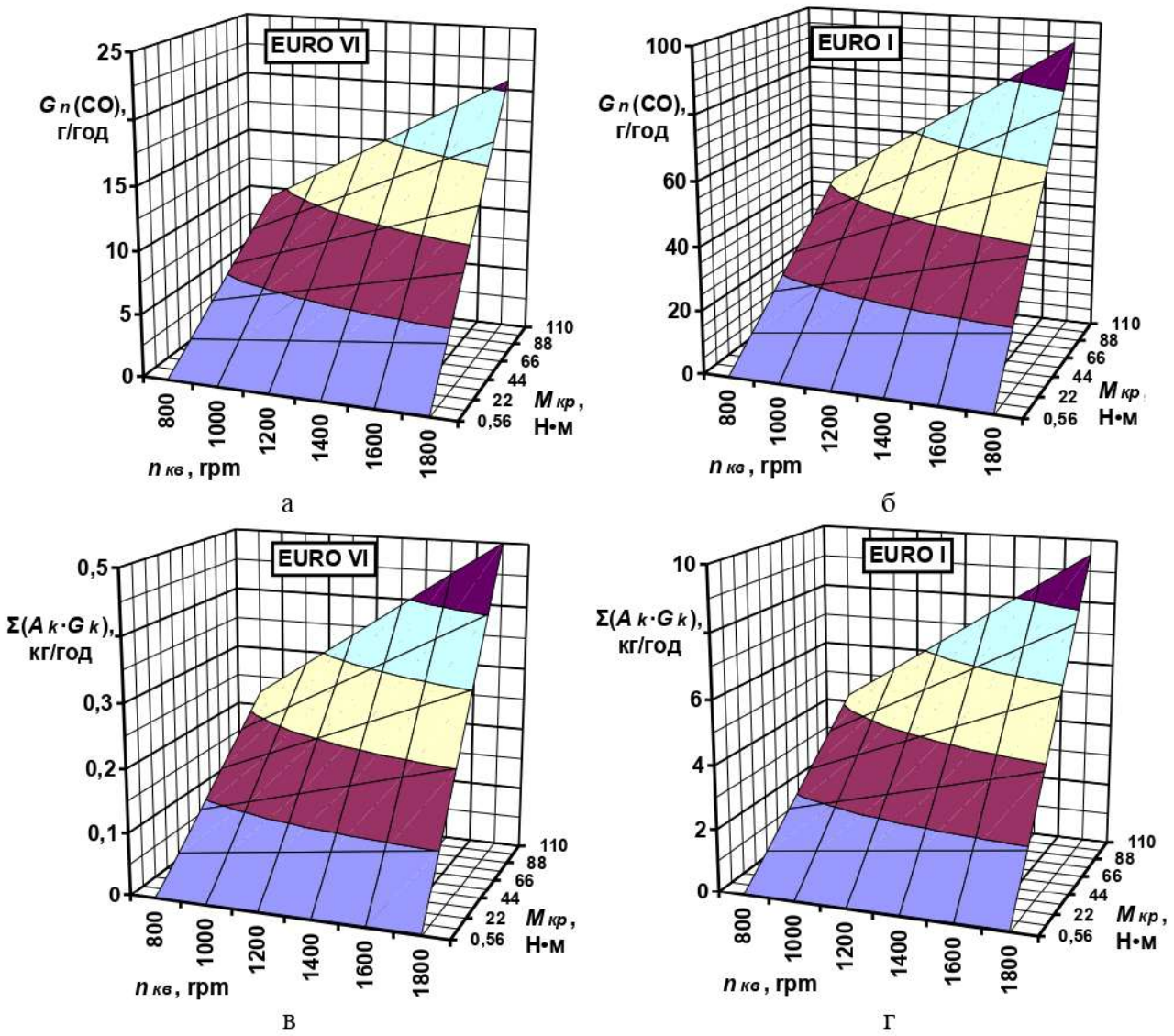


Рисунок 3.21 – Розподіл еталонних значень викидів G(CO) (а, б) та $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ (в, г) по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для крайніх рівнів EURO I та VI

Значення величини U для різних видів моторного палива, тобто величини H_u, та для базових значень величин $\sigma = 1{,}0$ і $f = 1{,}0$ проілюстровано на рис. 3.23 у вигляді графіку. На рис. 3.23 видно, що еталонні значення величини V з підвищенням рівня EURO (збільшенням жорсткості екологічних вимог до ПДВЗ) знижується, для EURO VI на 95 % у порівнянні з EURO I. Еталонні значення питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ g_e для різних видів моторного палива (з різним значенням теплотворної здатності H_u у МДж/кг) залежать від значення ефективного ККД двигуна η_e. Такі залежності проілюстровано на рис. 3.24 і видно, що такі залежності мають вид сімейства гіпербол, величина g_e при цьому змінюється у межах від 1440 ($\eta_e = 0{,}1$, $H_u = 25$ МДж/кг) до 28,8 г/(кВт·год) ($\eta_e = 1{,}0$, $H_u = 125$ МДж/кг).

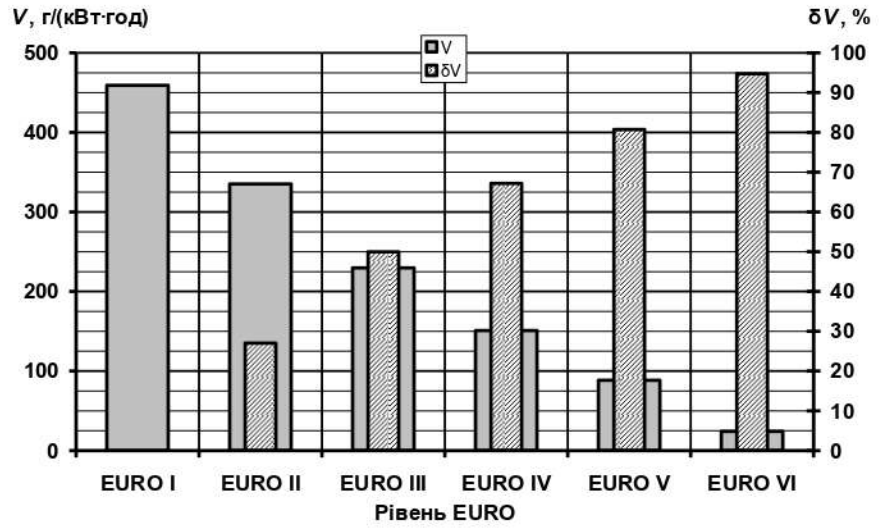


Рисунок 3.22 – Значення величин V та δV для різних рівнів EURO для базових значень величин $\sigma = 1{,}0$ і $f = 1{,}0$ та $H_u = 42{,}7$ МДж/кг

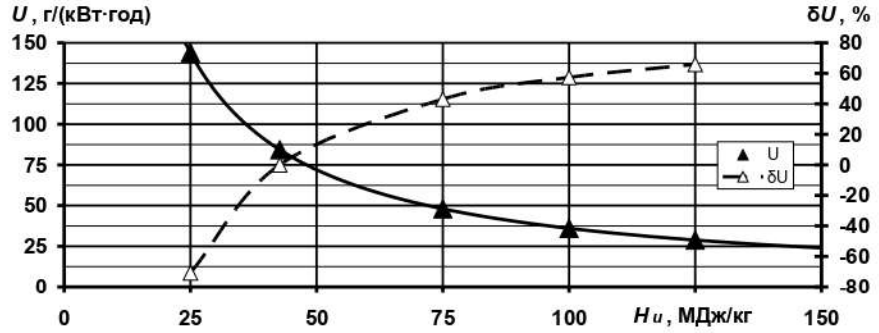


Рисунок 3.23 – Значення величин U та δU для різних видів моторного палива та для базових значень величин $\sigma = 1{,}0$ і $f = 1{,}0$

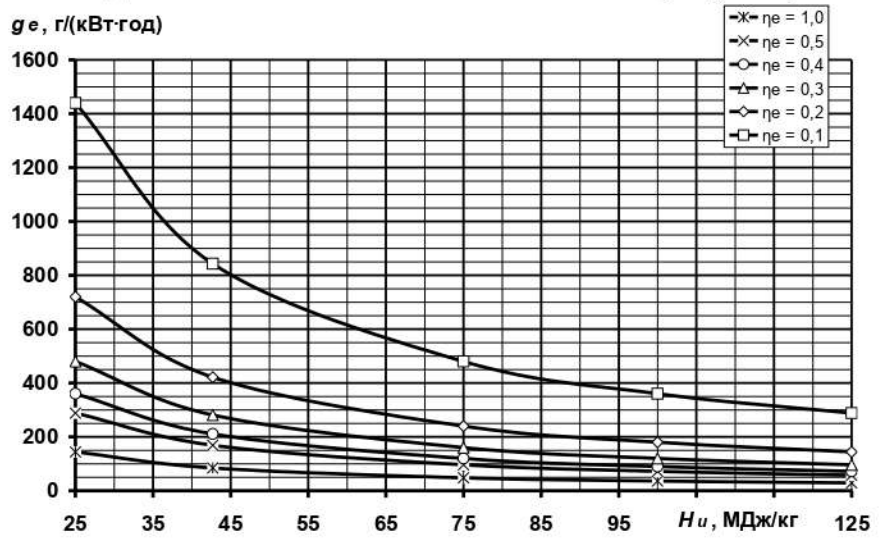


Рисунок 3.24 – Графіки залежності значень величини g_e від значень величини H_u для різних постійних значень величини η_e

На рис. 3.23 видно, що еталонні значення величини U з підвищенням значення величини H_u спадають за гіперболічним законом та у повному діапазоні зміни впли-

ваючого фактора (від 25 до 152 МДж/кг) змінюються на ±70 % у порівнянні з базовим значенням H_u = 42,7 МДж/кг, що дорівнює 84,5 г/(кВт·год).

На рис. 3.25 наведено графіки залежності еталонних значень величини g_e від значення ефективного ККД η_e для різних видів моторного палива та для базових значень величин σ = 1,0 і f = 1,0. На рис. 3.25 видно, що такі значення величини g_e спадають за гіперболічним законом про зростанні значення величини η_e. При значенні η_e = 0,5, що відображає об'єктивну межу можливостей сучасних ПДВЗ, для звичайного дизельного палива (H_u = 42,7 МДж/кг) значення g_e = 168,6 г/(кВт·год), при зменшенні η_e до 0,1 воно зростає на 400 %, а при зростанні η_e до 1,0 – зменшується на 50 %.

Залежність еталонних значень критерію K_{fe} від значення питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ g_e для різних рівнів EURO та базових значень величин σ = 1,0, f = 1,0 і H_u = 42,7 МДж/кг, описані формулою (3.45), відображено на рис. 3.26,а. Власне графіки на рис. 3.26 виступають основою для отримання шуканих значень реперних точок відповідної часткової шкали бажаності. Вони побудовані у найбільш широких з теоретично можливих межах зміни значень величини g_e – від 0 до 500 г/(кВт·год) та самого критерію K_{fe} – від 0 до 1000 ‰. Реальні ж межі зміни цих величин є такими: g_e – від 150 до 350 г/(кВт·год), K_{fe} – від 100 до 500 ‰ (див. рис. 3.26,б). Такі графіки, побудовані у вказаних реальних межах зміни координат наведено на рис. 3.26,б. На рис. 3.26,б видно, що зображені на ньому графіки є сімейством гіпербол, еталонні значення критерію K_{fe} спадають зі зростанням значення величини g_e, а різниця між такими значеннями для крайніх значень рівня EURO – зменшується з 1800 (при g_e = 0) до 83 % (при g_e = 500 г/(кВт·год)).

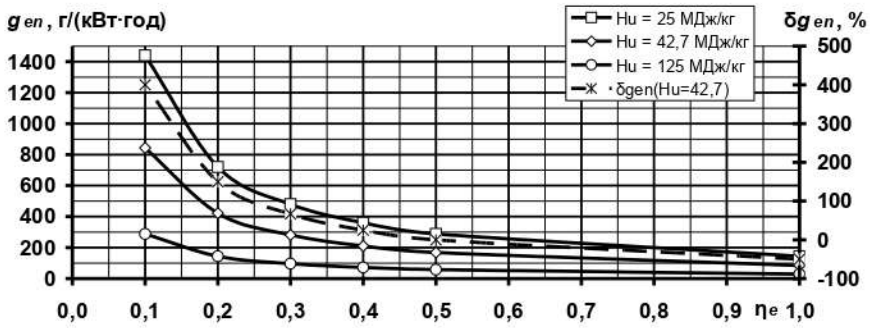
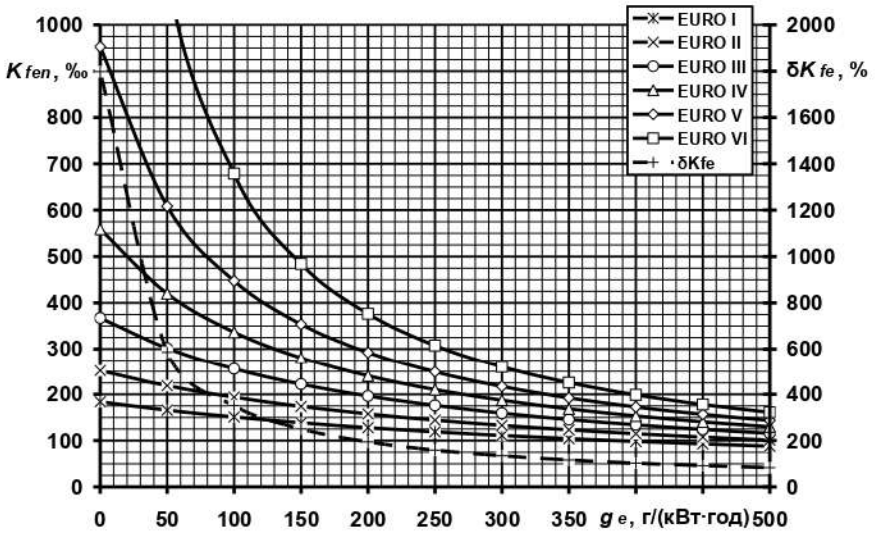
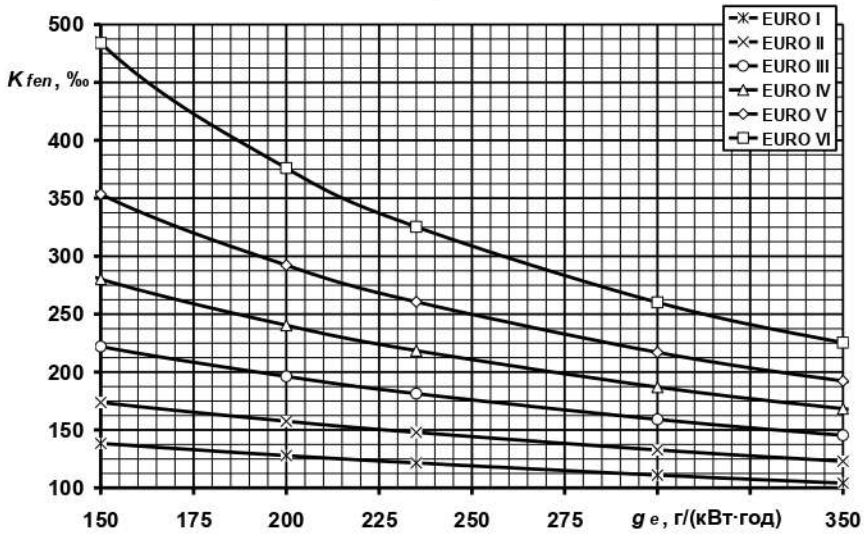


Рисунок 3.25 – Еталонні значення величини g_e від значення ефективного ККД η_e для різних видів моторного палива та для базових значень величин σ = 1,0 і f = 1,0

Відомо, що фізичний зміст критерію K_{fe} полягає у тому, що він являє собою ефективний ККД ПДВЗ з урахуванням законодавчо нормованих екологічних показників його ВГ. Таким чином, його граничні значення для будь-якого стаціонарного режиму роботи двигуна є значеннями ефективного ККД η_e. Таких значень він набуває при ідеальних показниках екологічності, тобто у випадку, коли у потоці його ВГ відсутні законодавчо нормовані полютанти. Розподіл значень ефективного ККД η_e дизеля 2Ч10,5/12 по полю його робочих режимів наведено у [5]. Значення ефективного ККД η_e розподіляються по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 нерівномірно та набувають значень у межах від 0,08 (режим А) до 0,356 (режим Б).

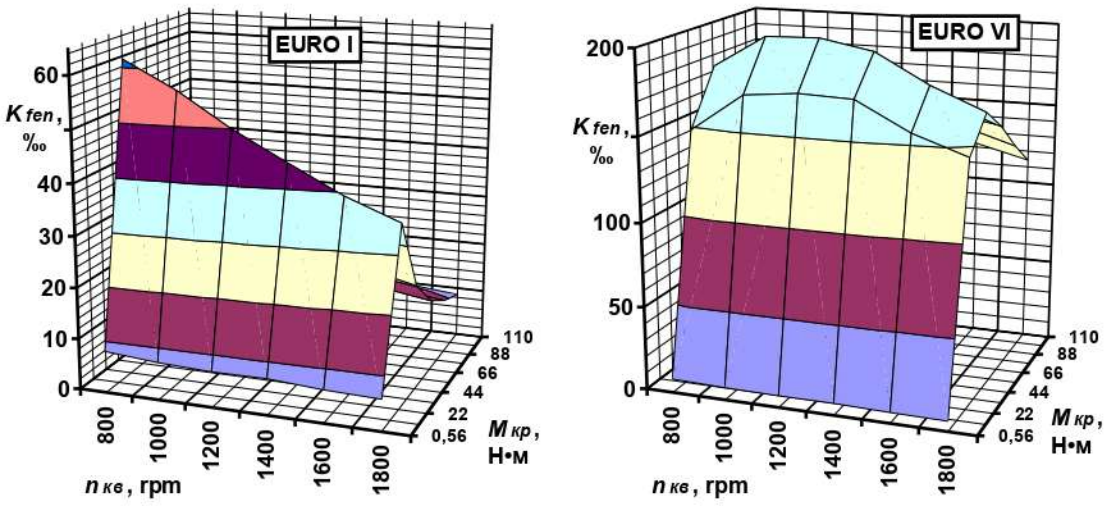


а



б

Рисунок 3.26 – Графіки залежності еталонних значень критерію K_{fe} від значення питомої ефективної масової годинної витрати палива ПДВЗ g_e для різних рівнів EURO та базових значень величин σ = 1,0, f = 1,0 і H_u = 42,7 МДж/кг



а б

Рисунок 3.27 – Розподіл еталонних значень критерію K_{fe} по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для крайніх рівнів EURO I та VI

Розподіл еталонних значень критерію K_{fe} по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для крайніх значень рівня EURO – I та VI, та базових значень величин σ = = 1,0, f = 1,0 і H_u = 42,7 МДж/кг наведено на рис. 3.27. На рис. 3.27 видно, що такі еталонні значення критерію K_{fe} розподіляються по полю робочих режимів нерівномірно і сягають максимумів 61 та 200 ‰ відповідно для EURO I і EURO VI на різних стаціонарних режимах роботи двигуна. Характер розподілу суттєво відрізняється для різних рівнів EURO. Така відмінність зумовлена особливостями розподілу величини ефективного ККД цього дизеля та еталонних значень викидів полютантів по такому полю, викладених на рис. 3.20–3.21.

3.6.4 Результати основних розрахунків та їх аналіз

У цьому дослідженні пропонується розділити підходи до формування середньоексплуатаційних (Підхід А) та порежимних (Підхід Б) значень реперних точок часткової шкали бажаності критерію K_{fe}.

Підхід А

У якості середньоексплуатаційних значень реперних точок пропонується обрати еталонні значення критерію K_{fe}, що відповідають середньоексплуатаційному значенню питомої ефективної масової годинної витрати палива дизелем g_e та відповідним рівням EURO. Згідно до технічного описання дизеля 2Ч10,5/12 [114, 163] сере-

дньоексплуатаційне значенням величини g_{eme} становить 235 г/(кВт·год).

Верхньою реперною точкою пропонується обрати точку, що відповідає рівню EURO VI та значенню часткової функції бажаності $d(\mathrm{k})_{\mathrm{up}} = 0{,}63$ (відповідає початку діапазону оцінки «добре» психофізичної шкали), нижньою – рівню EURO I та значенню часткової функції бажаності $d(\mathrm{k})_{\mathrm{dn}} = 0{,}32$ (відповідає кінцю діапазону оцінки «погано» психофізичної шкали). Вибір значень верхніх та нижніх реперних точок часткової функції беженості $d(\mathrm{k})_{\mathrm{up}} = 0{,}63$ та $d(\mathrm{k})_{\mathrm{dn}} = 0{,}32$, а не а не 0,8 та 0,2 відповідно, зумовлено тим, що:

– обрані значення у шкалі бажаності обрано виходячи зі зручності обчислень за формулою (1.3), адже $0{,}63 \approx 1 - 1/e$, а $0{,}37 \approx 1/e$, крім того, при значеннях часткових функцій бажаності $d(\mathrm{k})_i < 0{,}2$ чи $d(\mathrm{k})_i > 0{,}8$ значення відгуків локальних критеріїв $r(\mathrm{k})_i$ чинять не такий значний вплив на значення узагальненої функції бажаності D критерію якості;

– значення ефективного ККД η_e, до якого наближаються показники найкращих екземплярів дизелів і яке навряд чи буде перевищено у найближчому майбутньому, становить 0,5;

– кінцева мета будь-яких заходів з підвищення рівня ЕБ ПДВЗ – це досягнення нормативно встановлених значень її показників, які мають тенденцію до подальшого посилення;

– необхідно передбачити можливість реалізоації вирішення задачі оцінювання рівня ЕБ для процесу експлуатації ЕУ з утилізацією і рекуперацією теплоти ВГ, охолоджуючої рідини і моторного мастила, для якої η_e може сягати 0,9 і вище, а також АТЗ з системами рекуперації механічної енергії гальмування тощо;

– техніко-економічні й екологічні показники дизеля 2Ч10,5/12 наразі досить низький у порівнянні з кращими сучасними аналогами, а поточний технічний стан можна охарактеризувати не вище, ніж як «задовільний», однак у експлуатації перебуває значна кількість ПДВЗ зі ще нижчим технічним рівнем і станом.

При такому підході: $r(\mathrm{k})_{\mathrm{up}} = K_{feme}(g_{eme}, \text{ EURO VI}) = 325$ ‰, $r(\mathrm{k})_{\mathrm{dn}} = K_{feme}(g_{eme}, \text{ EURO I}) = 121$ ‰. Тоді коефіцієнти у формулі (3.39), визначені за формулами (3.40) і (3.41), становлять $a(\mathrm{k}) = 0{,}666$, $b(\mathrm{k}) = -4{,}425 \cdot 10^{-3}$ і формула (3.38) набуває виду

формули (3.46), що відображає рис. 3.28. На рис. 3.28 видно, що графік залежності $d(K_{fe}) = f(K_{fe})$ має помірний плин як на основному робочому відрізку значень аргумента (при K_{fe} = 121 … 325 ‰ та $d(K_{fe})$ = 0,32 … 0,63), так і на відрізках поза значеннями $d(K_{fe})$ = 0,2 і 0,8, де розрізнювальна здатність цього математичного апарату різко знижується, що дозволяє його застосувати для ПДВЗ зі значно гіршим чи ліпшим у порівнянні з кращими аналогами і нормативними вимогами технічним рівнем.

$$d\left(K_{fe}\right) = \exp\left\{-\exp\left(0{,}666 - 4{,}425 \cdot 10^{-3} \cdot K_{fe}\right)\right\}. \qquad (3.46)$$

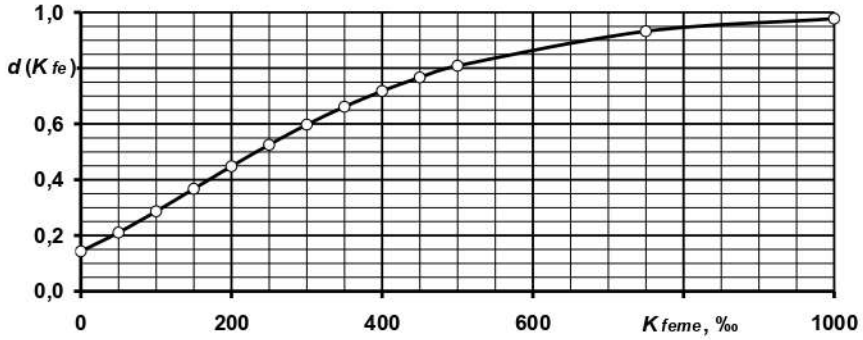


Рисунок 3.28 – Графік залежності значень часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ від середньоексплуатаційних значень критерію K_{fe}

Підхід Б

У якості порежимних значень реперних точок пропонується обрати не постійні значення критерію K_{fe}, що відповідають рівням EURO I і EURO VI, а залежності цих значень від величини g_e. Значення верхньої реперної точки при σ = 1,0, f = 1,0 і H_u = 42,7 МДж/кг визначає формула (3.47), а нижньої (3.48).

Тоді коефіцієнти у формулі (3.49), визначені за формулами (3.40) і (3.41), описуються формулами (3.49) і (3.50), проілюстровані на рис. 3.29, на якому видно, що залежність значень коефіцієнта a(k) часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ від порежимного значення величини g_e носить лінійний характер, а коефіцієнта і b(k) – може бути апроксимована поліномом 2-го ступеня – див. рис. 3.29.

$$r(k)_{up} = K_{fe}\left(g_e, EURO_VI\right) = 84{,}3/\left(g_e + 24{,}2\right)\ ‰, \qquad (3.47)$$

$$r(k)_{dn} = K_{fe}\left(g_e, EURO_I\right) = 84{,}3/\left(g_e + 459{,}2\right)\ ‰. \qquad (3.48)$$

$$a(k) = 2{,}075 \cdot 10^{-3} \cdot g_e + 0{,}181; R^2 = 1{,}0, \qquad (3.49)$$

$$b(k) = -2{,}462 \cdot 10^{-8} \cdot g_e^2 - 1{,}190 \cdot 10^{-5} \cdot g_e - 2{,}735 \cdot 10^{-4}; R^2 = 1{,}0, \qquad (3.50)$$

Оскільки значення коефіцієнтів a(k) і b(k) залежать від значення величини g_e, то формула (3.38) набуває виду формули (3.51), результати її застосування зведено проілюстровані на рис. 3.30, на якому видно, що плин графіків залежностей значень часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ від порежимних значень критерію K_{fe} суттєво відрізняється для різних порежимних значень величини g_e.

$$d\left(K_{fe}\right)=\exp\left\{-\exp\left(a\left(g_e\right)+b\left(g_e\right)\cdot K_{fe}\right)\right\}, \qquad (3.51)$$

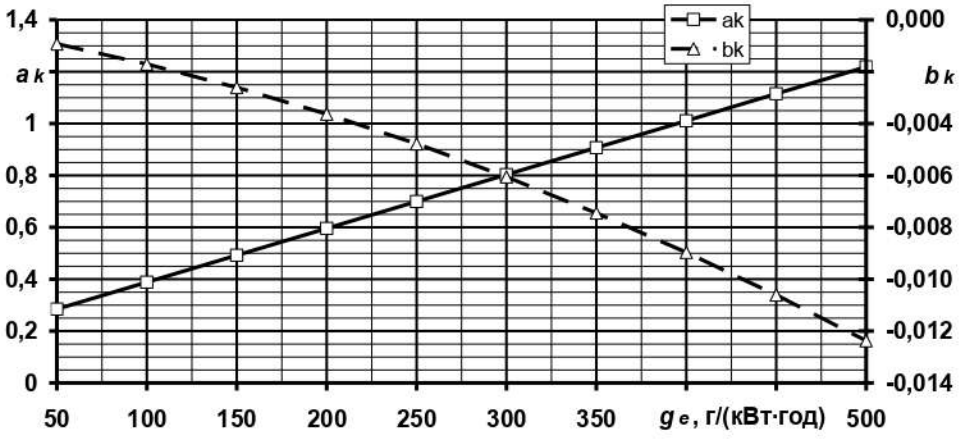


Рисунок 3.29 – Графіки залежності значень коефіцієнтів a(k) і b(k) часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ від порежимного значення величини g_e

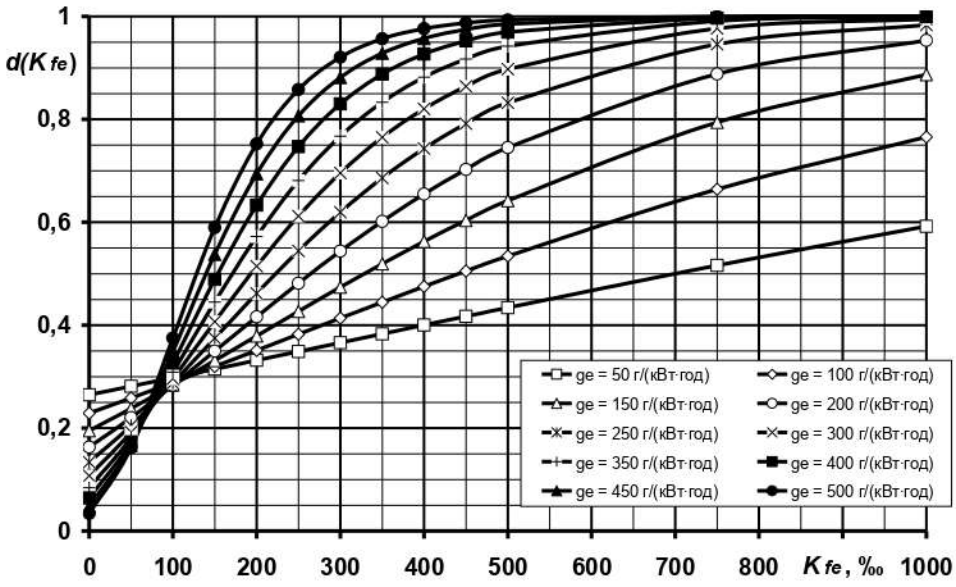


Рисунок 3.30 – Графіки залежності значень часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ від порежимних значень критерію K_{fe} в залежності від порежимного значення величини g_e

3.7 Визначення еталонних значень вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію

У роботі [4] запропоновано підхід до визначення вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію A_{fuel} та описано і проаналізовано результати його реалізації у вигляді розрахунків за відповідною методикою. Вказаний підхід виражається у тому, що шукана величина виражається з рівняння, де прирівнюються частинні похідні критерію K_{fe} за масовим годинним викидом k-го законодавчо нормованого полютанту $\partial K_{fe}/\partial G_k$ та за масовою годинною витратою моторного палива $\partial K_{fe}/\partial G_{fuel}$ і має ті самі властивості, що й безрозмірний індекс відносної агресивності k-го полютанту A(k), що викладено у цьому розділі рукопису вище.

На рис. 3.31 видно, що значення коефіцієнта A_{fuel} розподіляються по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 нерівномірно, а їх залежність від значень координат цього поля є нелінійною. Коефіцієнт A_{fuel} набуває значень у діапазоні від 6,1 ($n_{кв}$ = = 1200 rpm, $M_{кр}$ = 0,55 Н·м – режим А) до 60,0 ($n_{кв}$ = 800 rpm і $M_{кр}$ = 88 Н·м – режим Б), тобто зростає у 9,8 разів зі зростанням N_e у 450 разів, $M_{кр}$ у 200 разів, $n_{кв}$ у 2,3 рази, G_{fuel} у 9,8 разів, $\Sigma(A_k \cdot G_k)$ у 21,7 рази.

Значення витрати моторного палива двигуном за умови постійності завданого значення його ефективного ККД η_e описується формулою (3.52), значення величини A_{fuel} за умови постійності завданих значень ефективного ККД двигуна η_e та рівня норм EURO – формулою (3.53). Сімейство залежностей, описаних формулою (3.53), проілюстровано на рис. 3.31. На ньому видно, що ці залежності носять нелінійний характер, а саме парабол 2-го ступеня, котрі проходять крізь початок координат, тобто за значення η_e = 0 для будь-якого рівня норм EURO вагомість витрат палива двигуном також дорівнює нулю. Також видно, що зі збільшенням значення η_e зростає також і значення A_{fuel}, рівно як і зі зниженням рівня норм EURO. Для об'єктивної межі значення ККД для поршневих ДВЗ η_e = 0,5 значення A_{fuel} = 26,7 для EURO I, 16,9 для EURO II, 10,2 для EURO III, 6,2 для EURO IV, 3,7 для EURO V та 1,6 для EURO VI. Для теоретичної межі значення ККД для ЕУ з рекуперацією теплової енергії, АТЗ з рекуперацією механічної енергії та ін. η_e = 1,0 значення A_{fuel} = 82,1 для EURO I, 48,5 для EURO II, 26,7 для EURO III, 14,6 для EURO IV, 7,4 для EURO V та

2,3 для EURO VI. Останні залежності проілюстровано на рис. 3.32 сімействами гістограм. На ньому видно, що залежності значення A_{fuel} від рівня норм EURO для фіксованого значення η_e є також нелінійними.

$$G_{fuel} = 3{,}6 \cdot n_{cs} \cdot M_{кр} / (9550 \cdot \eta_e \cdot H_u), \text{ кг/год.} \quad (3.52)$$

$$A_{fuel} = (((G_{fuel}(\eta_e) + 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma(A(\text{k}) \cdot G(\text{k}))(\text{EURO}))^2 - 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma(A(\text{k}) \cdot G(\text{k}))(\text{EURO})^2) / (\sigma \cdot f \cdot G_{fuel}(\eta_e)^2). \quad (3.53)$$

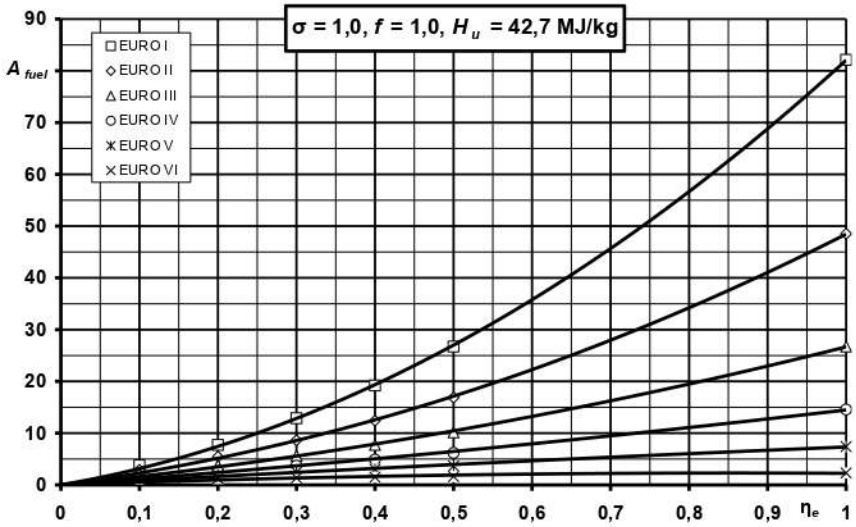


Рисунок 3.31 – Графіки залежності значення величини A_{fuel} від значень ефективного ККД двигуна η_e за фіксованого значення рівня норм EURO

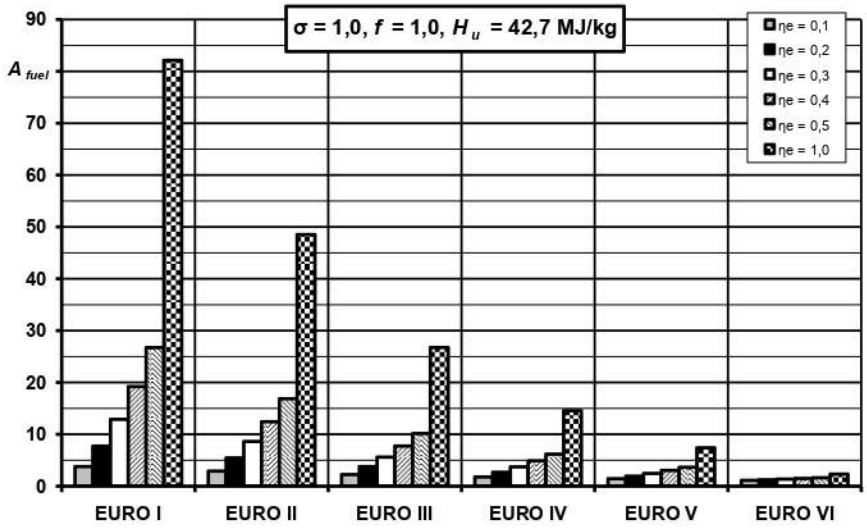


Рисунок 3.32 – Гістограми залежності значення величини A_{fuel} від значень рівня норм EURO за фіксованого значення ефективного ККД двигуна η_e

Інформація на рис. 3.31 і 3.32 отримана за умови $\sigma = 1{,}0$, $f = 1{,}0$ та $H_u = 42{,}7$ МДж/кг. У роботі також досліджено вплив значень факторів, які характеризують умови експлуатації ЕУ з ПДВЗ (σ та f) і властивості моторного палива (H_u), на зна-

чення A_{fuel}, результати такого дослідження проілюстровано на рис. 3.33 і 3.34.

Слід зауважити, що згідно до методики [26], на основі якої побудовано математичний апарат критерію K_{fe}, ці впливаючі фактори приймають значення у таких межах: σ = [0,025…10], f = [0,5…2,0], H_u = [25…125] МДж/кг.

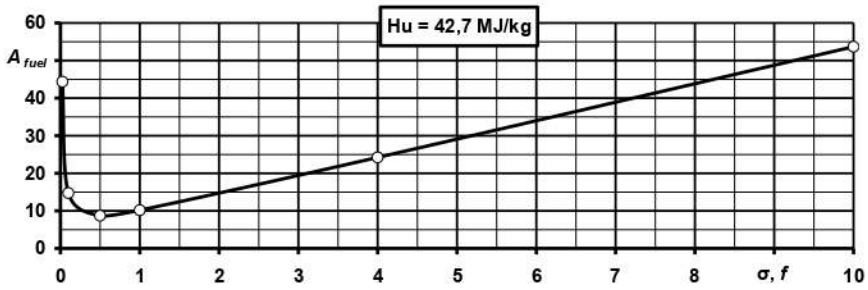


Рисунок 3.33 – Залежність усередненого значення величини A_{fuel} від значення коефіцієнта σ та індексу f за значення H_u = 42,7 МДж/кг

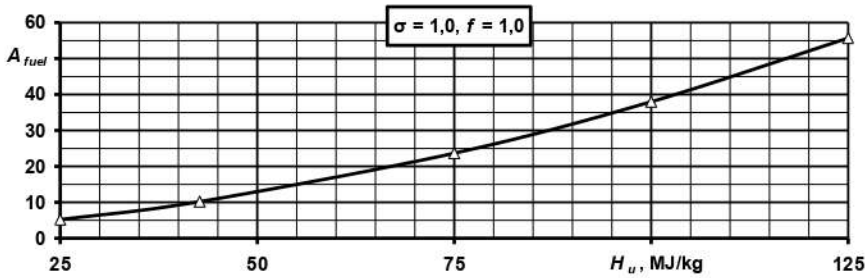


Рисунок 3.34 – Залежність усередненого значення величини A_{fuel} від значення теплотворної здатності моторного палива H_u за значень σ = 1,0, f = 1,0

На рис. 3.34 видно, що залежність $A_{fuel} = f(\sigma, f)$ носить складний характер: у діапазоні σ, f = 0,5 … 10 – A_{fuel} лінійно зростає від 8,7 до 53,7, а в діапазоні σ, f = 0,5… …0 – також зростає , але за гіперболічним законом, асимптотично наближаючись до вісі ординат. На рис. 6.39 видно, що залежність $A_{fuel} = f(H_u)$ носить нелінійний характер, значення A_{fuel} зростають за параболічним законом від 8,7 до 14,6 зі зростанням H_u, а при H_u = 0 МДж/кг графік перетинає початок координат.

3.8 Отримання значень інтегративного показника рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації поршневого ДВЗ в енергоустановці на основі узагальненої функції бажаності з урахуванням значень комплексного паливно-екологічного критерію

На основі усіх отриманих вище результатів розрахунковим шляхом отримано розподіли значень розробленого критерію ефективності функціонування СУЕБ про-

цесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ, побудованого на основі математичного апарату узагальненої функції бажаності D, по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для різних варіантів його структури.

При цьому попередньо отримано залежності параметрів часткових функцій бажаності d(k) для усіх врахованих математичним апаратом комплексного паливно-екологічного критерію чинників ЕНБ та усіх чинників, введених у структуру запропонованого у роботі критеріального апарату, що проілюстровано на рис. 3.35.

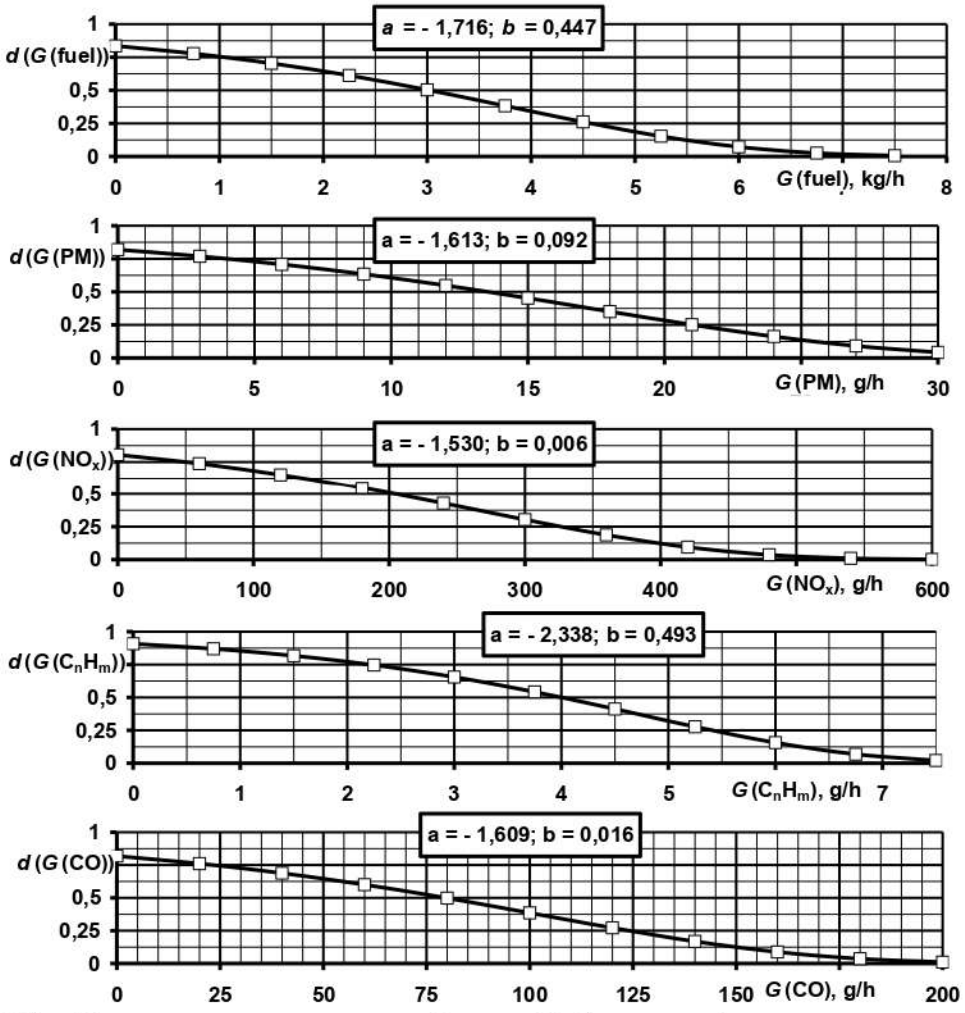


Рисунок 3.35 – Параметри часткових функцій бажаності врахованих чинників ЕНБ

На рис. 3.36,а наведено такий розподіл для критерію зі структурою впливаючих чинників, аналогічній структурі комплексного паливно-екологічного критерію K_{fe}, на рис. 3.36,б – з критерієм K_{fe} у якості самостійного і єдиного врахованого чинника, а на рис. 3.36,в – критерієм K_{fe} у якості самостійного чинника та усіма іншими чинниками, котрі додатково введено до його структури.

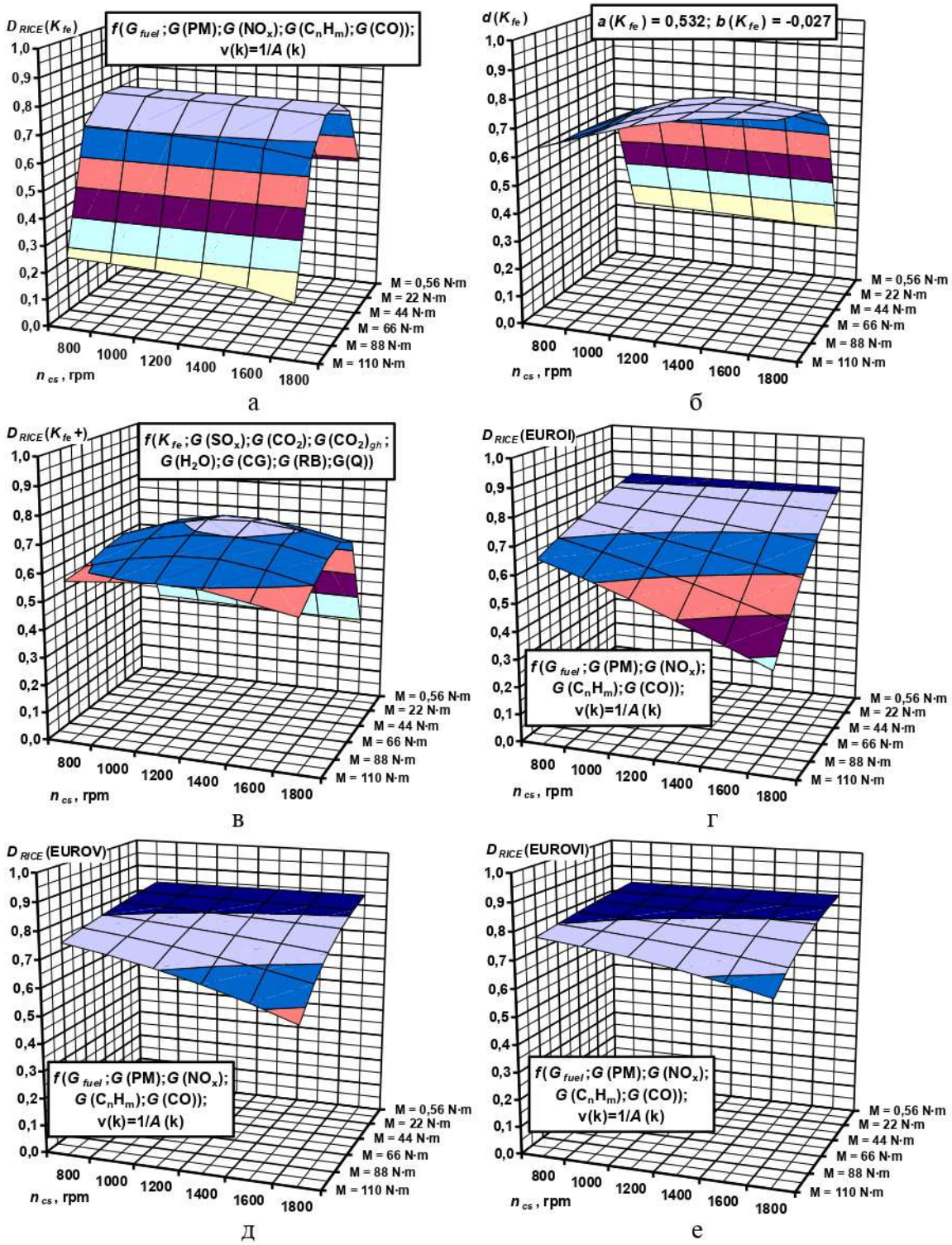


Рисунок 3.36 – Розподіл значень розробленого інтегративного показника рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації поршневого ДВЗ в енергоустановці та його еталонних значень для різних рівнів стандартів екобезпеки EURO по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для різних варіантів структури

3.9 Висновки по розділу 3

Таким чином, у цьому розділі рукопису дисертаційної роботи отримано такі результати.

1. Розроблено індикатор екобезпеки поршневого ДВЗ і його технології захисту навколишнього середовища.

Надано теоретичні основи методології комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ із високим рівнем фізичного зносу. Показані переваги введеного індикатора екобезпеки ПДВЗ і його ТЗНС Ω_{RICE}, величина якого становить суму двох інтегративних показників екологічної якості J_{RICE} та J_{EPT}, що оцінюють окремо рівень екологічної якості функціонування ПДВЗ і ТЗНС у складі енергоустановки з урахуванням результатів стендових моторних випробувань. Значення інтегративного показника екологічної якості J_{RICE} формує значення інтегративного показника рівня екобезпеки процесу експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE}, а інтегративного показника екологічної якості роботи ТЗНС J_{EPT} – індексу ефективності функціонування ТЗНС I_{EPT}. Це відображає розроблений інтегративний підхід до оцінювання рівня екологічної безпеки.

2. Розроблено підхід до визначення вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію у якості показника вагомості витрат моторного палива як чинника екологічної небезпеки.

Запропоновано характеризувати таку вагомість коефіцієнтом A_{fuel}, що має фізичний зміст, близький до фізичного змісту коефіцієнта безрозмірного показника відносної агресивності k-го законодавчо нормованого полютанта у потоці ВГ ПДВЗ A_k. Введений коефіцієнт вагомості паливної складової критерію K_{fe} урівнює вирази для частинних похідних критерію за величиною масової годинної витрати палива ПДВЗ та за величинию масового годинного викиду законодавчо нормованого полютанту з потоком ВГ ПДВЗ. Шляхом розрахункового дослідження встановлено, що у першому наближенні можна використовувати усереднені по всьому полю робочих режимів значення цих величин, а саме A_{fuel} = 38,4. Отримано залежності значення коефіцієнтом A_{fuel} від значень впливаючих факторів, що характеризують параметри моторного палива і умов експлуатації ПДВЗ для всього діапазону їх зміни.

3. Розроблено підхід до розширення номенклатури врахованих математичним апаратом інтегративного показника рівня екобезпеки процесу експлуатації ПДВЗ в ЕУ чинників екологічної небезпеки згідно до розробленого класифікатора.

Викладено загальний підхід до врахування викиду полютанта з потоком ВГ при комплексному критеріальному оцінювання, який застосовано для введення у структуру впливаючих чинників критерію масових годинних викидів оксидів сірки з потоком ВГ, таких викидів діоксиду вуглецю як полютанту і як парникового газу, бензо(а)пірена та інших поліциклічних ароматичних вуглеводнів, парів води, а також масових годинних викидів аерозолю картерних газів, випарів моторного палива, спричинених явищами великого та малого дихання резервуарів й викидів теплової енергії. Вдосконалено і застосовано математичний апарат інтегрального індексу екологохімічної оцінки.

Виконано аналіз кількісних і якісних особливостей структури врахованих чинників екологічної небезпеки при критеріальному оцінюванні рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ за допомогою математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію, який розширено з 5 позицій до 14 з 23 можливих, проте складають повний набір для досліджуваного типу ПДВЗ та відрізку його життєвого циклу, окрім забруднення НПС шумом і вібрацією.

4. Розроблено підхід до визначення еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію, що є складовою інтегративного показника рівня екобезпеки процесу експлуатації ПДВЗ в ЕУ, як реперних точок психофізичної шкали відповідної йому часткової функції бажаності.

Здійснено розрахункове оцінювання еталонних значень як реперних точок психофізичної шкали часткової функції бажаності показників екологічності ПДВЗ як складових комплексного паливно-екологічного критерію у залежності від значення ефективної потужності та координат поля робочих режимів двигуна для різних рівнів законодавчо встановлених екологічних нормативів EURO, що діють на території України та діяли раніше за розробленою у дисертації методикою, котра заснована на пропонованому підході.

5. Розроблено підхід до визначення еталонних значень вагомості паливної

складової комплексного паливно-екологічного критерію як показника вагомості споживання моторного палива як чинника екологічної небезпеки.

Здійснено розрахункове оцінювання еталонних значень паливної та екологічної складової комплексного паливно-екологічного критерію у залежності від значень рівня екологічних нормативів EURO, ефективного ККД двигуна та нижчої теплотворної здатності моторного палива за розробленою у дисертації методикою, котра заснована на пропонованому підході.

6. Отримано значення інтегративного показника рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації поршневого ДВЗ в енергоустановці на основі узагальненої функції бажаності з урахуванням значень комплексного паливно-екологічного критерію та параметрів часткових функцій бажаності для усіх врахованих цими математичними апаратами чинників екологічної небезпеки. Отримано розподіли значень розробленого інтегративного показника по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для різних варіантів його структури.

Обґрунтовано доцільність розробки комплексної системи управління екологічною безпекою процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу відповідно до роботи ПДВЗ як джерела чинників негативного впливу на атмосферне повітря та ефективності системи забезпечення екологічної якості роботи енергоустановки, що являє собою ТЗНС.

Тобто, вирішено задачі дослідження № 3.

4 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ

4.1 Загальні міркування

Аналіз нормативно-правової бази щодо питань захисту атмосферного повітря від техногенного впливу показав такі загальнодержавні та відомчі аспекти.

Конституція України встановлює, що забезпечення ЕБ і підтримання екологічної рівноваги на території України є обов'язком держави. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» встановлює основні принци забезпечення такого зобов'язання. Серед них особливо треба виділити такі, що мають прямий стосунок до процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ: пріоритетність вимог ЕБ, обов'язковість додержання екологічних нормативів при здійсненні господарської діяльності, гарантування екологічно безпечного середовища для життя і здоров'я людей, використання та відтворення відновлюваних природних ресурсів, обов'язковість оцінки впливу на довкілля, науково обґрунтоване нормування впливу господарської та іншої діяльності на НПС, науково обґрунтоване узгодження екологічних, економічних та соціальних інтересів суспільства на основі поєднання міждисциплінарних знань екологічних, соціальних, природничих і технічних наук та прогнозування стану НПС. Стратегія сталого розвитку «Україна–2020», схвалена Указом Президента України № 5/2015 від 12.01.2015 р., ставить за мету впровадження в Україні європейських стандартів життя, для досягнення якої передбачається здійснювати рух уперед за вектором безпеки, який полягає у тому числі й у приділенні особливої уваги безпеці життя та здоров'я людини, що неможливо без безпечного стану довкілля. Стратегія національної безпеки України, затверджена Указом Президента України від 14.09.2020 р № 392/2020, встановлює наступним важливим завданням розробку Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату України. Імплементований в Україні стандарт екологічних показників АТЗ з ПДВЗ Правил ЄЕК ООН R-49 встановлює необхідність для нових одиниць техніки відповідати вимогам рівня EURO V та рівня EURO II для одиниць вживаної техніки, але заплановане введення

в дію вимог рівня EURO VI перенесено на 2025 р. через неготовність матеріальної бази та інфраструктури. «Положення про організацію екологічного забезпечення ДСНС України», затверджене наказом № 618 від 20.09.2013 р., встановлює, що метою забезпечення є досягнення екологічної безпеки усіх видів діяльності органів та підрозділів ДСНС, а також охорона НПС у місцях їх дислокації та розташування. З числа завдань такої діяльності особливо слід відмітити наукове забезпечення основних завдань такого забезпечення, що має виконуватись завдяки додержанню граничнодопустимих норм викиду в атмосферу шкідливих речовин, виконання заходів щодо їх скорочення, зниження токсичності вихлопних газів техніки підрозділів.

Отже, з аналізу наведеної вище інформації випливає, що розробка методологічних основ системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ у повній мірі відповідає чинній нормативно-правовій базі як на загальнодержавному, так і на відомчому рівні.

4.2 Передумови розробки системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

Аналіз матеріалів публікацій і доповідей секцій Всесвітніх конгресів Товариства інженерів автомобільної промисловості (Society of Automotive Engineers (SAE)), які присвячені питанням екологічності ДВЗ, за період з 1991 по 2014 рр. здійснений у [1], показує, що у цей час (останні 25 років) у області зазначеного питання спостерігались такі тенденції: а) дизелізація світового парку АТЗ і парку АТЗ нашої країни; б) охоплення нормативами екологічності нових типів АТЗ, а з ними і їхніх ПДВЗ; в) введення екологічних стандартів у країнах світу, де таких стандартів ще не було; г) перехід від нормування димності ВГ до нормування масового викиду ТЧ ними; д) акцентування уваги на фракційному складі ТЧ за масою, за площею активної поверхні та рахунковому (за кількістю окремих частинок); е) акцентування уваги на хімічному складі та внутрішній структурі ТЧ; ж) перехід від технології простої фільтрації ВГ і їхнього каталітичного окислення до застосування комплексних систем зниження токсичності ВГ; з) прагнення до модульності та компактності систем зниження токсичності ВГ та їхніх агрегатів; і) вирішення проблеми холодного пуску

ПДВЗ; к) вдосконалення керамічних матеріалів підложки каталітичних нейтралізаторів і ФТЧ; л) перехід від цільнокерамічних ФЕ до ФЕ стільникової структури з газопроникними стінками каналів, заглушеними у шаховому порядку; м) поглиблене вивчення каталітичних властивостей металів платинової групи та їхніх комбінацій; н) пошук, дослідження та впровадження у виробництво матеріалів ФЕ, альтернативних керамічним: волокнистих, насипок, намоток, тканих і нетканих сталевих сіток, мембран; о) розроблення і застосування різних варіантів реалізації комплексного підходу до зниження токсичності ВГ, що передбачає вдосконалення не лише системи їх очищення, але й систем, що задіяні у організації робочого процесу ПДВЗ, а також підвищення якості моторних палив і олив; п) розроблення і впровадження заходів щодо приведення показників токсичності ВГ двигунів АТЗ, що перебувають у експлуатації, до рівня нововведених норм; р) інтеграція системи зниження токсичності ВГ двигуна до системи електронного керування ПДВЗ або АТЗ; с) математичне моделювання механізмів утворення токсичних забруднюючих речовин у ВГ, зокрема і ТЧ, у робочому процесі ПДВЗ; т) математичне моделювання процесів, що відбуваються у ВГ під час їхнього руху випускним трактом ПДВЗ; у) математичне моделювання процесів, що відбуваються під час регенерації I і II роду у ФТЧ.

Таким чином, наукоємність підходів до реалізації вищенаведених тенденцій і спектр науково-технічних проблем у питаннях ЕБ процесу експлуатації АТЗ і ПДВЗ, що входять до їхнього складу, свідчать про те, що ця проблематика є вкрай актуальною у країнах з розвинутим двигуно- і автомобілебудуванням. Основною тенденцією можна вважати послідовне зменшення масового викиду ТЧ з потоком ВГ поршневих ДВЗ, що спричинено суттєвим посиленням законодавчо встановлених вимог до енергетичних установок [1].

Сучасні вимоги до ПДВЗ передбачають скорочення усіх видів забруднення НПС, до яких традиційно відносять [1–20] (упорядковану у першому наближенні інформацію у виді класифікації наведено на рис. 4.1 [1]):

1) речовини-забруднювачі (хімічне і біологічне забруднення НПС): а) тверді – деталі механізмів і систем двигуна, а також корпусні (у тому числі й одноразові), що вичерпали ресурс або вийшли з ладу; б) рідкі – палива, оливи, охолоджуючі рідини,

електроліти, консистентні змазки; в) газоподібні – токсичні забруднюючі речовини у ВГ і аерозолі ТЧ у них, випари рідких забруднювачів, парникові гази;

2) енергетичне забруднення (фізичне забруднення НПС): а) електромагнітні поля – від електронних частин систем автоматичного керування і автоматичного регулювання; б) шум і вібрації – механічні, аеродинамічні, гідравлічні, хімічні джерела механічних коливань; в) теплота – вся енергія, що виділилась при згорянні палива врешті-решт перетворюється у теплову (безпосередньо або при подоланні дисипативних сил) і йде на нагрівання навколишнього середовища;

3) інформаційне забруднення – від електронних частин систем автоматичного керування і автоматичного регулювання: а) інформаційний шум; б) хибна інформація; в) турбуючі фактори.



Рисунок 4.1 – Класифікація видів забруднення довкілля енергоустановками з поршневим ДВЗ [1]

Усі забруднювачі-речовини мають відповідним чином знешкоджуватися та/або рециклюватися. Всі види енергетичного забруднення повинні скорочуватися, оскільки є дисипативними. Інформаційні забруднення ще недостатньо досліджені. Спільним є одне – скорочення відходів будь-якого виду потребують матеріальних і органі-

заційних витрат, а також відповідного законодавчого забезпечення. При цьому ці витрати для приведення показників токсичності ВГ ПДВЗ АТЗ, що випускаються на пострадянському просторі, у відповідність до вимог європейських норм настільки великі й потребують настільки радикальних змін у конструкції й технології виробництва цих ПДВЗ, що провідними фахівцями в цій підгалузі зазначається економічна недоцільність таких змін для досягнення вимог більш суворих, ніж EURO II [1].

Аналіз характеристик вітчизняних транспортних і автотракторних дизелів показує, що більшість з них не задовольняє сучасних європейських норм токсичності ВГ. Ці показники, отримані при регулюваннях, що забезпечують найкращу паливну економічність, не задовольняють вимог стандарту EURO II, введеного в дію на території України з 2010 р., ні за одною з токсичних забруднюючих речовин у ВГ [1].

Інформаційне забруднення наразі є недооціненим, однак відомо, що воно характеризується такими ознаками [1]: а) нематеріальність – не піддаються аналізу органами чуттів людини, тварин як сам фактор впливу, так і наслідки його дії; б) спричиняє звикання – замінює собою вдоволення якої-небудь природної потреби і замінює природний спосіб її вдоволення; в) неочевидність спричинених витрат – вкрай мала кількість енергії на генерування одиниці діючого фактора створює хибну впевненість у її «безкоштовності», що значно посилюється у поєднанні з першим пунктом і експоненціальним характером зростання кількості цього забруднення; г) широка розповсюдженість – чинить дію на усі живі істоти, особливо на людину; д) руйнівність – може стати причиною виходу з ладу автоматизованих фінансових систем і систем безпеки цілих країн, появи і розвитку кіберзлочинності у загальносвітовому масштабі; е) наявність «відкладених ефектів» – чинить вплив на показники мозкової активності нових поколінь людини, змінює поведінкові моделі отримання і використання знань, зміст культурних цінностей, моральних орієнтирів, положень фундаментального наукового доопрацювання (особливо історичного); ж) легальність – знаходиться поза дією санкцій правового поля або під захистом держави, активно використовується у геополітичній, політичній і конкурентній боротьбі; з) незворотність ефектів – у разі потрапляння у НПС невпинно розповсюджується. Таким чином, інформаційне забруднення є відмінним від двох вищезгаданих інших за фізичною

природою чинником ЕНБ, специфічним і небезпечним та має безпосереднє відношення до теорії інформації та психології, у тому числі й екстремальної та кризової [31], та виходить за рамки даного дослідження.

4.3 Побудова системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ на етапі його життєвого циклу «безаварійна експлуатація»

Дослідження різноманітних аспектів ЕБ потребує конкретизації суті понятійного апарату, методології вирішення екологічних проблем. Управління ЕБ являє собою складову частину системи управління, яка пов'язана з комплексом проблем життєзабезпечення людини. Питання щодо цієї проблематики конкретизують і деталізують наукові праці В.А. Андронова, Т.В Козулі, С.О. Вамболя, В.В. Вамболь, В.М. Навроцького, І.С. Масленнікової, Ю.М. Саталкіна, В.Я. Шевчука, О.Д. Липенкова, В.М. Федосєєва та інших учених. Останнім часом проводяться багатоаспектні теоретичні й практичні дослідження у даній галузі. В роботах М.М. Биченка, В.М. Шмандія, О.М. Касимова, Г.Д. Коваленка, С.С. Рижкова, Л.Д. Пляцука, М.С. Мальованого, В.М. Кобріна, М.В. Нечипорука та інших конкретизуються і поглиблюються підходи за різноманітними науковими напрямками, зокрема за технічними. Постійно поширюється сфера теоретичних і практичних досліджень, при цьому ЕБ розглядається як складова національної безпеки. Докладний аналіз робіт вітчизняної школи управління ЕБ [180–210] здійснено у дослідженнях [1, 180].

Таким чином, створення наукових основ методологічного забезпечення рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ є актуальною задачею, що вирізняється науковою новизною, а її вирішення дасть значну практичну цінність.

Ефективне і раціональне вирішення проблеми накопичення небезпечних відходів і нейтралізації полютантів, джерелами яких виступають ЕУ з ПДВЗ, полягає у створенні СУЕБ процесу їх експлуатації [1]. У цьому випадку доцільним і раціональним є застосування системного підходу до розроблення організаційно-технологічних рішень для основних складових процесу забезпечення екологічної безпеки. Це дозволить раціонально сформулювати і вирішити складні й комплексні науково-технічні проблеми шляхом структурування і виділення їхніх окремих задач як відносно

самостійних частин з урахуванням їх взаємозв'язку і динамічної взаємодії.

Під час ліквідації надзвичайних ситуацій бойовими підрозділами ДСНС України використовується велике різноманіття АТЗ і спеціальної техніки, більшість з якого працює за допомогою ПДВЗ, зокрема дизелів. Те саме стосується АТЗ і спеціальної техніки, що використовується у службово-бойовій діяльності сил Національної гвардії України, Національної поліції України, Збройних сил України, Державної прикордонної служби України та інших силових структур [1–5].

Наразі дуже актуально стоїть питання щодо забезпечення рівня ЕБ процесу експлуатації АТЗ і спеціальної техніки як під час локалізації й ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, так і під час бойового чергування. Це зумовлено тим, що при роботі ПДВЗ виділяється велика кількість ВГ – приблизно у 22–115 разів за масою більше (залежно від режиму роботи дизеля і, відповідно, від значення коефіцієнта надлишку повітря), ніж споживається палива, якого, у свою чергу, сучасні дизелі у середньому по експлуатаційному циклу споживають 230–270 г на 1 кВт ефективної потужності за годину.

Ці вимоги задовольняються шляхом застосування нейтралізації полютантів у потоці ВГ дизелів, що для ТЧ зазвичай здійснюються шляхом фільтрації їхнього потоку фільтрами ФТЧ. Як показано у [1], існує значне різноманіття конструкцій ФЕ ФТЧ, більшість з яких має в своєму складі керамічні елементи і каталітичні покриття з коштовних металів, тому їм притаманна низка недоліків, що не дозволяють їх використовувати для модернізації АТЗ і спеціальної техніки ДСНС України.

Спираючись на проведений аналіз, а також специфічні особливості створення СУЕБ [1, 180], можна запропонувати використання такої послідовності при формуванні моделі управління ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, зокрема і дизелями:

1. Визначення задач і вивчення інформації щодо ФТЧ вітчизняного виробництва, отримання їх показників роботи експериментальним та розрахунковим шляхом.

2. Вибір критеріїв ефективності або критеріїв прийняття рішень для раціоналізації такої системи – для оцінювання ефективності її функціонування та створення у ній управляючого контуру зворотного зв'язку.

3. Розроблення нових і вдосконалення відомих методів і засобів для вирішен-

ня визначеної задачі.

4. Проведення експериментальних досліджень (випробувань) теоретичних розробок, у тому числі й у виробничих умовах та умовах реальної експлуатації.

5. Опрацювання рекомендацій і нормативно-технічної документації для введення в експлуатацію ФТЧ вітчизняного виробництва чи інших виконавчих пристроїв відповідної ТЗНС як матеріальної основи СУЕБ.

Схему такого алгоритму подано на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Алгоритм побудови системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

Будь-яка СУЕБ має враховувати специфічні особливості об'єкту чи процесу, для управління рівнем ЕБ якого її розробляють, тому для її побудови у даному разі класифікацію шкідливих чинників впливу ЕУ з ПДВЗ на компоненти НПС і рівень ЕБ в урбосистемах, викладену на рис. 4.1 (класифікаційна ознака – матеріальний носій чинника – речовини, енергетичні й інформаційні забруднення), модифіковано для зручності побудови СУЕБ і така класифікація наведена на рис 4.3. У ній ті самі види забруднення ПНС поділено на такі:

1) полютанти (забруднювачі, шкідливі речовини) – це усі газоподібні (токсичні забруднюючі речовини у ВГ і аерозолі ТЧ у них, випари рідких забруднювачів, парникові гази) й рідкі речовини-забруднювачі (палива, оливи, охолоджуючі рідини, електроліти, консистентні змазки);

2) шкідливі фактори впливу – це усі види енергетичного (електромагнітні поля, шум і вібрація, теплота) й інформаційного забруднення;

3) відходи – це тверді речовини-забруднювачі (деталі механізмів і систем двигуна, а також корпусні деталі, що вичерпали ресурс або вийшли з ладу).

Формалізація вирішення задачі побудови системи управління ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ як необхідний крок запропонованого алгоритму побудови відповідної СУЕБ виконана згідно до таких міркувань.



Рисунок 4.3 – Класифікація видів забруднення довкілля поршневими ДВЗ у складі енергоустановки

Як і будь-яка складна система, СУЕБ складається з багатьох компонентів, що формуються виходячи з їх функціональних характеристик і взаємовідносин у процесі функціонування системи в цілому. Це дозволяє представити систему у вигляді моделі, зручної для аналітичного дослідження і синтезування компонентів-підсистем власне системи й зовнішнього середовища [1].

Вихідною позицією для розроблення такої системи може бути диференціація

технологічного процесу забезпечення рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ як сукупності основних (нейтралізації, утилізації й очищення) та допоміжних (підготовка вихідних даних, сировини для основних процесів, транспортування, складування, управління, диспетчеризації тощо) процесів на характерні етапи.

Кожна складова СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ є складною і об'ємною цільовою підсистемою, що характеризується певними функціями, методами і засобами їх практичної реалізації.

Головними цілями побудови, організації й функціонування СУЕБ є такі [1]: А) запобігання (або суттєве обмеження) негативному впливу на НПС чинників ЕНБ; Б) послаблення прояву небезпеки; В) послаблення дії джерел небезпеки.

Формалізація вирішення задачі ефективного управління рівнем ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ взагалі й побудова відповідної СУЕБ зокрема може бути виконана з використанням принципу багаторівневої декомпозиції [1].

Процес синтезу такої СУЕБ засновано на її розбитті на ієрархічні рівні функціонально завершених етапів вирішення комплексу підзадач цього рівня. Це наочно відображено на рис. 4.4.

Етап 1 – «Етап формування вихідних даних» (див. рис. 4.4) – включає два рівні, що визначають ідентифікацію відходів і небезпек, джерелом яких виступає ЕУ з ПДВЗ [1]. На першому рівні, що насить назву «Ідентифікація джерел чинників екологічної небезпеки і аналіз нормативно-правової бази», визначаються типи чинників ЕНБ. Як указувалось вище, ПДВЗ є джерелами таких факторів: а) полютанти; б) шкідливі фактори впливу; в) відходи, а також нормативні вимоги до їхніх рівнів (Правила ЄЕК ООН № 49 і № 96). Особливо виділяються групи, що сприяють утворенню і викиду у НПС високотоксичних канцерогенних й мутагенних речовин.

Рівень 2, що називається «Класифікація чинників екологічної небезпеки з урахуванням їхніх генезису і значущості», передбачає: а) визначення й ідентифікацію небезпек з урахуванням характерних особливостей регіональної структури парку техніки, що оснащена ПДВЗ; б) просторово-часову структуризацію джерел чинників екологічної небезпеки; в) кількісну структуризацію. Останнє передбачає наявність статистичних даних за типами джерел небезпеки та їхніми окремими чинниками.

Цей рівень завершується розробленням варіантів принципових технологічних схем забезпечення екологічної безпеки експлуатації ЕУ з ПДВЗ.



Рисунок 4.4 – Укрупнена схема багаторівневої декомпозиції системи управління екологічною безпекою при експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

Етап 2 – «Етап нових і вдосконалених технологій» – так само, як і попередній, складається з двох послідовних рівнів (див. рис. 4.4) – рівня 3 і рівня 4 [1].

Рівень 3, що називається «Розроблення нових і вдосконалення відомих підготовчих процесів», охоплює підготовчі процеси зі створення технологічної системи оброблення полютантів і відходів для забезпечення допустимого рівня показників екологічної безпеки. Він включає такі технологічні процеси: а) оброблення (термічного, термокаталітичного, хімічного) полютантів і відходів, що забезпечують заданий рівень ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ; б) очищення газоподібних, рідких і твердих продуктів обробки, що попереджають первинне й вторинне утворення висо-

котоксичних речовин; в) утилізації й перероблення твердих відходів,що попереджають утворення високотоксичних речовин у продукції цільового призначення.

На рівні 4, що носить назву «Розроблення нового і вдосконалення наявного оснащення для реалізації технологічних процесів», продукуються технічні умови і розробляється оснащення, необхідне для обробляння полютантів і відходів, що може забезпечити допустимий рівень чинників ЕНБ продуктів переробки – ВГ, твердого залишку, рідкого конденсату, а також у продукції цільового призначення. Під цим розуміється забезпечення технологічних процесів основним, допоміжним і додатковим обладнанням з урахуванням виконання вимог щодо виробничої безпеки персоналу, а саме: а) для оброблення полютантів і відходів; б) для очищення газоподібних, рідких і твердих продуктів обробки; в) для утилізації й перероблення твердих відходів і отримання продукції цільового призначення. Для цього рівня характерною особливістю є урахування об'ємів, номенклатури і маршрутів виробничих процесів і термінів їх виконання.

Етап 3 – «Організація і виконання технологічних процесів, що забезпечують заданий рівень ЕБ, що використовуються СУЕБ». На ньому відбувається безпосереднє виконання технологічних процесів, що забезпечують нормативний рівень чинників ЕНБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ (див. рис. 4.4). Він містить два рівні – рівень 5 і рівень 6 [1].

Рівень 5, що носить назву «Організація і управління СУЕБ», характеризується вирішенням задач управління і організації вищезгаданих технологічних процесів. Він містить такі складові: а) організація послідовності технологічних процесів; б) організація виробничих ділянок для здійснення технологічних процесів; в) диспетчеризація і управління виробничим процесом. Комплексне вирішення задач цього рівня потрібно виконувати сумісно з вирішенням задач рівня 6 (власне виробничого) (див. рис. 4.4). Для досліджуваного процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ технологічними процесами є такі: а) високотемпературне обробляння полютантів і відходів; б) розкладання токсичних забруднюючих речовин низькотемпературною плазмою; в) хімічне перетворення токсичних речовин у безпечні продукти у присутності каталізаторів; г) різке охолодження ВГ; д) очищення ВГ різноманітними способами; е) відділення

продуктів цільового призначення (корисних продуктів).

Етап 4 – «Результати використання СУЕБ» (див. рис. 4.4) – є заключним і містить два рівні – рівень 7 і рівень 8 [1].

Рівень 7, що носить назву «Вихідні результати використання СУЕБ: значення чинників ЕНБ і отримання продукції цільового призначення», містить перелік показників результатів використання розробленої СУЕБ і способів їх визначення. Це показники за такими напрямами: а) зниження кількості твердих відходів на полігонах; б) зниження екологічного навантаження на ПНС; в) отримання продуктів цільового призначення (теплота, електроенергія, корисні речовини, матеріали тощо).

Рівень 8, що називається «Система моніторингу і контролю рівня ЕБ», є заключним у СУЕБ і замикає її зворотним зв'язком шляхом застосування критеріального оцінювання та моніторингу показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ і контролю показників ефективності роботи самої СУЕБ, що дає відповідь на запитання «Чи досягнуто забезпечення заданого рівня параметрів рівня ЕБ?», і, якщо ні, то чому і на якому етапі функціонування СУЕБ (див. рис. 4.4).

Таким чином, на основі принципів багаторівневої декомпозиції запропоновано ієрархічну структуру СУЕБ, що передбачає формалізацію вирішення задачі забезпечення нормативного (а краще – якомога вищого) значення показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

Структура запропонованої СУЕБ передбачає такі особливості [1]: а) наявність вертикальних (межрівневих) зв'язків; б) наявність горизонтальних (міжетапних) зв'язків; в) пріоритетність дії рівнів і етапів, спрямована вздовж відповідних зв'язків; г) взаємозалежність рівнів і етапів; д) варіантність вибору і вирішення задач кожного рівня.

4.4 Функції системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ та її складових

Формалізація вирішення задачі створення СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ як важливого і невід'ємного етапу створення методологічних основ цього процесу передбачає описання вербальними формулами функцій як самої СУЕБ, так і ок-

ремих складових її структури. Вищенаведене і становить сутність мети такого процесу [1]. Основою існування будь-якої системи є базис і наявність певної мети функціонування. При цьому взяті окремо складові системи виконують свої функції, підпорядковуючи свої дії кінцевій меті, і усі компоненти системи, перебуваючи у певному взаємозв'язку, мають проявляти узгодженість дій.

Функція СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ полягає у створенні екологічно безпечного процесу оброблення відходів і полютантів, джерелом яких є ПДВЗ, з можливістю отримання продукції цільового призначення.

Форму функції усієї СУЕБ, а також будь-якого її компонента, можливо формалізувати у вигляді вербально-логічної формули, що відображає взаємодію трьох компонентів і має вигляд формули (4.1) [1].

$$F^{i}_{j} = (A, B, C). \qquad (4.1)$$

Тут під застосованими позначеннями слід розуміти таке: А – дія системи (компонента), що спричиняє необхідний результат; В – найменування об'єкта, на який спрямована дія; С – формулювання особливих умов і обмежень, за яких виконується дія системи (компонента); і – номер рівня СУЕБ; j – номер структурного елемента рівня СУЕБ. Тоді ця функція для СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ являє собою формулу (4.2) [1].

Загальний підхід передбачає те, що кожен елемент системи (компонент-підсистема, компонент-елемент) також визначається власною функцією вигляду (4.1). Функції компонентів системи залежать від власних ознак компонентів як таких, а також їхніх зв'язків з іншими компонентами. Для формулювання основних функцій компонентів системи можна скористатися запропонованою схемою СУЕБ (див. рис. 4.5 – 4.9) і формулою (4.1), отримавши формулу (4.2) [1].

F (система забезпечення рівня ЕБ) = [показники рівня ЕБ (А) технологічного процесу вилучення і оброблення відходів й полютантів, джерелом яких є ПДВЗ (В), за раціональними організаційно-технічними параметрами із застосуванням нових або вдосконалених технологій забезпечення рівня ЕБ (С)]. (4.2)

На рівні 1 у підсистемах виділяють небезпечні відходи і полютанти за ознакою генезису (типу утворення) й ідентифікують з урахуванням можливого утворення високотоксичних забруднюючих речовин у процесі експлуатації ЕУ з ПДВЗ і надходженні їх до НПС.

Визначаючи основні закономірності формування екологічної небезпеки у підсистемах рівня 2, приймають описане формулами (4.3) – (4.5) [1].

F^2_1 (регіоналізація небезпек) = [в результаті аналізу особливостей структури автопарку техніки, оснащеної ПДВЗ, регіону (А) виділяються пріоритети структур небезпек (В) залежно від можливого розвитку небезпек) (С)]; (4.3)

F^2_2 (просторово-часова структуризація небезпек) = [в результаті аналізу екологічно небезпечних об'єктів певного генезису, які внаслідок взаємодії та взаємного впливу генерують небезпеку (А), позиціонують джерела небезпеки (В), з урахуванням не лише просторового розміщення джерел небезпеки по відношенню до різноманітних об'єктів, але і характер середовища, у якому ця небезпека розповсюджується (С)]; (4.4)

F^2_3 (кількісна структуризація джерел екологічної небезпеки) = [в результаті аналізу різноманітних варіантів принципових схем експлуатації ЕУ з ПДВЗ (А) вони класифікуються з урахуванням наявних ресурсів (В) і їхніх різновидів (С)]. (4.5)

Функції підсистеми рівня 3 описуються формулами (4.6) – (4.8) [1].

F^3_1 (технологічні процеси оброблення полютантів і відходів, джерелами яких є ЕУ з ПДВЗ, що забезпечують заданий рівень ЕБ) = [вибір технологічних процесів (А), що створюють необхідні умови (В) для перетворення відходів і полютантів у екологічно безпечні речовини або продукцію цільового призначення(С)]; (4.6)

F^3_2 (технологічні процеси очищення газоподібних, рідких і твердих продуктів оброблення полютантів і відходів, що попереджують первинне й вторинне утворення високотоксичних речовин) = [вибір технології (А) для створення процесів очищення (В) і організація їх (С) в області утворення високотоксичних хімічних сполук]; (4.7)

F^3_3 (технологічні процеси утилізації і перероблення твердих відходів, що попереджують утворення високотоксичних речовин у продукції цільового призначення) = [вибір технологічних процесів (А), що засновані на різноманітних фізичних принципах (В), які забезпечують відсутність високотоксичних хімічних сполук в продукцію цільового призначення (С)]. (4.8)

Для підсистем рівня 4 мають місце функції вигляду формул (4.9) – (4.11) [1].

F^4_1 (обладнання для оброблення полютантів і відходів) = [проектування, виготовлення і підбір (А) оснащення (В), що забезпечує ЕБ при обробленні полютантів і відходів, джерелом яких є ЕУ з ПДВЗ, які попереджують утворення токсичних продуктів (С), при мінімальних витратах на оснащення]; (4.9)

F^4_2 (обладнання для очищення газоподібних, рідких і твердих продуктів оброблення полютантів і відходів) = [проектування, виготовлення і підбір (А) оснащення (В), що забезпечує якісне здійснення технологічних процесів очищення продуктів оброблення полютантів і відходів, джерелом яких є ЕУ з ПДВЗ (С), при мінімальних витратах на оснащення]; (4.10)

F^4_3 (обладнання для утилізації й перероблення твердих відходів і отримання продукції цільового призначення) = [проектування, виготовлення і підбір (А) оснащення (В), що забезпечує якісне здійснення технологічних процесів утилізації й перероблення твердих відходів і отримання продукції цільового призначення (С), при мінімальних витратах на оснащення]. (4.11)

У підсистемах рівня 5 визначено функції вигляду формул (4.12) – (4.14) [1].

F^5_1 (організація послідовності технологічних процесів) = [розроблення (А) циклових графіків (В) формування технологічних процесів оброблення відходів і полютантів, джерелом яких є ЕУ з ПДВЗ, що забезпечують мінімальні витрати ресурсів забезпечення виробничої безпеки та ЕБ (С)]; (4.12)

F^5_2 (організація виробничих ділянок для здійснення технологічних процесів) = [проектування і організація (А) ділянок для забезпечення рівня ЕБ при реалізації технологічних процесів оброблення відходів і полютантів, джерелом яких є ЕУ з ПДВЗ (В), з урахуванням особливостей нових і вдосконалених технологій (С)]; (4.13)

F^5_3 (диспетчеризація і управління виробничим процесом) = [регулювання і мережне планування за часом (А) циклових графіків використання технологічних процесів забезпечення ЕБ оброблення відходів і полютантів, джерелом яких є ЕУ з ПДВЗ (В), з метою виконання заданих виробничих циклів (С)]. (4.14)

Основні закономірності рівня 6 можна описати такими функціями, однотипними й інваріантними відносно конкретного технологічного процесу – формула (4.15) [1].

$F^{6}_{1\text{-}6}$ (технологічний процес оброблення відходів і полютантів, джерелом яких є ЕУ з ПДВЗ) = [регулювання і мережне планування за часом (А) циклових графіків виробничих процесів оброблення відходів і полютантів, джерелом яких є ЕУ з ПДВЗ (В), з метою виконання заданих виробничих процесів (С) із забезпеченням ЕБ]. (4.15)

Функціональні закономірності підсистем рівнів 7 і 8 є складовою частиною у загальній закономірності для процесу утилізації відходів життєдіяльності з урахуванням забезпечення необхідного рівня екологічної безпеки. Їх описує формула (4.16) [1].

$F^{7,8}$ (система забезпечення рівня ЕБ) = [Рівень ЕБ (А) в процесі функціонування технологічного процесу оброблення полютантів і відходів, джерелом яких є ЕУ з ПДВЗ (В), при раціональних організаційно-технічних параметрах із застосуванням нових і вдосконалених технологій забезпечення рівня ЕБ (С)]. (4.16)

Таким чином, здійснено описання вербально-логічними формулами функцій СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ і її складових.

4.5 Методологічні основи комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ у структурі системи управління

4.5.1 Концепція створення та застосування критерію ефективності функціонування системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

Розроблена у дисертації СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ складається з чотирьох послідовно здійснюваних функціонально завершених етапів, кожен з яких розбитий на два рівня, що слідують один за іншим.

В даному розділі кваліфікаційної роботи приведена загальна концепція вирішення завдань Етапу 4 такої СУЕБ – «Результати використання СУЕБ», зокрема

Рівня 8 «Система моніторингу та контролю рівня ЕБ», завершального в структурі СУЕБ, який замикає її зворотним зв'язком шляхом застосування моніторингу показників ЕБ і контролю ефективності роботи самої СУЕБ. Вирішення такого завдання пропонується шляхом розробки критерію ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, що характеризується якомога більшою універсальністю. Функція всієї СУЕБ і розглянутого в даному дослідженні її Рівня 8, описані вербальної-логічними формулами у підрозділі 4.4.

Структура цієї СУЕБ з вказанням місця зворотного зв'язку, створеного на її етапі 4 та основі критеріального математичного апарату, наведена на рис. 4.5. Пропонована концепція розробки критерію ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ і алгоритму його застосування передбачає 7 кроків, сутність якої відображає рис. 4.6.

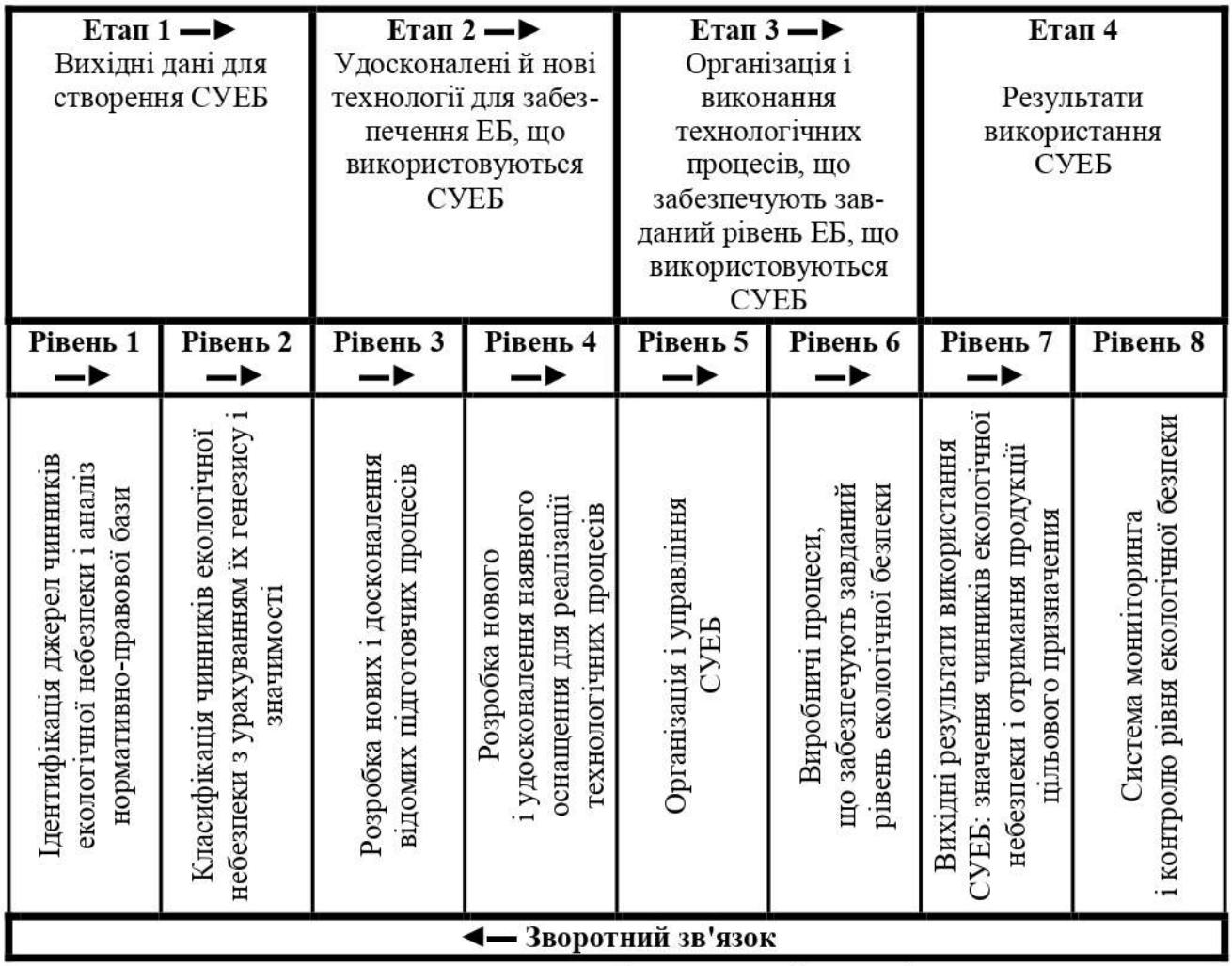


Рисунок 4.5 – Схема системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ [3]

Таким чином пропонований алгоритм є замкнутим зворотним зв'язком (тобто циклічним) і не є автономним відносно самої СУЕБ, оскільки містить Кроки «Б» і «Е», якими і реалізується його взаємодія з СУЕБ. Тому його можна назвати інтегрованим у СУЕБ. При цьому Крок «Б» є джерелом нової інформації в алгоритмі, а Крок «Е» – вже джерелом інформації для СУЕБ.

Для реалізації Кроку А «Базовий варіант об'єкта» і Кроку В «Модернізований варіант об'єкта» розроблюваного алгоритму, враховуючи в першу чергу специфіку технічного об'єкта впливу СУЕБ, пропонується використовувати комплексний паливно-екологічний критерій проф. Ігоря Парсаданова [6] та інші, подібні до нього, розроблені на його основі або за його подобою. У якості порежимних вихідних даних для такого оцінювання слід використовувати результати експериментальних або розрахункових досліджень за відомими, вдосконаленими або розробленими методиками, наприклад з дослідження [3].

Крок	Назва та сутність кроку	
А ▼	«**Базовий варіант об'єкта**». Кількісна оцінка у абсолютних і відносних одиницях рівня значень комплексу техніко-економічних і екологічних порежимних та/або середньоексплуатаційних показників базового варіанту ЕУ з ПДВЗ, тобто до впровадження розроблених заходів щодо підвищення рівня екологічної безпеки.	
Б ▼	«**Дія СУЕБ на об'єкт**». Розробка виду або послідовності заходів щодо забезпечення ЕБ в структурі СУЕБ експлуатації ЕУ з ПДВЗ, визначення інтенсивності або характеру впливу окремо взятого заходу а також практична реалізація цих заходів.	
В ▼	«**Модернізований варіант об'єкта**». Кількісна оцінка рівня значень такого комплексу для модернізованого варіанту ЕУ з ПДВЗ, тобто після розробки і впровадження заходів щодо підвищення рівня ЕБ на основі нових і вдосконалених способів й засобів.	
Г ▼	«**Відгук об'єкт на дію СУЕБ**». Встановлення абсолютного і відносного значення різниці величин такого комплексу для базового та модернізованого варіантів ЕУ з ПДВЗ, що і пропонується вважати критерієм ефективності функціонування СУЕБ.	▲ **Ж**
Д ▼	«**Нормування критерію ефективності функціонування СУЕБ**». Порівняння отриманого значення різниці величин такого комплексу з його граничним значенням або розробленої шкалою значень і винесення певних висновків на цій основі.	
Е ▼	«**Коригування дії СУЕБ на об'єкт**». Коригування виду або послідовності заходів щодо забезпечення екологічної безпеки в структурі СУЕБ експлуатації ЕУ з ПДВЗ, а також інтенсивності або характеру впливу окремо взятого заходу.	
Ж	«**Зворотний зв'язок**». Раціоналізація критерію ефективності функціонування СУЕБ в ітераційному процесі варіювання значень параметрів процесів і виконавчих пристроїв, що забезпечують необхідний рівень екологічної безпеки.	

Рисунок 4.6 – Послідовність кроків пропонованого алгоритму реалізації етапу 4 системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

Для отримання середньоексплуатаційних значень, вочевидь, слід використовувати методики випробувань, що відповідають певній моделі експлуатації ПДВЗ або ЕУ і у зв'язку з цим містять перелік стаціонарних, перехідних або змішаних режимів їх роботи і характеристики самих режимів (для ПДВЗ – значення частоти обертання КВ, крутного моменту, вагового фактора і т.д.), а також відповідними методиками обробки експериментальних даних. У разі неможливості проведення експериментальних досліджень за певною моделлю експлуатації й наявності даних попередніх досліджень для отримання необхідних даних можна скористатися математичним апаратом апроксимації (наприклад, метод найменших квадратів або лінійної регресії), інтерполяції або екстраполяції [3].

Для реалізації Кроку Б «Дія СУЕБ на об'єкт» алгоритму слід використовувати результати інших Етапів СУЕБ, описаних в попередніх розділах рукопису.

Для реалізації Кроку Г «Відгук об'єкта в дію СУЕБ» алгоритму пропонується різницю величин комплексу техніко-економічних та екологічних показників базового й модернізованого варіантів ЕУ з ПДВЗ власне і вважати критерієм ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ – $\Omega_{СУЕБ}$ [3, 4]. Склад комплексу техніко-економічних і екологічних показників роботи ПДВЗ, що враховуються таким критерієм, повинен бути якомога повнішим, що визначає рівень його універсальності та відповідати пунктам класифікації чинників ЕНБ, джерелом яких є ПДВЗ в складі ЕУ, розробленої в роботі [3] і наведеної у розділі 2. В якості одиниць вимірювання абсолютних значень комплексу техніко-економічних та екологічних показників, що беруть участь у визначенні значення $\Omega_{СУЕБ}$, раціонально використовувати грошові витрати на розробку та впровадження заходів щодо забезпечення необхідного рівня ЕкБ, витрати на компенсацію негативного впливу чинників ЕНБ на НПС або урбосистему. Таким чином, якщо де E_M и $E_Б$ – відповідно витрати для модернізованого та базового варіантів ЕУ з ПДВЗ, то:

$$\Omega_{ESMS} = (E_M - E_B)/E_B, \tag{4.17}$$

Обґрунтування вибору одиниць вимірювання складових критерію $\Omega_{СУЕБ}$ – долари США ($) – наведено у [5]. Таке рішення обумовлене, по-перше, виходячи з визначе-

ння коштів як товару максимальної ліквідності й універсального еквівалента вартості товарів та послуг [112]. По-друге, наявність вдалого досвіду застосування відомого підходу до оцінки техніко-економічних і екологічних показників ПДВЗ, розробленого проф. Ігорем Парсадановим, як частина методики розрахункового визначення паливо-екологічного критерію K_{fe} [6]. По-третє, як стане зрозумілим з наведених далі міркувань, не всі складові вищевказаних витрат можливо привести до виду безрозмірної величини β і, тим більше, наділити їх фізичним змістом $g_{e\,cp\,e}$, як у випадку критерію K_{fe} [6]. В роботі [6] витрати, що входять до структури критерію K_{fe}, виражаються в українських гривнях (₴). Однак в такому випадку виникає проблема оцінки ефективності заходів щодо забезпечення рівня ЕБ для ЕУ з ПДВЗ, що знаходяться в експлуатації тривалий час.

Так, для випадку підвищення рівня ЕБ автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 шляхом обладнання його випускної системи ФТЧ, вдосконаленим у цій роботі, безпосереднє порівняння величин критерію K_{fe} для базового (дизель, не обладнаний ФТЧ) і модернізованого (дизель, обладнаний ФТЧ) варіанту виконати в гривні складно. Це обумовлено такими обставинами. По-перше, дизель 2Ч10,5/12, який використовували як генератор аерозолю ТЧ у потоці ВГ в цих дослідженнях, випущений в середині 80-рр XX століття, сучасна його модифікація, що випускався Володимирським тракторним заводом (Російська Федерація), сучасні його модифікації мають суттєві конструктивні відмінності (наприклад, електронну систему управління паливоподачою). При цьому точно оцінити його загальне напрацювання і залишковий моторесурс, передісторію й індивідуальні особливості експлуатації саме цього екземпляру, переліку заходів з обслуговування та ремонту і, відповідно, поточний технічний стан та співвіднести його з яким-небудь вартісним показником вкрай складно. По-друге, на момент його випуску такої грошової одиниці як гривня (UAH) не існувало, та одиниця, в якій виражається його вартісні показники – карбованець СРСР (SUR) – не існує нині; грошова одиниця, у якій оцінювалась його вартість на момент постановки такого дизеля на моторний випробувальний стенд – купоно-карбованець України (UAK) – також наразі не існує; а нинішня модифікація цього дизеля оцінюється в російських рублях (RUB), а на одночасно з періодом існування UAK існував неденомінований російський рубль (RUR). По-третє, в силу певних причин,

курс гривні по відношенню до основних вільноконвертованих (так званих, твердих, світових резервних) валют вкрай нестабільний. Так, на момент введення в обіг гривні (1996 р.) її курс по відношенню до долара США ($) становив менше 2 ₴/$, на момент початку розробки концепції ФТЧ (2008 р.) – близько 5 ₴/$, на момент отримання експериментальних даних для досліджень [1] (2013 р.) – близько 8 ₴/$, на момент створення первинних варіантів математичних моделей з [3] (2014 р.) – 12 ₴/$, при отриманні результатів дослідження [2] (2016 р.) – 25 ₴/$, на момент виконання досліджень метрологічного характеру [4] (2018 р.) – 27 ₴/$, наразі, тобто на момент виконання досліджень методологічного характеру [5] (2020 р.) – 28,5 ₴/$. Спрогнозувати поведінку цього макроекономічного показника з прийнятною точністю принаймні на півроку вперед не є можливим, не кажучи вже з достатньою точністю про більш довгострокову перспективу.

У зв'язку з вищенаведеними міркуваннями, представляється раціональним виражати величини витрат, що формують значення $\Omega_{СУЕБ}$, в одній з широкодоступних в Україні вільноконвертованих світових резервних валют – євро (€) або долар США. Однак тільки остання має історію, повністю охоплює історію ПДВЗ від зародження ідеї (1807 р. двигун де Ріваса, 1860 р. двигун Ленуара, 1863 р. двотактний двигун Отто, 1876 р. чотиритактний двигун Отто, 1880 р. двигун Костовича, 1897 р. двигун Дизеля) і по сьогоднішній день. При цьому слід врахувати, що купівельна спроможність долара США протягом його існування від моменту створення першого ПДВЗ і по сьогоднішній день також не була постійною в силу прояву інфляції. На основі вищесказаного можна зробити висновок, що величини витрат у структурі критерію слід виражати в доларах США, а врахування інфляції самого долара слід врахувати спеціальним коефіцієнтом, наприклад на основі індексу споживчих цін – Consumer Price Index *CPI* [112]. Для забезпечення можливості проведення порівняльних досліджень різних джерел енергії, наприклад ПДВЗ і комплексу з фотоелектричного перетворювача і суперконденсатора на основі наноструктурованих напівпровідників [2], в структурі розроблюваного критерію витрати на паливо слід перетворити в одиниці енергії або потужності.

Слід звернути увагу на те, що обладнання випускної системи дизеля ФТЧ позначається на значенні критерію K_{fe} одночасно позитивно – за рахунок зменшення

масового викиду ТЧ з потоком ВГ (і відповідних грошових витрат на компенсацію впливу даного чинника екологічної небезпеки на ЗНС та урбосистеми), і негативно – за рахунок підвищення витрати палива, що витрачається на подолання ГО ФТЧ [5].

Для реалізації Кроку Д «Нормування критерію ефективності функціонування СУЕБ» розроблюваного алгоритму пропонується використовувати дані з нормативно-правових актів, що є чинними на території, де здійснюється експлуатація ЕУ з ПДВЗ, наприклад Правила ЄЕК ООН № 49 чи 96 [21, 22].

Для реалізації Кроку Е «Коригування дії СУЕБ на об'єкт» розроблюваного алгоритму слід спиратися на специфічні особливості конкретного заходу для забезпечення рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ чи комплексу таких заходів.

Для реалізації Кроку Ж «Зворотний зв'язок» розроблюваного алгоритму пропонується використовувати метод планування експерименту [211], математичний апарат багатокритеріальної оптимізації [212], а також математичний апарат нечіткої логіки, а саме узагальненої функції бажаності К.Е. Харрінгтона із застосуванням психофізичних шкал [64, 65].

4.5.2 Ієрархічне місце критеріального математичного апарату в структурі системи управління екологічною безпекою

При розробці критерію $\Omega_{СУЕБ}$ слід взяти до уваги такі аспекти ієрархічної структури СУЕБ, ЕУ та її ЖЦ. Весь життєвий цикл ЕУ з ПДВЗ традиційно ділять на послідовний ланцюжок етапів, які в світлі специфіки даної проблематики і вищесказаного раціонально об'єднати в такі блоки: Блок І «Розробка і виробництво»; Блок ІІ «Експлуатація»; Блок ІІІ «Утилізація».

Також не варто випускати з уваги такі особливості ЕУ як таких та їх джерел енергії – ПДВЗ. По-перше, один і той самий ПДВЗ може використовуватися для приводу різнотипних ЕУ (наприклад, автотракторні дизелі), тобто експлуатуватися за різними моделями експлуатації. По-друге, одна ЕУ може містити більше одного ПДВЗ (наприклад, пересувний бетонозмішувач з приводом міксера від окремого ПДВЗ, автопотяг з тягача і енергоагрегату з електрогенератором, водяним насосом, повітряним компресором тощо), які можуть експлуатуватися як одночасно, нарізно,

так і з деяким перекриттям часу роботи одне одного. По-третє, сама ЕУ, без урахування наявності в її складі ПДВЗ та агрегатів його систем, винесених за межі підкапотного простору, також є джерелами екологічної та техногенної небезпеки, і повинні якісно й кількісно характеризуватися своїми власними чинниками, критерії для оцінки яких також потребують розробки та/або доопрацювання. По-четверте, у деяких ЕУ присутній ПДВЗ, що не є основним чи головним джерелом механічної енергії, або ж виробляє таку енергію переривчасто (наприклад, гібридні автомобілі), при цьому модель його експлуатації принципово відмінна від традиційних як по структурі, так і по параметрах окремих режимів роботи двигуна.

У зв'язку з вищенаведеним, особливо слід відзначити, що розроблюваний критерій ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ $\Omega_{СУЕБ}$ в пропонованій постановці займає таке ієрархічне місце в структурі ЖЦ та складі ЕУ: а) характеризує лише II блок життєвого циклу ЕУ з ПДВЗ – експлуатацію; б) характеризує ЕБ лише частини ЕУ, а саме ПДВЗ і агрегатів систем, що його обслуговують, що відображено на рис. 4.7 та 4.8. На рис. 4.8 наведено такі позначення: індексами *I*, *II* та *III* позначено критерій $\Omega_{СУЕБ}$ для Блоку I, Блоку II та Блоку III ЖЦ відповідно; індексами *ДЕ* та *СЕ* позначено критерій $\Omega_{СУЕБ}$ для джерел енергії ЕУ (наприклад, ПДВЗ та його агрегатів його систем, винесених за межі підкапотного простору) та споживачів енергії ЕУ (усі виконавчі органи ЕУ, деталі її остова, контрольно-вимірювального обладнання тощо) відповідно.

Тому для СУЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ критерій ефективності функціонування $\Omega_{СУЕБ}$ можна виразити такою формулою:

$$\Omega^{ЕУ}_{СУЕБII} = \sum_{j=1}^{m} \Omega^{ДЕ}_{СУЕБII} / m \times \sum_{k=1}^{n} \Omega^{СЕ}_{СУЕБII} / n, \qquad (4.18)$$

де f – деяка математична функція, що пов’язує складові критерію $\Omega_{СУЕБ}$; j – номер джерела енергії у складі ЕУ; k – номер споживача енергії у складі ЕУ; m – кількість джерел енергії у складі ЕУ; n – кількість споживачів енергії у складі ЕУ.

Підбиваючи вищенаведені міркування, структуру алгоритму оцінювання ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ та її місце у структурі самої СУЕБ подано на рис. 4.9.



Рисунок 4.7 – Поділ життєвого циклу енергоустановки з поршневим ДВЗ на блоки, придатні до використання у процесі розробки системи управління екологічною безпекою

Ієрархічне місце критерію $\Omega_{СУЕБ}$ → у структурі енергетичної установки		
↓ у структурі життєвого циклу	Джерело енергії	Споживач енергії
Блок I «Розробка і виробництво»	$\Omega^{ДЕ}_{СУЕБI}$	$\Omega^{СЕ}_{СУЕБI}$
Блок II «Експлуатація»	$\Omega^{ДЕ}_{СУЕБII}$	$\Omega^{СЕ}_{СУЕБII}$
Блок III «Утилізація»	$\Omega^{ДЕ}_{СУЕБIII}$	$\Omega^{СЕ}_{СУЕБIII}$

Рисунок 4.8 – Ієрархічне місце розроблюваного критерію ефективності функціонування системи управління екологічною безпекою

Розроблюваний критерій ефективності СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ $\Omega_{СУЕБ}$, на відміну від комплексного паливо-екологічного критерію проф. Ігоря Парсаданова K_{fe}, також повинен враховувати такі чинники ЕНБ, джерелом яких є ПДВЗ, як шум і вібрація, а в ідеалі – також і енергетичне забруднення НПС й урбосистем (теплове, електромагнітне та інформаційне) [1].

Забруднення НПС і урбосистем рідкими поллютантами (моторними паливами і маслами) й твердими відходами (деталями, що вичерпали ресурс чи вийшли з ладу аварійно) ПДВЗ в процесі експлуатації ЕУ з ними відбувається або при технічному обслуговуванні та ремонті, або в аварійній ситуації [1]. Імовірнісний характер прояви останніх чинників обумовлює застосування для їх оцінки понятійного апарату та інструментарію екологічних ризиків.

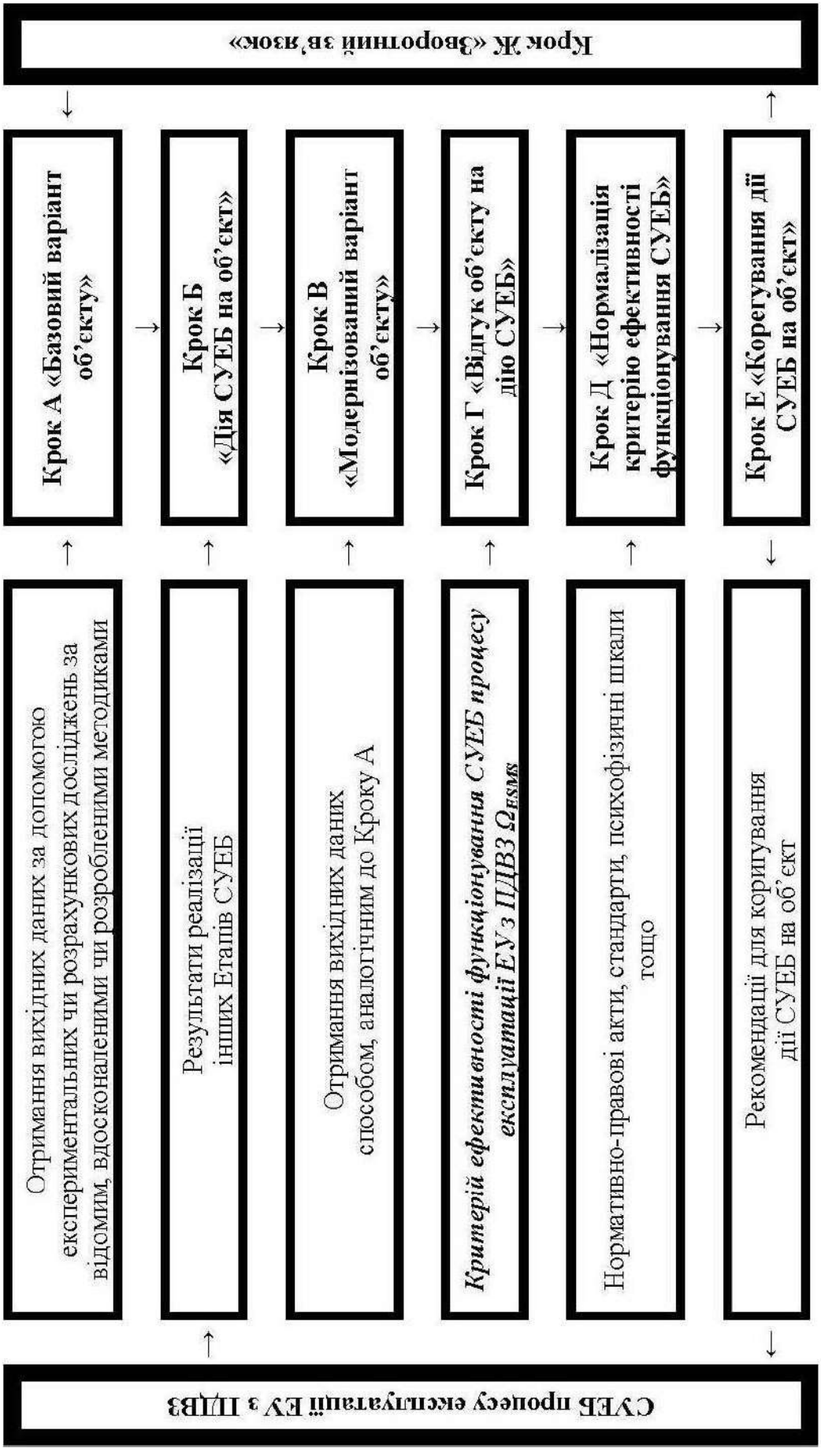


Рисунок 4.9 – Алгоритм оцінки ефективності функціонування системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енегоустановок з поршневим ДВЗ

При цьому сам комплексний паливо-екологічний критерій K_{fe} може виступити прообразом, складовою частиною та основою розробляємого критерію ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ $\Omega_{СУЕБ}$.

Встановлено, що отримані у цьому і попередніх розділах нові теоретичні результати доцільно апробувати шляхом практичної реалізації СУЕБ процесом безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу у функції розробленого інтегративного показника ефективності.

4.6 Система моніторингу роботи системи управління екологічною безпекою

Розроблена СУЕБ може характеризуватися різними значеннями ефективності функціонування в залежності від виду, особливостей та поточного технічного стану об'єкту управління, тобто енергоустановки з ПДВЗ. Також на ефективність функціонування СУЕБ чинить вплив фізико-хімічні властивості та відповідність нормативним вимогам застосованих у ПДВЗ технічних рідин, які потрапляють у камеру згоряння – моторного палива і моторної оливи.

З метою надання алгоритму оцінки ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ вихідних даних для роботи, побудовано систему моніторингу, схему якої наведено на рис. 4.10.

Система моніторингу формує набір вихідних даних для критеріального оцінювання на основі датчиків стану атмосферного повітря (барометричний тиск B_0, температура t_0, відносна вологість φ_0) та датчиків складу ВГ (показники димності ВГ – димомір, показники токсичності ВГ – багатокомпонентний газоаналізатор), даних з екологічних нормативів (допустимі значення показників рівня ЕБ, параметри режиму роботи і моделі експлутації), ДСТУ на технічні рідини (вміст нормованих домішок), довідникові матеріали (показники випаровуваності технічних рідин), а також датчиків стану ПДВЗ (крутний момент $M_{кр}$, частота обертання колінчастого валу n_{cs}, температура ВГ t_{EG}, температура моторної оливи t_{MO}). Ці вихідні дані перетворюються на значення чинників екологічної небезпеки, у функції яких отримується значення інтегративного показника рівня ЕБ експлуатації ЕУ з ПДВЗ

шляхом застосування формул перерахунку, методик та математичних моделей. Комплекс з математичних моделей роботи виконавчих пристроїв ТЗНС формує значення індексу ефективності функціонування ТЗНС. Згадані обидві складові визначають значення індикатора ЕБ ПДВЗ і його ТЗНС. На основі порівняння значення індикатора зі значеннями з характеристичної карти, закладеними у постійну пам'ять блока управління електронної системи автоматичного керування (ЕСАК) роботою ЕУ чи ПДВЗ і сформованими на основі психофізичної шкали, формується значення ідентифікатора рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ. Про це значення та відповідний йому стан ЕБ вказаного процесу система моніторингу сповіщає оператора ЕУ. При незначних відхиленнях стану ЕБ від заздалегідь встановленого ЕСАК у автоматичному режимі змінює параметри роботи ПДВЗ – приймає управлінське рішення та формує управляючий імпульс до актуаторів виконавчих пристроїв. При суттєвих відхиленнях і відповідних їм станах ЕБ система сповіщає оператора про те, що є потреба у його безпосередньому втручанні.

Аналогічним чином працює гілка системи моніторингу щодо управління ТЗНС. Управління здійснюється у функції індексу ефективності функціонування ТЗНС чи її окремого виконавчого пристрою, для визначення якого використовуються покази відповідних датчиків стану пристрою – гідравлічного опору, температури ВГ на вході тощо.

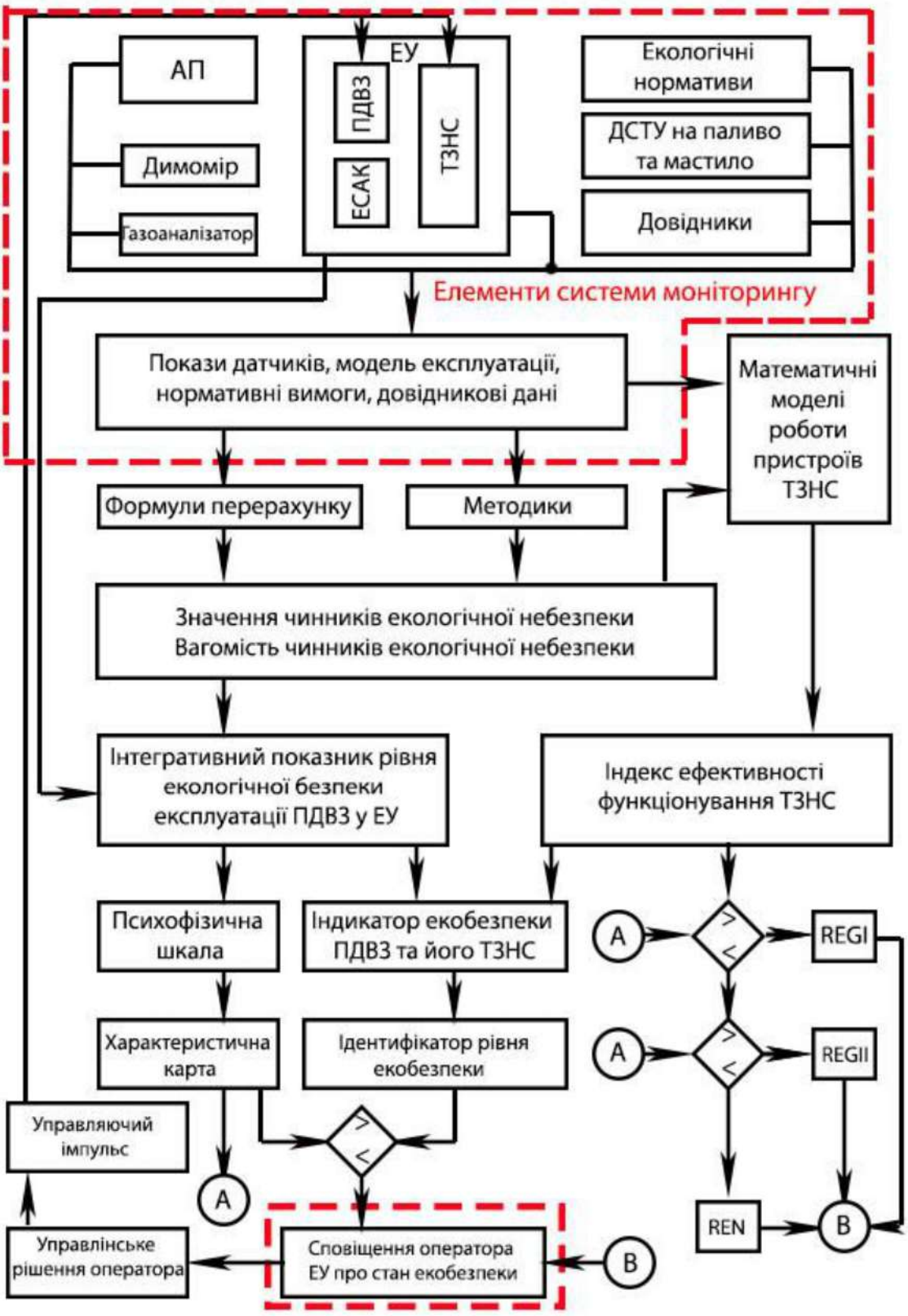


Рисунок 4.10 – Алгоритм оцінки ефективності функціонування системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу та моніторингу її роботи

4.7 Висновки по розділу 4

Таким чином, у цьому розділі рукопису дисертаційної роботи отримано такі результати.

1. Встановлено та описано передумови розробки СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ та сформульовано алгоритм її розробки.

Запропоновано, обґрунтовано і проілюстровано послідовність формування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ. Запропоновано і проілюстровано зміни у класифікації видів забруднення компонентів ПНС, джерелом яких є ЕУ з ПДВЗ на полютанти, шкідливі фактори впливу і відходи.

2. Побудовано СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ на етапі його життєвого циклу «безаварійна експлуатація».

Здійснено формалізацію вирішення задачі побудови такої СУЕБ як складної технологічної системи на основі застосування методологічного підходу і принципу багаторівневої декомпозиції, запропоновано, описано і проілюстровано укрупнену і деталізовану схему багаторівневої декомпозиції такої СУЕБ на підсистеми і рівні, а також її особливості. Такий підхід дозволяє забезпечити досягнення заданого рівня показників екологічної безпеки досліджуваного процесу з урахуванням можливості отримання продукції цільового призначення.

Розроблена СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ на етапі його життєвого циклу «безаварійна експлуатація» являє собою послідовність чотирьох етапів.

3. Визначено та описано функції СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ та її складових – підсистем і рівнів – вербально-логічними формулами.

4. Розроблено методологічні основи комплексного критеріального оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

Сформульовано загальну концепцію створення та застосування критерію ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ як основи практичної реалізації на етапі 4 та впровадження моніторингу показників екологічної безпеки атмосферного повітря для здійснення контролю ефективності функціонування самої системи управління екологічною безпекою.

Визначено значення і місце критеріального математичного апарату інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} в означеній системі управління екологічною безпекою.

На основі теоретичного обґрунтування показників екологічної безпеки з комплексного оцінювання техногенного впливу процесів «безаварійної експлуатації» ЕУ з ПДВЗ із високим рівнем фізичного зносу запропоновано комплексну систему екологічного управління процесами їх експлуатації.

5. Побудовано систему моніторингу показників екологічної безпеки атмосферного повітря як основу контролю ефективності функціонування самої СУЕБ.

Доведено ефективність функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ на основі результатів моніторингу показників екологічної безпеки атмосферного повітря і контролю ефективності функціонування самої СУЕБ.

Тобто, вирішено задачу дослідження № 4.

5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСНИХ СИСТЕМ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ І ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ РОБОТІ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ

5.1 Загальні міркування

Аналіз тематики досліджень у дисертації показав, що їх тематика й результати відображають границю між такими трьома спеціальностями – 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки», 21.06.01 – «Екологічна безпека» та 183 «Технології захисту навколишнього середовища». Такий тісний перетин вказаних вище напрямків досліджень на прикладі розробки ФТЧ та критеріального оцінювання ефектів від його впровадження вимагає внесення ясності щодо питання встановлення вертикальних та горизонтальних зв'язків між основними одиницями понятійних апаратів цих наукових галузей знань. Зокрема, необхідним є встановлення місця ФТЧ у запропонованій ТЗНС, місця цієї ТЗНС від негативного впливу ПДВЗ у складі ЕУ у структурі СУЕБ процесу експлуатації такого технічного об'єкту та місця означеного етапу в його ЖЦ. Окремим питання є місце і функції критеріального оцінювання, а також принципу його класифікації, у зазначених ієрархічних структурах.

Мета цього міждисциплінарного дослідження – побудова та описання ТЗНС від негативного впливу ПДВЗ у складі ЕУ та пошук її місця у структурі відповідної СУЕБ процесу експлуатації такого технічного об'єкту і місця ФТЧ у цій ТЗНС й критеріального оцінювання у цій СУЕБ. Проблема дослідження – встановлення місця ФТЧ та критеріального математичного апарату в ТЗНС від негативного впливу ПДВЗ у складі ЕУ та місця такої ТЗНС у СУЕБ процесу експлуатації такого технічного об'єкту й місця означеного етапу в його ЖЦ. Об'єкт дослідження – ТЗНС від негативного впливу ПДВЗ у складі ЕУ. Предмет дослідження – місце ФТЧ та критеріального математичного апарату в об'єкті дослідження та місце об'єкта дослідження у СУЕБ процесу експлуатації такого технічного об'єкту й місце означеного етапу в його ЖЦ. При цьому теоретичною основою побудови ТЗНС виступають роботи [275–287], а нормативною базою – документи [263–287].

5.2 Побудова схеми технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу поршневих ДВЗ у складі енергоустановки на атмосферне повітря

За результатами послідовно здійснених досліджень з питань екологізації ПДВЗ, принципів дії та конструкції ФТЧ, структури та алгоритму роботи СУЕБ [1], підходів, методик та математичних апаратів для здійснення критеріального оцінювання показників рівня ЕБ, моделей експлуатації ЕУ з ПДВЗ і їх ЖЦ [3], методик та засобів фізичного й математичного моделювання [5] та стендових випробувань робочих процесів [4] і показників роботи двигунів та їх агрегатів, у дисертації розроблено схему ТЗНС від негативного впливу ПДВЗ, яка зображена на рис. 5.1. На рис. 5.1 також наведено місце того етапу у структурі ЖЦ ЕУ з ПДВЗ, для якого розроблено відповідну СУЕБ – Етап В «Експлуатація»; а також місце розробленої ТЗНС у структурі цієї СУЕБ; місце критеріального апарату і принципу його класифікації в СУЕБ; та місце ФТЧ у запропонованій ТЗНС.

На рис. 5.1 містяться такі позначення: A – ПДВЗ; B – споживач механічної енергії; C – атмосфера; D – гідросфера; E – літосфера; F – біосфера; G – турбіна ТКР; H – ФТЧ; I – КН ПНЗП; J – КП NO_x; K – охолоджувач ВГ; L – система рециркуляції ВГ; M – резонатор; N – глушник шуму ВГ; O – іскрогасник; P – система шумоізоляції підкапотного простору; Q – охолоджувач МО; R – фільтри МО; S – система суфлювання КГ; T – охолоджувач ОР; U – фільтри ОР; V – система суфлювання ОР; W – система паливоподачі двигуна; X – фільтри МП; Y – система суфлювання парів МП; Z – електронна САУ; AA – маховик КВ з антивібратором; AB – механізми Ланчестера та системи противаг на щоках кривошипів КВ ; AC – активна віброізоляція підвіски двигуна; AD – охолоджувач наддувочного повітря; AE – компресор ТКР; AF – глушник шуму впуску; AG – повітряний фільтр. 1 – потік корисної механічної енергії; 2 – потік ВГ, забруднений усіма видами полютантів; 3 – потік енергії механічного шуму; 4 – потік МО; 5 – потік ОР; 6 – потік наддувочного повітря; 7 – потік енергії механічних коливань (вібрації); 8 – поток МП; 9 – потік виливів рідкого МП та рідкої МО; 10 – відходи (тверді речовини-забруднювачі); 11, 13, 14, 16, 17, 18 – потік теплової енергії; 12 – потік атмосферного повітря; 15 – потік ВГ,

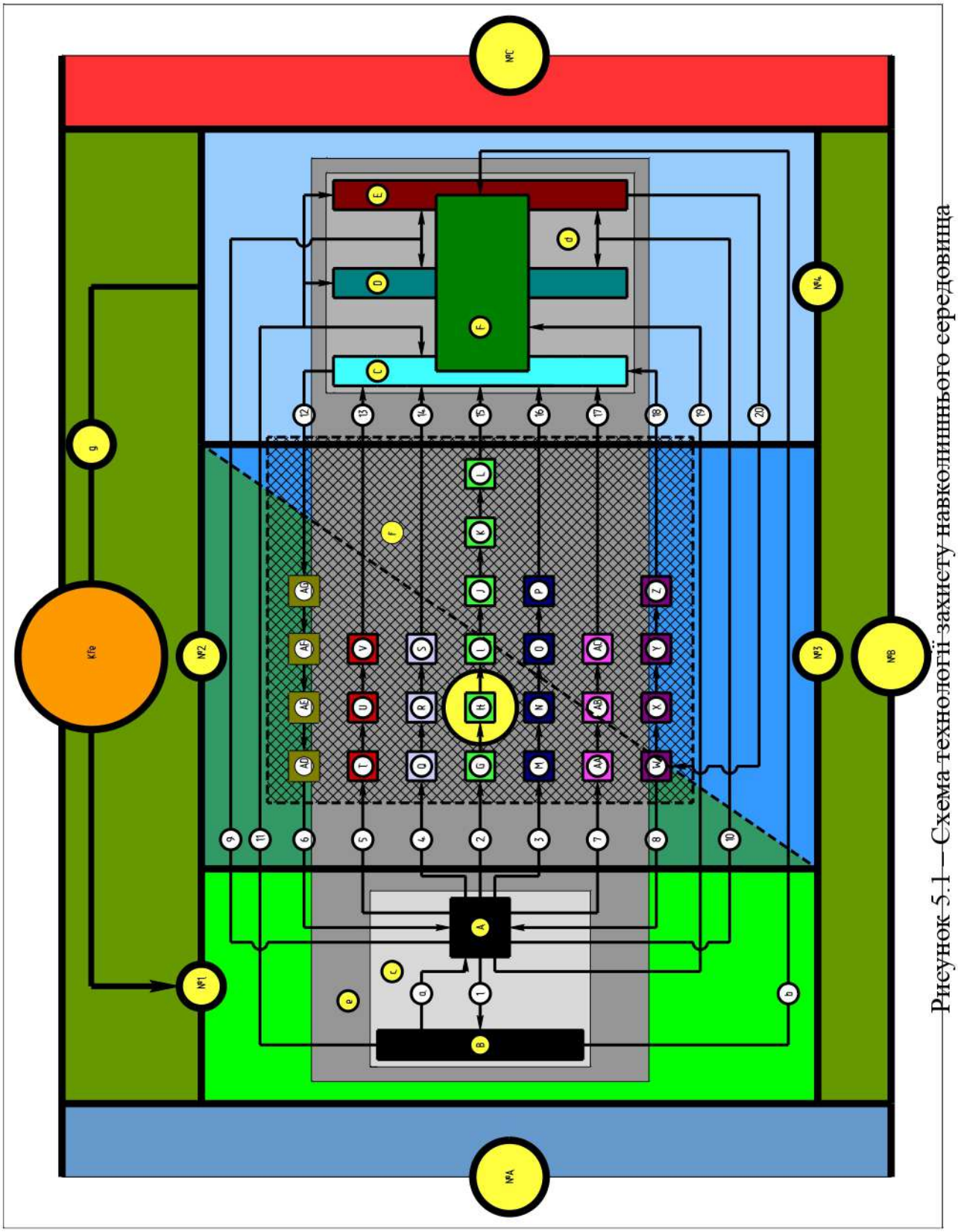


Рисунок 5.1 – Схема технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу поршневого ДВЗ у складі енергоустановки

забруднений нормованими опосередковано і ненормованими полютантами; 19 – потік електромагнітного та інформаційного забруднення; 20 – потік невідновного джерела енергії; a – модель експлуатації; b – корисна механічна робота; c – ЕУ як джерело чинників ЕНБ; d – НПС як реципієнт чинників ЕНБ; e – передавальне середовище; f – ТЗНС; g – зворотний зв'язок в СУЕБ; № 1 – I етап СУЕБ; № 2 – II етап СУЕБ; № 3 – III етап СУЕБ; № 4 – IV етап СУЕБ; № A – 1-й етап ЖЦ (проектування і виробництво); № B – 2-й етап ЖЦ (експлуатація); № C – 3-й етап ЖЦ (утилізація).

5.3 Описання схеми технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу поршневих ДВЗ у складі енергоустановки на атмосферне повітря

Структурою вищого рангу в наведеній на рис. 5.1 схемі є ЖЦ такого технічного об’єкту, як ЕУ з ПДВЗ. У даному разі поділ цієї структури виконано у першому наближенні на три послідовно минаючі у часі етапи: 1-й етап ЖЦ – «Проектування і виробництво» (поз. № A на схемі); 2-й етап ЖЦ – «Експлуатація» (поз. № B на схемі); 3-й етап ЖЦ – «Утилізація» (поз. № C на схемі). Слід зауважити, що усі подальші дослідження виконувались лише для одного з цих етапів, а саме № B «Експлуатація» – від поставки кінцевому споживачеві нової щойно виготовленої одиниці ЕУ з ПДВЗ (одразу після закінчення попереднього етапу ЖЦ – «Проектування і виробництво») до досягнення цією одиницею критичного технічного стану, за якого здійснення капітального ремонту є неможливим чи економічно необґрунтованим, а сама одиниця такої техніки передається на наступний етап ЖЦ – «Утилізація». Особливо виділено при цьому частину цього етапу – «Безаварійна експлуатація», тобто за виключенням часу та регламентних робіт з усіх видів ТО і ремонту, транспортування й перебування на зберіганні у законсервованому стані, перебування у технічно не справному чи аварійному стані.

Методологічною основою забезпечення нормативно встановленого рівня показників ЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ виступає відповідна СУЕБ, яка на рис. 5.1 є структурою другого рангу. У розробленій в дисертації СУЕБ наявні чотири послідовно минаючі у часі етапи: I етап СУЕБ – «Вихідні дані для

функціонування СУЕБ» (поз. № 1); II етап СУЕБ – «Нові й вдосконалені технології для забезпечення нормативно встановленого рівня ЕБ» (поз. № 2 на схемі); III етап СУЕБ – «Організація й вдосконалення технологічних процесів роботи виконавчих пристроїв СУЕБ» (поз. № 3 на схемі); IV етап СУЕБ – «Результати функціонування СУЕБ, зворотний зв'язок» (поз. № 4 на схемі).

Структурою третього рангу на схемі з рис. 5.1 є основа класифікації критеріальних математичних апаратів, а саме поділ джерел вихідних даних для критеріального оцінювання: а) ЕУ з ПДВЗ як джерело чинників ЕНБ (поз. с на схемі); б) НПС як реципієнт чинників ЕНБ (поз. d); в) передавальне середовище (поз. е на схемі).

На схемі видно, що оцінювання поточного актуального стану рівня ЕБ ЕУ з ПДВЗ як джерело чинників ЕНБ здійснюється на I етапі СУЕБ. Усі складові ТЗНС, розроблені на II етапі СУЕБ та впроваджені на III етапі СУЕБ, розміщуються у передавальному середовищі. На IV етапі СУЕБ здійснюється критеріальне оцінювання ефективності застосування виконавчих пристроїв ТЗНС на прикладі усіх складових НПС як реципієнта чинників ЕНБ, а також організовується зворотний зв'язок для оцінювання ефективності функціонування самої СУЕБ (поз. g на схемі), за допомогою обраного критеріального математичного апарату (поз. K_{fe}).

До складу джерела чинників ЕНБ віднесено такі елементи: а) ПДВЗ (поз. А на схемі); б) споживач механічної енергії (поз. В на схемі).

Між ними наявний потік корисної механічної енергії (поз. 1 на схемі) та інформація щодо моделі експлуатації ЕУ (поз. а на схемі).

До складових НПС віднесено такі елементи: а) атмосфера (поз. С на схемі); б) гідросфера (поз. D на схемі); в) літосфера (поз. Е на схемі); г) біосфера, у тому числі людина (поз. F на схемі), що територіально базується на попередніх трьох.

Між джерелом і реципієнтом впливу чинників ЕНБ наявний потік корисної механічної роботи (поз. b на схемі), та декілька потоків речовини (поз. 2, 4, 5, 8, 9, 10 на схемі), енергії (поз. 3, 7, 11, 13, 14, 16 – 18 на схемі) та інформації (поз. 19 схемі).

У описаній системі наявні й зворотні потоки речовини (поз. 6, 20 на схемі), енергії та інформації (не показано на схемі).

5.4 Ланцюги та ланки технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу поршневого ДВЗ у складі енергоустановки

Усі виконавчі пристрої ТЗНС є ланками, що послідовно вишикувано в лінійні ланцюги, котрі обробляють та перетворюють вказані потоки, приводячи їх показники ЕБ до нормативно встановлених значень. Таких ланцюгів розроблена ТЗНС налічує 7. При роботі кожної ланки усіх ланцюгів цієї ТЗНС утворюються побічні продукти, а також локальні вхідні потоки речовини, енергії та інформації, що не показані на схемі. Фізичну сутність та способи утилізації побічних продуктів та вхідних потоків виконавчих пристроїв описано у відповідних частинах опису схеми.

Крім того, наявні потоки енергії, котрі є дуже розсіяними у часі й просторі, а тому майже не рекуперованим – це потік теплової енергії (поз. 11 на схемі), у яку остаточно перетворюється уся вироблена двигуном корисна механічна енергія, а отже і уся хімічна енергія моторного палива.

На схемі також присутні потоки речовини, з якими розроблена ТЗНС не працює, оскільки вони у процесі експлуатації виділяються лише при здійсненні планових ТО і ремонтів, а також у аварійних ситуаціях, тобто на етапі ЖЦ, що не входить до етапу «Безаварійна експлуатація» – це потік виливів рідкого МП та рідкої МО (поз. 9 на схемі) та відходи (тверді речовини-забруднювачі) (поз. 10 на схемі).

Ці самі полютанти також інтенсивно виділяються на наступному етапі ЖЦ – «Утилізація». Вплив вказаних чинників ЕНБ, з якими не працює розроблена ТЗНС, здійснюється на усі компоненти НПС.

Головним ланцюгом (№ 1/7) запропонованої ТЗНС є той, котрий забезпечує досягнення нормативно встановлених показників ЕБ ВГ за хімічним складом. На вході у ланцюг подається потік ВГ (поз. 2 на схемі), забруднений: а) законодавчо нормованими прямо газоподібними полютантами: продуктами неповного (ТЧ, C_nH_m, CO) та повного (NO_x) згоряння; б) законодавчо нормованими опосередковано газоподібними полютантами: SO_x, Б(а)П, ПАВ, у тому числі й парниковими газами (CO_2, H_2O); в) тепловою енергією; г) енергією механічних коливань (шум); д) джерелами відкритого вогню (іскрами).

Він складається з таких ланок (виконавчих пристроїв):

– турбіна ТКР (поз. G на схемі) – для перетворення надлишкової механічної енергії потоку ВГ на додаткову корисну, а також для зменшення енергії механічних коливань (шуму). Додаткових потоків на вході та виході з цієї ланки нема;

– ФТЧ (поз. H на схемі) – для очищення потоку ВГ від ТЧ (дисперсної фази аерозолю) та перетворення накопичених ТЧ на безпечні речовини у процесі регенерації. Потрібною є подача на вхід до ланки додаткового кисню, порцій моторного палива, теплової енергії, керуючих імпульсів електронної САР тощо (залежно від конструкції та принципу роботи конкретного ФТЧ). Побічним продуктом роботи ФТЧ є теплова енергія, неокислювані фракції ТЧ (зола) тощо;

– КН ПНЗП (поз. I на схемі) – для очищення потоку ВГ від ПНЗП шляхом каталітичного доокислення. Потрібною є подача на вхід до ланки додаткового кисню, теплової енергії, керуючих імпульсів електронної САР тощо (залежно від конструкції та принципу роботи конкретного КН ПНЗП). Побічним продуктом роботи КН ПНЗП є теплова енергія, продукти повного згоряння палива, у тому числі й парникові гази;

– КП NO_x (поз. J на схемі) – для очищення потоку ВГ від NO_x шляхом поглинання та поглинання. Потрібною є подача спеціальних реагентів, наявність рідкого робочого тіла, керуючих імпульсів електронної САР тощо (залежно від конструкції та принципу роботи конкретного КП NO_x). Побічним продуктом роботи КП NO_x є теплова енергія, розчини продуктів хімічних реакцій;

– охолоджувач ВГ (поз. K на схемі) – для рекуперації надлишкової теплової енергії потоку ВГ шляхом її передачі теплоносію. Потрібною є подача на вхід до ланки холодагенту (рідкого чи газоподібного), керуючих імпульсів електронної САР тощо (залежно від конструкції та принципу роботи конкретного теплообмінного апарату). Побічним продуктом роботи охолоджувач ВГ є теплова енергія, продукти очищення холодагенту;

– система рециркуляції ВГ (поз. L на схемі) – для нейтралізації частини ПНЗП та ТЧ у камері згоряння двигуна та впливу на екологічні показники робочого процесу шляхом додавання у свіжий заряд інертного газу. Потрібною є подача на вхід до ланки керуючих імпульсів електронної САР. Побічним продуктом роботи охолоджувач ВГ є теплова енергія, продукти очищення потоку рециркульованих ВГ.

На виході з ланцюга – потік ВГ (поз. 15 на схемі), забруднений такими чинниками ЕНБ: а) законодавчо нормованими опосередковано газоподібними полютантами: SO_x та парниковими газами (CO_2, H_2O); б) тепловою енергією; в) енергією механічних коливань (шум); г) джерелами відкритого вогню (іскрами).

Наступним ланцюгом (№ 2/7) запропонованої ТЗНС є той, котрий забезпечує досягнення нормативно встановлених показників ЕБ ВГ за шумом. На вході у ланцюг подається потік ВГ (поз. 3 на схемі), забруднений: а) законодавчо нормованими опосередковано газоподібними полютантами: SO_x і парниковими газами (CO_2, H_2O); б) енергією механічних коливань (шум); в) джерелами відкритого вогню (іскрами).

Він складається з таких ланок (виконавчих пристроїв):

– резонатор та глушник шуму ВГ (поз. M та N на схемі) – для розсіювання надлишкової механічної енергії потоку ВГ з метою зменшення енергії механічних коливань (шуму). Додаткових потоків на вході та виході з цієї ланки нема;

– іскрогасник (поз. O на схемі) – для гасіння джерел відкритого вогню (іскор). Додаткових потоків на вході та виході з цієї ланки нема;

– система шумоізоляції підкапотного простору (поз. P на схемі) – для розсіювання надлишкової механічної енергії ПДВЗ з метою зменшення енергії механічних коливань (шуму). Додаткових потоків на вході та виході з цієї ланки нема.

На виході з ланцюга – потік ВГ (поз. 16 на схемі), забруднений такими чинниками ЕНБ: а) законодавчо нормованими опосередковано газоподібними полютантами: SO_x та парниковими газами (CO_2, H_2O).

Ще одним ланцюгом (№ 3/7) запропонованої ТЗНС є той, котрий забезпечує підвищення ефективного ККД спалювання палива шляхом рекуперації теплової енергії моторної оливи. На вході у ланцюг подається потік МО (поз. 4), забруднений: а) тепловою енергією; б) продуктами зносу деталей двигуна та старіння МО.

Він складається з таких ланок (виконавчих пристроїв):

– охолоджувач МО (поз. Q на схемі) – для рекуперації надлишкової теплової енергії МО шляхом її передачі теплоносію. Потрібною є подача на вхід до ланки холодагенту (рідкого чи газоподібного), керуючих імпульсів електронної САР тощо (залежно від конструкції та принципу роботи конкретного теплообмінного апарату). Побічним продуктом роботи охолоджувача ВГ є теплова енергія, продукти очищен-

ня холодагенту;

– фільтри (грубого і тонкого очищення) МО (поз. R на схемі) – для видалення продуктів зносу деталей двигуна та старіння МО. Вхідних потоків для цієї ланки, окрім механічної енергії потоку рідини, не передбачається. Побічним продуктом роботи фільтрів МО є продукти очищення потоку МО та, власне, забруднені фільтрувальні елементи;

– система суфлювання КГ (поз. S на схемі) – для відділення дисперсної фази аерозолю КГ (крапель МО з мастильного туману порожнини картера двигуна) та знешкодження газоподібних токсичних забруднюючих речовин у дисперсного середовища цього аерозолю. Вхідними потоками для цього виконавчого пристрою є керуючі імпульси електронної САР. Побічним продуктом роботи цього пристрою є сепарована МО та потік КГ;

На виході з ланцюга – потік МО, незабруднений жодними чинниками ЕНБ (поз. 14 на схемі).

Близьким за призначенням до попереднього є ланцюг (№ 4/7) запропонованої ТЗНС, котрий забезпечує підвищення ефективного ККД спалювання палива шляхом рекуперації теплової енергії охолоджувальної рідини. На вході у ланцюг подається потік ОР (поз. 5), забруднений: а) тепловою енергією; б) продуктами старіння ОР.

Він складається з таких ланок (виконавчих пристроїв):

– охолоджувач ОР (поз. T на схемі) – для рекуперації надлишкової теплової енергії ОР шляхом її передачі теплоносію. Потрібною є подача на вхід до ланки холодагенту (рідкого чи газоподібного), керуючих імпульсів електронної САР тощо (залежно від конструкції та принципу роботи конкретного теплообмінного апарату). Побічним продуктом роботи охолоджувач ВГ є теплова енергія, продукти очищення холодагенту;

– фільтри ОР (поз. U на схемі) – для видалення продуктів старіння ОР. Вхідних потоків для цієї ланки, окрім механічної енергії потоку рідини, не передбачається. Побічним продуктом роботи фільтрів МО є продукти очищення потоку ОР та, власне, забруднені фільтрувальні елементи;

– система суфлювання ОР (поз. V на схемі) – для запобігання викиду пари перегрітої ОР у атмосферу. Вхідним потоком для цього виконавчого пристрою є керуючі

імпульси електронної САР. Побічним продуктом роботи даного пристрою є сконденсована ОР.

На виході з ланцюга – потік ОР, незабруднений жодними чинниками ЕНБ (поз. 13 на схемі).

Ланцюг № 5/7 запропонованої ТЗНС є той, котрий забезпечує двигун моторним паливом (невідновним джерелом енергії). На вході у ланцюг подається потік МП (поз. 20 на схемі), забруднений: а) Б(а)П та ПАВ, ТЕС тощо; б) механічними домішками, краплями води тощо.

Він складається з таких ланок (виконавчих пристроїв):

– система паливоподачі дизельного двигуна (поз. W на схемі) – для зберігання, очищення та безперебійної подачі МП як неодмінної складової ПВС (відновника в ОВР), зокрема для забезпечення оптимальних для поточного режиму роботи ПДВЗ дози і максимального тиску палива при його подачі у КЗ, початку і тривалості впорскування, закону і кількості актів впорскування тощо. Вхідним потоком для цього виконавчого пристрою є керуючі імпульси електронної САР та власне МП при заправці паливного баку ЕУ, механічна енергія від ПДВЗ. Побічним продуктом роботи даної групи пристроїв є потік парів МП, викликаний явищами великого і малого дихання резервуарів.

– фільтри МП (грубого і тонкого очищення) (поз. X на схемі) – для видалення механічними домішками, краплями води та інших макрозабрудників з МП. Вхідних потоків для цієї ланки, окрім механічної енергії потоку рідини, не передбачається. Побічним продуктом роботи фільтрів МП є продукти очищення потоку МП та, власне, забруднені фільтрувальні елементи;

– система суфлювання парів МП (поз. Y на схемі) – для підтримання заданого значення надлишкового тиску в резервуарі для зберігання МП на борту ЕУ шляхом видалення частини парів МП, утворених за механізмами великого і малого дихання резервуарів та (опціально) їх утилізація шляхом подачі у свіжий заряд. Вхідними потоками тут є налаштування пружин дихальних клапанів та параметри НПС (барометричний тиск, температура повітря, вологість повітря). Побічним продуктом роботи є конденсовані вуглеводні МП чи організований потік їх парів;

– електронна САУ (поз. Z на схемі) – для реалізації на апаратному рівні управ-

ляючого імпульсу оператора та автоматичного підтримання параметрів завданого оператором режиму роботи двигуна, а також для збирання, зберігання та обробки інформації діагностичного характеру. Вхідними потоками тут є керуючий імпульс оператора ЕУ, параметри ПНС, модель експлуатації ПДВЗ, характеристичні та налаштувальні карти у ПЗУ ЕБК, механічна енергія двигуна, покази датчиків системи тощо. Побічним продуктом роботи системи є електромагнітне випромінювання, інформаційне забруднення НПС, теплова енергія.

На виході з ланцюга: у сторону ПДВЗ – потік підготовленого до спалювання МП (поз. 8 на схемі), а у сторону НПС – потік парів МП (поз. 18 на схемі), утворених за механізмами великого і малого дихання резервуарів.

Ланцюг № 6/7 запропонованої ТЗНС є той, котрий забезпечує нормативні показники впливу на оператора ЕУ, елементи ЕУ та компоненти ПНС механічних коливань (вібрації). На вході у ланцюг подається поток енергії механічних коливань (поз. 7 на схемі), що і є чинником ЕНБ.

Він складається з таких ланок (виконавчих пристроїв):

– маховик КВ з антивібратором (поз. АА на схемі) – для підвищення рівномірності обертання КВ, згладжування піків крутного та реактивного моменту, гасіння крутильних коливань КВ тощо. Вхідними потоками у цьому випадку є механічна енергія двигуна та налаштування механічних властивостей маховика й антивібратора. Побічних продуктів цьому не виділяється;

– механізми Ланчестера та системи противаг на щоках кривошипів КВ (поз. АВ на схемі) – для врівноваження сил та моментів інерції від обертально й поступально рухаючихся мас (I та II порядку) КШМ. Вхідними потоками тут є механічна енергія двигуна та механічні характеристики противаг і механізму Ланчестера. Побічних продуктів цьому не виділяється;

– активна віброізоляція підвіски двигуна (поз. АС на схемі) – для забезпечення захисту ЕУ, оператора та компонентів НПС від залишкової частини факторів неврівноваженості, зокрема на перехідних режимах роботи ПДВЗ. Вхідними потоками тут є механічна енергія двигуна та механічні характеристики демпферів підвіски двигуна. Побічних продуктів цьому не виділяється;

На виході з ланцюга – потік енергії механічних коливань (поз. 17 на схемі), що

за показниками відповідає нормативним вимогам.

Ланцюг № 7/7 запропонованої ТЗНС є той, котрий забезпечує нормативні показники рівня ЕБ при забезпеченні двигуна другим компонентом ППС (окисником ОВР) – атмосферним повітрям. На вході у ланцюг подається потік атмосферного повітря (поз. 12 на схемі), який забруднено: а) механічними домішками (пил); б) парою води (вологість).

Він складається з таких ланок (виконавчих пристроїв):

– охолоджувач наддувочного повітря (поз. AD на схемі) – для рекуперації надлишкової теплової енергії наддувочного повітря шляхом її передачі теплоносію та підвищення маси порції свіжого заряду. Потрібною є подача на вхід до ланки холодагенту (рідкого чи газоподібного), керуючих імпульсів електронної САР тощо (залежно від конструкції та принципу роботи конкретного теплообмінного апарату). Побічним продуктом роботи охолоджувача наддувочного повітря є теплова енергія, продукти очищення холодагенту;

– компресор ТКР (поз. AE на схемі) – для підвищення маси порції свіжого заряду, тобто форсування двигуна. Вхідними потоками тут є механічна енергія турбіни турбокомпресора, керуючі імпульси електронної САК і оператора, модель експлуатації ПДВЗ тощо. Побічним продуктом роботи тут є теплова енергія стиснутого потоку повітря та механічний шум на впуску;

– глушник шуму впуску (поз. AF на схемі) – для розсіювання надлишкової механічної енергії потоку надувочного повітря з метою зменшення енергії механічних коливань (шуму). Додаткових потоків на вході та виході з цієї ланки нема;

– повітряний фільтр (поз. AG на схемі) – для видалення з потоку аерозолю наддувочного повітря його дисперсної фази – пилу. Вхідних потоків для цієї ланки, окрім механічної енергії потоку повітря, не передбачається. Побічним продуктом роботи повітряного фільтру є продукти очищення потоку повітря та, власне, забруднені фільтрувальні елементи.

На виході з ланцюга: у сторону ПДВЗ – потік підготовленого до участі в ОВР повітря (поз. 6), а у сторону НПС – теплова енергія, шум та відфільтрований пил.

Отже, потоки 9 – 11, 19 і b напрямлено від ПДВЗ і ЕУ до НПС в обхід ТЗНС, потоки 5 – 8 напрямлено від ПДВЗ і ЕУ до ТЗНС, потоки 13 – 18 направлено від

ТЗНС до НПС, а потоки 12 і 20 – від НПС до ТЗНС, потоки 6 і 8 – від ТЗНС до ПДВЗ, потік 1 – від ПДВЗ до ЕУ, а потік а – навпаки.

Також на схемі позначено місце ФТЧ та критеріального математичного апарату в ЖЦ, СУЕБ, ТЗНС.

5.5 Описання конструкції та принципу роботи фільтра твердих частинок дизельного ДВЗ нетрадиційної конструкції як виконавчого пристрою технології захисту навколишнього середовища

Провідне місце в структурі методів і засобів зниження токсичності ВГ дизелів і їх підготовки для рециркуляції займають різноманітні за принципом дії системи, що очищують ВГ від законодавчо нормованих шкідливих речовин. Такі системи найчастіше містять так звані фільтри твердих частинок (ФТЧ), що видаляють ТЧ з потоку ВГ, накопичують і утримують їх у своєму фільтрувальному елементі (ФЕ) до моменту очищення самих фільтрів (регенерації). Однак таким пристроям властивий ряд недоліків, таких, як висока собівартість (близько 900 $ за ФЕ і 1200 $ за ФТЧ), низькі показники технологічності (потребують високої культури виробництва і експлуатації, містять складні й прецизійні конструктивні елементи і каталітичні покриття) і надійності у експлуатації (схильні до термошокового руйнування і абразивного зносу, чутливі до використання неякісних дизельних палив і моторних олив, їхній ресурс становить 100 –150 тис. км пробігу АТЗ), а також створення порівняно високого протитиску у випускній системі дизеля (3,5 – 25 кПа), періодична потреба у витратах енергії (а значить, і палива) для відновлення робочих якостей (до 10 % середньоексплуатаційних питомих масових годинних ефективних витрат палива дизелем). У той час як останні два недоліки є принциповими, перші три можливо подолати або зменшити шляхом розроблення нових конструкцій фільтрів і використання для їх виготовлення недефіцитних матеріалів вітчизняного походження [1, 5].

Додатковим обґрунтуванням застосування систем очищення ВГ від нормованих полютантів взагалі, і особливо від ТЧ, є певна обставина. Дизелі, що мають сучасну конструкцію, найчастіше оснащені системами рециркуляції ВГ, що перенаправляють частину їхнього потоку (бажано попередньо охолодженого) на впуск. При

цьому ВГ потребують обов'язкового очищення від ТЧ, що характеризуються абразивними властивостями. Рециркульовані ВГ як правило очищуються від ТЧ за допомогою ФТЧ, які зазвичай не мають бортової системи регенерації і у зв'язку з останньою обставиною потребують очищення поза бортом АТЗ при його черговому технічному обслуговуванні [1].

Відомі зі спеціалізованої літератури підходи до проектування пристроїв для очищення аерозолів від їхніх дисперсних фаз, а також методи прогнозування і визначення їхніх робочих характеристик не враховують специфіки роботи в умовах системи випуску дизеля. Суть спеціальних методів, за допомогою яких таку специфіку можливо врахувати, становить комерційну таємницю фірм-виробників ФТЧ, ПДВЗ і АТЗ [58].

Окремим аспектом ЕБ використання АТЗ, дизелів і систем очищення їхніх ВГ від полютантів є те, що ці об’єкти являють собою джерело пожежної та вибухової небезпеки і можуть спричинити такі види надзвичайних ситуацій, як лісові низові й степові пожежі і вибухи у місцях експлуатації [198].

Таким чином, вирішення проблеми зменшення викиду ТЧ з ВГ дизелів (нових і особливо таких, що знаходяться в експлуатації), за рахунок застосування ФТЧ вітчизняного виробництва, який містить щонайменшу кількість каталітичних покриттів, має високі показники ефективності очищення, універсальності, технологічності виготовлення і експлуатаційної надійності і водночас невисокий гідравлічний опір, собівартість і масогабаритні показники, є актуальним завданням, яке має науковий і практичний інтерес.

5.5.1 Визначення поняття «фільтр твердих частинок»

Перші сажові фільтри (у іноземній термінології Soot Filfer – SF) (пізніше – ФТЧ (у іноземній термінології Diesel Particulate Matter Filter – DPF) на серійних вантажних АТЗ застосовано у 90-х рр. XX ст. Перші прототипи АТЗ марок Peugeot и Ford, оснащені ФТЧ, з'явились ще у 2000 р., а на серійному легковому АТЗ – Peugeot 607 – ФТЧ вперше використано у травні 2002 р. У 2005 р. фірма Bosch розробила ФТЧ сучасної конструкції, тобто з керамічним ФЕ зі стільниковою системою каналів з

газопроникними стінками [1].

Ринкова ціна ФТЧ, що серійно випускаються, становить 350 – 900 євро, а у комплекті з корпусом, системою автоматичного керування і системою регенерації – 900 – 3000 євро для легкових АТЗ. Так, наприклад, для VW Passat B6 ФТЧ коштує близько 1200 $, а окремо ФЕ – більше за 900 $. Для вантажних АТЗ вартість ФТЧ може перевищувати вартість їхніх ПДВЗ [1].

З моменту введення у дію у країнах ЄС норм Правил ЄЕК ООН рівня EURO V (січень 2011 р.) наявність ФТЧ на борту АТЗ, що серійно виробляються і мають вдовольняти ці норми, є обов'язковим. При цьому обов'язковим також є використання дизельного пального класу EURO IV і моторної оливи класу CJ, що згідно зі стандартом мають містити якомога менше сульфатних зол, фосфору, вільної сірки. Крім того, у деяких АТЗ пуск ДВЗ неможливий за відсутності сечовини у відповідному резервуарі, яка використовується для зниження викидів NO_x [1].

ФЕ монолітної й стільникової структур традиційно виготовляють екструзією, спіканням або спінюванням. При цьому застосовують такі добре зарекомендовані керамічні матеріали як у чистому вигляді, так і у різноманітних сумішах одне з одним [1]: кристалобаліт; протоенстатіт; кордієрит; сапфірин; мілліт; періклаз; шпінель; корунд; карбід силіцію; компаунд Si-SiC; нікелева піна; силіційметалічні матеріали з нітруванням поверхонь; електротермічні напилення на керамічних або металевих поверхнях (підложках) з Al_2O_3, γ-Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2, ZrO_2-Al_2O_3, ZrO_2-TiO_2, TiO_2-Al_2O_3, BaO-ZrO_2-Al_2O_3, NbO-Al_2O_3; каталітично активна глибоководолокниста шлакова вата; цеоліти. Також відомі ФЕ з металевих мікросит і сіток або перфорованих решіток з нанесенням на їхні металеві поверхні пористих покриттів, волокнистих природних або штучних матеріалів (наприклад, силікатних волокон), або без покрить, які, однак, досі не набули широкого застосування.

Часто ці матеріали є носіями каталітичних покрить (нанесеним напилюванням, осадженням, відновленням з розчинів або іншими способами), що додають ФТЧ властивості окисних нейтралізаторів і поглиначів оксидів азоту. Іноді один і той же пористий матеріал може бути тілом одночасно і каталітичного окислювального нейтралізатора, і ФТЧ, і каталітичний поглинач NO_x при однаковій або різній пористості [1]. Один і той же пористий матеріал при використанні у комплексі таких

пристроїв може бути у вигляді [1]: аксіальних шарів; радіальних шарів. При цьому для різних пристроїв потрібна різна пропускна властивість, що чинить безпосередній вплив на час проходження потоку ВГ крізь пристрій і швидкість перетворень полютантів на безпечні речовини, а також ГО пристрою. Різницю ГО, ідентичних за хімічним складом матеріалів, досягають застосуванням: різної пористості; різного вмісту волокон певного типу [1].

За конструктивним виконанням при розміщенні таких агрегатів у єдиному корпусі або як окремих блоків (з різним ступенем або фракційністю очищення) одного й того ж пристрою (наприклад, ФТЧ, у яких при цьому кожен шар затримує фракції ТЧ з певним діапазоном розмірів) окремі блоки з пористої кераміки можуть бути [1]: розділеними буферними порожнинами; не розділеними буферними порожнинами. Зазвичай у випадку використання шарів або блоків з одного й того ж пористого матеріалу у одному пристрої шари або блоки розміщені по потоку ВГ від більшої пористості до меншої [1].

Як матеріал каталітичного покриття за його наявності традиційно використовують такі метали та їхні з'єднання [1]: платина Pt; іридій Ir; паладій Pd; родій Rd. Традиційні каталітичні речовини наносять на матеріал ФЕ у кількості від 2 г на 1 дм^3 об'єму ФЕ на початку 2000 рр. і до 0,2 г на 1 дм^3 у 2010 р. Така значна економія дорогоцінних металів за 10 років – у 10 разів, вочевидь, є результатом значного обсягу НДР [1]. Окрім традиційних каталітичних матеріалів останнім часом набули обмеженого використання такі їхні замінники [1]: пористий γ-оксид алюмінію; шар мікро- і нановолокон карбіду кремнію, протравлений в плавиковій кислоті, з покриттям оксидами міді, кобальту або заліза; пористий сечовино-формальдегідний полімер просторово-глобулярної структури з аніонобмінними властивостями та ін. Основними вимогами до матеріалу ФЕ є такі [1]: а) термостійкість (температура під час процесу регенерації досягає 1000 °С); б) корозійна стійкість (для металевих ФЕ); в) стійкість до високотемпературної газової ерозії; г) стійкість до абразивної ерозії; д) стабільність властивостей матеріалу ФЕ у часі (стійкість до старіння).

На випадок аварійного засмічення ФЕ він повинен мати байпасний (запобіжний, обвідний) канал з руйнівною перетинкою або електрокерованою заслінкою [1].

Основними недоліками цих типів фільтрів є такі [1]: 1) висока собівартість і необхідність у високій культурі виробництва; 2) значний гідравлічний опір, що збільшується в процесі експлуатації у декілька разів; 3) мала надійність в експлуатації – схильність до термошокового руйнування, чутливість до наявності сірки в паливі, витрат оливи на угар; 4) необхідність у прогріванні до робочої температури за наявності каталітичного покриття.

ФТЧ типу wall-flow характеризуються ефективністю очищення потоку відпрацьованих газів від ТЧ в діапазоні розмірів 10 нм – 1 мкм близько 95 %, а ФТЧ типу separator, залежно від масових витрат відпрацьованих газів крізь них, – від 30 до 70 % (див. рис. 1.6). Об'єм ФЕ має перевищувати робочий об'єм дизеля у 1,2–2,0 рази для забезпечення прийнятного рівня гідравлічного опору, сажомісткості та властивостей до іскро- і шумогасіння. Пробіг АТЗ між регенераціями I роду ФТЧ, залежно від різних чинників, становить 300–800 км і обмежується досягненням рівня накопичення ТЧ у ФЕ 5–10 г на 1 дм^3 об'єму ФЕ. Потреба у очищенні ФЕ від золи (продуктів горіння присадок палива і оливи, продуктів зносу деталей дизеля, діоксиду сірки, пилу зі свіжого заряду), тобто регенерації II роду, виникає кожні 120–180 тис. км пробігу АТЗ [1].

Основною проблемою ФТЧ з ФЕ традиційної конструкції з керамічним твердим тілом з стильниковою структурою каналів, заглушених у шаховому порядку, і пористими стінками є схильність їхніх матеріалів до термошокового руйнування.

З усіх вищеописаних конструкцій ФТЧ у вигляді пакетів з перфорованого і гофрованого сталевого листа і листового тканого або нетканого фільтрувального матеріалу, а також з використанням сталевої тканої сітки і різного виду насипок з пористого сорбенту реально перебувають у виробництві й експлуатації лише ті, які розроблені фірмами, що спеціалізуються тільки на таких системах зниження токсичності ВГ АТЗ, тобто фірмами DCL і Econix DPF. Решта некерамічних конструкцій, що заявлені в патентах найбільших фірм-автомобілевиробників – MAN, Toyota, Renault, Peugeot, а також фірм, що розробляють і виробляють системи зниження токсичності ВГ, переважно з керамічними ФЕ з каталітичним покриттям – Engelhart, Emitech, Johnson Matthey, і тим більше, запропоновані авторами винаходів з України,

вочевидь, носять декларативний характер. Останнє також підтверджується наявністю у формулах винаходів переважно свідомо важкореалізованих конструктивних рішень в описі об'єктів авторського права.

У праці [1] проаналізовано номенклатуру та техніко-економічні характеристики закордонних діючих ФТЧ нетрадиційної конструкції, що застосовуються для обладнання ПДВЗ, котрі не мали ФТЧ від моменту виготовлення, чи позбулись їх через різні причини. Це ФТЧ фірми DCL International inc., ФЕ являє собою згорнутий спірально у рулон пакет з двох однакових сталевих стрічок і шару листового нетканого фільтруючого матеріалу – сталевої мікрофібри з каталітичним покриттям, регенерація виконується поза бортом АТЗ. ФТЧ фірми Econix-DPF виробляє ФТЧ конструкції, розробленої фірмою Boshart Engineering, ФЕ якого являє собою згорнутий у зсічені коаксиально зібрані конуси різного розміру пакет з двох шарів сталевої тканої сітки і одного шару сталевої нетканої мікрофібри з каталітичним покриттям між ними, з власною системою термічної регенерації, що містить камеру згоряння в корпусі ФТЧ, систему подачі палива і повітря в неї, а також систему автоматичного керування його роботою. Обидва описаних вище прикладів ФТЧ з некерамічними ФЕ, що знаходяться у виробництві, забезпечують виконання норм токсичності ВГ рівня CARB Level 3+ (аналог EURO-V).

У дослідженні [1] проаналізовано номенклатуру та техніко-економічні характеристики вітчизняних діючих ФТЧ нетрадиційної конструкції, які було розроблено, але не поставлено у серійне виробництво. Рідинний ФТЧ ІПМаш НАН України у якості основної частини мав рідинний нейтралізатор, що першочергово виконував функції ФТЧ (зниження викиду ТЧ – на режимі максимального крутного моменту до 85 %), а також за певних умов знижував рівень водорозчинних компонентів і викиду NO_X, а також рівень шуму випускної системи дизеля у всьому діапазоні частот і температуру ВГ на 40–80°С, повністю усував іскроутворення у ВГ, підвищував оптичну прозорість ВГ і зводив нанівець їхній запах. В першу чергу система призначалась для дизелів потужністю до 200 кВт, якими обладнано автономні стаціонарні ЕУ, а також випробувальні станції і окремі бокси, та система мала модифікацію для транспортних дизелів потужністю до 75 кВт, що могла встановлюватись на тракто-

рах, автонавантажувачах, спеціальному самохідному гірничо-шахтному обладнанні взамін штатного глушника шуму ВГ. Робочий зразок стаціонарного варіанта рідинного нейтралізатора цієї системи було виготовлено та успішно випробувано на випробувальній станції НТЦ «КамАЗ» з двигуном КамАЗ-740 (м. Набережні Челни, Російська Федерація), що відображено у виконаних НДР [1].

5.5.2 Фільтр твердих частинок нетрадиційної конструкції з насипкою з природного цеоліту в сітчастих касетах

Як логічне продовження вищенаведених досліджень у відділі поршневих ЕУ ІПМаш НАН України за участю здобувача розроблено модульну конструкцію нерідинного ФТЧ дизеля з ФЕ з насипкою з природного цеоліту (ПЦ) у сітчастих касетах, процесу у якій піддано фізичному і математичному моделюванню [5], виготовлено і експериментально досліджено діючий зразок [3].

ФЕ такого ФТЧ побудовано на перспективному принципі роботи, що полягає у комплексному використанні ефекту інерційного впливу на ТЧ, процесів фільтрації й адсорбції, а також, на відміну від більшості традиційних фільтрів, у його функціонуванні без використання каталітичних покриттів. Відповідно до описаної в розділі 2 класифікації способів і засобів роботи ФТЧ ця розробка має ФЕ, що за принципом роботи об’єднує об'ємно-фільтруючий, поверхнево-адсорбційний та інерційний способи роботи, тобто може бути віднесена до комбінованого типу. ФЕ такого ФТЧ характеризується порівняно малою собівартістю виготовлення, прийнятними величинами ГО і масогабаритних показників і порівняно високою ефективністю очищення ВГ від ТЧ. На такій основі може бути побудовано типорозмірний ряд ФТЧ для транспортних дизелів, як нових, так і тих, що експлуатуються, а також запропоновано технічне рішення ФТЧ для очищення ВГ у системах рециркуляції ПДВЗ.

Сам ФТЧ складається з таких елементів: ФЕ; корпус фільтра; система регенерації І роду; система автоматичного керування системою регенерації й контролю стану ФЕ. Корпус такого фільтра коробчастого типу виконано з листової сталі, оснащено теплоізолюючими елементами, приєднувальними фланцями, і він має три по-

рожнини: а) приймальну (буферний об'єм на вході), в якій потік ВГ готується до проходження крізь ФЕ (знижуються швидкість потоку, температура ВГ і, відповідно, створюються сприятливі умови для інтенсифікації процесу коагуляції ТЧ). Також у цій порожнині можуть бути встановлені паливна форсунка і камера згоряння для реалізації процесу автоматичного, примусового очищення фільтра від накопичених в ньому ТЧ (процес примусової регенерації I роду); б) робочу, в якій встановлено ФЕ. При цьому її об'єм, за даними робіт [1, 27, 28], має бути не меншим за з робочий об'єм дизеля, а сумарна площа вхідних отворів модулів – принаймні рівною площі вихідного отвору випускного колектора дизеля; в) вихідну (буферний об'єм на виході), в якій забезпечується стабілізація параметрів потоку ВГ (температура, швидкість, тиск). Також у буферних об'ємах датчиками системи автоматичного керування вимірюють параметри потоку ВГ, що характеризують роботу ФТЧ.

Принципову конструкцію всього ФТЧ описано у роботі [1], в якій очищення потоку ВГ відбувається у ФЕ шляхом адсорбції й утриманні ТЧ на високопористому жаростійкому покритті стінок із сталевих пластин та гранулах насипки з ПЦ (див. рис. 3.3), які герметично рознімно з'єднані одна з одною і утворюють порожнини модулів ФЕ, при їх омиванні цим потоком, який організовується (спрямовується і розподіляється) отворами в сполучній пластині модуля, закритою сталевою нержавіючих тканою сіткою і поперечними перетинками між торцями модулів. При цьому порожнини модуля заповнені насипкою з жаростійкого сорбенту – ПЦ, а сполучна пластина з отворами в ній може виконуватися лише зі сталевої тканої сітки.

ФЕ такого ФТЧ складається з окремих однакових і рознімно сполучених між собою модулів. Їхню кількість зумовлюють такі чинники: а) заданий рівень ГО ФТЧ або допустимого погіршення паливної економічності дизеля; б) заданий рівень сажомісткості ФЕ або міжрегенераційного періоду; в) бажаний рівень зниження шуму випуску ВГ; г) компоновка моторного відсіку ЕУ або вимоги до маси і габаритних розмірів ФТЧ. Головною особливістю розробленого ФЕ є те, що використання каталітичного покриття елементів конструкції ФЕ не передбачається (слабкими каталітичними властивостями ПЦ можна знехтувати).

Регенерація I роду такого ФТЧ можлива будь-яким з термічних способів, змі-

ною насипки сорбенту з її подальшим очищенням або утилізацією або плазмовим способом. Вибір схеми, способу і алгоритму роботи системи регенерації такого ФТЧ подано у роботі [1] та описано цьому розділі роботи далі.

За результатами фізичного і математичного моделювання процесу руху текучого середовища [5] у модулі для подальших досліджень вибрано два варіанти, на основі яких було побудовано діючі зразки ФЕ, що відрізнялись наявністю та відсутністю насипки з ПЦ у сітчастих касетах модуля і сполучної пластини відповідно, піддані фізичному моделюванню (продувкою текучим середовищем на безмоторній дослідницькій установці [5]).

Такі зразки експериментально досліджено у реальних умовах експлуатації у складі модернізованої випускної системи автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 за стандартизованими випробувальними циклами [27, 28]. Зовнішній вид діючого макета ФЕ з насипкою з ПЦ у сітчастих касетах модуля [1, 5, 27, 28], подано на рис. 5.2. Результати декількох етапів стендових моторних досліджень описано у роботі [5] та використано для побудови математичних моделей ефективності роботи і ГО ФТЧ та моделі впливу ГО ФТЧ на паливну економічність ПДВЗ [3].

Ефективність роботи ФТЧ, тобто ступінь очищення потоку ВГ від ТЧ, для автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 досягає максимуму 77,5 % на режимі максимального крутного моменту дизеля (63 % за 13-режимним і 53 % за 8-режимним випробувальним циклом, а вздовж однієї робочої зміни зростає до 86,5 %) і залежить від: абсолютної величини масового часового викиду ТЧ, значення секундного масового потоку відпрацьованих газів у ФЕ, часу роботи дизеля на усталеному режимі. ГО ФТЧ не перевищує 4 кПа у всьому діапазоні робочих режимів дизеля для дизеля 2Ч10,5/12 і залежить від тих самих факторів, що й ефективність роботи ФТЧ.

Ткані сітки з нержавіючої сталі з різноманітними параметрами комірок, що виготовляють на ПАТ «Завод Фрунзе» (м. Харків), характеризуються такими особливостями [5]: а) широкий вибір розмірів комірок і типів плетіння; б) виготовляються з неокислюваного і жароміцного матеріалу; в) легко піддаються механічній обробці; г) мають малу питому вагу; д) доступні й мають порівняно невелику вартість; е) мають достатню механічну міцність і жорсткість. Сітка, що обрана для діючого експе-

риментального зразка ФЕ ФТЧ ІПМаш, яку виготовляють на ПАТ «Завод Фрунзе» (м. Харків), характеризується такими параметрами: тип плетіння – полотняний, діаметр дроту – 0,09 мм, розміри комірки – 0,14 × 0,14 мм, товщина – 0,25 мм.

Насипка з ПЦ, якою наповняли сітчасті касети, характеризуються середнім діаметром частинок (гранул) фракції – 3 мм, ступінь щільності насипки – від 0 до 100 % за об'ємом. ПЦ – це природний туф, що є високоефективним сорбентом з малою вартістю і досить високою жаростійкістю. ПЦ, що видобувається на території України, набув широкого та різноманітного застосування, у тому числі й для сорбційного очищення різноманітних текучих середовищ, як рідких, так і газоподібних. Структурно являє собою молекулярні сита зі сталими розмірами пор 2–15 Å, ярко вираженими іонобмінними властивостями, через що вирізняється каталітичними властивостями і великою хімічною спорідненістю до речовин з полярними молекулами (наприклад, вода) або з полярною частиною розгалуженої молекули (вуглеводні в одному з ступенів окислення – альдегіди, спирти, органічні кислоти та ін.). ПЦ в 4–5 разів дешевше синтетичного [1]. Основні властивості ПЦ такі [5]: щільність 1900–2600 кг/м^3 (залежно від хімічного складу); насипна щільність 620 – 1200 кг/м^3 (залежно від розміру фракції); питома теплоємність ~ 1 кДж/(кг·°С); пористість близько 50 % (діаметр каналів 0,25–0,27 нм, що відповідає розміру молекули води); спроможний адсорбувати до 0,2 см^3 пари води на 1 см^3 власного об'єму.



Рисунок 5.2 – Зовнішній вид діючого макета ФЕ ФТЧ
з насипкою з природного цеоліту у сітчастих касетах [1, 5]

Картини розподілу ТЧ у модулях експериментального зразка, наведені у [5] та отримані у ході експериментальних випробувань діючих зразків ФТЧ на моторному

стенді у складі випускної системи дизеля 2Ч10,5/12, наочно демонструють використання розробленим ФЕ комбінації з усіх трьох вищезгаданих способів очищення ВГ дизеля від ТЧ. А саме: фільтрація конгломератів ТЧ сітчастою поверхнею касети і насипкою з ПЦ при проходженні потоку ВГ крізь них; осадження ТЧ на поверхнях сталевих листів з великою шорсткістю і сітки при омиванні цих поверхонь спеціальним чином організованим (для реалізації інерційної складової процесу очищення) потоком аерозолю «ВГ дизеля – ТЧ»; адсорбція ТЧ на поверхнях насипки з ПЦ при проходженні крізь неї потоку ВГ.

Модуль ФЕ складається з двох типів деталей, що рознімно сполучені між собою – кожух (2 шт.) і касета (4 шт.). Кожух виконаний штампуванням зі сталевого листового прокату і має швелероподібну форму і сформовані в з його тіла упори для інших деталей. Касета являє собою складальну одиницю, що містить: власне касету (виконану штампуванням зі сталевої нержавіючої тканої сітки), міжкасетну перетинку (виконану штампуванням зі сталевого листового прокату, сполучену з касетою заклепкою або точковим зварюванням) і насипку з ПЦ цеоліту.

Таким чином, встановлено, що розроблена конструкція ФЕ вирізняється невисокою собівартістю виробництва і обслуговування за рахунок: рознімності з'єднань деталей, високої технологічності, а також загальнодоступності та невисокої ціни матеріалів ФЕ (наразі становить 0,25 $ для одного модуля). Також прогнозується висока експлуатаційну надійність розробленої конструкції ФЕ забезпечено за рахунок відсутності схильності його матеріалів до термошокового руйнування та відсутності каталітичних покриттів, що виходять з ладу при використанні неякісних дизельного палив і олив. Універсальність такого ФЕ зумовлена модульністю конструкції та широким вибором методів його регенерації, а також можливістю використання ФТЧ як глушника шуму і/або іскрогасника випускної системи дизеля (за певних умов) і розміщення ФТЧ на борту АТЗ поза підкапотним простором. Порівняно високу ефективність очищення ВГ від ТЧ досягнуто завдяки використанню комбінованого способу роботи. ГО і масогабаритні показники такого ФЕ (для дизеля з робочим об'ємом 2,0 дм^3 містять не менше 30 модулів і важать 2,0 кг, його габаритні розміри становлять 60 × 90 × 170 мм) не перевищують показників аналогів. Серійне виробниц-

тво ФТЧ з розробленим ФЕ може бути налагоджено на вітчизняних підприємствах машинобудівної галузі.

5.6 Способи і засоби здійснення процесу регенерації I і II роду розробленого фільтра твердих частинок з цеолітовою насипкою у сітчастих касетах

Як указано у цьому розділі вище, у дисертації було розроблено і вдосконалено у частині розробки системи управління модульний ФТЧ з насипкою з природного цеоліту у сітчастих касетах, модулі якого виготовлені з недорогих і недефіцитних матеріалів вітчизняного виробництва і не містять каталітичних покриттів [5], конструкцію якого можна віднести до нетрадиційних [1, 5].

З описаних у роботах [1, 5] найближчих аналогів розробленого ФТЧ, БСР оснащений тільки один – це ФТЧ фірми Econix, призначений для модернізації дизелів АТЗ, що знаходяться в експлуатації. Це система термокаталітичної регенерації, що містить електронний блок керування, камеру згоряння у корпусі ФТЧ і систему подачі палива у неї. Регенерація I роду ФТЧ фірми DCL (другого аналога розробленого ФТЧ), що має аналогічне першому призначення, також здійснюється термокаталітичним способом, але поза бортом АТЗ на спеціальному стенді, на час якої на АТЗ встановлюється новий ФЕ. ФТЧ системи очищення рециркульованих ВГ фірми Engelhart (третій аналог розробленого ФТЧ) регенерується термічним способом (оскільки не має каталітичного покриття) також поза бортом АТЗ при його черговому технічному обслуговуванні.

Розроблений ФТЧ має конструкцію, що дозволяє здійснити регенерацію I роду будь-яким із способів, описаних у розділі 1, за винятком каталітичних, оскільки не має каталітичного покриття, а каталітичними властивостями насипки з природного цеоліта, що міститься в його конструкції, можна знехтувати.

Регенерація II роду для нього може бути здійснена зміною насипки з природного цеоліта, а також промиванням сітчастих касет і порожнин модулів струменем води під високим тиском або ж повною заміною сітчастих касет, заповнених насипкою з ПЦ (завдяки їхнім високій технологічності і малій собівартості, а також розбірним конструкціям ФЕ [1]). Отримана суспензія ТЧ у воді має бути відфільтрова-

на, отриманий фільтрат – випарований (осушений), отриманий сухий концентрат ТЧ – спалений у сталому режимі (наприклад, у топці міні-котельні або заводу зі спалювання твердих побутових відходів).

Регенерація І роду для розробленого ФТЧ може бути побудована на використанні вже наявної матеріальної бази модернізованого АТЗ (система подачі палива з електронним блоком керування) і/або включення ФТЧ у повний комплекс очищення ВГ дизеля і постановкою безпосередньо перед ним каталітичного окислювача продуктів неповного згоряння палива і моторної оливи (з метою ініціалізації дифузного горіння збагачених паливом ВГ) або оксидів азоту (з метою окислення ТЧ у ньому за допомогою діоксиду азоту). У разі використання цього ФТЧ для зниження викиду ТЧ з ВГ модернізованого дизеля, що знаходиться в експлуатації, без зменшення викидів інших нормованих полютантів у ВГ, тобто без розробляння і установки на АТЗ каталітичного доокислювача продуктів неповного згоряння палива і каталітичного поглинача оксидів азоту, регенерація І роду для нього може здійснюватися одним з таких способів [1]:

– повністю на борту АТЗ – при розробленні або виборі з наявних у виробництві елементів системи термічної регенерації, її схеми і встановленні її на АТЗ з дизелем конкретної моделі;

– повністю поза бортом АТЗ – при розробленні або виборі з наявних у виробництві пристроїв для автоматичної термічної регенерації в умовах централізованої експлуатації й обслуговування АТЗ;

– з частковим розміщенням елементів системи термічної регенерації на борту АТЗ – при розміщенні виконавчих пристроїв системи регенерації на борту АТЗ у складі корпусу ФТЧ повністю або частково і розміщенні джерел енергії, необхідної для здійснення процесу, поза бортом АТЗ на території підприємства, яке здійснює його експлуатацію і технічне обслуговування або за місцем його зберігання.

Перший спосіб дозволяє створити повністю автономну систему зниження викиду ТЧ з ВГ дизеля, однак потребує значного подорожчання, ускладнення системи, а також збільшення її масогабаритних показників. Для другого способу переваги і недоліки першого взаємно протилежні. Третій спосіб – комбінований і дозволяє, за

певних умов, обійтися мінімально можливими подорожчанням і ускладненням конструкції системи очищення ВГ від ТЧ при мінімальному зниженні автономності та універсальності АТЗ як такого. Найважливішими з цих умов є використання універсальних і загальнодоступних джерел енергії – електрична і/або моторне паливо.

З принципів роботи відомих на сьогодні систем термічної регенерації ФТЧ (див. розділ 1), що знаходяться в експлуатації, придатних для реалізації цього способу регенерації I роду, можна виділити такі.

1. Підвищення температури ВГ на вході в ФТЧ за рахунок упорскування палива в них й ініціалізації його дифузного окислення залишковим киснем у ВГ за допомогою електрогідравлічних форсунок універсальної конструкції, керованих електронним блоком керування і встановлених у камеру згоряння корпусу ФТЧ [1]. При цьому резервуар з паливом, паливні фільтри і паливний насос, сам електронний блок керування і його контрольно-вимірювальні прилади можуть знаходитися поза бортом АТЗ і, будучи зібраними у єдиний агрегат, використовуватися для обслуговування декількох АТЗ за місцем розміщення експлуатуючої організації або на автозаправній станції. На борту АТЗ у складі корпусу ФТЧ при цьому повинні розміщуватися камера згоряння, паливна форсунка й ініціатор горіння: свічка розжарювання, каталітична сітка, каталітичний доокислювач продуктів неповного згоряння палива або свічка запалювання. Сама ж паливна форсунка також може знаходитися поза бортом АТЗ, при цьому на борту АТЗ потрібна лише наявність камери згоряння з місцями установки універсальної форсунки й ініціатора окислення, заглушеними спеціальними пробками під час експлуатації.

2. Підвищення температури і реакційної (окислювальної) здатності ВГ на вході у ФТЧ за рахунок генерування низькотемпературної плазми з ВГ спеціальним пристроєм. При цьому можливе використання малогабаритних енергоефективних плазмотронів, які потребують для своєї роботи підведення газу-плазмоносія і електроенергії.

Аналіз способів і пристроїв для плазмової нейтралізації ВГ ПДВЗ у роботі [1] свідчить, що більшість технічних рішень базується на обробленні усього потоку ВГ низькотемпературної плазмою; також іноді використовуються добавка іонізованого

вторинного повітря і оброблення потоку ВГ плазменно-паливними струменями. Як газ-плазмоносій згідно з даними дослідження, що виконано у відділі поршневих енергоустановок ІПМаш НАН України, раціонально використовувати самі ВГ. Конструкція, зовнішній вигляд і спосіб установки плазмотрона подано на рис. 3.5.

До недоліків способу слід віднести такі: а) відносно велике енергоспоживання плазмотрона за його високої продуктивності; б) необхідність у використанні системи подачі газу-плазмоносія; в) використання як газ-плазмоносій повітря або кисню призводить до різкого збільшення емісії дизелем оксидів азоту.

Дослідження [1] також показало такі результати аналізу цих процесів: а) плазмова нейтралізація дозволяє знизити вміст у ВГ продуктів неповного згоряння палива на 70 %, ТЧ – на 25 %; б) спільне використання низькотемпературної плазми з каталізаторами при нейтралізації ВГ є перспективним технічним рішенням, яке дозволяє істотно підвищити ефективність способу. Так, процес нейтралізації ВГ значно поліпшується, якщо каталітично активна речовина введена в структуру електрода плазмотрону; в) для транспортних ПДВЗ доцільно об'єднати плазмовий нейтралізатор ВГ з глушником шуму системи випуску ВГ.

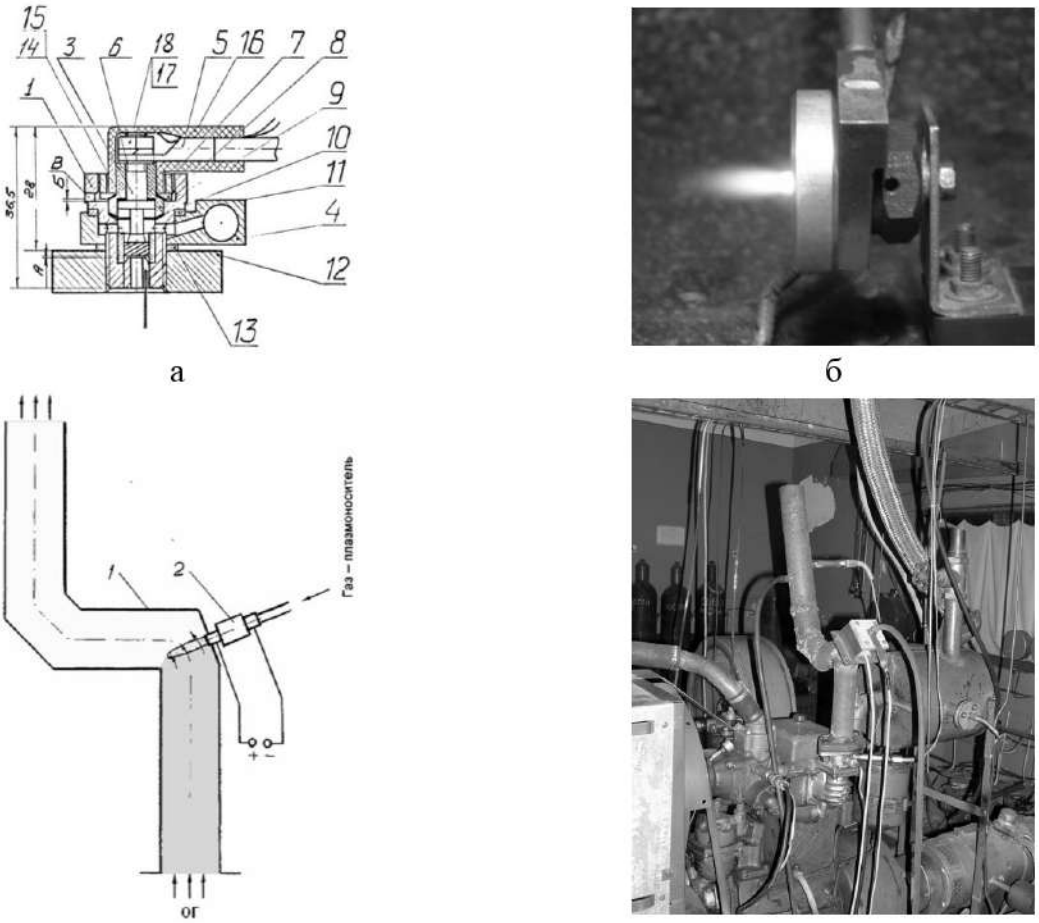
При використанні плазмотрона, поданого на рис. 5.3, тільки для регенерації ФТЧ, його ефективності окислення ТЧ при споживаної ним потужності 5 кВт (за попередньою оцінкою) достатньо, щоб завершити процес регенерації розробленого ФТЧ, який накопичив до 60 г ТЧ, за 30 хв.

При цьому, як і у випадку використання паливних форсунок й камери згоряння для регенерації ФТЧ, на борту АТЗ можуть перебувати сам плазмотрон і штуцер відбору газу-плазмоносія, а джерело електроенергії й блок живлення плазмотрона може знаходитися поза бортом АТЗ у складі єдиного універсального агрегату, придатного для обслуговування декількох АТЗ. Можливі також перенесення самого плазмотрона з борту АТЗ в агрегат і установка на його місце спеціальних пробок. Для АТЗ, що зберігаються і обслуговуються власниками самостійно, можлива установка плазмотрона і блока його живлення на борт АТЗ, а живлення системи регенерації здійснюється від побутової електромережі напругою 220 В.

3. Підвищення температури ВГ до порогу самовільного займання ТЧ у ФЕ на-

гріванням потоку ВГ вбудованими електронагріваючими елементами на вході в корпус ФТЧ або ж підведенням електричної напруги до самого ФЕ (виготовленого із сталевого прокату і сталевої тканої сітки – див. розділ 2).

При цьому, як і в попередньому випадку, як самі нагрівальні елементи, так і блок живлення системи регенерації можуть встановлюватися як на борту АТЗ, так і поза ним. Джерело електроенергії – побутова електромережа напругою 220 В. При установленні нагрівальних елементів поза АТЗ доцільно нагрівати ними не ВГ, а повітря з НПС, подаючи його в спеціальний штуцер корпусу ФТЧ. Сам пристрій подачі нагрітого до 650 °С повітря може бути аналогом промислового фена і споживати при цьому до 4 кВт·год електроенергії [1].



а б в г

а – ескіз плазмотрона; б – зовнішній вигляд працюючого плазмотрона; в – схема установки плазмотрона у випускній системі моторного стенда; г – зовнішній вигляд моторного стенду із встановленим плазмотроном

Рисунок 5.3 – Плазмотрон і місце його установки на моторному стенді відділу водневої енергетики ІПМаш НАН України [1]

4. Вплив на потік ВГ і ТЧ в ньому НВЧ-випромінювача з метою підвищення температури ВГ до порогу самозаймання ТЧ або для деструкції і знешкодження продуктів неповного згоряння палива (в основному вуглеводнів), що входять до складу ТЧ (адсорбовані на сажових ядрах) і являють собою основну частину окислюваних фракцій ТЧ [1]. Варіанти розміщення самого НВЧ-випромінювача і його джерела енергії такі самі, як і для попередніх пунктів.

Сам процес, реалізований будь-яким з вищеписаних способів, може проводитися при роботі дизеля на режимі холостого ходу з максимальною частотою обертання КВ, як і на режимі з максимальними масовими витратами й температурою ВГ при нульовій ефективній потужності дизеля [1]. Тривалість процесу, за попередніми оцінками, не повинна перевищувати 30 хв. У будь-якому з вищеописаних варіантів реалізації системи регенерації демонтаж ФТЧ з випускної системи дизеля і ФЕ з самого ФТЧ не потрібен.

Періодичність необхідності здійснення регенерації І роду для розробленого ФТЧ визначається тими ж вимогами, що й для ФТЧ будь-якого іншого типу – рівнями створюваних заповненим ФТЧ ГО і перепаду температур ВГ у випускній системі дизеля. Ця величина також визначається питомою сажомісткістю ФТЧ (у грамах ТЧ на 1 дм^3 об'єму ФЕ), яка змінюється в ході експлуатації під впливом причин, які потребують необхідності проведення регенерації ІІ роду.

Розроблений ФТЧ відрізняється модульною конструкцією, що дозволяє вибирати найкращий варіант поєднання масогабаритних показників ФЕ (компонування на конкретному АТЗ), його ГО (і витрат палива) і вартістю – з одного боку, і його сажомісткістю, періодом роботи до регенерації І роду (міжрегенераційним періодом), середньоексплуатаційними витратами енергії на її проведення і собівартістю всієї системи очищення ВГ від ТЧ (залежить від моделі експлуатації АТЗ) – з іншого.

У дослідженнях [1, 3, 5] проведено оцінювання кількості модулів ФЕ для дизеля 2Ч10,5/12 [33, 114] з робочим об’ємом 2,0 дм^3 (не менш за 30–50 шт.); середньоексплуатаційного викиду ТЧ дизелем (до 1,23 г/(кВт·год)), ефективності очищення розробленим ФЕ його ВГ від ТЧ і його ГО залежно від різних режимних і конструктивних параметрів дизеля і часу його роботи на стаціонарному режимі з максимальним викидом ТЧ (більше за 63 %); збільшення у зв'язку з цим середньоексплуатаційної питомої еф-

ективної витрати палива (не більше за 4,35 %).

Вимоги до рівня ГО випускної системи дизеля 2Ч10,5/12 (до 10 кПа) і періоду між технічним обслуговуванням (до 250 мотогодин) [33] обмежують сажомісткість і тривалість межрегенераційного періоду для розробленого ФТЧ, установленого на моторний випробувальний стенд лабораторії відділу водневої енергетики ІПМаш НАН України. Питома сажомісткість ФЕ з об'ємом, що дорівнює робочому об'єму дизеля (близько 2 дм^3), за наближеною оцінкою становить близько 30 г/дм^3 [1].

ГО діючого макета ФЕ, що містить 40 % модулів від необхідної кількості, збільшується на 1,6 кПа на 1 годину роботи дизеля на режимі максимального крутного моменту (характеризується максимальним масовим викидом ТЧ). Враховуючи ці дані, можна встановити, що міжрегенераційний період (період роботи ФТЧ між регенераціями I роду) становить близько 12,5 годин роботи на режимі максимального крутного моменту і близько 40 годин для 13-режимного випробувального циклу [1].

У роботі [3] надано результати аналізу аспектів техногенно-екологічної безпеки експлуатації ФТЧ як виконавчих пристроїв ТЗНС та аспекти пожежо- і вибухобезпеки експлуатації ФТЧ як виконавчих пристроїв ТЗНС.

5.7 Математична модель гідравлічного опору фільтра твердих частинок дизельного ДВЗ в реальних умовах експлуатації

Для досягнення ЕУ, оснащеними ПДВЗ, рівня екологічних показників, встановленими чинними нормами токсичності ВГ стандартів поряд із заходами щодо впливу на робочий процес ПДВЗ широко застосовують різні системи очищення потоку їх ВГ від нормованих полютантів, зокрема ТЧ, які разом з NO_X складають до 95 % токсичності ВГ [1–20]. За визначенням з [1–22] ТЧ – це усі субстанції, що осіли на спеціальному фільтрі з тефлону при пропусканні скрізь нього спеціальним чином приготованої проби з ВГ, розбавлених чистим повітрям, і не є водою. Для нейтралізації ТЧ в потоці ВГ (видалення з потоку, накопичення в ФЕ і перетворення в безпечні речовини в ФЕ або поза бортом АТЗ) в системах зниження токсичності ВГ ПДВЗ (власне, ТЗНС) застосовують ФТЧ традиційної та нетрадиційної конструкції [1].

Аналіз наведеного у [2, 5] можна дійти висновку, що наразі, у найближчій пер-

спективі, слід сконцентрувати увагу на дослідженнях менш радикальних способів забезпечення рівня ЕБ урбосистеми, ніж часткова (гібриди) або повна (електрокари) відмова від використання ПДВЗ як джерел механічної енергії для ЕУ, які чинять негативний вплив на компоненти НПС інтенсивно, різнобічно під час свого нормального функціонування, за рахунок узгодження показників екологічності ПДВЗ з законодавчо встановленими нормативами. Згідно до [1–20] серед таких способів найдієвішим є нейтралізація полютантів у потоці ВГ, а серед засобів – ФТЧ.

Методологічною базою для такого роду природоохоронної діяльності на стратегічному рівні виступає відповідна СУЕБ, матеріальною базою якої на тактичному рівні виступає відповідна ТЗНС, що містить елементи технічного рівня – виконавчі пристрої (зокрема ФТЧ) вона має декілька етапів, що реалізуються одне за одним.

Третій етап такої СУЕБ носить назву «Організація та виконання технологічних процесів, що забезпечують заданий рівень ЕБ» містить два рівні: Рівень 5 під назвою «Організація та управління СУЕБ»; та Рівень 6, котрий має назву «Виробничі процеси, що забезпечують заданий рівень ЕБ». Результатами їх виконання мають виступити досліджені, описані та раціоналізовані процеси, що відбуваються у ФЕ ФТЧ та у випускному тракті ПДВЗ. Тобто серія досліджень, описана у цьому розділі рукопису кваліфікаційної роботи, займає цілком визначене місце побудові у СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

Проблемою при цьому є відсутність математичного описання спільного впливу сукупності процесів, що відбуваються у потоці ВГ у випускному тракті ПДВЗ, а також конструктивних параметрів самого ФТЧ, на його робочі характеристики – ефективність очищення потоку ВГ від ТЧ та ГО, а також вплив ГО ФТЧ на показники паливної економічності ПДВЗ. Це процеси охолодження ВГ, конденсації та адсорбування ПНЗП на поверхнях сажових ядер ТЧ, коагуляції самих ТЧ.

У даному дослідженні такий опис буде здійснено на основі аналізу експериментально отриманих даних – результатів стендових моторних досліджень автотракторного дизеля, випускну систему якого обладнано діючим експериментальним зразком ФТЧ нетрадиційної конструкції.

З метою визначення техніко-економічних показників роботи ФТЧ з цеоліто-

вою насипкою у сітчастих касетах, розробленого і вдосконаленого у дисертації, як виконавчого пристрою розробленої ТЗНС, верифікації результатів фізичного і математичного моделювання процесів у ФТЧ та отримання набору вихідних даних для здійснення комплексного критеріального оцінювання, сплановано і здійснено експериментальне дослідження у формі моторних випробуваню. Експериментальними зразками виступили діючі зразки ФТЧ, що встановлювались випускну систему МВС з автотракторним дизелем 2Ч10,5/12 у лабораторії відділу водневої енергетики ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України. Систему відбору проб ВГ на токсичність і димність МВС при цьому вдосконалено шляхом обладнання МТ, у який встановлюється діючий зразок ФТЧ (див. Додаток В). Умови проведення, методика і програма стендових моторних випробувань, здійснених у 4 етапи, особливості варіантів конструкції експериментальних зразків ФТЧ, описано у працях [3, 5].

Таким чином, математична модель ГО ФТЧ має вигляд:

$$\begin{aligned}\Delta P_{ФТЧ} &= \Delta P_{ПММ}\left(g_{mEGi};S_{вх};z_{м}\right)\cdot k_0\cdot k_t\left(t_{ФТЧвхi}\right)\cdot k_L\left(t_{ФТЧвх\max}\right)\cdot k_\tau\left(\tau_M;N_{ei};WF_i\right)= \\ &= \Delta P_{ПММ}\left(n_{квi};S_{вх};z_{м}\right)\cdot k_0\cdot k_t\left(M_{кpi}\right)\cdot k_L\left(L_{вит}\right)\cdot k_\tau\left(\tau_M;N_{ei};WF_i\right),\ \text{Па}\end{aligned} \qquad (5.1)$$

де індекс i відповідає поточному режиму роботи дизельного ПДВЗ; k_0, k_t, k_L, k_τ – настроювальний, температурний, компоновочний часовий коефіцієнт відповідно.

При $z_м$ = 1 і $S_{вх}$ = 55 мм^2, $t_0 = t_{ТС}$ = 15 ... 20 ±2 °С; B_0 = 95 кПа, g_m = 10 ... 110 кг/(с·м^2) [5]:

$$\Delta P_{ПММ} = 0{,}122\cdot g_{mEG}^3 - 1{,}964\cdot g_{mEG}^2 + 173{,}7\cdot g_{mEG},\ \text{Па}; \qquad (5.2)$$

$$g_{mEG} = \left(1{,}558\cdot 10^{-2}\cdot n_{кв} + 0{,}956\right)\cdot 20/z_{м}\cdot 55/S_{вх},\ \text{кг/(с·м}^2\text{)}. \qquad (5.3)$$

Визначення настроювального коефіцієнта моделі.

Для приведення у відповідність результатів досліджень на БДУ (фізичне моделювання процесу руху реального ТС у проточній частині модуля ФЕ) та МВС (їх зв'язку з урахуванням прийнятого допущення) у формулі (5.1) вводиться спеціальний коефіцієнт – настроювальний k_0, рівний відношенню ГО діючого макету ФЕ на режимі з глобальним максимумом значення величини $t_{ВГ}$ (режим з $M_{кр\max}$) до ГО ПММ ФЕ з відповідною щільністю насипкою з ПЦ, при тому ж значенні $g_{mВГ}$. Тобто, його значення визначається такою формулою:

$$k_0 = \Delta P_{ФТЧt=const}\left(g_{mEG}\right)\Big|_{t_{ВГ}(M_{кр\max})} / \Delta P_{ПММ}\left(g_{mEG}\right)\Big|_{t_{ВГ}(M_{кр\max})}. \quad (5.4)$$

Настроювальний коефіцієнт дорівнює для ДМ ФЕ 1,04, а для ДМЦ ФЕ 0,96. Різниця в значенні коефіцієнта k_0 для ДМ і ДМЦ ФЕ пояснюється принциповими відмінностями в їх конструкції, а саме наявністю насипки з ПЦ, яка забезпечує більш рівномірний рух потоку ВГ в порожнинах проточної частини сітчастої касети модуля ФЕ. Подальші етапи моторних випробувань проводилися для діючого макету ФЕ з насипкою – ДМЦ.

Визначення температурного коефіцієнта моделі

За аналогією з настроювальним коефіцієнтом k_0 математичної моделі ГО ФТЧ дизельного ПДВЗ, для різних режимів ЗШХ, що характеризуються різним значенням температури ВГ $t_{ФТЧвх}$ на вході у корпус ФТЧ, що відрізняється від температури ВГ на режимі з $M_{кр\max}$ $t_{ФТЧвх\max}$ завідомо в меншу сторону, ця залежність – витратна характеристика «прогнозу» при $t_{ВГ}$= const – може бути отримана шляхом введення спеціального температурного коефіцієнта k_t, рівного відношенню ГО діючого макету ФЕ до значення ГО на витратній характеристиці «прогнозу» при $t_{ВГ}$= const при відповідному значенні $g_{mВГ}$ [3]. Для режиму з $M_{кр\max}$, очевидно, k_t дорівнює 1,0, оскільки це спільна точка ізотермічної та прогнозної витратних характеристик при $t_{ВГ}$= const і $t_{ВГ}\neq$ const (що в даному випадку збігається з експериментально отриманою на МВС витратною характеристикою для ДМЦ ФЕ), в чому і полягає сутність запропонованого підходу. Для інших режимів характеристики $k_t < 1{,}0$ і залежить від $t_{ФТЧвх}$. Пропонований підхід і фізичний зміст температурного коефіцієнта описується такими формулами:

$$\Delta P_{ФТЧексп} = \Delta P_{ФТЧt\neq const} = \Delta P_{ФТЧt=const} \cdot k_t = \Delta P_{ПММ} \cdot k_0 \cdot k_t; \quad (5.5)$$

$$k_t = \frac{\Delta P_{ФТЧексп}}{\Delta P_{ФТЧпрогн}} = \frac{\Delta P_{ФТЧексп}\left(g_{mВГ}\right)\Big|_{t_{ВГ}(n_{кв})}}{\Delta P_{ФТЧt=const}\left(g_{mВГ}\right)\Big|_{t_{ВГ}(n_{кв})}} = 1 - \frac{\Delta P_{попр}\Big|_{t_{ВГ}(n_{кв})}}{\Delta P_{ФТЧt=const}\left(g_{mВГ}\right)\Big|_{t_{ВГ}(n_{кв})}}; \quad (5.6)$$

$$\Delta P_{попр} = \Delta P_{ФТЧпрогн} - \Delta P_{ФТЧексп} = \Delta P_{ФТЧt=const}\left(g_{mВГ}\right)\Big|_{t_{ВГ}(n_{кв})} - \Delta P_{ФТЧексп}\left(g_{mВГ}\right)\Big|_{t_{ВГ}(n_{кв})}. \quad (5.7)$$

Залежності величини k_t від величин $g_{mВГ}$, $t_{ВГ}$ і $n_{кв}$, отримані експеримента-

но на МВС для τ_M = 0 с, $L_{вп}$ = 0 м (і, відповідно, $t_{ФТЧвх\max}$ = 605 ºС), відображають суть описаного формулами (5.5) – (5.7) підходу, описані методом найменших квадратів [213] – формула (5.12) для ДМЦ ФЕ.

$$M_{кр} = -4{,}776 \cdot 10^{-5} \cdot n_{кв}^2 + 0{,}118 \cdot n_{кв} + 37{,}5;\ R^2 = 0{,}97891,\ \text{Н·м}; \quad (5.10)$$

$$t_{ВГ} = -3{,}590 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 0{,}963 \cdot n_{кв} - 94{,}8;\ R^2 = 0{,}98880,\ ^{\circ}\text{C}. \quad (5.11)$$

$$k_t = -2{,}171 \cdot 10^{-3} \cdot g_{mВГ}^2 + 9{,}120 \cdot 10^{-2} \cdot g_{mВГ} + 0{,}0321 =$$
$$= -5{,}425 \cdot 10^{-7} \cdot n_{кв}^2 + 1{,}391 \cdot 10^{-3} \cdot n_{кв} + 0{,}10 = 1{,}433 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ФТЧвх} + 0{,}127;$$
$$R^2\left(g_{m_ОГ}\right) = 0{,}97036;\ R^2\left(n_{кв}\right) = 0{,}98092;\ R^2\left(t_{ФТЧвх}\right) = 0{,}97201; \quad (5.12)$$

Визначення компонувального коефіцієнту моделі

Другий етап моторних випробувань на МВС дизеля 2Ч10,5/12, випускна система якого оснащена ДМЦ ФЕ, проводився з метою виявлення впливу температури ТС (для МВС – ВГ) на робочі характеристики ФТЧ, зокрема на значення його ГО.

Таким чином, додатково організовані три положення МТ, що характеризуються значеннями 1,5; 5,0 і 8,0 м відповідно з метою забезпечення охолодження потоку ВГ у випускному тракті до ФТЧ за рахунок теплообміну та розширення.

Разом з підвищенням ефективності очищення потоку ВГ від ТЧ спостерігається зменшення ГО експериментального зразка, МТ та інших елементів випускної системи МВС, що знаходяться за МТ. Це пояснюється збільшенням щільності ВГ $\rho_{ВГ}$, що при незмінності секундної масової витрати ВГ $G_{mВГ}$ призводить до зменшення секундної об'ємної витрати ВГ $G_{V.ВГ}$, що при сталості прохідного перетину ФЕ $z_м \cdot S_{вх}$ призводить до зменшення швидкості руху потоку ВГ крізь проточну частину ФЕ $V_{ВГ}$, від квадрата якої залежать лінійні і місцеві втрати напору потоку ВГ.

Залежність величини $t_{ФТЧвх\max}$ (в °С) від величини $L_{вп}$ (в м) для МВС є нелінійної і описується формулою (5.13).

$$t_{ФТЧвх\max} = 2{,}176 \cdot L_{вп}^2 - 61{,}272 \cdot L_{вп} + 591{,}2;\ R^2 = 0{,}98621. \quad (3.13)$$

Врахування виявленого у експерименті ефекту пропонується здійснювати шляхом введення в математичну модель ГО ФТЧ відповідного коефіцієнта – компонувального k_L, що дорівнює співвідношенню значень ГО ДМЦ ФЕ на режимі робо-

ти ПДВЗ з $M_{кр\max}$ при поточному значенні величини $L_{вип}$ і при $L_{вип}=0$ м. Залежність значень k_L (в долях одиниці) від значення $L_{вип}$ (в м) і $t_{ФТЧвх\max}$ (в °С) виражається рівнянням (5.14).

$$k_L = 1{,}248\cdot10^{-6}\cdot t^2_{ФТЧвх\max} + 1{,}073\cdot10^{-6}\cdot t_{ФТЧвх\max} + 0{,}478 = \\ = 2{,}337\cdot10^{-6}\cdot L^2_{вип} - 6{,}721\cdot10^{-2}\cdot L_{вип} + 0{,}959; \\ R^2\left(t_{ФТЧвх\max}\right) = 0{,}99996; R^2\left(L_{вип}\right) = 0{,}97920. \qquad (5.14)$$

Визначення часового коефіцієнту моделі

Він визначається за аналогією з іншими коефіцієнтами описуваної математичної моделі, а саме: співвідношенням значень ГО розробленого ФТЧ, експериментально отриманими на МВС, відповідно на початку роботи ФТЧ з незаповненим (порожнім, очищеним) ФЕ (в початковий момент міжрегенераційного періоду, тобто при напрацюванні дизелем часу $\tau_{reg}=0$) і в поточний момент часу з $\tau_{reg}\neq0$ (аж до закінчення міжрегенераційного періоду роботи ФТЧ, тобто безпосередньо перед початком процесу регенерації I роду [3]). Це виражається формулою (5.15).

$$k_т = f\left(\tau_M, G_{ТЧ}\left(N_{ei}\right), K_{EO}\left(G_{ТЧ}\right)\left(N_{ei}\right), WF_i\right) = \Delta P_{ФТЧ}\left(\tau_{reg}=0\right)/\Delta P_{ФТЧ}\left(\tau_{reg}\neq0\right), \qquad (5.15)$$

де індексом *i* позначено режим роботи дизельного ПДВЗ у моделі його експлуатації; τ_M – час роботи дизельного ПДВЗ на режимі з максимальним масовим годинним викидом ТЧ (тобто на режимі з $M_{кр\max}$); $G_{ТЧ}$ – масовий годинний викид ТЧ з потоком ВГ ПДВЗ; $K_{EO}\left(G_{ТЧ}\right)$ – коефіцієнт ефективності очищення ФТЧ потоку ВГ ПДВЗ від ТЧ; N_e – ефективна потужність ПДВЗ; $M_{кр}$ – крутний момент дизельного ПДВЗ; $n_{кв}$ – частота обертання колінчастого вала ПДВЗ; WF – ваговий фактор *i*-го режиму роботи ПДВЗ в обраної моделі його експлуатації.

Міжрегенераційний період роботи ФТЧ τ_{regI} – це тривалість роботи ПДВЗ (в одиницях часу чи кілометражу АТЗ, в одиницях кількості спожитого палива, в одиницях виробленої енергії чи напрацювання ПДВЗ у мотогодинах) від моменту, коли можна вважати, що ФЕ ФТЧ повністю незаповнений $\tau_{reg}=0$ (порожній, очищений) ТЧ, до моменту, коли можна умовно вважати, що в ФТЧ необхідно здійснити процес

регенерації I роду і $\tau_{reg} = \tau_{regI}$.

Експериментально визначені значення часового коефіцієнта k_τ у функції величини τ_M описуються формулою (5.16).

$$k_\tau(\tau_M) = 1{,}544 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_M^3 - 0{,}208 \cdot \tau_M^2 + 1{,}394 \cdot \tau_M + 1{,}0; R^2 = 0{,}99546. \quad (5.16)$$

5.8 Математична модель ефективності роботи розробленого фільтра твердих частинок

Зв'язок робочих характеристик ФТЧ з режимними, регулювальними, конструктивними параметрами дизеля та експлуатаційними факторами, описаний математичною мовою, є основою НДР з побудови типоряду таких об'єктів для їх запровадження у серійне виробництво на вітчизняних машинобудівних підприємствах та експлуатацію автотранспортними підприємствами і приватними автовласниками задля забезпечення ЕБ експлуатації АТЗ [3].

Виконано фізичне моделювання процесу руху ТС у різних варіантах конструкції прозорого макету модуля на БДУ [5]. Однак, її технічні можливості не дозволяють досліджувати процес руху аерозолів у модулі (через відсутність генератора дисперсної фази аерозолю), а також процеси адсорбції, адгезії і конденсації C_nH_m на сажових ядрах ТЧ, та коагуляції самих ТЧ (через високу складність таких досліджень). Тому результати фізичного моделювання, на відміну від моделі опору ФТЧ, описаної у попередньому підрозділі рукопису кваліфікаційної роботи, не враховуються у розробленій математичній моделі ефективності роботи розробленого ФТЧ. Те саме стосується виконаного математичного моделювання процесу руху аерозолю «ВГ дизеля – ТЧ» у модулі, результати якого описано у джерелі [5]. Процеси формування ТЧ у робочому процесі дизеля та у потоці ВГ і процеси очищення цього потоку при цьому також не досліджувались через принципові особливості розрахункової моделі модуля. За результатами фізичного і математичного моделювання процесу руху потоку ТС у модулі розроблено експериментальні ФЕ зразки для дослідження їх робочих якостей у реальних умовах експлуатації. Для виявлення особливостей функціонування розробленого ФТЧ в умовах випускної системи дизеля (тобто у реальних умовах експлуатації) проведено відповідне експериментальне дослідження

діючих зразків ФЕ на МВС [5], описане у попередньому підрозділі рукопису.

Математична модель ефективності роботи розробленого ФТЧ у реальних умовах експлуатації принципово аналогічна моделі опору досліджуваного ФТЧ, описаній у попередньому підрозділі.

Математична модель ефективності роботи розробленого ФТЧ у реальних умовах експлуатації, що відповідає конструкції експериментального зразка ДМЦ ФЕ, за аналогією з математичною моделлю його ГО у тих же умовах має такий вид:

$$K_{EO} = K_{EO}(G_{TЧ})(g_{m_ВГ}) \cdot k_L(t_{ФТЧвх\max}) \cdot k_\tau(\tau_M; N_{ei}; WF_i) = \\ = K_{EO}(G_{TЧ})(n_{кв}) \cdot k_L(L_{вип}) \cdot k_\tau(\tau_M; N_{ei}; WF_i), \%, \quad (5.17)$$

$$K_{EO}(G_{TЧ})(g_{m_ВГ}) = -0{,}332 \cdot g^2_{m_ВГ} + 14{,}198 \cdot g^2_{m_ВГ} - 112{,}557; R^2 = 0{,}96756, \%. \quad (5.18)$$

Математична модель ефективності роботи розробленого ФТЧ, як видно з порівняння комплексу формул комплексу формул (5.17) – (5.18), має деякі відмінності від вищенаведеної моделі його ГО. Вони зумовлені описаними у [5] особливостями конструкції БДУ, тобто відсутністю даних, отриманих на ній, з якими можна було б порівняти дані, отримані на МВС. Відповідно до цього, у моделі ефективності роботи ФТЧ відсутні настроювальний k_0 (за вищенаведеними міркуваннями) і температурний коефіцієнти k_t. Останній втрачає фізичний сенс, оскільки показник ефективності роботи ФТЧ – K_{EO} – залежить на кожному окремому режимі роботи дизельного ПДВЗ не лише від температури ВГ, а й від значення масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ (див. формулу (5.18).

Визначення компонувального коефіцієнта моделі

Пропонований коефіцієнт встановлює зв'язок між температурою потоку ВГ на вході у корпус ФТЧ, що зумовлена місцем його розміщення вздовж випускного тракту дизельного ПДВЗ (перебігом процесів розширення потоку ВГ і теплообміну ВГ з повітрям НПС у випускному тракті), та ефективність очищення ФТЧ потоку ВГ від ТЧ, що зумовлена укрупненням ТЧ через конденсацію C_nH_m на ТЧ і коагуляцію самих ТЧ у потоці ВГ.

Другий етап моторних експериментальних досліджень проведено з метою виявлення і оцінки впливу температури дисперсного середовища аерозолю «ВГ дизеля – ТЧ» $t_{ВГ}$ на ефективність його очищення від дисперсної фази за допомогою ФТЧ.

Ефекту підвищення значення $K_{EO}(G_{TЧ})$ при зниженні значення $t_{ВГ}$ було очікуваним ефектом, з причин, проаналізованих і описаних у [5]. В ході експериментальної перевірки ці припущення знайшли своє підтвердження – залежності величин $K_{EO}(G_{TЧ})$ від величини $t_{ФТЧвх}$ носить нелінійний характер, що мало відрізняється від лінійного та може бути описана формулою (5.19). Вплив величин $t_{ФТЧвх\max}$ і $n_{кв}$ на величину коефіцієнта k_L може бути описаний формулою (5.20).

$$K_{EO}(G_{TЧ}) = -1{,}683 \cdot 10^{-4} \cdot t_{ФТЧвх}^2 + 3{,}266 \cdot 10^{-2} \cdot t_{ФТЧвх} + 73{,}2\,,\ \%. \qquad (5.19)$$

$$k_L = -5{,}579 \cdot 10^{-6} \cdot t_{ФТЧвх\max}^2 + 1{,}167 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ФТЧвх\max} + 2{,}3; R^2 = 0{,}99848. \qquad (5.20)$$

Слід зауважити, що для величини $K_{EO}(G_{TЧ})$ з описуваної математичної моделі компонувальний коефіцієнт k_L є по-суті аналогом комплексу температурного k_t і компонувального k_L коефіцієнтів математичної моделі ГО ФТЧ, принципова різниця між якими у даному випадку не може бути виявлена за наявними експериментальними даними, а саме через відсутність даних фізичного моделювання процесу очищення потоку ВГ від ТЧ модулем розробленого ФЕ [3].

Компонувальний коефіцієнт для даної математичної моделі величина k_L за визначенням (що і є його фізичним змістом) рівний відношенню значень $K_{EO}(G_{TЧ})$ при різних фіксованих значеннях $L_{вип} \neq 0$ (або $t_{ФТЧвх\max} \neq t_{ФТЧвх\max}(M_{кр\max})$, тобто за частковою швидкісною характеристикою) до значень $K_{EO}(G_{TЧ})$ при $L_{вип} = 0$ (або $t_{ФТЧвх\max} = t_{ФТЧвх\max}(M_{кр\max})$, тобто за ЗШХ), при постійних значеннях $n_{кв}$.

5.9 Математична модель впливу гідравлічного опору розробленого фільтра твердих частинок на паливну економічність поршневого ДВЗ

При своїй роботі ФТЧ, створюючи позитивний ефект, як і будь-які елементи і пристрої випускної системи дизеля, створюють додатковий ГО, що неминуче призводить до або збільшення витрат палива дизелем, або до зниження його ефективної потужності [1].

Первинна оцінка такого впливу виконана у [3] за розробленою в дисертації моделлю. Недоліками того варіанту моделі були: а) однобічність оцінки (неврахування впливу ГО ФТЧ на ефективну потужність дизеля N_e, а лише на масові годинні витрати палива G_{fuel}); б) розділення режимів роботи дизеля, для яких виконувалась

оцінка, і формул для них на режими з нульовою і ненульовою ефективною потужністю N_e; в) використання у розрахункових формулах даних непрямих вимірювань – величин питомих ефективних масових витрат палива g_e, ефективного η_e і механічного $\eta_м$ ККД дизеля; г) у формулі для середнього тиску механічних втрат для різних її складових застосовано величини, що залежать від різних аргументів – від частоти обертання колінчастого валу дизеля $n_{кв}$ і питомих масових витрат ВГ крізь ФТЧ g_m (у кг/(с·м^2)), хоча дані аргументи пов'язані прямопропорційною залежністю; д) точність прогнозу погіршувалась для режимів навантажувальних характеристик дизеля з малими значеннями крутного моменту; е) система індексів і позначень громіздка.

У даному дослідженні викладено вдосконалену з урахуванням більшості з вищенаведених недоліків методику. У методиці використано таке припущення. Наявність ФТЧ у складі випускної системи дизеля чинить вплив на абсолютні й відносні значення масових годинних витрат палива дизелем лише за рахунок збільшення ГО його випускної системи на величину ГО ФТЧ $\Delta P_{ФТЧ}$ (у Па), за незмінної ефективної потужності N_e дизеля (у Вт). Тобто, компенсація цього впливу відбувається за рахунок збільшення індикаторної потужності дизеля N_i (у Вт) шляхом збільшення його середнього індикаторного тиску p_i (у Па) за рахунок збільшення годинних масових витрат палива дизелем G_{fuel} (у кг/год) чи G_{fuel}^* (у %) на противагу збільшенню середнього тиску механічних втрат $p_м$ (у Па) і, відповідно, потужності механічних втрат дизеля $N_м$ (у Вт). При цьому абсолютні значення змін величин p_i та $p_м$ рівні між собою, а їх різниця, що дорівнює середньому ефективному тиску p_e (у Па), залишається незмінною. Величини $\Delta P_{ФТЧ}$ і $p_м$ є функціями частоти обертання КВ дизеля $n_{кв}$ (у rpm). Величини N_e, N_i і $N_м$ є функціями $n_{кв}$ та крутного моменту $M_{кр}$ (у Н·м).

Слід зауважити, що для режимів холостого ходу, на яких ефективні потужність і ККД дизеля рівні нулю, питомі масові ефективні витрати палива дизелем g_e (у кг/(кВт·год)) прямує до безкінечності, а індикаторна потужність дорівнює потужності механічних втрат. При цьому впливом додаткового ГО на випуску на коефіцієнти залишкових газів і наповнення та, отже, процеси наповнення і сумішоутворення й таким чином додатковим впливом на значення індикаторного η_i, механічного $\eta_м$ і ефективного η_e ККД нехтуємо. Прийняте припущення дозволяє моделювати ситуацію, коли ФТЧ оснащують дизель, що перебуває у експлуатації і має засоби пе-

реналаштування паливної апаратури, наприклад систему електронного керування.

Середньоексплуатаційні значення питомих масових ефективних витрат палива дизелем 2Ч10,5/12 (Д21А1) $\bar{g}_e$ у кг/(кВт·год) для будь-яких стандартизованих випробувальних циклів розраховуються за формулою (5.21), у функції значень середніх за цикл випробувань масових годинних витрат палива $\overline{G}_f$ у кг/год (формула (5.22)) і ефективної потужності дизеля $\overline{N}_e$ у кВт (формула (5.23)).

У формулах (5.22) і (5.23) індексом *i* позначено величини, що визначені для певного режиму роботи дизеля з наявних *n*, враховуються значення вагового фактора WF_i, питомих масових ефективних витрати палива g_{ei} у кг/(кВт·год), годинних масових витрат палива у кг/год G_{fi}, ефективної потужності дизеля N_{ei} у кВт (формула (5.24)), кількості режимів з ненульовою N_e *n* і режимів х.х. *m* у циклі. У формулі (5.24) враховуються значення крутного моменту дизеля $M_{кpi}$ у Н·м, частоти обертання КВ дизеля $n_{кв}$ у хв$^{-1}$, середнього ефективного тиску дизеля p_e у Па; тактності дизеля τ у тактів/цикл, кількості циліндрів дизеля *z*, робочого об'єму циліндра дизеля V_h у м^3; нижчої теплоти згоряння дизельного палива Q_H у МДж/кг. Для дизеля 2Ч10,5/12: τ = 4 тактів/цикл, V_h = 1,038·10^{-3} м^3, *z* = 2 од., Q_H = 42,7 МДж/кг.

$$\bar{g}_e = \overline{G}_f / \overline{N}_e, \tag{5.21}$$

$$\overline{G}_f = \sum_{i=1}^{n} \overline{G}_{fi} = \sum_{i=1}^{n} \left(WF_i \cdot G_{fi} \right); \tag{5.22}$$

$$\overline{N}_e = \sum_{i=1}^{n} \overline{N}_{ei} = \sum_{i=1}^{n} \left(WF_i \cdot N_{ei} \right), \tag{5.23}$$

$$N_{ei} = M_{кpi} \cdot n_{кві} / 9550 = p_{ei} \cdot z \cdot V_h \cdot n_{кві} / \left(\tau \cdot 3 \cdot 10^4 \right) = G_{fi} \cdot Q_H \cdot \eta_e / 3600, \tag{5.24}$$

Згідно до основних положень наукової дисципліни «Теорія ДВЗ» для окремого *i*-го режиму роботи дизеля (індекс *i* опускаємо) отримано формули (5.25) – (5.30).

Відповідно до висунутого припущення $p_e = p_i - p_м = const$, тоді $\Delta p_e = \Delta p_i - \Delta p_м = 0$, однак Δp_i і $\Delta p_м$ не є константами, що виражається формулою (5.28), у якій враховуються значення абсолютних змін величин p_i і $p_м$, тобто Δp_i, $\Delta p_м$ у Па, що визначаються за формулами (5.29) і (5.30), у яких індексами *б* та *н* позначено відповідно базовий і новий варіанти конструкції дизеля. Під «базовим» варіантом

слід розуміти дизель, не оснащений ФТЧ, під «новим» – навпаки, оснащений.

$$N_e = N_i - N_м = G_f \cdot Q_H \cdot \eta_e / 3600, \quad (5.25)$$

$$N_i = p_i \cdot z \cdot V_h \cdot n_{кв} / (\tau \cdot 3 \cdot 10^4) = G_f \cdot Q_H \cdot \eta_i / 3600, \quad (5.26)$$

$$N_м = p_м \cdot z \cdot V_h \cdot n_{кв} / (\tau \cdot 3 \cdot 10^4) = G_f \cdot Q_H \cdot (\eta_i - \eta_e) / 3600, \quad (5.27)$$

$$\Delta p_i = \Delta p_м, \quad (5.28)$$

$$\Delta p_i = |p_{iб} - p_{iн}|, \quad (5.29)$$

$$\Delta p_м = |p_{мб} - p_{мн}|, \quad (5.30)$$

Шляхом перетворення формули (5.22) отримуємо формулу (5.31), у якій величини τ, z, V_h, Q_H є незмінними конструктивними параметрами дизеля 2Ч10,5/12, для певного усталеного i-го режиму роботи дизеля величина $n_{кв}$ також є незмінною, а згідно до висунутого припущення незмінною є величина η_i.

Тому зміни абсолютної величини масових годинних витрат палива дизелем $\Delta G_f = |G_{fб} - G_{fн}|$ та відповідна їй відносна величина $\Delta G_f^* = \Delta G_f^* \cdot 100 / G_f$ можуть бути викликані лише зміною величини p_i (однак, слід розуміти, що у даній постановці причинно-наслідковий зв'язок між цими змінами є зворотним – саме зміна величини G_f призводить до зміни величини p_i). Далі вплив величини Δp_i на величину ΔG_{fuel} пропонується оцінити за формулами (5.31) і (5.32). Тоді з урахуванням формул (5.27), (5.30) і (5.33) отримуємо формулу (5.34). Величини $p_{мб}$ і $p_{мн}$ визначаються аналогічно до способу, запропонованого у попередній версії даної моделі, опублікованої в праці [3].

$$G_f = p_i \cdot z \cdot V_h \cdot n_{кв} \cdot 3600 / (\tau \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot Q_H \cdot \eta_i). \quad (5.31)$$

$$\Delta G_f = \partial G_f / \partial p_i \cdot \Delta p_i, \quad (5.32)$$

$$\partial G_f / \partial p_i = z \cdot V_h \cdot n_{кв} \cdot 3600 / (\tau \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot Q_H \cdot \eta_i). \quad (5.33)$$

$$\Delta G_f = \Delta p_м \cdot z \cdot V_h \cdot n_{кв} \cdot 3600 / (\tau \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot Q_H \cdot \eta_i). \quad (5.34)$$

Величина відносної зміни часових масових витрат палива дизелем визначається за формулою (5.35) з урахуванням формули (5.24) і (5.31), у якій величина $p_{мб}$ за формулою (5.23), перетвореною до виду формули (5.36).

$$\delta G_f^* = \Delta G_f / G_f \cdot 100 = \Delta p_м / p_{iб} \cdot 100 = \Delta p_м / (p_{еб} + p_{мб}) \cdot 100, \quad (5.35)$$

$$p_e = \frac{N_e \cdot \tau \cdot 3 \cdot 10^4}{z \cdot V_h \cdot n_{кв}} = \frac{M_{кр} \cdot \tau \cdot 3 \cdot 10^4}{9550 \cdot z \cdot V_h} = \frac{G_f \cdot Q_H \cdot \eta_e \cdot \tau \cdot 3 \cdot 10^4}{3600 \cdot z \cdot V_h \cdot n_{кв}}. \qquad (5.36)$$

Отже, як випливає з формул (5.35) і (5.36), які вочевидь дозволяють відмовитись від роздільного обчислення значень шуканої величини для режимів з нульовою і ненульовою N_e, для такого обчислення можна використовувати дані прямих вимірювань на моторному випробувальному стенді – $\Delta P_{ФТЧ}$, $M_{кр}$, $n_{кв}$ та G_{fuel} – замість даних непрямих вимірювань – g_e, η_e і $\eta_м$.

Для отримання абсолютного значення зміни часових масових витрат палива дизелем можна скористатися формулою (5.34), але вона містить значення η_i, тому доцільніше використати формулу (5.37) після визначення відносної величини:

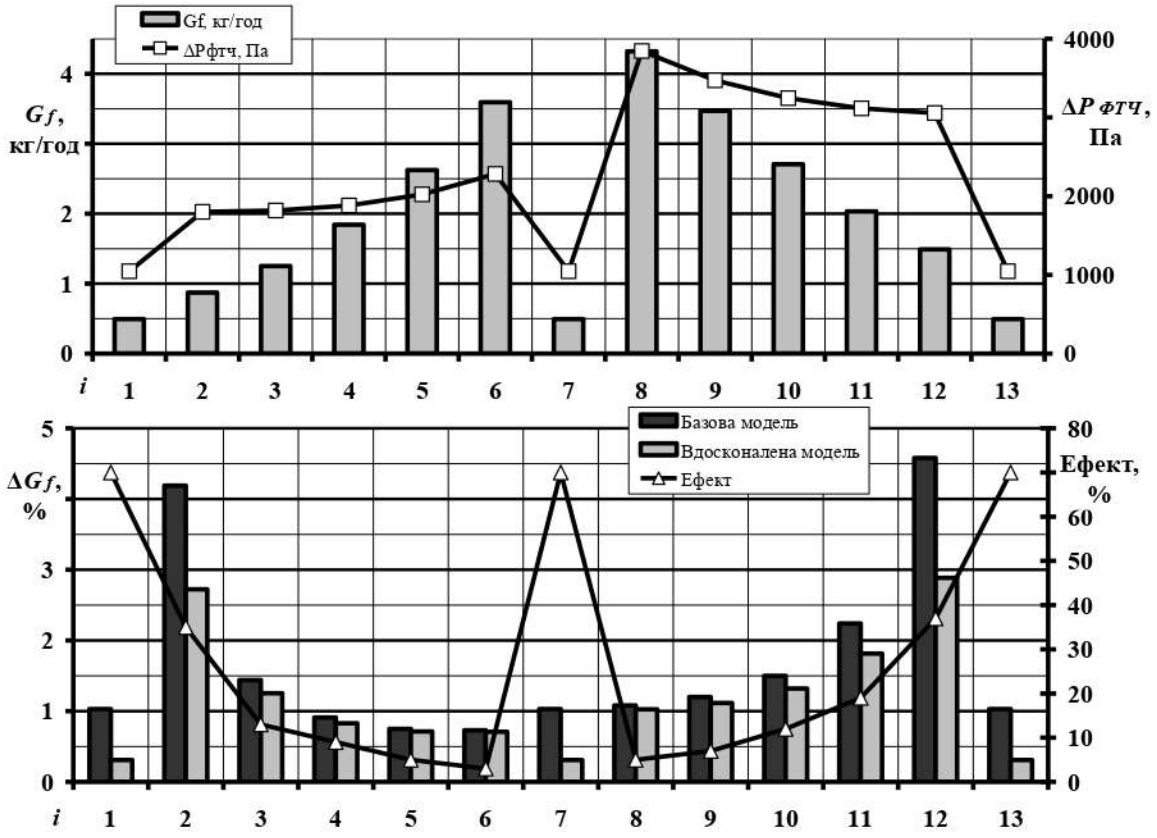
$$\Delta G_f = \delta G_f^* \cdot G_f / 100. \qquad (5.37)$$

Результати порівняльного дослідження щодо застосування вихідної та вдосконаленої методик наведено у наступному підрозділі рукопису дисертації.

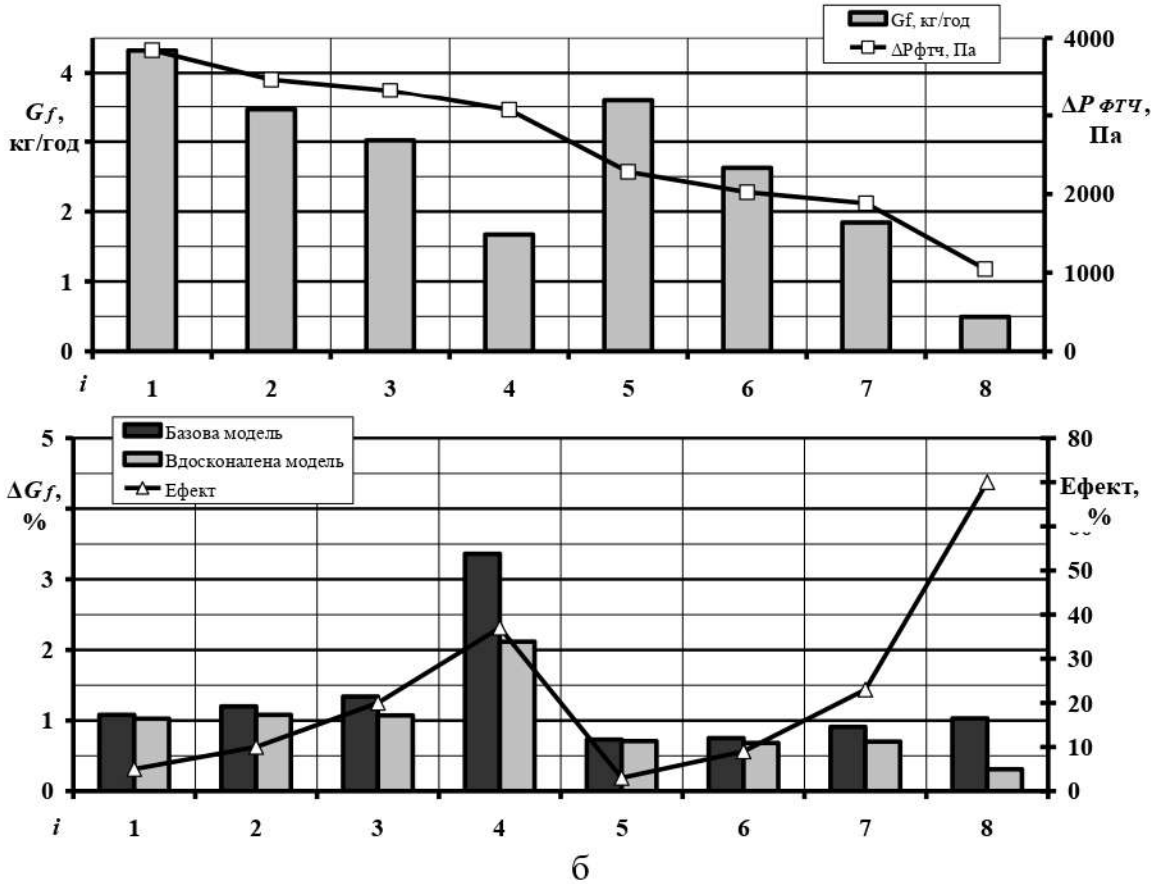
Результати застосування вдосконаленої моделі та їх аналіз

Результати здійсненого розрахункового оцінювання за вдосконаленою методикою наведено на графіках розподілу значень масових годинних витрат палива дизелем, не оснащеним ФТЧ G_{fuel}, ГО ФТЧ ΔP_{DPF}, відносної зміни масових годинних витрат палива дизелем зі встановленим ФТЧ ΔG_{fuel} для обох моделей – базовою та вдосконаленою, а також ефекту від застосування вдосконаленої моделі по режимах 13-ти та 8-ми режимних стандартизованих стаціонарних випробувальних циклів (Правила ЄЕК ООН № 49 та 96 [21, 22]), які наведено на рис. 5.4.

Результати розрахунків за вдосконаленою моделлю дають середньоексплуатаційне значення збільшення величини масових годинних витрат палива дизелем 2Ч10,5/12 при обладнанні його випускної системи ФТЧ на початку міжрегенераційного періоду (ΔP_{DPF} = 4 кПа) на 25,2 % менші для 13-режимного стаціонарного випробувального циклу в порівнянні з результатами застосування базового варіанту методики та на 22,9 % для 8-режимного випробувального циклу.



а



б

Рисунок 5.4 – Результати застосування базової та вдосконаленої методики для дизеля 2Ч10,5/12 при випробуваннях за 13-ти (а) та 8-ми (б) режимним випробувальним циклом

Для ФТЧ у кінці міжрегенераційного періоду (ΔP_{DPF} = 25 кПа) вказаний ефект становить відповідно 34,8 % та 31,7 %. Такі значення краще узгоджуються з результатами вимірювань на моторному стенді, тобто більш адекватно описують досліджуваний ефект впливу ГО ФТЧ на показники паливної економічності дизеля.

5.10 Побудова комплексу з математичних моделей функціонування фільтра твердих частинок дизеля як виконавчого пристрою технології захисту навколишнього середовища

Отже, у попередніх підрозділах запропоновано, обґрунтовано і описано три математичні моделі, котрі описують математичною мовою основні аспекти функціонування ФТЧ дизельного ПДВЗ нарізно. З трьох описуваних робочих характеристик ФТЧ, котрі характеризуються вказаними моделями, а саме коефіцієнту ефективності очищення потоку ВГ від ТЧ K_{CE} у %, ГО ΔP_{DPF} у Па, та відносне збільшення масової годинної витрати моторного палива ПДВЗ δG_{fuel} у %. Окрім всього ФТЧ характеризують такі параметри – габаритні розміри L × H × B у м, вага m_{DPF} у кг, тривалість міжрегенераційного періоду τ_{IRP} у год, максимальне значення ГО $\Delta P_{DPF\max}$ у Па, відстань розміщення по довжині випускного тракту ПДВЗ L_{DPF} у м.

З набору модельованих величин – $K_{CE}(G(\text{PM}))$, ΔP_{DPF}, δG_{fuel} – дві є залежними одна від одної, а саме значення $\Delta P_{ФТЧ}$ визначає значення δG_f, тому при побудові комплексу з математичних моделей пропонується у якості єдиної цільової функції застосувати індекс ефективності функціонування ФТЧ I_{DPF} (безрозмірністна величина), описаний формулою (5.38).

$$I_{DPF} = A(\text{PM}) \cdot G(\text{PM})(n_{cs};\, M_{кр};\, N_D;\, C(\text{C}_\text{n}\text{H}_\text{m});\, G_{fuel};\, G_{air}) / \\ / \left(A_{fuel}(\partial K_{fe}/\partial G_{fuel};\, \partial K_{fe}/\partial G(\text{k})) \cdot G_{fuel}(n_{cs};\, M_{кр})\right) \cdot K_{CE}(G(\text{PM}))(n_{cs};\, M_{кр};\, L_{DPF};\, \tau_{IRP}) / \\ / \delta G^{*}_{fuel}(G_{fuel};\, H_u;\, \Delta P_{DPF}(n_{cs};\, M_{кр};\, L_{DPF};\, \tau_{IRP})), \qquad (5.38)$$

де A_{fuel} – вагомість паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію; $A(\text{PM})$ = 200 – вагомість ТЧ як полютанта; G_{fuel} – масові годинні витрати моторного палива, кг/год; $G(\text{PM})$ – масовий годинний викид ТЧ у потоці ВГ, кг/год.

У першому наближенні приймаємо усереднене по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 A_{fuel} = 38,4, тобто A_{fuel} / $A(\text{PM})$ = 38,4 / 200 = 5,208. Для L_{DPF} = 5,0 м та τ_{IRP} = 0 год у першому наближенні приймаємо усереднене по полю робочих режимів

дизеля 2Ч10,5/12 G_{fuel} = 2,250 кг/год, G(PM) = 7,0·10^{-3} кг/год, тоді маємо таке значення $A_{fuel} \cdot G_{fuel} / (A(\text{PM}) \cdot G(\text{PM})) = 0{,}016$. У загальному випадку $A_{fuel} = f(n_{кв}; M_{кр})$, $G_{fuel} = f(n_{кв}; M_{кр})$, $\delta G_{fuel} = f(\Delta P_{DPF}; G_{fuel}) = f(n_{кв}; M_{кр})$, $K_{CE} = f(G(\text{EG}); G(\text{PM})) = f(n_{кв}; M_{кр})$, $G(\text{PM}) = f(n_{кв}; M_{кр})$. У роботі описані у цьому розділі математичні моделі вдосконалено шляхом розповсюдження області її визначення на все поле робочих режимів ПДВЗ та весь між регенераційний період і усі варіанти компонування випускної системи ПЗВЗ. Вдосконалена математична модель ГО розробленого ФТЧ для *i*-го стаціонарного режиму роботи ПДВЗ має вигляд формули (5.39), у якій k_0, k_t, k_L, k_τ – настроювальний, температурний, компоновочний і часовий коефіцієнт відповідно. При z_m = 1 і S_m = 55 мм^2, t_0 = 15 ºС; B_0 = 95 кПа, $g_{mEG} < 110$ кг/(с·м^2) маємо формули (5.40) і (5.41). Для всього поля робочих режимів ПДВЗ модель приймає вид формули (5.52) та для всього міжрегенераційного періоду і усіх варіантів компонування випускної системи ПЗВЗ – формули (5.43).

Вдосконалена математична модель ефективності роботи розробленого ФТЧ у реальних умовах експлуатації для *i*-го стаціонарного режиму роботи ПДВЗ має вигляд формули (5.44). Для всього поля робочих режимів ПДВЗ модель приймає вид формули (5.45) та для всього міжрегенераційного періоду і усіх варіантів компонування випускної системи ПЗВЗ – формули (5.46).

Вдосконалена математична модель впливу ГО розробленого ФТЧ на паливну економічність ПДВЗ має вид комплексу формул (5.47)–(5.49). Вихідними даними для її застосування є результати застосування математичної моделі ГО ФТЧ.

$$\Delta P_{DPF} = \Delta P_{PhM}\left(g_{mEG}\left(n_{cs}; M_{кр}\right)\right) \cdot k_0 \cdot k_t\left(t_{DPF}\right) \cdot k_L\left(L_{DPF}\right) \cdot k_\tau\left(\tau_{IRP}; N_e; WF\right), \text{ Па}, \quad (5.39)$$

$$\Delta P_{PhM} = 0{,}122 \cdot g_{mEG}^3 - 1{,}964 \cdot g_{mEG}^2 + 173{,}7 \cdot g_{mEG}, \text{ Па}; \quad (5.40)$$

$$g_{mEG} = G_{EG} / \Sigma S_{DPF} = \left(G_{fuel} + G_{air}\right) / \left(z_m \cdot S_m\right), \text{кг/(с·м}^2\text{)}. \quad (5.41)$$

$$\Delta P_{DPF}\left(g_{EG}\left(n_{cs}; M_{кр}\right)\right) = a_{pg} \cdot n_{cs}^2 + b_{pg} \cdot n_{cs} + c_{pg} \cdot n_{cs} \cdot M_{кр} + d_{pg} \cdot M_{кр} + e_{pg} \cdot M_{кр}^2 + g_{pg}, \%. \quad (5.42)$$

$$\Delta P_{DPF}\left(L_{DPF}; \tau_{IRP}\right) = a_{pl} \cdot L_{DPF}^2 + b_{pl} \cdot L_{DPF} + c_{pl} \cdot L_{DPF} \cdot \tau_{IRP} + d_{pl} \cdot \tau_{IRP} + e_{pl} \cdot \tau_{IRP}^2 + g_{pl}, \%. \quad (5.43)$$

$$K_{CE} = 100 \cdot \left(G(PM)_{RICE} - G(PM)_{DPF}\right) / G(PM)_{RICE} = \\ = K_{CE}(G(PM))\left(g_{EG}\left(n_{cs}; M_{кр}\right)\right) \cdot k_L\left(L_{DPF}\right) \cdot k_\tau\left(\tau_{IRP}; N_e; WF\right), \%, \quad (5.44)$$

$$K_{CE}(G(PM))\left(g_{EG}\left(n_{cs}; M_{кр}\right)\right) = a_{kg} \cdot n_{cs}^2 + b_{kg} \cdot n_{cs} + c_{kg} \cdot n_{cs} \cdot M_{кр} + d_{kg} \cdot M_{кр} + e_{kg} \cdot M_{кр}^2 + g_{kg}, \%. \quad (5.45)$$

$$K_{CE}(G(PM))\left(L_{DPF}; \tau_{IRP}\right) = a_{kl} \cdot L_{DPF}^2 + b_{kl} \cdot L_{DPF} + c_{kl} \cdot L_{DPF} \cdot \tau_{IRP} + d_{kl} \cdot \tau_{IRP} + e_{kl} \cdot \tau_{IRP}^2 + g_{kl}, \%. \quad (5.46)$$

$$\delta G_{fuel}^* = 100 \cdot \Delta G_{fuel}^* / G_{fuel} = \partial G_{fuel} / \partial P_{DPF} \cdot \Delta P_{DPF}\left(n_{cs}; M_{кр}; L_{DPF}; \tau_{IRP}\right), \%, \quad (5.47)$$

$$G_{fuel} = M_{кр} \cdot n_{cs} \cdot 3600 / (9550 \cdot Q_H \cdot \eta_e), \text{ кг/год}, \quad (5.48)$$

$$\partial G_{fuel} / \partial p_{DPF} = z \cdot V_h \cdot n_{cs} \cdot 3600 / (\tau \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot Q_H \cdot \eta_e / \eta_m), \text{ кг/год/Па}. \quad (5.49)$$

На рис. 5.5,а показано розподіл значень паливного ефекту δG_{fuel} при L_{DPF} = = 5,0 м та τ_{IRP} = 0 год по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12, а на рис. 5.5,б – такий розподіл для коефіцієнту ефективності K_{CE}. На рис. 5.6,а проілюстровано графік залежності значень індексу I_{DPF} від значення тривалості періоду τ_{IRP} за постійного значення L_{DPF} = 5,0 м, а на рис. 5.6,б – графік залежності значень індексу I_{DPF} від значення відстані L_{DPF} за постійного значення тривалості періоду τ_{IRP} = 0 год. На рис. 5.7,а наведено розподіл значень індексу I_{DPF} при L_{DPF} = 5,0 м та τ_{IRP} = 0 год по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12, а на рис. 5.7,б – розподіл значень індексу I_{DPF}, усереднених по всьому полю режимів дизеля 2Ч10,5/12, по факторній площині тривалості міжрегенераційного періоду τ_{IRP} та відстані L_{DPF}.

На рис. 5.5,г-д показано розподіл значень величин паливного ефекту δG_{fuel}, коефіцієнту ефективності $K_{CE}(G(\text{PM}))$ та ГО ФТЧ ΔP_{DPF}, усереднених значень цих величин по цьому полю значень, по факторній площині тривалості τ_{IRP} та відстані L_{DPF}. Таким чином, з наведеного на рис. 5.5 видно, що вдосконалення усіх трьох математичних моделей, котрі описують робочі характеристики ФТЧ, у цьому дослідженні здійснено шляхом розширення їх області визначення на все поле робочих режимів ПДВЗ, повний діапазон можливих значень відстані L_{DPF} та тривалості міжрегенераційного періоду τ_{IRP}.

З фізичного змісту введеного індексу I_{DPF} стає зрозумілим, що при варіюванні конструктивним параметрами як самого ФТЧ, так і випускного тракту ПДВЗ, при оптимізаційних дослідженнях слід мінімізувати значення такої цільової функції. Значення індексу зростає як впродовж міжрегенераційного періоду τ_{IRP} (лінійно у 5 разів впродовж 10 годин безперервного напрацювання), так і при зменшенні відстані L_{DPF} від зрізу випускного колектора двигуна до корпусу фільтра (нелінійно у 3 рази при зменшенні L_{DPF} від оптимального значення 5,0 м до 0 м), тобто при збільшенні температури ВГ на вході у ФТЧ. Очевидно, що можна рекомендувати використання значення запропонованого індексу I_{DPF} у якості керуючої функції у системі автоматичного керування процесом регенерації ФТЧ. Таким значенням є 0,1 як для оптимального розміщення ФТЧ (L_{DPF} = 5,0 м) так і для розміщення ФТЧ одразу за випускним колектором двигуна (L_{DPF} = 0 м).

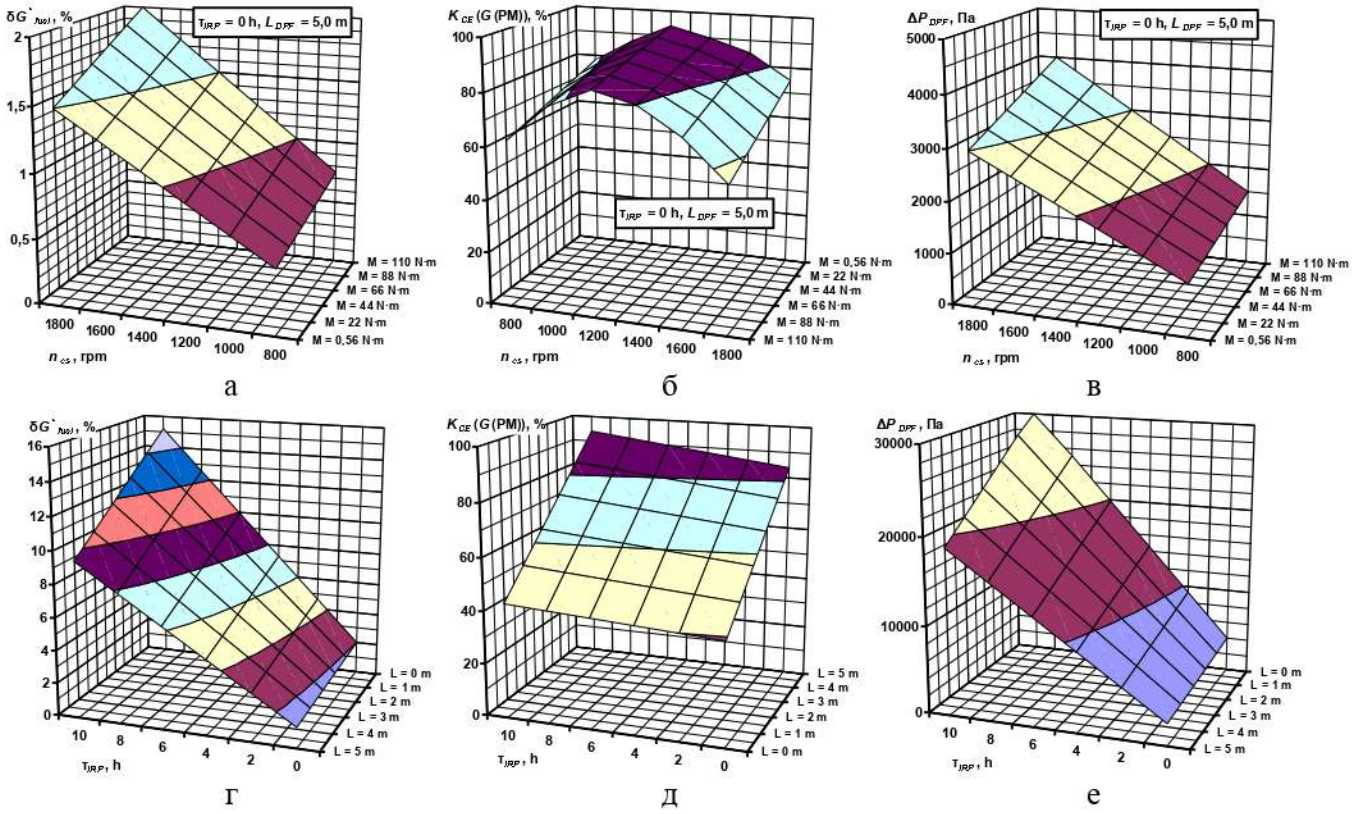


Рисунок 5.5 – Розподіл значень паливного ефекту δG_{fuel} (а), коефіцієнту ефективності $K_{CE}(G(\text{PM}))$ (б) та ГО ФТЧ ΔP_{DPF} (в) при L_{DPF} = 5,0 м та τ_{IRP} = 0 год по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12, усереднених значень цих величин по цьому полю значень, по факторній площині тривалості τ_{IRP} та відстані L_{DPF} (г–д)

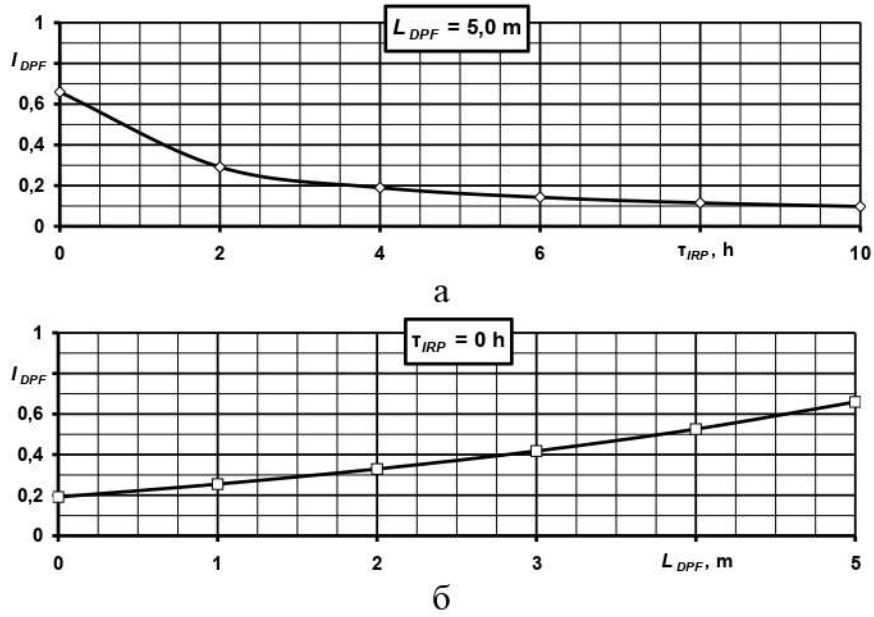
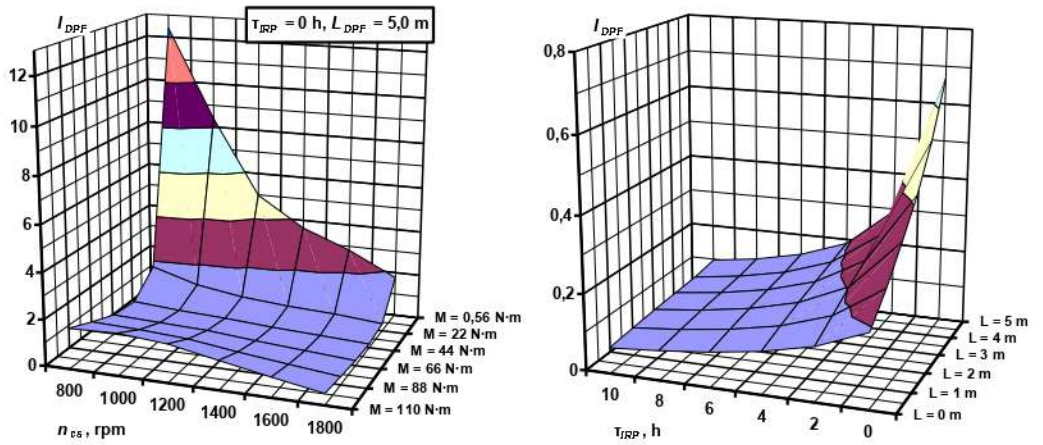


Рисунок 5.6 – Графік залежності значень індексу I_{DPF} від значення тривалості періоду τ_{IRP} за постійного значення L_{DPF} = 5,0 м (а) та від значення відстані L_{DPF} за постійного значення тривалості періоду τ_{IRP} = 0 год (б)



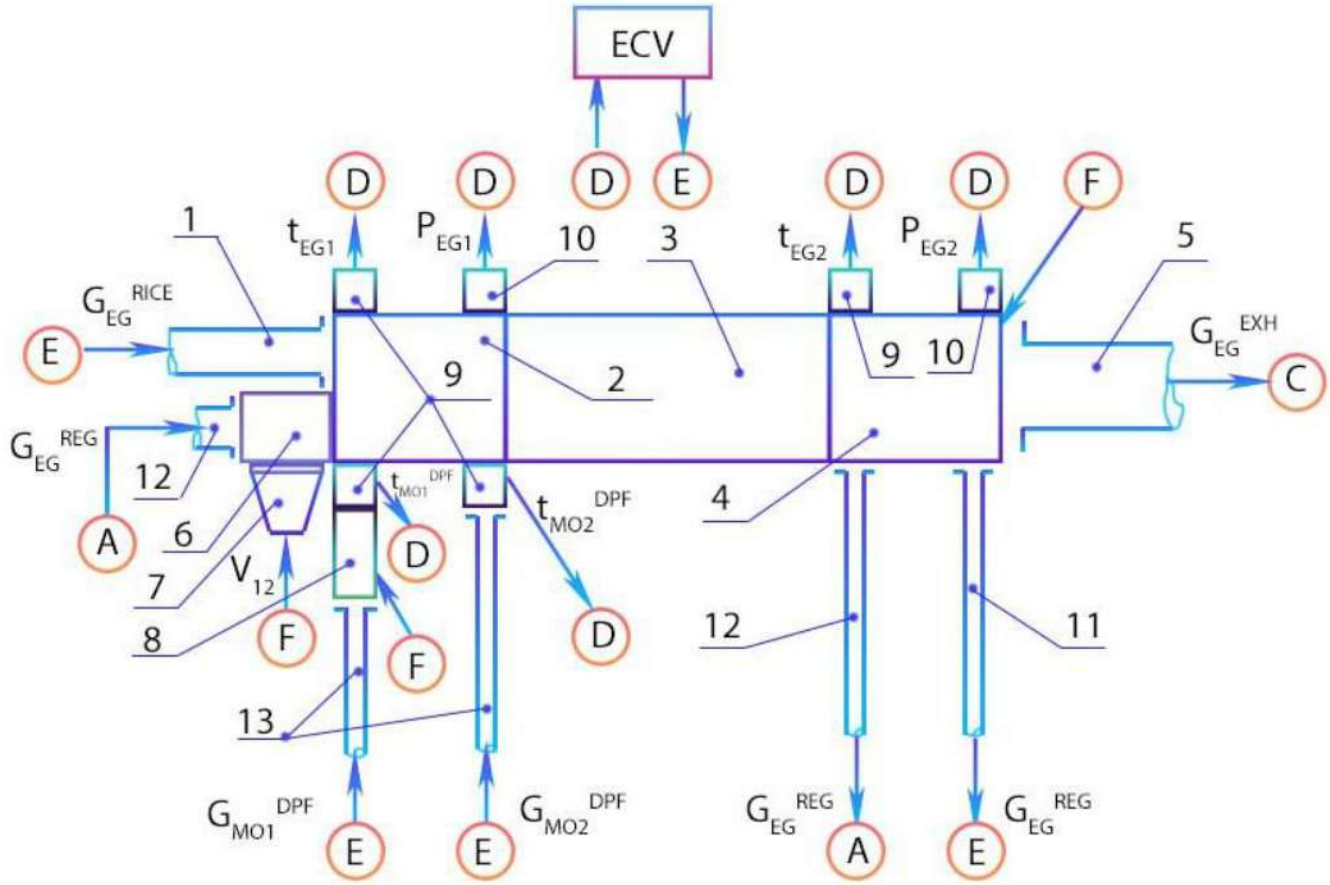
а б

Рисунок 5.7 – Розподіл значень індексу I_{DPF} при L_{DPF} = 5,0 м та τ_{IRP} = 0 год по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 (а) та значень індексу I_{DPF}, усереднених по цьому полю, по факторній площині тривалості τ_{IRP} та відстані L_{DPF} (б)

5.11 Вдосконалення конструкції та принципу роботи модульного фільтра твердих частинок нетрадиційної конструкції з насипкою з природного цеоліту у сітчастих касетах

На рис. 5.8 наведено схему ФТЧ вдосконаленої у роботі конструкції для дизельних ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу. На рис. 5.9 проілюстровано розробленої у роботі систему управління ефективністю роботи ФТЧ вдосконаленої конструкції для дизельних ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу.

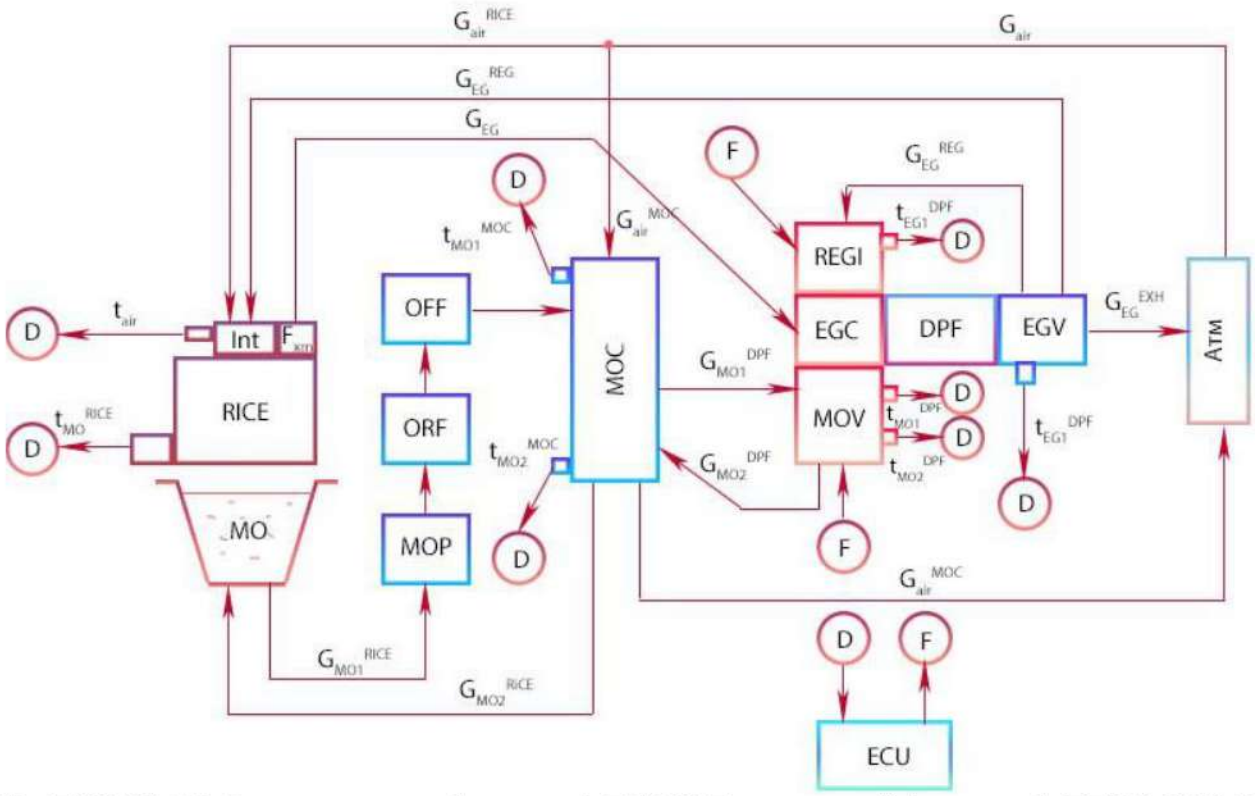
З аналізу розроблених математичних моделей, які описують показники роботи ФТЧ та побудовані на основі обробки експериментальних даних стендових моторних випробувань, стає зрозумілим таке. Усі три модельовані показники роботи – гідравлічний опір, ефективність очищення потоку ВГ від ТЧ та вплив на показники паливної економічності ПДВЗ – залежать від значення температури ВГ на вході у фільтр. При цьому чим вищою є температура, ним гіршими є показники роботи ФТЧ та, відповідно, нижчим є значення введеного індексу ефективності функціонування ФТЧ I_{DPF}. Значення індексу для ФТЧ на ряду з такими ж індексами для інших виконавчих пристроїв ТЗНС формує значення індексу ефективності функціонування ТЗНС I_{EPT}, а той є основою для визначення значення інтегративного показника екологічної якості роботи ТЗНС J_{EPT}. В решті решт разом зі значенням інтегративного показника екологічної якості роботи ПДВЗ J_{RICE} за інтегративним принципом оцінювання він визначає значення індикатора екобезпеки ПДВЗ і його ТЗНС Ω_{RICE}.



A – потік ВГ у систему регенерації I роду ФТЧ; B – потік ВГ у систему рециркуляції ПДВЗ; C – потік ВГ у випускну систему ПДВЗ; D – сигнал показів датчиків ЕСАК; E – потік ВГ від ПДВЗ; F – керуючий імпульс від ЕБК ЕСАК; 1 – випускний колектор ПДВЗ; 2 – охолоджувач ВГ ФТЧ; 3 – ФЕ ФТЧ; 4 – триходовий клапан ФТЧ; 5 – випускний тракт ПДВЗ; 6 – система регенерації I роду ФТЧ; 7 – плазмотрон системи регенерації; 8 – клапан управління охолоджувача ВГ ФТЧ; 9 – датчик температури МО і ВГ; 10 – датчик тиску ВГ; 11 – газопровід системи рециркуляції ВГ ПДВЗ; 12 – газопровід системи регенерації I роду ФТЧ; 13 – трубопровід охолоджувача ВГ ФТЧ; 14 – ЕБК ЕСАК

Рисунок 5.8 – Схема ФТЧ вдосконаленої конструкції для дизельних ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу

Для комплексного покращення ефективності роботи розробленого ФТЧ вдосконалено його конструкцію шляхом застосування охолодження потоку ВГ у керованому холодильнику на вході у фільтр моторним мастилом, поданим з картеру ПДВЗ мастильним насосом. Вид охолоджуючого середовища обрано з тієї обставини, що не усі ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу оснащені системою рідинного охолодження. Таке рішення дозволяє розміщувати ФТЧ безпосередньо у підкапотному просторі ЕУ у безпосередній близькості до випускного колектора двигуна та підтримувати раціональне значення температури очищуваного потоку ВГ на вході у фільтр за режимами роботи двигуна.



ECU – ЕБК ЕСАК; D – сигнал показів датчиків ЕСАК; F – керуючий імпульс від ЕБК ЕСАК; RICE – ПДВЗ; MO – моторна олива; Int – впускний колектор; Exh – випускний колектор; MOP – насос моторної оливи; ORF – фільтр грубого очищення моторної оливи; OFF – фільтр тонкого очищення моторної оливи; MOC – охолоджувач моторної оливи; MOV – клапан управління охолоджувача ВГ ФТЧ; EGC – охолоджувач ВГ ФТЧ; DPF – ФТЧ; EGV – триходовий клапан ФТЧ; REG_I – система регенерації I роду ФТЧ; Atm – атмосфера

Рисунок 5.9 – Система управління ефективністю роботи ФТЧ вдосконаленої конструкції для дизельних ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу

Також вдосконалення конструкції ФТЧ виконано у напрямі забезпечення можливості здійснення процесу його регенерації I роду шляхом перенаправлення частини потоку ВГ, що вже охолоджені у керованому холодильнику на вході у ФТЧ та очищені від ТЧ у самому фільтрі, крізь введений у конструкцію фільтра керований триходовий клапан ФТЧ до системи регенерації, яка працює на основі наведення низькотемпературної плазми у цьому потоці ВГ, що запобігає зростанню концентрації оксидів азоту у ВГ, що утворюються при плазмовій регенерації.

Крім того, конструкція керованого триходового клапану ФТЧ дозволяє перенаправляти частину потоку ВГ, що вже охолоджені у керованому холодильнику на вході у ФТЧ та очищені від ТЧ у самому фільтрі, у систему рециркуляції ВГ і розбавляти інертним газом свіжий заряд, знижуючи кількість оксидів азоту, що утворюються у робочому процесі ПДВЗ при окисленні палива у камері згоряння.

5.12 Висновки по розділу 5

Таким чином, у цьому розділі дисертаційної роботи отримано такі результати.

1. Побудовано схему ТЗНС від негативного впливу ПДВЗ у складі ЕУ на НПС на основі розробленого підходу та аналізу науково-технічної, довідникової, нормативної та патентної літератури, проілюстровано та описано її структуру, її ланцюги та ланки. Визначено місце такої ТЗНС у структурі СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ як частини життєвого циклу такого технічного об'єкту та місце ФТЧ і критеріального математичного апарату в такій СУЕБ.

2. Розкрито зміст поняття «фільтр твердих частинок» у технічному й історичному ракурсі, виявлено принципові недоліки ФТЧ традиційної конструкції та описано особливості процесу їх експлуатації. Надано описання конструкції та принципів роботи діючих та серійно виготовлюваних ФТЧ дизельних ПДВЗ нетрадиційної конструкції, як закордонних, так і розроблених чи вдосконалених у дисертації. Проаналізовано і описано способи і засоби здійснення процесу регенерації I і II роду розробленого модульного ФТЧ з цеолітовою насипкою у сітчастих касетах як виконавчого пристрою ТЗНС.

3. Запропоновано математичну модель гідравлічного опору ФТЧ, розробленого у дисертації, побудовану на основі опису результатів стендових моторних випробувань. Наведено та обґрунтовано фізичний зміст та визначено значення настроювального, температурного, компонувального і часового коефіцієнта моделі, що дозволяють зв'язати результати фізичного моделювання процесів у модулі ФТЧ та результати випробувань ФТЧ у реальних умовах експлуатації, а також особливості моделі експлуатації та її умови.

4. Запропоновано математичну модель ефективності роботи ФТЧ, розробленого у дисертації, у реальних умовах експлуатації. Наведено та обґрунтовано фізичний зміст та визначено значення компонувального і часового коефіцієнтів побудованої математичної моделі.

5. Запропоновано математичну модель впливу значення гідравлічного опору ФТЧ, розробленого у дисертації, на показники паливної економічності ПДВЗ.

Вдосконалення усіх трьох математичних моделей, котрі описують робочі ха-

рактеристики ФТЧ, у цьому дослідженні здійснено шляхом розширення їх області визначення на все поле робочих режимів ПДВЗ, та всі варіанти компонування випускної системи ПДВЗ L_{DPF} та тривалості міжрегенераційного періоду τ_{IRP}. Результати застосування усіх розроблених математичних моделей використано у якості вихідних даних для здійснення критеріального оцінювання.

6. Запропоновано індекс ефективності функціонування ФТЧ I_{DPF}, який є єдиним безрозмірнісним показником, визначається за результатами застосування усіх трьох математичних моделей та замикає цим самим їх у єдиний комплекс. Індекс входить до складу інтегративного показника екологічної якості роботи ТЗНС у структурі ЕУ J_{EPT}, що згідно до запропонованого інтегративного принципу формує значення індикатора екобезпеки ПДВЗ і його ТЗНС Ω_{RICE}.

7. Розроблено схему ФТЧ вдосконаленої конструкції для дизельних ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу та систему управління ефективністю роботи ФТЧ вдосконаленої конструкції для дизельних ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу. Вдосконалення полягає у застосуванні регульованого охолодження потоку ВГ на вході у фільтр для підтримання раціонального значення індекс ефективності функціонування ФТЧ I_{DPF} по режимах роботи двигуна та регульоване перенаправлення частини охолодженого і очищеного потоку ВГ у плазмову систему регенерації фільтра І роду та у систему рециркуляції ВГ.

Таким чином, у розділі отримано практичні результати щодо підвищення рівня екологічної безпеки при сумісній роботі ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу і розробленої для нього ТЗНС. Виявлено передумови отримання синергетичного ефекту щодо підвищення екологічної безпеки ЕУ з ПДВЗ від результатів роботи виконавчих пристроїв з охолодження, очищення і рециркуляції ВГ, утилізації теплової енергії, переведення двигуна на споживання альтернативного моторного палива й раціоналізації структури моделі його експлуатації

Тобто, вирішено задачу дослідження № 5.

6 РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОЮ ЕКСПЛУАТАЦІЄЮ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВИГУНОМ ВІДПОВІДНО ДО ІНТЕГРАТИВНОГО ПОКАЗНИКА ЕФЕКТИВНОСТІ

6.1 Загальні міркування

У попередньому розділі отримано практичні результати щодо підвищення рівня екологічної безпеки при сумісній роботі ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу і розробленої для нього ТЗНС.

Вдосконалено конструкцію і спосіб управління виконавчого пристрою такої ТЗНС, а саме ФТЧ, на основі результатів застосування розроблених математичних моделей показників його роботи, отриманих за даними стендових моторних випробувань. Моделі об'єднано у єдиний комплекс на основі індекс ефективності функціонування I_{DPF} на основі якого передбачається як оцінювати вказану ефективність функціонування ФТЧ, так і керувати його роботою для підтримання показників ефективності роботи фільтра на стабільному рівні для різних режимів роботи ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу у складі ЕУ.

На основі аналізу структури розробленої ТЗНС та вертикальних і горизонтальних зв'язків між її виконавчими пристроями виявлено передумови отримання синергетичного ефекту щодо підвищення екологічної безпеки ЕУ з ПДВЗ від результатів роботи виконавчих пристроїв з охолодження, очищення і рециркуляції ВГ, утилізації теплової енергії, переведення двигуна на споживання альтернативного моторного палива й раціоналізації структури моделі його експлуатації.

У продовження описаних вище результатів дослідження у цьому розділі роботи отримано результати практичної реалізації комплексної СУЕБ безаварійною експлуатацією ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу. Принцип роботи СУЕБ заснований на прийнятті рішень відповідно до розробленої методології оцінювання безпечності ПДВЗ на основі запропонованого інтегративного показника рівня екологічної безпеки D_{RICE} в умовах негативного впливу енергогенеруючих об'єктів з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу на атмосферне повітря.

6.2 Алгоритм управління рівнем екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу

Для практичної реалізації теоретичних результатів, отриманих у попередніх розділах роботи, проаналізовано особливості конструкції та моделей роботи реальних ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, що не відповідають сучасному рівню законодавчо встановлених екологічних вимог, але не можуть бути виведені з експлуатації. Це такі технічні об'єкти:

– автотракторний дизель 2Ч10,5/12, встановлений на моторний випробувальний стенд відділу водневої енергетики Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України;

– одиниці парку транспортних і електрогенеруючих ЕУ з ПДВЗ ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «Харківський насосний завод» (м. Харків);

– одиниці парку транспортних і електрогенеруючих ЕУ з ПДВЗ, мотор-компресорів газотранспортної системи і газовидобувних станцій ТОВ «Армко-Інжиніринг» (м. Київ).

За результатами виконаного аналізу реальних одиниць різноманітної техніки, що перебуває в експлуатації, розроблено алгоритм управління рівнем екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, який наведено на рис. 6.1.

Розроблений алгоритм призначений для реалізації управління рівнем ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу у функції значень розробленого для цього інтегративного показника, моніторингу поточного стану рівня ЕБ й підтримання завданого рівня шляхом керування ТЗНС і її виконавчими пристроями та організації зворотного зв'язку в алгоритмі.

Алгоритм складається з 12 послідовних кроків. При цьому він є циклічно замкнутий зворотним зв'язком між кроками № 12 «Об'єкти управління» на попередньому витку його реалізації та кроком № 1 «Джерело вихідних даних» на наступному витку.

КРОК 1 —►			КРОК 2 —►	КРОК 3 —►	КРОК 4 —►	КРОК 5 —►	КРОК 6 —►
Рівень IIIA			Рівень IIIA	Рівень IIIB	Рівень IIIB	Рівень IIIB	Рівень IIIB
«Джерело вихідних даних»			«Первинний набір вихідних даних»	«Обробка вихідних даних»	«Формули перерахунку»	«Значення факторів ЕБ та їх вагомість»	«Точність отримання значень факторів ЕБ»
a. Нормативи, довідники, паспорти a.1. Екологічні нормативи. a.2. Стандарти на моторне паливо. a.3. Моделі експлуатації. a.4. Паспорти ЗВТ, довідники	**b. Результати експериментальних досліджень на МВС** b.1. ПДВЗ. b.2. НП. b.3. ЗВТ. b.4. ФТЧ.	**c. Результати моделювання** c.1. Фізичне моделювання на БДУ. c.2. Математична модель ΔP_{DPF}. c.3. Математична модель $K_{CE}(G(\text{PM}))$. c.4. атематична модель ΔG^*_{fuel}.	**a.** $[g_e(\text{k})]$; Q_H; ΔP_{sfs}; n_{cs}; M; WF; σ; f. **b.** n_{cs}; M; $C(\text{NO}_x)$; $C(\text{C}_n\text{H}_m)$; $C(\text{CO})$; C_c; N_D; K; BSU; HSN; S_m; z_m; G_{fuel}; G_{air}; B_0; t_0; φ_0; t_{EG}. **c.** ΔP_{TML}; $\Delta P_{DPF} = f(\Delta P_{TML}(n_{cs}; M); t_{EG}, L_{DPF}, \tau_{IRP})$; $K_{CE}(G(\text{PM})) = f(n_{cs}; M; L_{DPF}, \tau_{IRP})$; $\Delta G^*_{fuel} = f(n_{cs}; M; \Delta P_{DPF}; G_{fuel})$	$N_e = f(n_{cs}; M)$; $G_{EG} = f(G_{fuel}; G_{air})$; $g_{mEG} = f(G_{EG}; S_m; z_m)$; $[G(\text{k})] = f(g_e(\text{k}); N_e)$	$N_D = f(C_c; K; \text{BSU}; \text{HSN})$; $G(\text{PM}) = f(N_D; C(\text{C}_n\text{H}_m); G_{fuel}; G_{air})$; $G(\text{k}) = f(C(\text{k}); B_0; t_0; \varphi_0)$; $k = [\text{NO}_x; \text{C}_n\text{H}_m; \text{CO}]$	$K_{fe} = f(G_{fuel}; G(\text{PM}); G(\text{NO}_x); G(\text{C}_n\text{H}_m); G(\text{CO}); Q_H; WF; \sigma; f)$; $A_{fuel} = f(\partial K_{fe} / \partial G_{fuel}; \partial K_{fe} / \partial G(\text{k}); Q_H; WF; \sigma; f)$; $G(\text{k})$; $A(\text{k})$; $k = [\text{SO}_x; \text{CO}_2; \text{CO}_{2\text{GH}}; \text{H}_2\text{O}; \text{B(a)P}; \text{PAH}; \text{CG}; \text{RB}; \text{Q}; \eta_e]$	δK_{fe}; δG_{fuel}; $\delta G(\text{k})$; $\delta A(\text{k})$; $k = [G_{fuel}; \text{PM}; \text{NO}_x; \text{C}_n\text{H}_m; \text{CO}; \text{SO}_x; \text{CO}_2; \text{CO}_{2\text{GH}}; \text{H}_2\text{O}; \text{B(a)P}; \text{PAH}; \text{CG}; \text{RB}; \text{Q}; \eta_e]$; $G(\text{PM}) \pm \delta G(\text{PM}) = \beta(p; q; N; K_{entr})$
КРОК 7 —►	**КРОК 8 —►**	**КРОК 9 —►**	**КРОК 10 —►**	**КРОК 11—►**	**КРОК 12 —► КРОК 1**		
Рівень IIB	**Рівень IIC**	**Рівень IIC**	**Рівень IIC**	**Рівень IC**	**Рівень IA**		
«Еталонні значення факторів ЕБ»	**«Часткові функції бажаності факторів ЕБ та її вагомість»**	**«Критерій рівня ЕБ ПДВЗ та індекс ефективності роботи ТЗНС»**	**«Рівень ЕБ експлуатації ЕУ з ПДВЗ»**	**«Управління ПДВЗ, ТЗНС, рівнем ЕБ»**	**«Об'єкти управління»**		
$r(K_{fe})_{up}, r(K_{fe})_{dn} = f(K_{fe}; [G(\text{k})](\text{EURO}))$; $r(G(\text{k}))_{up}, r(G(\text{k}))_{dn} = f(G(\text{k}); [G(\text{k})](\text{EURO}))$; $r(A(\text{k}))_{up}, r(A(\text{k}))_{dn} = f(A(\text{k}); [A(\text{k})](\text{EURO}))$; $k = [G_{fuel}; \text{PM}; \text{NO}_x; \text{C}_n\text{H}_m; \text{CO}; \text{SO}_x; \text{CO}_2; \text{CO}_{2\text{GH}}; \text{H}_2\text{O}; \text{B(a)P}; \text{PAH}; \text{CG}; \text{RB}; \text{Q}; \eta_e]$	$d(K_{fe}) = f(K_{fe}; a(K_{fe}); b(K_{fe}))$; $d(G(\text{k})) = f(G(\text{k}); a(G(\text{k})); b(G(\text{k})))$; $\upsilon(G(\text{k})) = f(A(\text{k}))$; $k = [K_{fe}; G_{fuel}; \text{PM}; \text{NO}_x; \text{C}_n\text{H}_m; \text{CO}; \text{SO}_x; \text{CO}_2; \text{CO}_{2\text{GH}}; \text{H}_2\text{O}; \text{B(a)P}; \text{PAH}; \text{CG}; \text{RB}; \text{Q}; \eta_e]$	$D_{RICE} = f(d(K_{fe}); d(G(\text{k})); \upsilon(K_{fe}); \upsilon(G(\text{k})))$; $k = [\text{SO}_x; \text{CO}_2; \text{CO}_{2\text{GH}}; \text{H}_2\text{O}; \text{B(a)P}; \text{PAH}; \text{CG}; \text{RB}; \text{Q}; \eta_e]$; $I_{EPT} = f(I_{ED}; WF_{ED})$; $I_{ED} = f(\Delta P_{ED}; \Delta G^*_{fuelED})$; $WF_{ED} = f(A(\text{k})_{ED}; \Sigma A(\text{k}))$	$\Omega_{LC} = f(\Omega_{PP}; \tau_q; I)$; $\Omega_{PP} = f(\Omega_{RICE}; N_e; n)$; $\Omega_{RICE} = f(D_{RICE}; I_{EPT})$; $ESL = f(\Omega_{RICE}; [\Omega_{RICE}])$;	$ESL = 1 \rightarrow \text{AFEP} = \text{OFF}$; $ESL = 2 \rightarrow \text{AFEP} = \text{EPT}$; $ESL = 3 \rightarrow \text{AFEP} = \text{ELEESL}$; $ESL = 4 \rightarrow \text{AFEP} = \text{IESL}$; $ESL = 5 \rightarrow \text{AFEP} = \text{PLEESL}$	**ЕУ з ПДВЗ та ЕСАК** $\text{REG}_1 = f(I_{DPF}; [I_{DPF}])$; $\text{REG}_2 = f(\tau_{IRP1}; [\tau_{IRP1}])$; $\text{REN} = f(\tau_{IRP2}; [\tau_{IRP2}])$ REG_1; REG_2; REN = [ON; READY; OFF]	**СУЕБ та ЕСАК:** ВО типу A – для газоподібних полютантів; ВО типу B – для рідких полютантів; ВО типу C – для твердих відходів; ВО типу D – для факторів впливу	**НПС:** Атмосфера; Гідросфера; Літосфера; Біосфера

Рисунок 6.1 – Алгоритм управління рівнем екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу

Назви та сутність кроків алгоритму є такими.

Крок № 1 «*Джерело вихідних даних*» об'єднує в собі організацію підготовчих процесів щодо отримання і упорядкування первинного набору вихідних даних для здійснення критеріального оцінювання. Джерелами вихідних даних є:

a) нормативи ЕБ, довідники та паспорти засобів вимірювальної техніки (ЗВТ);

b) результати експериментальних досліджень та стендових випробувань;

c) результати фізичного та математичного моделювання.

Крок № 2 «*Первинний набір вихідних даних*» передбачає отримання та упорядкування первинного набору вихідних даних для здійснення критеріального оцінювання. Застосовуються методи:

– аналізу літературних даних;

– фізичного та математичного моделювання;

– експериментальних досліджень.

Крок № 3 «*Обробка вихідних даних*» включає в себе результати первинної обробки набору вихідних даних для здійснення критеріального оцінювання. Отримуються результати непрямих вимірювань за відомими методиками обробки результатів експериментів та моделювання.

Крок № 4 «*Формули перерахунку*» містить результати застосування відомих формул перерахунку для отримання параметрів чинників екологічної небезпеки, що мають враховуватись у математичному апараті комплексного паливно-екологічного критерію як частині інтегративного показника рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу.

Крок № 5 «*Значення чинників екологічної небезпеки та їх вагомість*» описує результати застосування математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію, вдосконаленого у роботі, та методик визначення кількісних і якісних показників інтенсивних й екстенсивних параметрів інших чинників екологічної небезпеки, розроблених у роботі, а також методик визначення їх вагомості.

Крок № 6 «*Точність отримання значень чинників екологічної небезпеки*» присвячений отриманню значень інструментальної складової повної відносної систематичної похибки отримання значень комплексного паливно-екологічного критерію, інших чинників екологічної небезпеки, що враховуються при критеріальному

оцінюванні, та інтегративного показника рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу.

Крок № 7 «*Еталонні значення чинників екологічної небезпеки*» розкриває результати розрахунку параметрів реперних точок психофізичної шкали часткових функцій бажаності чинників екологічної небезпеки, що враховуються при критеріальному оцінюванні, на основі законодавчо встановлених значень відповідно до чинного рівня вимог екологічної безпеки EURO.

Крок № 8 «*Часткові функції бажаності чинників екологічної небезпеки та їх вагомість*» наповнений результатами розрахунку параметрів часткових функцій бажаності чинників екологічної небезпеки, що враховуються при критеріальному оцінюванні, а також визначення їх вагомості.

Крок № 9 «*Критерій рівня екологічної безпеки експлуатації поршневим ДВЗ та індекс ефективності роботи ТЗНС*» показує результати оцінювання значень критерію ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ – інтегративного показника D_{RICE}, та критерію ефективності функціонування ТЗНС – індексу I_{RICE}.

Крок № 10 «*Рівень екологічної безпеки експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ*» характеризує результати послідовного у ієрархічному порядку оцінювання значень індикатора екобезпеки ПДВЗ і його ТЗНС Ω_{RICE} у функції значень інтегративного показника D_{RICE} й індексу I_{RICE}, індикатора екобезпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ на поточному етапі його ЖЦ Ω_{PP} та індикатора екобезпеки життєвого циклу ЕУ з ПДВЗ Ω_{LC}.

Крок № 11 «*Управління ПДВЗ, ТЗНС, рівнем екологічної безпеки*» ілюструє результати оцінювання значень ідентифікатора рівня екобезпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ *ESL* у функції значень індикатора екобезпеки життєвого циклу ЕУ з ПДВЗ Ω_{LC} у відповідності до введеної психофізичної шкали, еталонні значення якої у виді характеристичної карти містяться у пам'яті електронного блоку керування (ЕБК) електронної системи автоматичного керування (ЕСАК) ПДВЗ чи ЕУ.

Крок № 12 «*Об'єкти управління*» показує яким саме чином реалізується безпосереднє керування роботою виконавчими пристроями ТЗНС за допомогою ЕСАК ПДВЗ чи ЕУ та визначає вид и порядок подачі управляючих імпульсів.

Усі кроки алгоритму систематизовано на рівні за ознаками підпорядкованості та послідовності, що показано на рис. 6.2.

ПОСЛІДОВНІСТЬ →				
	Управлінський (С)	Критерії для ПДВЗ і виконавчих пристроїв ТЗНС	Комплексний критерій, ESL, психофізичні шкали	Управлінські рішення щодо ТЗНС, переведення на інший етап ЖЦ
	Оціночний (В)	Формули перерахунку, методики	Комплекс з математичних моделей, класифікації	Чинники ЕНБ, похибки, еталонні значення
	Методичний (А)	ЕУ, ПДВЗ, виконавчі пристрої ТЗНС, набір вихідних даних, нормативи, довідкові дані, МВС, ЗВТ	ТЗНС, ЕСАК, характеристичні карти	СУЕБ, зворотний зв'язок
РІВЕНЬ		**Технічний (І)**	**Тактичний (ІІ)**	**Стратегічний (ІІІ)**
		ПІДПОРЯДКОВАНІСТЬ →		

Рисунок 6.2 – Результати систематизації кроків алгоритму управління рівнем екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу

На рис. 6.2 видно, що кроки алгоритму поділено на такі

– за ознакою підпорядкованості: технічного рівня (І); тактичного рівня (ІІ); стратегічного рівня (ІІІ);

– за ознакою послідовності: методичного рівня (А); оціночного рівня (В); управлінського рівня (С).

6.3 Практична реалізація Кроків № 10 і № 11 алгоритму управління

Отримано усі необхідні складові для реалізації розробленого алгоритму управління рівнем екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим ступе-

нем фізичного зносу, що не відповідають чинним вимогам екологічного законодавства України, але не можуть бути виведеними з експлуатації.

Алгоритм передбачає прийняття управлінських рішень електронною системою автоматичного керування ЕУ з ПДВЗ на основі значення ідентифікатора рівня екобезпеки *ESL*, що обирається за психофізичною шкалою і характеристичною картою за значенням індикатора екобезпеки ЖЦ ЕУ Ω_{LC}.

Індикатор Ω_{LC} для обраного етапу ЖЦ визначається значенням індикатора екобезпеки ЕУ Ω_{PP}, що у випадку наявності лише одного ПДВЗ визначається значенням індикатора екобезпеки ПДВЗ і його ТЗНС Ω_{RICE} (формула (6.1)).

$$\Omega_{RICE} = J_{RICE} + J_{EPT} = D_{RICE} + \left(1 - D_{RICE}\right)^{I_{EPT}}, \tag{6.1}$$

де Ω_{RICE} – індикатор екобезпеки ПДВЗ і його ТЗНС; J_{RICE} – інтегративний показник екологічної якості ПДВЗ; J_{EPT} – інтегративний показник екологічної якості ТЗНС; D_{RICE} – інтегративний показник рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ; I_{EPT} – індекс ефективності функціонування ТЗНС.

Значення індикатора Ω_{RICE} формують значення інтегративного показника рівня екобезпеки процесу експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} (формули (6.2) і (6.3)) та індексу ефективності функціонування ТЗНС I_{EPT} (формулу (6.4)).

$$D_{RICE} = \sqrt[\sum_{i=1}^{n} \upsilon(\mathrm{k}_i)]{\prod_{i=1}^{n} d(\mathrm{k}_i)^{\upsilon(\mathrm{k})_i}} = \sqrt[(\upsilon(\mathrm{k}_1)+\upsilon(\mathrm{k}_2)+\ldots+\upsilon(\mathrm{k}_n))]{d_i(\mathrm{k}_1)^{\upsilon(\mathrm{k}_1)} \cdot d_i(\mathrm{k}_2)^{\upsilon(\mathrm{k}_2)} \cdot \ldots \cdot d_i(\mathrm{k}_n)^{\upsilon(\mathrm{k}_n)}} =$$

$$= \sqrt[\upsilon(K_{fe})+\sum_{k=1}^{h} \upsilon(\mathrm{k}_i)]{K_{fe}^{\upsilon(K_{fe})} \cdot \prod_{i=1}^{h} G(\mathrm{k}_i)^{\upsilon(\mathrm{k}_i)}}; \mathrm{k} = \mathrm{SO_2}; \mathrm{CO_2}; \mathrm{CO_{2GH}}; \mathrm{H_2O}; \mathrm{CG}; \mathrm{RB}; \mathrm{Q}, \tag{6.2}$$

де D_{RICE} – інтегративний показник рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ; $d(\mathrm{k}_i)$ – часткова функція бажаності, що відповідає k-му критерію якості, $d(\mathrm{k}_i) = [0\ldots 1{,}0]$; $\upsilon(\mathrm{k}_i)$ – коефіцієнт вагомості k-го критерію якості, що розглядаються, $0 < \upsilon(\mathrm{k}_i) \leq 1$; n – кількість критеріїв якості, що розглядаються; K_{fe} – комплексний паливно-екологічний критерій; $G(\mathrm{k}_i)$ – масовий годинний викид k-го полютанту, кг/год; $\upsilon(K_{fe})$ – коефіцієнт вагомості критерію K_{fe}; $\upsilon(\mathrm{k}_i)$ – коефіцієнт вагомості величини викиду $G(\mathrm{k}_i)$; PM – тверді частинки; $\mathrm{NO_x}$ – оксиди азоту; $\mathrm{C_nH_m}$ – незгорілі

вуглеводні; CO – монооксид вуглецю; SO_2 – оксиди сірки; CO_2 – діоксид вуглецю як токсична забруднююча речовина; CO_{2HG} – діоксид вуглецю як парниковий газ; H_2O – водяна пара; CG – картерні гази; RB – пара моторного палива; Q – теплова енергія.

$$I_{EPT} = \sum_{y=1}^{m}\left(\frac{1}{I_{EDy}\cdot WF_{EDy}}\right) = \sum_{y=1}^{m}\left(\left(I_{EDy}\cdot A(\mathrm{k}_i)/\sum_{k=1}^{h+5}A(\mathrm{k}_i)\right)^{-1}\right), \tag{6.4}$$

де I_{EPT} – індекс ефективності функціонування ТЗНС; I_{ED} – індекс ефективності функціонування y-го виконавчого пристрою ТЗНС, зокрема для ФТЧ – I_{DPF}; WF_{EDy} – ваговий фактор y-го виконавчого пристрою ТЗНС; $A(\mathrm{k}_i)$ – безрозмірний індекс відносної агресивності k-го полютанту; h = 5 – кількість ЕНБ, які враховуються критерієм K_{fe}.

Значення інтегративного показника рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ D_{RICE} формують значення часткових функцій бажаності комплексного паливно-екологічного критерію та додатково введених в оцінювання чинників екологічної небезпеки на основі психофізичної шкали з реперними точками, які відповідають законодавчо встановленим нормативам, вагомість яких визначається за значеннями безрозмірного індексу їх відносної агресивності.

Визначення характеристичної карти за значенням індикатора екобезпеки ЖЦ ЕУ Ω_{LC} проводиться таким чином (формули (6.5)–(6.7)).

$$\begin{cases}
\Omega_{LC} = [0;\ldots;1,0]; \\
\Omega_{LC} < 0,2 \Rightarrow ESL = 1 : \text{Forbidden} \Rightarrow \text{AFEP} = \text{OFF}; \\
\Omega_{LC} = (0,2;\ldots;0,37] \Rightarrow ESL = 2 : \text{Acceptable} \Rightarrow \text{AFEP} = \text{EPT}; \\
\Omega_{LC} = (0,37;\ldots;0,63] \Rightarrow ESL = 3 : \text{Permissible} \Rightarrow \text{AFEP} = \text{ELEESL}; \\
\Omega_{LC} = (0,63;\ldots;0,8] \Rightarrow ESL = 4 : \text{High} \Rightarrow \text{AFEP} = \text{IESL}; \\
\Omega_{LC} > 0,8 \Rightarrow ESL = 5 : \text{Excellent} \Rightarrow \text{AFEP} = \text{PLEESL};
\end{cases} \tag{6.5}$$

$$\Omega_{LC} = \sum_{q=1}^{l}\left(\Omega_{PPq}\cdot WF_{\tau}\right)/l = \sum_{q=1}^{l}\left(\Omega_{PPq}\cdot \tau_q / \sum_{q=1}^{l}\tau_q\right)/l, \tag{6.6}$$

$$\Omega_{PP} = \sum_{j=1}^{n}\left(\Omega_{RICEj}\cdot WF_N\right)/n = \sum_{j=1}^{n}\left(\Omega_{RICEj}\cdot N_{ej} / \sum_{j=1}^{l}N_{ej}\right)/n, \tag{6.7}$$

де Ω_{LC} – індикатор екобезпеки ЖЦ ЕУ; ESL – ідентифікатора рівня екобезпеки; AFEP – процедура «Безаварійна експлуатація»; OFF – режим «Кінець безаварійної

експлуатації»; EPT – режим «Захист НПС»; ELEESL – режим «Забезпечення законодавчо встановленого рівня екобезпеки»; IESL – режим «Покращення рівня екобезпеки»; PLEESL – режим «Перспективний законодавчо встановлений рівень екобезпеки»; Ω_{PP} – індикатор екобезпеки ЕУ з ПДВЗ на q-му етапі ЖЦ з $l = 3$ можливих етапів; τ_q – тривалість q-го етапу ЖЦ ЕУ з ПДВЗ, год; $\Sigma\tau_q$ – сумарна тривалість ЖЦ ЕУ з ПДВЗ, год; для етапу ЖЦ «експлуатація» індекс $q = 2$ опущено; Ω_{RICEj} – індикатор екобезпеки j-го ПДВЗ у складі ЕУ з n наявних; N_{ej} – ефективна потужність j-го ПДВЗ, кВт; ΣN_{ej} – сумарна ефективна потужність ПДВЗ в ЕУ, кВт; для випадку наявності лише одного ПДВЗ у складі ЕУ індекс $n = 1$ опущено.

При цьому значенню ідентифікатора $ESL = 1$ відповідає стан екобезпеки «Недопустимий/Forbidden», $ESL = 2$ відповідає стан екобезпеки «Допустимий/Acceptable», $ESL = 3$ відповідає стан екобезпеки «Прийнятний/Permissible», $ESL = 4$ відповідає стан екобезпеки «Високий/High», $ESL = 5$ відповідає стан екобезпеки «Відмінний/Excellent».

При досягненні значення $ESL = 1$ і нижче СУЕБ перемикається у режим «Кінець безаварійної експлуатації» («End of accident-free exploitation (AFEP= =OFF)»), у якому має розпочатися ремонт ЕУ з ПДВЗ (Overhaul) чи виведення її з експлуатації (Decommission).

При досягненні $ESL = 2$ і нижче СУЕБ перемикається у режим «Захист НПС» (Environment protection (AFEP=EPT)), у якому має виконуватись розробка ТЗНС для конкретного ПДВЗ, що перебуває в експлуатації тривалий час, та вибір її виконавчих пристроїв.

При досягненні $ESL = 3$ і нижче СУЕБ перемикається у режим «Забезпечення законодавчо встановленого рівня екобезпеки» (Ensuring of legislative established ES level (AFEP=ELEESL)), у якому параметри виконавчих пристроїв покращуються та узгоджуються.

При досягненні $ESL = 4$ і нижче СУЕБ перемикається у режим «Покращення рівня екобезпеки» (Improvement of ES level (AFEP=IESL)), у якому окремі виконавчі пристрої ТЗНС доводяться до межі своїх технічних можливостей.

При досягненні $ESL = 5$ і нижче СУЕБ перемикається у режим

«Перспективний законодавчо встановлений рівень екобезпеки» (Promising legislative established ES level (AFEP=PLEESL)), у якому усі виконавчі пристрої ТЗНС доводяться до межі своїх технічних можливостей чи замінюються на більш ефективні.

У роботі досліджено можливості розробленої СУЕБ щодо підвищення екологічної ефективності роботи ПДВЗ та підвищення рівня екологічної безпеки процесів у ТЗНС відповідно до таких технічних рішень:

а) вибору типу споживаного моторного палива, зокрема переведення на чисте біодизельне чи сумішеве;

б) вибору моделі експлуатації ПДВЗ, стаціонарних режимів його роботи при використанні ПДВЗ у складі АТЗ з гібридним приводом рушія;

в) керування роботою виконавчих пристроїв ТЗНС, зокрема ФТЧ.

Безпосередня реалізація алгоритму роботи керуючої частини системи управління виконавчими пристроями ТЗНС за допомогою електронної системи автоматичного керування двигуном чи самої ТЗНС (кроки алгоритму 9–12) на прикладі застосування ФТЧ наведена на рисунку 6.3.

Найбільш ефективним з розглянутих технічних рішень є обладнання випускної системи ПДВЗ ФТЧ нетрадиційної конструкції, вдосконаленої у роботі. Моніторинг ефективності роботи фільтру та управління процесом його регенерації проводиться з використанням наданого індексу ефективності функціонування ФТЧ I_{DPF} (формула (6.8)), що є основою для формування управляючого імпульсу СУЕБ.

$$I_{DPF} = A(\mathrm{PM}) \cdot G(\mathrm{PM})(n_{cs};\, M_{кр};\, N_D;\, C(\mathrm{C_nH_m});\, G_{fuel};\, G_{air}) /$$
$$/ \left(A_{fuel}(\partial K_{fe}/\partial G_{fuel};\, \partial K_{fe}/\partial G(\mathrm{k})) \cdot G_{fuel}(n_{cs};\, M_{кр})\right) \cdot K_{CE}(G(\mathrm{PM}))(n_{cs};\, M_{кр};\, L_{DPF};\, \tau_{IRP}) /$$
$$/ \delta G^{*}_{fuel}(G_{fuel};\, H_u;\Delta P_{DPF}(n_{cs};\, M_{кр};\, L_{DPF};\, \tau_{IRP})), \qquad (6.8)$$

де I_{DPF} – індекс ефективності функціонування ФТЧ; $A(\mathrm{PM}) = 200$ – вагомість ТЧ як полютанта; $G(\mathrm{PM})$ – масовий годинний викид ТЧ у потоці ВГ, кг/год; N_D – показник димності ВГ, %; $C(\mathrm{C_nH_m})$ – концентрація незгорілих вуглеводнів у ВГ, %; G_{fuel} – масова годинна витрата моторного палива, кг/год; G_{air} – масова годинна витрата повітря, кг/год; A_{fuel} – вагомість витрати моторного палива як чинника екологічної небезпеки; K_{fe} – комплексний паливно-екологічний критерій, ‰; $G(\mathrm{k})$ – масовий годинний

викид k-го полютанту у ВГ, кг/год; $K_{CE}(G(\text{PM}))$ – коефіцієнт ефективності роботи ФТЧ, %; δG^{*}_{fuel} – ефект впливу ГО ФТЧ на паливну економічність ПДВЗ, %; ΔP_{DPF} – гідравлічний опір ФТЧ, Па.

Управління процесами регенерації I і II роду ФТЧ пропонується узгоджувати з психофізичною шкалою і характеристичною картою ЕСАК, яка визначається у даному разі таким чином:

$$\begin{cases} I_{EPT} = [0;\ldots;\infty]; I_{EPT} > 1{,}0 \Rightarrow I_{EPT} = 1{,}0; \\ I_{EPT} < 0{,}1 \Rightarrow REG_1 = ON; \\ I_{EPT} = (0{,}1;\ldots;0{,}37] \Rightarrow REG_1 = READY; \\ I_{EPT} > 0{,}37 \Rightarrow REG_1 = OFF. \end{cases} \tag{6.9}$$

$$\begin{cases} \tau_{IRP1} = [0;\ldots;\tau_{IRP1\max}]; \\ \tau_{IRP1} < 0{,}37 \cdot \tau_{IRP1\max} \Rightarrow REG_2 = ON; \\ \tau_{IRP1} = (0{,}37;\ldots;0{,}63] \cdot \tau_{IRP1\max} \Rightarrow REG_2 = READY; \\ \tau_{IRP1} > 0{,}63 \cdot \tau_{IRP1\max} \Rightarrow REG_2 = OFF. \end{cases} \tag{6.10}$$

$$\begin{cases} \tau_{IRP2} = [0;\ldots;\tau_{IRP2\max}]; \\ \tau_{IRP2} < 0{,}37 \cdot \tau_{IRP2\max} \Rightarrow REN = ON; \\ \tau_{IRP2} = (0{,}37;\ldots;0{,}63] \cdot \tau_{IRP1\max} \Rightarrow REN = READY; \\ \tau_{IRP2} > 0{,}63 \cdot \tau_{IRP1\max} \Rightarrow REN = OFF. \end{cases} \tag{6.11}$$

де I_{EPT} – індексу ефективності функціонування ТЗНС; REG_I – процедура «Регенерація I роду»; REG_II – процедура «Регенерація II роду»; ON – режим «ввімкнено»; READY – режим «готовність»; OFF – режим «вимкнено»; τ_{IRP1} – тривалість міжрегенераційного періоду I роду на попередньому кроці, год; $\tau_{IRP1\max}$ – граничне значення тривалості міжрегенераційного періоду I роду, год; τ_{IRP2} – тривалість міжрегенераційного періоду I роду на попередньому кроці, год; $\tau_{IRP2\max}$ – граничне значення тривалості міжрегенераційного періоду I роду, год.

Тобто індекс ефективності функціонування ТЗНС I_{RICE} та його складова індекс ефективності функціонування ФТЧ I_{DPF}, використовуються також і для управління роботою відповідного виконавчого пристрою ТЗНС впродовж його міжрегенераційного періоду згідно до формули (6.9).

Так, з формули (6.9) видно, що усі значення індексу I_{DPF} >1,0 прирівнюються до значення I_{DPF} = 1,0. При досягненні значення I_{DPF} >0,37 режим роботи ФТЧ змі-

нюється з нормального (REG_1=OFF) на режим готовності до здійснення процесу регенерації I роду (REG_1=READY), а при досягненні значення I_{DPF} >0,1 режим роботи ФТЧ змінюється на здійснення процесу регенерації I роду (REG_1=ON).

ЕСАК документує тривалість експлуатації між двома послідовними процесами регенерації I роду (міжрегенераційного періоду I роду) τ_{IRP1} та виконує порівняння її значення з наперед заданим опорним значенням $\tau_{IRP1max}$ згідно до формули (6.10).

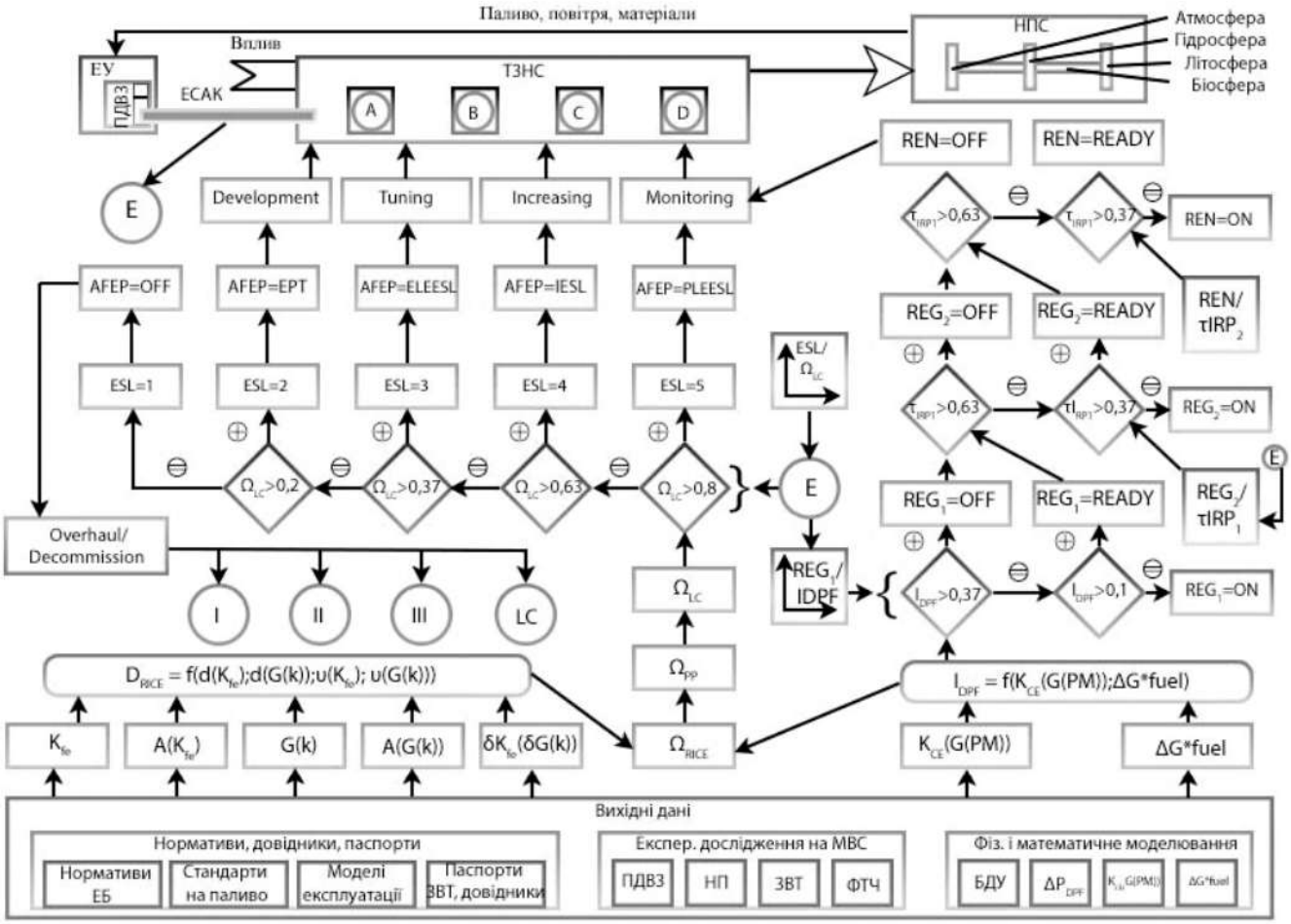
При досягненні значення $\tau_{IRP1}<0,63\cdot\tau_{IRP1max}$ режим роботи ФТЧ змінюється з нормального (REG_2=OFF) на режим готовності до здійснення процесу регенерації II роду (REG_2=READY), а при досягненні значення $\tau_{IRP1}<0,37\cdot\tau_{IRP1max}$ режим роботи ФТЧ змінюється на здійснення процесу регенерації II роду (REG_2=ON).

Також ЕСАК документує тривалість експлуатації між двома послідовними процесами регенерації II роду (міжрегенераційного періоду II роду) τ_{IRP2} та виконує порівняння її значення з наперед заданим опорним значенням $\tau_{IRP2max}$ згідно до формули (6.11).

При досягненні значення $\tau_{IRP2}<0,63\cdot\tau_{IRP2max}$ режим роботи ФТЧ змінюється з нормального (REN=OFF) на режим готовності до здійснення процесу реновації ФЕ фільтра (REN=READY), а при досягненні значення $\tau_{IRP2}<0,37\cdot\tau_{IRP2max}$ режим роботи ФТЧ змінюється на здійснення процесу реновації ФЕ фільтра (REN=ON).

6.4 Практична реалізація Кроку № 9 алгоритму управління

Для практичної реалізації розробленого алгоритму застосовується математичний апарат розробленого у роботі інтегративного показника рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ, повністю і послідовно викладений у табл. 6.1, та математичний апарат розробленого у роботі індексу ефективності роботи фільтра твердих частинок, повністю і послідовно викладений у табл. 6.2.



RICE – ПДВЗ, IM – впускний колектор, EM – випускний колектор, TFT – резервуар з традиційним дизпаливом, AFT – резервуар з альтернативним дизпаливом, FM – змішувач моторного палива, FSS – система паливоподачі двигуна, FH – нагрівач моторного палива, RBV – дихальний клапан резервуару, CGV – клапан системи суфлювання картерних газів, EACS – ЕСАК, UG – електрогенератор, EGRS – система рециркуляції ВГ, EGC – холодильник ВГ, DPF – ФТЧ, EGRV – триходовий клапан перепуску ВГ, REGS – плазмова система регенерації ФТЧ I роду, MOC – радіатор охолодження моторної оливи, ChT – характеристична карта ЕБУ ЕСАК, FPU – блок визначення параметрів моторного палива

Рисунок 6.3 – Алгоритм роботи керуючої частини системи управління виконавчими пристроями технології захисту навколишнього середовища від впливу ПДВЗ

Таблиця 6.1 – Математичний апарат інтегративного показника рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ

Показник	Формула	Од. вим.
Узагальнена функція бажаності	Для довільного складу впливаючих чинників ЕНБ $D_i = \sum_{k=1}^{n} \upsilon_k \sqrt{\prod_{k=1}^{n} d_{ki}^{\upsilon_k}} = \sqrt[\upsilon_{k_1}+\upsilon_{k_2}+\ldots+\upsilon_{k_n}]{d_i(k_1)^{\upsilon_{k_1}} \cdot d_i(k_2)^{\upsilon_{k_2}} \cdot \ldots \cdot d_i(k_n)^{\upsilon_{k_n}}}$ $d_{ki} = \exp\left[-\exp\left(a_{ki} + b_{ki} \cdot r_{ki}\right)\right]; k = \left\{K_{fe}, G_{SO_x}, \delta_{cs}, \xi_{cs}, \eta_{cs}, L_{Aequ}, L_{A\max}, \ldots\right\}$ $\begin{cases} d_{kidn} = \exp\left[-\exp\left(a_{ki} + b_{ki} \cdot r_{kidn}\right)\right] \\ d_{kiup} = \exp\left[-\exp\left(a_{ki} + b_{ki} \cdot r_{kiup}\right)\right] \end{cases};$ $a_k = \left(\ln(-\ln(d_{kup})) \cdot r_{kdn} - \ln(-\ln(d_{kdn})) \cdot r_{kup}\right) / \left(r_{kdn} - r_{kup}\right)$ $b_k = \left(\ln(-\ln(d_{kdn})) - \ln(-\ln(d_{kup}))\right) / \left(r_{kdn} - r_{kup}\right)$	–
	Для складу впливаючих чинників ЕНБ, ідентичному комплексному паливно-екологічному критерію $D = \sum_{k=1}^{n} \upsilon_k \sqrt{\prod_{k=1}^{n} d_k^{\upsilon_k}} = \sqrt{\begin{matrix} \upsilon_{NOx}+\upsilon_{PM}+ \\ +\upsilon_{CnHm}+\upsilon_{CO}+ \\ +\upsilon_{G\,fuel} \end{matrix}} \sqrt{\begin{matrix} d(G(NO_X))^{\upsilon_{NOx}} \cdot d(G(PM))^{\upsilon_{PM}} \cdot d(G(C_nH_m))^{\upsilon_{CnHm}} \cdot \\ d(G(CO))^{\upsilon_{CO}} \cdot d(G_{fuel})^{\upsilon_{G\,fuel}} \end{matrix}}$	
	Для складу впливаючих чинників ЕНБ, що включає критерій K_{fe} та додаткові чинники ЕНБ $D = \sum_{k=1}^{n} \upsilon_k \sqrt{\prod_{k=1}^{n} d_k^{\upsilon_k}} = \sqrt{\begin{matrix} \upsilon_{Kfe}+\upsilon_{SOx}+\upsilon_{CO2}+ \\ +\upsilon_{CO2\,gh}+\upsilon_{B(a)P}+ \\ +\upsilon_{PAH}+\upsilon_{CG}+ \\ +\upsilon_{RB}+\upsilon_{H2O}+\upsilon_{GQ} \end{matrix}} \sqrt{\begin{matrix} d(K_{fe})^{\upsilon_{Kfe}} \cdot d(G(SO_X))^{\upsilon_{SOx}} \cdot d(G(CO_2))^{\upsilon_{CO2}} \cdot \\ d(G(CO_2)_{GH})^{\upsilon_{CO2GH}} \cdot d(G(B(a)P))^{\upsilon_{B(a)P}} \times \\ d(G(PAH))^{\upsilon_{PAH}} \cdot d(G(CG))^{\upsilon_{CG}} \cdot d(G(RB))^{\upsilon_{RB}} \cdot \\ d(G(H_2O))^{\upsilon_{H2O}} \cdot d(G(Q))^{\upsilon_{GQ}} \end{matrix}}$	
	Вагомість k-го впливаючого чинника ЕНБ $\upsilon(k) = \frac{1}{A(k)}$	
Порежимне значення комплексного паливно-екологічного критерію	$K_{fe} = \eta_e \cdot (1-\beta) = \frac{3600}{H_u \cdot g_e} \cdot \left(1 - \frac{Z_e(P_f)}{Z_f(P_f) + Z_e(P_f)}\right) = \frac{3600 \cdot N_e(M_{кр}, n_{кв})}{H_u \cdot G_{fuel}} \cdot \frac{1}{1 + \sigma \cdot f \cdot \sum_{m=1}^{h} (A_k \cdot G_k) / G_{fuel}}$	‰
	Сумарний приведений викид законодавчо нормованих полютантів $\Sigma(A(k) \cdot G(k)) = A(PM) \cdot G(PM) + A(NO_X) \cdot G(NO_X) + + A(C_nH_m) \cdot G(C_nH_m) + A(CO) \cdot G(CO)$	кг/год
Безрозмірний індекс відносної агресивності k-го полютанта	$A_k = a_k \cdot \alpha_k \cdot \beta_k \cdot \delta_k;$ $a_k = \sqrt{ГДК_{сд}(CO) \cdot ГДК_{рз}(CO) / \left(ГДК_{сд}(k) \cdot ГДК_{рз}(k)\right)}$	–
	Значення безрозмірного індексу відносної агресивності законодавчо нормованих полютантів $A(PM) = 200\ ;\ A(NO_x) = 41{,}1\ ;\ A(C_nH_m) = 3{,}2\ ;\ A(CO) = 1$	

Продовження таблиці 6.1

Масовий годинний викид ТЧ у потоці ВГ як дисперсної фази аерозолю – формула перерахунку з показників токсичності й димності ВГ	$G(PM) = A \cdot N_D \cdot (D \cdot G_{air} + H \cdot G_{fuel}) + B \cdot N_D^2 \cdot (D \cdot G_{air} + H \cdot G_{fuel}) +$ $+ C \cdot C_{CH} \cdot (G_{EG}) + M \cdot C_{CH}^2 \cdot (G_{EG})^2 / (D \cdot G_{air} + H \cdot G_{fuel})$	кг/год
	Формули перерахунку показників димності ВГ у базовий варіант $K = -\ln(1 - N/100)/L$; $N = 100 - \tau$; $\tau = I / I_0 \cdot 100$ $N = 100 \cdot (1 - \exp(-\varepsilon \cdot l \cdot C))$; $C_C = \ln(1 - N/100)/(\varepsilon \cdot l)$; $\varepsilon = 3 \cdot d_A^2 / (2 \cdot \rho \cdot d_v^3)$ $C_C = 565 \cdot \left(\ln\left(\frac{10}{10 - BSU} \right) \right)^{1,206}$ $C_C = (-184 \cdot BSU - 727,5) \cdot \log(1 - BSU/10)$ $HSN = -2,64 \cdot 10^{-4} \cdot BSU^2 + 0,111642 \cdot BSU - 1,023 \cdot 10^{-3}$	
Масові годинні викиди газоподібних законодавчо нормованих полютантів – формули перерахунку зі значень об'ємної концентрації у ВГ з урахуванням параметрів атмосферного повітря	$G(NO_x) = 1,587 \cdot 10^{-3} \cdot C_V(NO_x) \cdot F(NO_x) \cdot (G_{fuel} + G_{air})$, $G(CO) = 9,66 \cdot 10^{-4} \cdot C_V(CO) \cdot F(CO) \cdot (G_{fuel} + G_{air})$, $G(C_nH_m) = 4,78 \cdot 10^{-4} \cdot C_V(C_nH_m) \cdot (G_{fuel} + G_{air})$,	кг/год
	$F(NO_x) = \begin{pmatrix} 1 + (0,044 \cdot G_{fuel}/G_{air} - 0,0038) \cdot (7 \cdot d - 75) + \\ + (0,0053 - 0,116 \cdot G_{fuel}/G_{air}) \cdot 1,8 \cdot (T_0 - 302) \end{pmatrix}^{-1}$ $d = 6,21 \cdot \varphi_0 \cdot P_s / (B_0 - 0,01 \cdot \varphi_0 \cdot P_s)$ $F(CO) = 1 - 1,85 \cdot G_{fuel}/G_{air}$ $P_s = 6,1121 \cdot \exp((18,678 - t_0/234,5) \cdot t_0 / (257,14 + t_0))$	
Інструментальна складова повної систематичної відносної похибки	Для отримання значень масових годинних викидів полютантів $\delta G(k)_x = \frac{\Delta G(k)}{G(k)} \cdot 100 = \Sigma\left(\left| \frac{\partial G(k)}{\partial x} \right| \cdot \Delta x \right)$ Для значень отримання значень комплексного паливно-екологічного критерію $\delta K_{fex} = \frac{\Delta K_{fe}}{K_{fe}} \cdot 100 = \Sigma\left(\left| \frac{\partial K_{fe}}{\partial x} \right| \cdot \Delta x \right)$	%
Масові годинні викиди додаткових чинників ЕНБ	– оксиди сірки $G(SO_x) = G_{fuel} \cdot k_{SO2}$, $k_{SO2} = 2 \cdot (C_{Sf} + C_{Of} \cdot C_{So}) / 100$; – діоксид вуглецю як токсичний полютант та як парниковий газ $G(CO_2) = G(CO_2)_{GH} = G_{fuel} \cdot 3,20 - G(CO) \cdot 1,59 -$ $- G(C_nH_m) \cdot 3,07 - G(PM) \cdot 2,85$, – бенз(а)пірен та інші ПАВ $G(B(a)P) = G(Б(a)П)_{me} / G(C_nH_m)_{me} \cdot k_{RICE} \cdot G(C_nH_m) =$ $= 18,0 \cdot 10^{-4} \cdot G(C_nH_m)$,	кг/год

Продовження таблиці 6.1

	чи $G(\text{B(a)P}) = G(\text{Б(a)П})_{me} / G(\text{PM})_{me} \cdot k_{RICE} \cdot G(\text{PM}) =$ $= 6{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot G(\text{PM}),$ $k_{RICE} = 5{,}0;$ $G(\text{PAH}) = 10{,}93 \cdot \text{G(B(a)P)},$ – аерозоль картерних газів $G(\text{CG}) = p_i \cdot k_{CG} \cdot k_{ts},$ $k_{CG} = \frac{G(CG)}{p_i}\Big\vert_{(n_{cz}=1200rpm;M_T=110H\cdot м)};$ $k_{ts} = G(\text{CG})_{CTC} / G(\text{CG})_{GTC};$ – суміш парів моторного палива, утворена за явищами малого і великого дихання резервуару $G(\text{RB}) = G(\text{SB}) + G(\text{IB}),$ $G(\text{SB}) = M(\text{SB}) / \tau_{SB} = G_{fuel} \cdot M(\text{SB}) / M_{fuel} = G_{fuel} \cdot 8{,}209 \cdot 10^{-3},$ $G(\text{IB}) = M(\text{IB}) / \tau_{IB} = (M_f(\text{IB})(\mu_{fuel};\rho_{fuel};t_0) + M_t(\text{IB})(\Delta p_{svf};t_0)) / \tau_{IB},$ – водяна пара $G(\text{H}_2\text{O}) = k(\text{H}_2\text{O}) \cdot G_{fuel},$ $k(\text{H}_2\text{O}) = C_f(\text{H}) \cdot 2 \cdot \mu(\text{H}_2\text{O}) / (4 \cdot \mu(\text{H})) = 1{,}08;$ – викид теплової енергії (еквівалент) $G(\text{Q}) = G_{fuel} \cdot (1 - \eta_e)$	
Безрозмірні індекси відносної агресивності додаткових чинників ЕНБ	– споживання моторного палива як невідновного енергоресурсу $A_{fuel} = \frac{\left(G_{fuel} + 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma\left(A(k) \cdot G(k)\right)\right)^2 - 2 \cdot \left(\sigma \cdot f \cdot \Sigma\left(A(k) \cdot G(k)\right)\right)^2}{\sigma \cdot f \cdot G_{fuel}^2};$ – відпрацьовані гази в цілому $A_{EG} = \frac{A_{PM} \cdot G_{PM} + A_{NOx} \cdot G_{NOx} + A_{CnHm} \cdot G_{CnHm} + A_{CO} \cdot G_{CO}}{G_{PM} + G_{NOx} + G_{CnHm} + G_{CO}} = 34{,}3;$ – оксиди сірки $A(\text{SO}_\text{x}) = 22$ – діоксид вуглецю як токсичний полютант та як парниковий газ $A(\text{CO}_2) = \text{MCP(CO)} / \text{MCP(CO}_2) \cdot (\rho(\text{CO}) \cdot \mu(\text{CO})) /$ $/ (\rho(\text{CO}_2) \cdot \mu(\text{CO}_2)) = 0{,}002;$ $A(\text{CO}_2)_{GH} = A(\text{CO}_2) \cdot k_{GH} = A_{fuel} \cdot G(\text{CO}_2)_{\Sigma RICE} / G(\text{CO}_2)_W = 4{,}0 \cdot 10^{-5};$ – бенз(а)пірен та інші ПАВ $A(\text{B(a)P}) = 12{,}6 \cdot 10^5;$ $A(\text{PAH}) = k_{IKA} \cdot A(\text{B(a)P}) = IKA_{ПАВ} / IKA_{Б(a)П} \cdot A(\text{B(a)P}) = 12{,}6 \cdot 10^3;$ – аерозоль картерних газів $A_{CG} = \frac{\left(A_{EG} \cdot G_{EG}^{CG} + A_{air} \cdot G_{air}^{CG} + A_{oil} \cdot G_{oil}^{CG}\right)}{G_{CG}} = 25{,}5;$ – суміш парів моторного палива, утворена за явищами малого і великого дихання резервуару $A(\text{RB}) = A_{fuel} = 38{,}4;$ – водяна пара $A(\text{H}_2\text{O}) = a_{H_2O} \cdot \alpha_{H_2O} \cdot \beta_{H_2O} \cdot \delta_{H_2O} = 1{,}976 \cdot 10^{-3};$ $a(H_2O) = \sqrt{\frac{ГДК_{сд}(CO) \cdot ГДК_{рз}(CO)}{ГДК_{сд}(H_2O) \cdot ГДК_{рз}(H_2O)}} = \sqrt{\frac{ГДК_{сд}(CO) \cdot ГДК_{рз}(CO)}{\rho^*(H_2O)^2(t)}};$ $\rho^*(\text{H}_2\text{O}) = 8{,}044 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 3{,}583 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 + 1{,}369 \cdot t + 6{,}219 \cdot 10^{-1}$, Па;	–

Закінчення таблиці 6.1

	– викид теплової енергії (еквівалент) $A_Q = A_{fuel} \cdot k_E = 28{,}8;$ $k_E = A_{fuel} \cdot E_{RICE} / E_W = 0{,}75;$ – ефективний ККД двигуна $A(\eta_e) = \frac{3600 \cdot N_e^2}{H_u \cdot A_{fuel}} = 84{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{N_e^2}{A_{fuel}}$	–
Значення часткової функції бажаності впливаючих чинників ЕНБ	– комплексний паливно-екологічний критерій $d(K_{fe}) = \exp\left[-\exp(0{,}666 - 4{,}425 \cdot 10^{-3} \cdot K_{fe})\right];$ чи $d(K_{fe}) = \exp\left[-\exp(a_k(g_e) + b_k(g_e) \cdot K_{fe})\right];$ $a_k = 2{,}075 \cdot 10^{-3} \cdot g_e + 0{,}181; R^2 = 1{,}0;$ $b_k = -2{,}462 \cdot 10^{-8} \cdot g_e^2 - 1{,}190 \cdot 10^{-5} \cdot g_e - 2{,}735 \cdot 10^{-4}; R^2 = 1{,}0;$ – масова годинна витрата моторного палива $d(G_{fuel}) = \exp\left[-\exp(-1{,}716 + 0{,}447 \cdot G_{fuel})\right];$ – масові годинні викиди законодавчо нормованих полютантів $d(G(PM)) = \exp\left[-\exp(-1{,}613 + 0{,}092 \cdot G(PM))\right];$ $d(G(NO_x)) = \exp\left[-\exp(-1{,}530 + 0{,}006 \cdot G(NO_x))\right];$ $d(G(C_nH_m)) = \exp\left[-\exp(-2{,}338 + 0{,}493 \cdot G(C_nH_m))\right];$ $d(G(CO)) = \exp\left[-\exp(-1{,}609 + 0{,}016 \cdot G(CO))\right];$ – масові годинні викиди чинників ЕНБ $d(G(SO_x)) = \exp\left[-\exp(-1{,}716 + 0{,}030 \cdot G(SO_x))\right];$ $d(G(CO_2)) = d(G(CO_2)_{GH}) = \exp\left[-\exp(-1{,}699 + 1{,}412 \cdot 10^{-4} \cdot G(CO_2))\right];$ $d(G(B(a)P)) = \exp\left[-\exp(-1{,}619 + 0{,}689 \cdot G(B(a)P))\right];$ $d(G(PAH)) = \exp\left[-\exp(-1{,}619 + 0{,}063 \cdot G(PAH))\right];$ $d(G(CG)) = \exp\left[-\exp(-1{,}676 + 1{,}315 \cdot G(CG))\right];$ $d(G(RB)) = \exp\left[-\exp(-1{,}777 + 0{,}055 \cdot G(RB))\right];$ $d(G(H_2O)) = \exp\left[-\exp(-1{,}716 + 0{,}414 \cdot G(H_2O))\right];$ $d(G(Q)) = \exp\left[-\exp(-1{,}864 + 0{,}767 \cdot G(Q))\right];$ $d(\eta_e) = \exp\left[-\exp(0{,}508 - 5{,}311 \cdot \eta_e)\right];$ $d(\Sigma(A(k) \cdot G(k))) = \exp\left[-\exp(-1{,}583 + 0{,}111 \cdot \Sigma(A(k) \cdot G(k)))\right];$	–
Еталонне значення вагомості паливної складової	$A_{fuel} = (((G_{fuel}(\eta_e) + 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma(A_k \cdot G_k)(\text{EURO}))^2 -$ $- 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma(A_k \cdot G_k)(\text{EURO})^2) / (\sigma \cdot f \cdot G_{fuel}(\eta_e)^2)$	–

Таблиця 6.2 – Математичний апарат індексу ефективності роботи ФТЧ I_{DPF}

Модель	Формула	Од. вим.
Індекс та умова початку процесу регенерації ФТЧ	$I_{DPF} = \frac{A(PM)\cdot G(PM)_{RICE}}{A_{fuel}\cdot G_{fuel}} \cdot \frac{K_{CE}(G(PM))}{\delta G_{fuel}} = f(L_{DPF};\tau_{DPF})$ $\begin{cases} 0{,}1 \le I_{DPF} \le 1{,}0 \rightarrow RGN = OFF \\ I_{DPF} \le 0{,}1 \rightarrow RGN = ON \end{cases}$	–
Вагомість витрат палива	$\frac{\partial K_{fe}}{\partial G_{fuel}} = \frac{\partial K_{fe}}{\partial G(k)}$ $A_{fuel} = \frac{\left(G_{fuel} + 2\cdot\sigma\cdot f\cdot\Sigma(A(k)\cdot G(k))\right)^2 - 2\cdot(\sigma\cdot f\cdot\Sigma(A(k)\cdot G(k)))^2}{\sigma\cdot f\cdot G_{fuel}^2}$	–
Сумарний приведений масовий годинний викид полютантів	$\Sigma(A(k)\cdot G(k)) = A(PM)\cdot G(PM) + A(NO_x)\cdot G(NO_x) +$ $+ A(C_nH_m)\cdot G(C_nH_m) + A(CO)\cdot G(CO)$	кг/год
Вагомість полютантів	$A(PM) = 200\ ;\ A(NO_x) = 41{,}1\ ;\ A(C_nH_m) = 3{,}2\ ;\ A(CO) = 1\ ;$ $A_k = a_k\cdot\alpha_k\cdot\beta_k\cdot\delta_k$ $a_k = \sqrt{ПДК_{сс}(CO)\cdot ПДК_{рз}(CO)/(ПДК_{сс}(k)\cdot ПДК_{рз}(k))}$	–
Умови експлуатації ПДВЗ	$\sigma = 1\ ;\ f = 1$ $f = 100/(100 + \varphi\cdot h)\cdot 4/(1+u)\ ;\ \varphi = 1 + \Delta T/75$ σ – безрозмірний показник відносної небезпеки забруднення на різних територіях, f – безрозмірний коефіцієнт, що враховує характер розсіювання ВГ в атмосфері	–
Масовий годинний викид ТЧ	$G(PM) = A\cdot N_D\cdot(D\cdot G_{air} + H\cdot G_{fuel}) + B\cdot N_D^2\cdot(D\cdot G_{air} + H\cdot G_{fuel}) +$ $+ C\cdot C_{CH}\cdot(G_{EG}) + M\cdot C_{CH}^2\cdot(G_{EG})^2/(D\cdot G_{air} + H\cdot G_{fuel})$ $A = 2{,}3\cdot10^{-6}$ кг/(год·%); $B = 5{,}0\cdot10^{-8}$ кг/(год·%^{2}); $C = 6{,}93\cdot10^{-9}$; кг/(год·ppm); $D = 0{,}7734$; $H = 0{,}7239$; $M = 7{,}54\cdot10^{-17}$ кг/(год·ppm^2)	кг/год
Формули перерахунку показників димності ВГ	$K = -\ln(1 - N/100)/L\ ;\ N = 100 - \tau\ ;\ \tau = I/I_0\cdot100$ $N = 100\cdot(1 - \exp(-\varepsilon\cdot l\cdot C))\ ;\ C_C = \ln(1 - N/100)/(\varepsilon\cdot l)\ ;\ \varepsilon = 3\cdot d_A^2/(2\cdot\rho\cdot d_v^3)$ $C_C = 565\cdot\left(\ln\left(\frac{10}{10 - BSU}\right)\right)^{1{,}206}$ $C_C = (-184\cdot BSU - 727{,}5)\cdot\log(1 - BSU/10)$ $HSN = -2{,}64\cdot10^{-4}\cdot BSU^2 + 0{,}111642\cdot BSU - 1{,}023\cdot10^{-3}$	м$^{-1}$, %, мг/м^3, HSN, BSU
Масові годинні витрати палива, повітря та ВГ	$G_{fuel} = f(n_{cs};M)\ ;\ G_{air} = f(n_{cs};M)\ ;$ $G_{EG} = G_{fuel} + G_{air} = f(n_{cs};M)$	кг/год

Продовження таблиці 6.2

Масовий годинний викид NO_x, C_nH_m і CO	$G(NO_x)=1{,}587\cdot10^{-3}\cdot C_V(NO_x)\cdot F(NO_x)\cdot(G_{fuel}+G_{air})$ $G(CO)=9{,}66\cdot10^{-4}\cdot C_V(CO)\cdot F(CO)\cdot(G_{fuel}+G_{air})$ $G(C_nH_m)=4{,}78\cdot10^{-4}\cdot C_V(C_nH_m)\cdot(G_{fuel}+G_{air})$	кг/год
	$F(NO_x)=\begin{pmatrix}1+(0{,}044\cdot G_{fuel}/G_{air}-0{,}0038)\cdot(7\cdot d-75)+\\+(0{,}0053-0{,}116\cdot G_{fuel}/G_{air})\cdot1{,}8\cdot(T_0-302)\end{pmatrix}^{-1}$ $d=6{,}21\cdot\varphi_0\cdot P_s/(B_0-0{,}01\cdot\varphi_0\cdot P_s)$ $F(CO)=1-1{,}85\cdot G_{fuel}/G_{air}$ $P_s=6{,}1121\cdot\exp((18{,}678-t_0/234{,}5)\cdot t_0/(257{,}14+t_0))$	
Коефіцієнт ефективності очищення потоку ВГ від ТЧ	$K_{CE}(G(PM))=\dfrac{G(PM)_{RICE}-G(PM)_{DPF}}{G(PM)_{RICE}}\cdot100=$ $=f(g_{mEG}(n_{cs};M))\cdot k_L(L_{DPF})\cdot k_\tau(\tau_{DPF};N_e;WF)$	%
Ефективна потужність двигуна	$N_e=\dfrac{n_{cs}\cdot M}{9550}$	кВт
Параметри режиму роботи	n_{cs} – частота обертання колінчастого валу; M – крутний момент; WF – ваговий фактор	rpm Н·м –
Питомі масові годинні витрати ВГ	$g_{mEG}=\dfrac{G_{EG}}{S_{in}\cdot z_m}$	кг/с/м^2
Похибка отримання значення критерію	$\delta K_{fex}=\dfrac{\Delta K_{fe}}{K_{fe}}\cdot100=\Sigma\left(\left\lvert\dfrac{\partial K_{fe}}{\partial x}\right\rvert\cdot\Delta x\right)$	%
Похибки отримання значень викидів	$\delta G(k)_x=\dfrac{\Delta G(k)}{G(k)}\cdot100=\Sigma\left(\left\lvert\dfrac{\partial G(k)}{\partial x}\right\rvert\cdot\Delta x\right)$	%
Відносна зміна масової годинної витрати палива	$\delta G_{fuel}=\dfrac{\Delta G_{fuel}}{G_{fuel}}\cdot100$	%
Абсолютна зміна масової годинної витрати палива	$\Delta G_{fuel}=\dfrac{\partial G_{fuel}}{\partial p_i}\cdot\Delta p_i$ $\dfrac{\partial G_{fuel}}{\partial p_i}=\dfrac{z\cdot V_h\cdot n_{cs}\cdot3600}{\tau\cdot3\cdot10^3\cdot Q_н\cdot\eta_i}$ $\Delta p_i=\lvert\Delta p_м\rvert=\Delta p_{DPF}$	кг/год
Теплотворна здатність палива	$Q_н=42{,}7$	МДж/кг
Гідравлічний опір ФТЧ	$\Delta p_{DPF}=f(g_{mEG}(n_{cs};M))\cdot k_0\cdot k_t(t_{EG})\cdot k_L(L_{DPF})\cdot k_\tau(\tau_{DPF})$	Па

6.5 Практична реалізація Кроку № 12 алгоритму управління

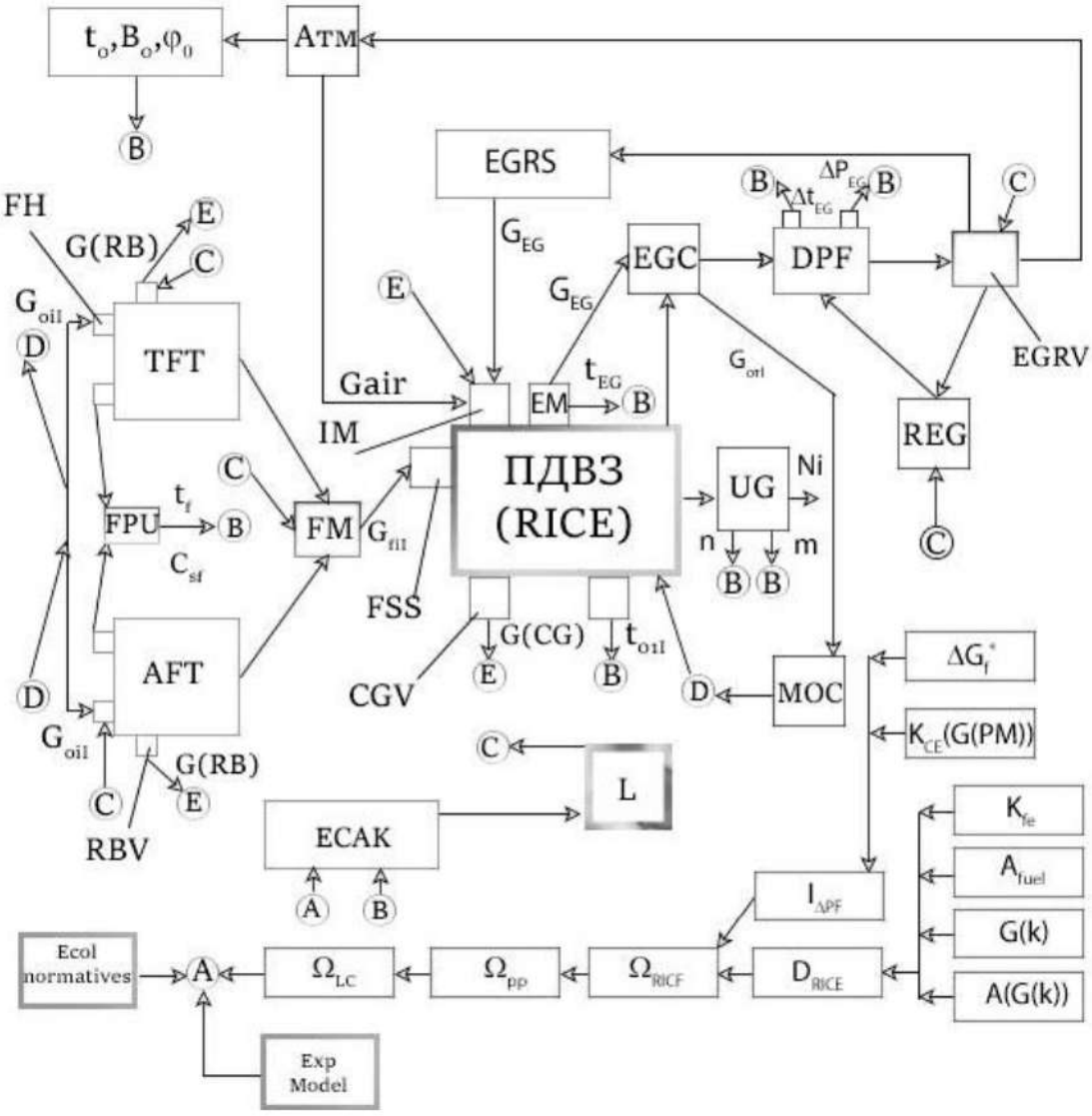
Для випадку застосування розробленого алгоритму для забезпечення певного рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ зі значним ступенем фізичного і морального зносу, що не мають виконавчих пристроїв ТЗНС, але не можуть бути виведеними з експлуатації, розроблено відповідну ТЗНС з удосконаленим режимом роботи та запровадженням певних способів підвищення рівня її екологічної безпеки (рис. 6.4).

За принципом побудови такої ТЗНС досягається синергетичний ефект від взаємоузгодженості та взаємодії результатів функціональних ланцюгів складових системи захисту атмосферного повітря від техногенного впливу.

Ланцюг «Теплова енергія» – відведення потоку ВГ у холодильник перед очищенням від ТЧ у ФТЧ, охолодження ВГ моторною оливою, охолодження моторної оливи повітрям, підігрів рідинного традиційного та альтернативного моторного палива у резервуарах. Результат – зменшення в'язкості рідинних палив і покращення показників роботи системи паливоподачі, що приводить до покращення перебігу робочого процесу і зменшення вмісту продуктів неповного згоряння палива у ВГ.

Ланцюг «Відпрацьовані гази» – охолодження ВГ у холодильнику, очищення ВГ у ФТЧ, подача частини потоку ВГ крізь триходовий клапан ФТЧ у систему рециркуляції ВГ, подача іншої частину ВГ з клапану до системи регенерації ФТЧ І роду, що реалізується шляхом наведення низькотемпературної плазми у ВГ. Результат – розбавлення свіжого заряду інертним газом і зниження викиду оксидів азоту, зменшення утворення оксидів азоту у ВГ при регенерації ФТЧ.

Ланцюг «Суфлювання» – відведення потоку картерних газів з піддону ПДВЗ і парів рідкого традиційного та альтернативного моторного палива з відповідних резервуарів до системи рециркуляції ВГ, змішування за потоком рециркульованих очищених у ФТЧ і охолоджених у холодильнику ВГ та подача у свіжий заряд. Результат – нейтралізація викидів картерних газів і парів рідинного моторного палива шляхом спалювання у камері згоряння ПДВЗ.



RICE – ПДВЗ, IM – впускний колектор, EM – випускний колектор, TFT – резервуар з традиційним дизпаливом, AFT – резервуар з альтернативним дизпаливом, FM – змішувач моторного палива, FSS – система паливоподачі двигуна, FH – нагрівач моторного палива, RBV – дихальний клапан резервуару, CGV – клапан системи суфлювання картерних газів, EACS – ECAK, UG – електрогенератор, EGRS – система рециркуляції ВГ, EGC – холодильник ВГ, DPF – ФТЧ, EGRV – триходовий клапан перепуску ВГ, REGS – плазмова система регенерації ФТЧ І роду, MOC – радіатор охолодження моторної оливи, ChT – характеристична карта ЕБУ ECAK, FPU – блок визначення параметрів моторного палива

Рисунок 6.4 – Розроблена технологія захисту навколишнього середовища для енергоустановок з поршневим ДВЗ зі значним ступенем фізичного і морального зносу, що не мають виконавчих пристроїв технології захисту, але не можуть бути виведеними з експлуатації

На рис. 6.5 наведено результати визначення ефекту δD_{RICE} від застосування розробленої ТЗНС для різних варіантів врахування синергетичного ефекту для всього поля робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12. На рис. 6.5: варіант А – базовий варіант – ПДВЗ без ТЗНС (з ним виконувалось порівняння); варіант В – ПДВЗ з некерованим ФТЧ (рис. 6.5,а); варіант С – ПДВЗ з керованим ФТЧ (рис. 6.5,б); варіант D – варіант «С» з рециркуляцією ВГ (рис. 6.5,в); варіант Е – варіант «D» з рекуперацією теплової енергії (рис. 6.5,г); варіант F – варіант «Е» з переведенням двигуна на споживання альтернативного палива (рис. 6.5,д).

На рис. 6.5 видно, що включення у синергетичний ланцюг чергової ланки суттєво підвищує значення інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} для режимів з малою ефективною потужністю та для режимів зовнішньої швидкісної характеристики двигуна. Для режимів з середньою ефективною потужністю ефект від застосування як окремих виконавчих пристроїв, так і синергетичного ланцюга з них, не є настільки вираженим. Це пояснюється тим, що для ПДВЗ такого призначення – автотракторні та транспортні – саме для режимів зовнішньої швидкісної характеристики узгоджують регулювальні параметри двигуна з метою досягнення якомога вищих значень техніко-економічних показників роботи, відсуваючи на другорядні позиції екологічні показники роботи.

На рис. 6.6 наведено розподіл значень визначення інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} зі структурою врахованих чинників екологічної небезпеки, аналогічній критерію K_{fe}, для ПДВЗ без ТЗНС (рис. 6.6,а) та із застосуванням ТЗНС із синергетичним ланцюгом зі всіма запропонованими ланками (рис. 6.6,б).

На рис. 6.6 видно, що значення інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} для режимів роботи двигуна характеристики холостого ходу перетнуло межу значення психофізичної шкали «відмінно» (тобто більше за 0,8), для режимів зовнішньої швидкісної характеристики – перетнуло межу психофізичної шкали «задовільно» (тобто більше за 0,32), а подекуди впритул наблизилось до значення психофізичної шкали «добре» (тобто більше за 0,63).

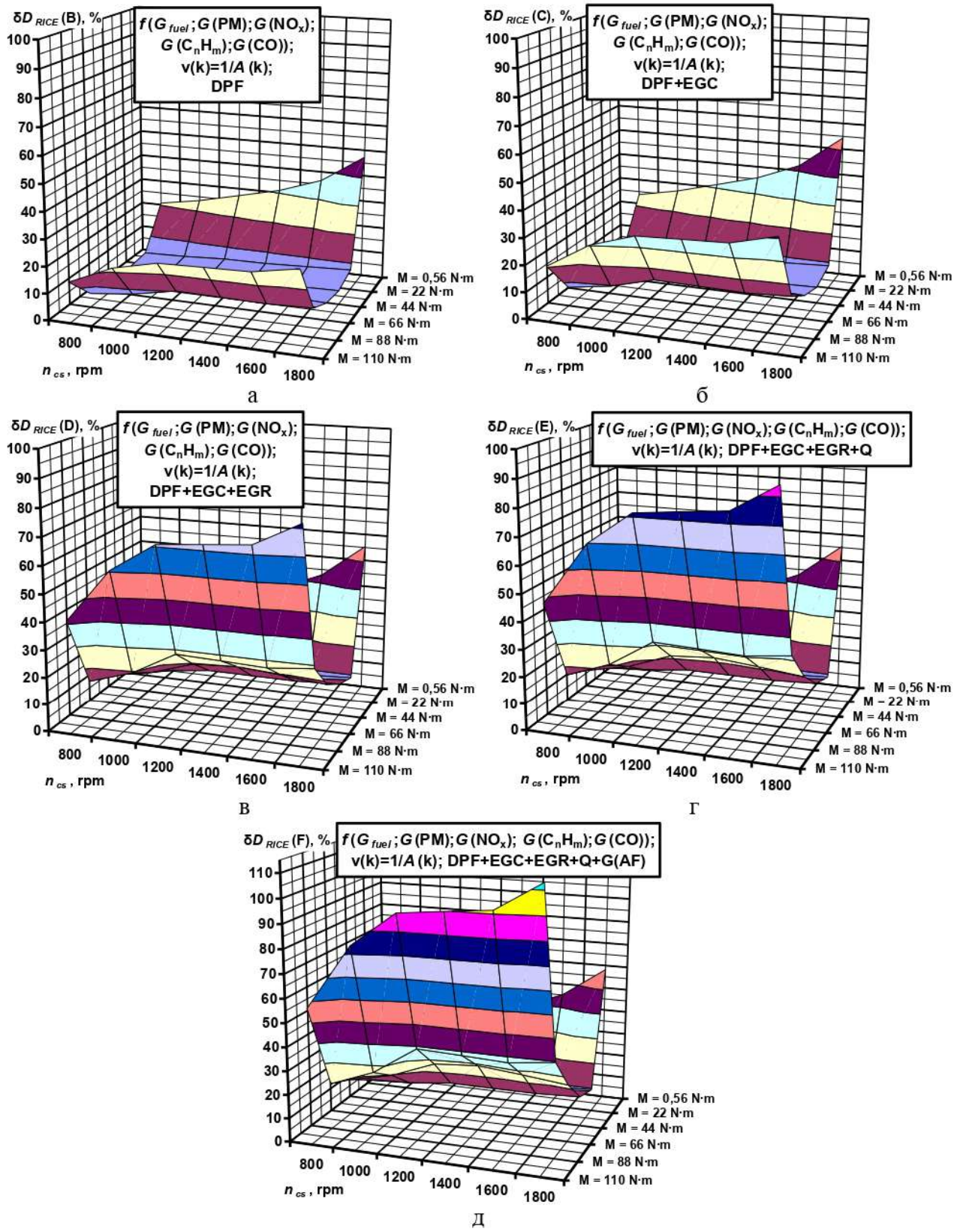
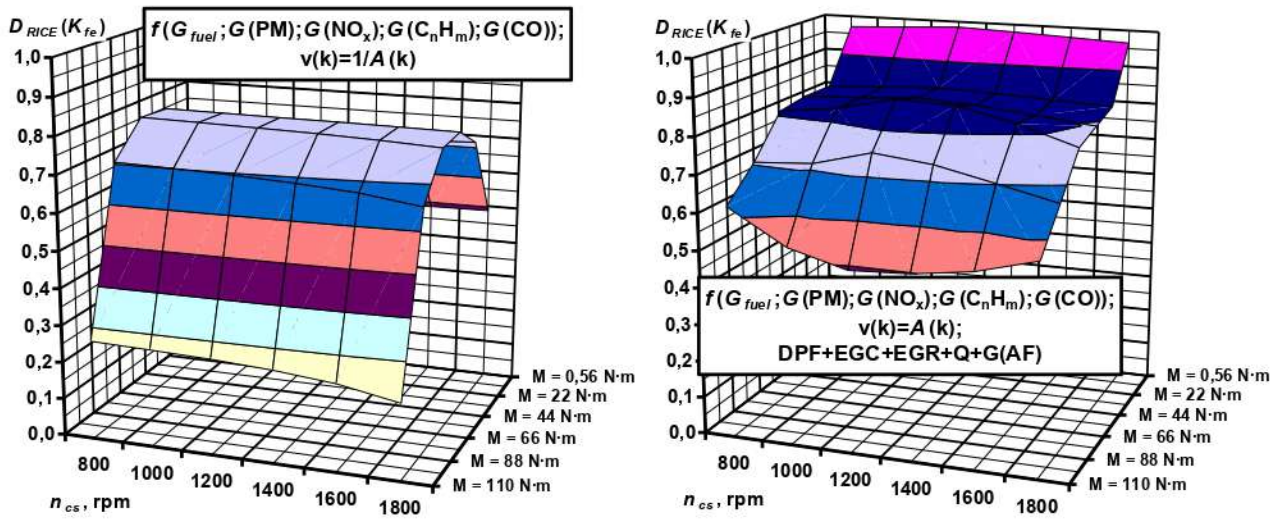


Рисунок 6.5 – Розподіл значень інтегративного показника ефекту від застосування ФТЧ та розробленої технології захисту навколишнього середовища за робочими режимами дизеля 2Ч10,5/12 для різних варіантів будови синергетичного ланцюга



а б

Рисунок 6.6 – Розподіл значень інтегративного показника ефекту від застосування ФТЧ та розробленої технології захисту навколишнього середовища за робочим режимом дизеля 2Ч10,5/12 для різних варіантів врахування синергетичного ефекту

На рис. 6.7 і 6.8 проілюстровано результати дослідження ефективності функціонування ТЗНС для різних варіантів синергетичного ланцюга та відносно нормативних вимог EURO. Це усереднені за полем робочих режимів двигуна значення інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} та ефекту δD_{RICE} від застосування розробленої ТЗНС.

На рис. 6.7 видно, що обладнання випускної системи дизеля ФТЧ, що є некерованим за температурою ВГ на вході, дає усереднене за полем робочих режимів двигуна значення ефекту δD_{RICE} складає 14,6 % (варіант B); обладнання керованим ФТЧ дає значення δD_{RICE} = 19,4 % (варіант C); поєднання керованого ФТЧ і рециркуляції ВГ дає значення δD_{RICE} = 31,1 % (варіант D); включення у цей ланцюг рекуперації теплової енергії охолоджувача ВГ дає значення δD_{RICE} = 35,0 % (варіант E); введення у ланцюг споживання альтернативного палива як відновного енергоресурсу дає значення δD_{RICE} = 41,7 % (варіант F).

На рис. 6.8 видно, що оцінюваний ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу до побудови для нього ТЗНС не відповідав вимогам екологічного стандарту рівня EURO I, характеризувався значенням усередненим за полем робочих режимів інтегративного показника D_{RICE} рівним 0,515, у той час як для рівня EURO I усереднене значення інтегративного показника D_{RICE} дорівнює 0,683. Після запровадження роз-

робленої ТЗНС з повним набором ланок синергетичного ланцюга значення інтегративного показника D_{RICE} для двигуна склало 0,730, що лише на 3,2 % менше, ніж таке значення для рівня EURO III – 0,754.

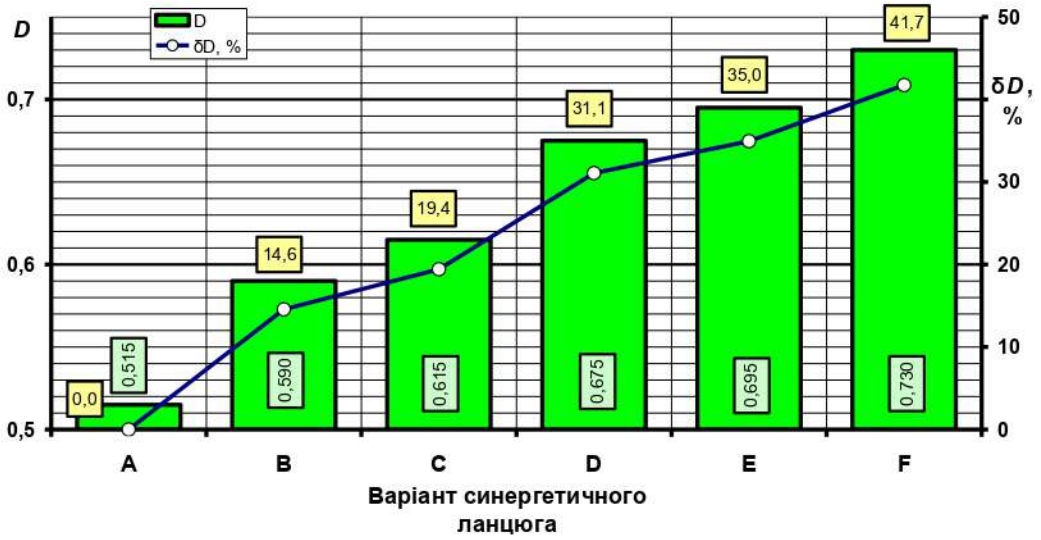


Рисунок 6.7 – Результати досягнення ефективності функціонування технології захисту навколишнього середовища для різних варіантів синергетичного ланцюга

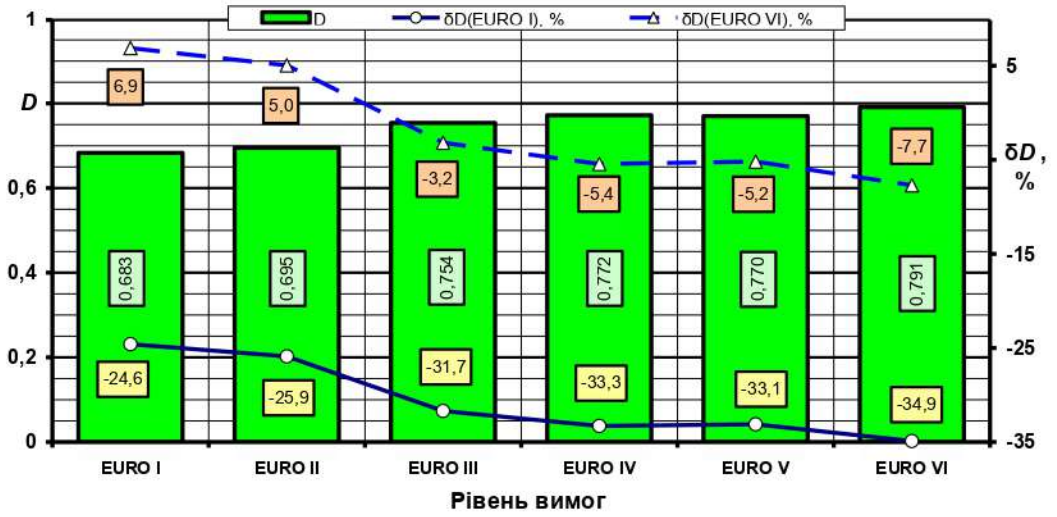


Рисунок 6.8 – Результати порівняння досягненого рівня ефективності функціонування технології захисту навколишнього середовища зі значеннями для нормативних вимог EURO

На рис. 6.9 надано порівняння випадків окремого застосування компонентів технології захисту навколишнього середовища та побудови з них синергетичного ланцюга.

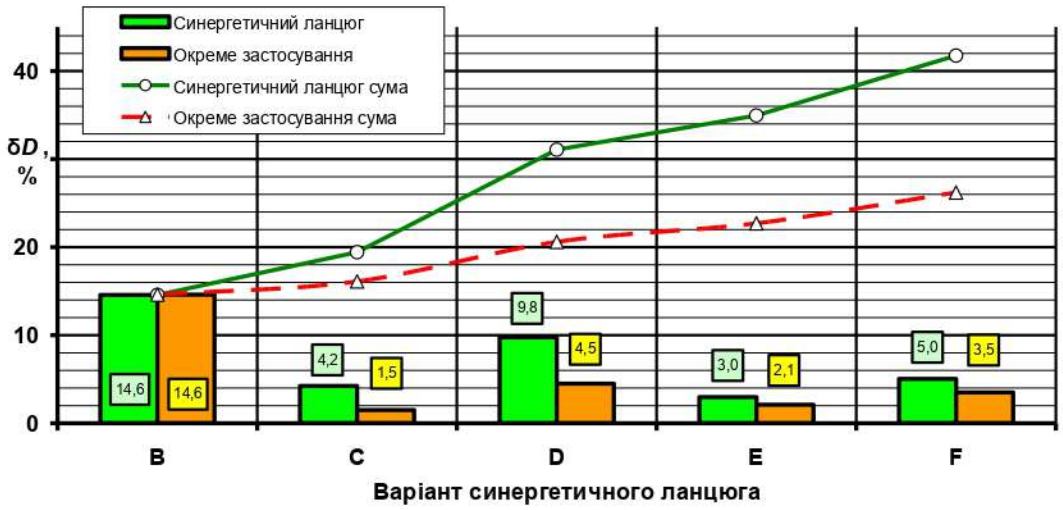


Рисунок 6.9 – Порівняння випадків окремого застосування компонентів технології захисту навколишнього середовища та побудови з них синергетичного ланцюга

На рис. 6.9 видно, що введення охолодження потоку ВГ на вході у ФТЧ (варіант С) дає приріст ефекту δD_{RICE} рівний 4,2 % (додатково до ефекту від застосування некерованого ФТЧ δD_{RICE} = 14,6 % (варіант В)) за рахунок підтримання щонайвищої ефективності очищення потоку ВГ від ТЧ на усіх режимах роботи двигуна. Охолодження ВГ без встановлення ФТЧ дає значно менший ефект δD_{RICE} рівний 1,5 % завдяки зменшенню гідравлічного опору усіх інших елементів випускного тракту двигуна. Застосування рециркуляції ВГ у поєднанні з керованим ФТЧ (варіант D) дає приріст ефекту δD_{RICE} рівний 9,8 % завдяки зниженню утворення оксидів азоту в камері згоряння двигуна. Застосування рециркуляції ВГ, що не охолоджені і не очищені у ФТЧ дає приріст ефекту δD_{RICE} рівний 4,5 %. Включення у цей ланцюг рекуперації теплової енергії охолоджувача ВГ (варіант Е) дає приріст ефекту δD_{RICE} = 3,0 % через покращення фізичних властивостей рідинних палив (традиційного і альтернативного) у резервуарах ЕУ, покращення у зв'язку з цим процесу паливоподачі та, відповідно, робочого процесу двигуна. За умови відсутності відведення теплової енергії потоку ВГ у холодильнику ФТЧ дає приріст ефекту δD_{RICE} рівний 2,1 % через підвищення загального ККД енергоустановки. Введення у ланцюг споживання альтернативного палива (варіант F) дає значення приріст ефекту δD_{RICE} рівний 5,0 %, що пояснюється зменшенням витрати невідновного енергоресурсу. Такий захід без підігріву рідинного альтернативного палива від рекуперованої теплової енергії дає приріст ефекту δD_{RICE} рівний 3,5 %.

Встановлено, що ефективність функціонування розробленої ТЗНС для ПДВЗ зі значним ступенем фізичного зносу суттєво підвищується за рахунок реалізації синергетичних ланок, а саме на 60 % – значення ефекту δD_{RICE} для ПДВЗ, оснащеного ТЗНС з об'єднаними у синеретичний ланцюг ланками (виконавчими пристроями) складає 41,7 %, а для обладнаного ТЗНС, елементи якої у такий ланцюг не об'єднано значення ефекту дорівнює 26,2 %.

Таким чином, ефективність функціонування розробленої ТЗНС для ПДВЗ зі значним ступенем фізичного зносу суттєво підвищується за рахунок реалізації синергетичних ланок, що чисельно оцінюється за допомогою розробленого інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE}.

6.6 Практична реалізація зворотного зв'язку в алгоритмі управління

Розроблена ТЗНС є матеріальною основою розробленої СУЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу. Етап 4 такої СУЕБ (див. рис. 4.5 у розділі 4) повинен реалізовувати оцінювання ефективності функціонування самої СУЕБ шляхом здійснення критеріального оцінювання ефекту від роботи ТЗНС та застосування системи моніторингу. У загальному виді схема системи моніторингу для СУЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ з довільним ступенем фізичного зносу (від незначного до критичного) наведена на рис. 4.10 у розділі 4.

Для ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу найчастіше притаманним є і високий ступінь морального зносу. Це зумовлює обмеженість елементної бази системи автоматичного керування ЕУ – датчиків, актуаторів, виконавчих пристроїв, елементів керування (у тому числі й механічних регуляторів). Тому наявний брак інформаційних ресурсів – показів датчиків – для формування набору вихідних даних для здійснення комплексного критеріального оцінювання та використання його результатів для моніторингу стану екологічної безпеки ПДВЗ, ТЗНС і всієї ЕУ та управління рівнем екологічної безпеки експлуатації ЕУ. Для таких ЕУ в роботі розроблено схему системи моніторингу, що враховує обмеженість елементної бази системи управління двигуном і ТЗНС, наведену на рис. 6.10.

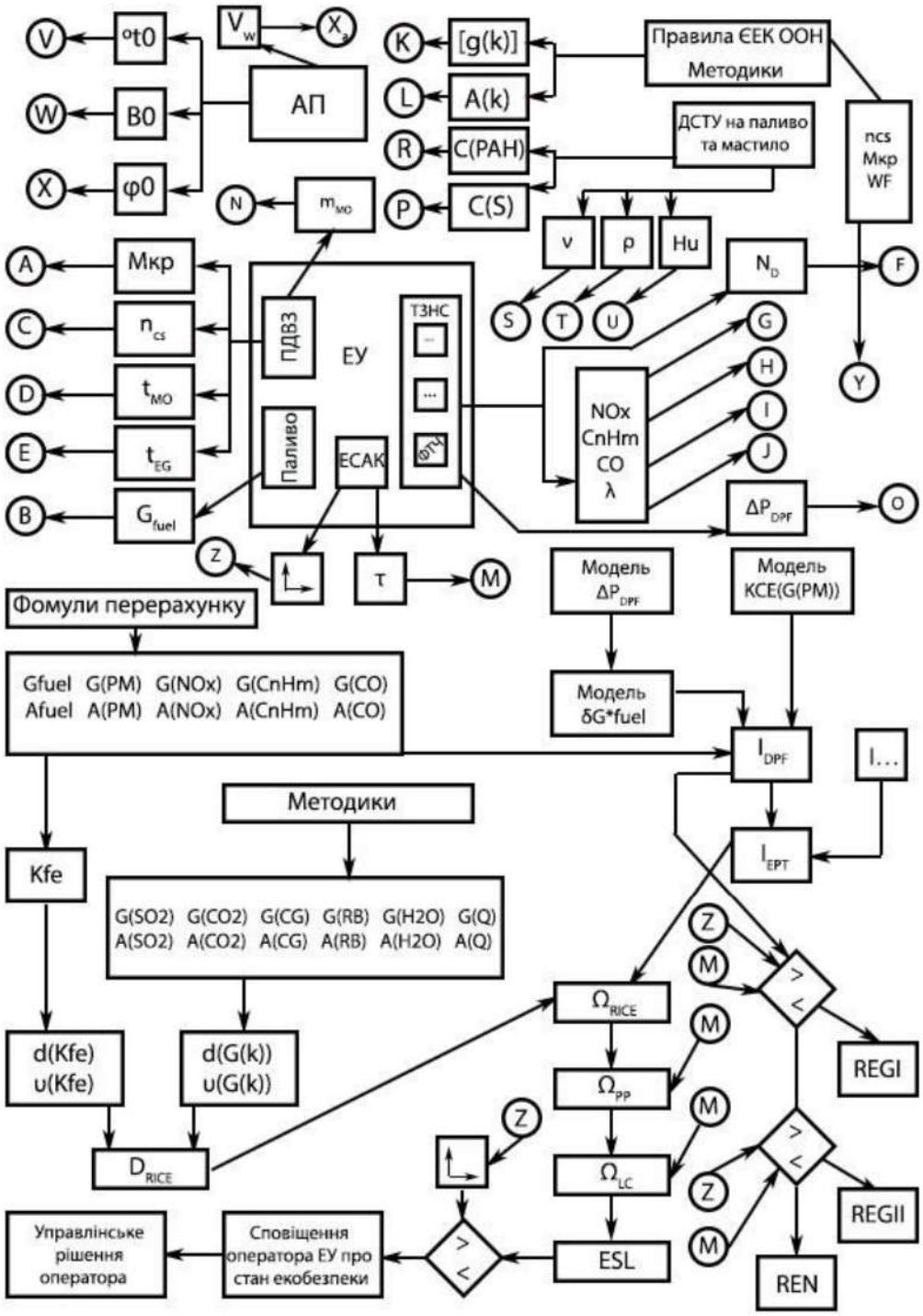


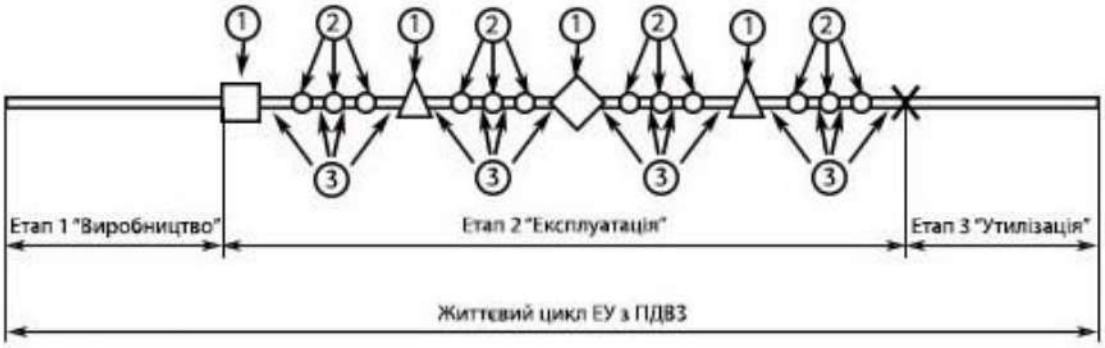
Рисунок 6.10 – Схема системи моніторингу роботи системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу і обмеженою елементною базою системи управління

Основною особливістю запропонованої схеми системи моніторингу є дискретність здійснення процедури оцінювання показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ зі значним ступенем фізичного і морального зносу.

Другою особливістю цієї системи моніторингу є використання показів датчи-

ків та ЗВТ, що не встановлені на борту ЕУ і не присутні у системі управління ПДВЗ і ТЗНС, а розміщуються у пунктах централізованого контролю показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ. Це димомір і багатокомпонентний газоаналізатор, датчики якості моторного палива і моторної оливи, датчики параметрів атмосферного повітря, датчик перепаду тиску на ФТЧ тощо.

Таким чином, пропонується здійснювати процедуру моніторингу в особливих точках діаграми життєвого циклу ЕУ з ПДВЗ (див. рис. 6.11), а саме: а) при перевірці справного стану при запуску в експлуатацію, після поточного чи капітального ремонту; б) при перевірці працездатності після технічного обслуговування, транспортування, зберігання; в) при перевірка правильності функціонування впродовж обраних за графіком моментів реального часу.



□ – запуск у експлуатацію; ○ – технічне обслуговування; Δ – поточний ремонт;
◊ – капітальний ремонт; × – виведення з експлуатації; 1 – перевірка справного стану;
2 – перевірка працездатності; 3 – перевірка правильності функціонування

Рисунок 6.11 – Діаграма життєвого циклу ЕУ з ПДВЗ

6.7 Висновки по розділу 6

Таким чином, цьому розділі дисертаційної роботи отримано такі результати.

1. Набули подальшого розвитку науково-методологічні основи побудови схеми комплексної технології захисту атмосферного повітря при експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, що не відповідають чинним вимогам ЕБ і не можуть бути виведені з неї на етапі ЖЦ «безаварійна експлуатація».

Це дозволило отримати синергетичний ефект від комплексу природозахисних технологічних заходів – охолодження, очищення і рециркуляції відпрацьованих газів, утилізації їх теплової енергії, переведення двигуна на споживання альтернативного моторного палива як відновного енергоресурсу і раціоналізації структури моде-

лі його експлуатації.

2. Здійснено критеріальне оцінювання ефективності застосування ФТЧ та інших виконавчих пристроїв ТЗНС для дизельного ПДВЗ за допомогою інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} для різних варіантів складу синергетичного ланцюга, що побудований з використанням взаємоузгодженого принципу роботи.

Встановлено, що при застосуванні такого синергетичного ланцюга для ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, що не відповідав вимогам ЕБ рівня EURO I, вдається підвищити показники ЕБ до вимог рівня EURO III і таким чином знизити техногенне навантаження на атмосферне повітря на 42 %. Виявлено, що ефективність функціонування розробленої ТЗНС для ПДВЗ зі значним ступенем фізичного зносу підвищується за рахунок реалізації синергетичних ланок на 60 %.

3. Розроблено систему моніторингу роботи системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу і обмеженою елементною базою системи управління та надано періодичність і умови здійснення процедури моніторингу.

5. Розроблена схема комплексної ТЗНС впроваджена для розробки переліку рекомендацій щодо забезпечення нормативно встановленого рівня комплексу показників екологічної безпеки при безаварійній експлуатації транспортних і електрогенеруючих ЕУ з ПДВЗ, мотор-компресорів газотранспортної системи і газовидобувних станцій на ТОВ «Армко-Інжинірінг» (м. Київ); транспортних і електрогенеруючих ЕУ з ПДВЗ на ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «Харківський насосний завод» (м. Харків); моторного стенду з автотракторним дизелем відділу воднева енергетики Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України (м. Харків). Це підтверджено актами впровадження та довідками про використання результатів дисертаційного дослідження, що свідчить про достовірність і відтворюваність отриманих теоретичних результатів.

Тобто вирішено задачу дослідження № 6 та тим самим вичерпано його програму. Мети дослідження досягнуто.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішена науково-прикладна проблема з розробки методологічних основ системи комплексного оцінювання рівня екологічної безпеки технології захисту атмосферного повітря при роботі енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу на етапі життєвого циклу «безаварійна експлуатація» та системи управління технологією захисту навколишнього середовища, що дозволило отримати такі наукові результати.

1. Вдосконалено систему класифікації способів роботи та конструкції фільтрів твердих частинок і систему класифікацій засобів реалізації процесу їх регенерації як складових методологічного забезпечення розробки технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу. Відповідно до результатів аналітичного огляду літературних джерел інформації у цій галузі наукових досліджень встановлено неможливість використання існуючих систем класифікації пристроїв технологій захисту навколишнього середовища в енергоустановках, в яких технічний стан поршневого ДВЗ не відповідає чинним вимогам екологічної безпеки. Це дозволило звернути увагу на додаткові чинники техногенного впливу на атмосферне повітря відпрацьованих газів енергоустановок з фізично зношеними поршневими ДВЗ, зокрема підвищену димність відпрацьованих газів. У роботі для уникнення прояву цього фактору запропоновано конструкцію і спосіб роботи фільтру твердих частинок.

2. Набули подальшого розвитку методологічні засади побудови технологій захисту навколишнього середовища при експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, які не відповідають чинним вимогам екологічної безпеки і не можуть бути виведені з експлуатації. Аналіз існуючих методологічних розробок з комплексного оцінювання техногенного впливу на стан атмосферного повітря таких поршневих ДВЗ встановив, що існують додаткові чинники негативної дії на екологічний стан повітря, зумовлені розбіжністю вимог законодавчих екологічних обмежень щодо якості моторного палива та екологічних вимог до складу відпрацьованих газів. Це визначило за необхідне впровадити інтегративний прин-

цип побудови системи оцінювання екологічної якості експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу – надання окремої оцінки безпечності роботи поршневого ДВЗ і технології захисту навколишнього середовища у складі енергоустановки.

3. Вперше науково обґрунтовано структуру інтегративного показника рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу. Показник враховує особливості та повний перелік чинників негативного впливу на атмосферне повітря технічного об'єкту, що не відповідає чинним вимогам екологічної безпеки, на етапі його життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Відповідно до прийнятої концепції оцінювання окремо екологічної безпеки роботи поршневих ДВЗ і технології захисту навколишнього середовища у енергоустановці запропоновано до інтегративної оцінки включити комплексний паливно-екологічний критерій у якості окремого самостійного чинника техногенного впливу на стан атмосферного повітря.

4. Вперше розроблено наукові основи системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу на етапі їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Надана система управління дозволяє врахувати пріоритетність екологічних показників роботи енергоустановки з поршневим ДВЗ над техніко-економічними на цьому етапі життєвого циклу. Набули подальшого розвитку методологічні засади побудови системи моніторингових заходів щодо встановлення стану атмосферного повітря. Відповідно до результатів дослідження особливостей функціонування системи управління екологічною безпекою запропоновано нетрадиційної конструкції фільтр твердих частинок як складової технології захисту навколишнього середовища енергоустановок. Визначено доцільним запровадити інтегративну основу оцінювання екологічної якості роботи такої системи управління екологічною безпекою при експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ зі значним ступенем зносу.

5. Вперше науково обґрунтовано методологію побудови та використання індексу ефективності функціонування фільтра твердих частинок, що є частиною технології захисту навколишнього середовища в енергоустановці з поршневим ДВЗ.

Отримано результати щодо підвищення рівня екологічної безпеки при застосуванні комплексу технологічних і технічних рішень у разі сумісної роботи поршневого ДВЗ тривалої експлуатації і технології захисту навколишнього середовища. Це дозволило отримати синергетичний ефект у забезпеченні екологічно безпечного функціонування поршневого ДВЗ і технології захисту навколишнього середовища у складі енергоустановки, а таким чином знизити техногенне навантаження на атмосферне повітря на 42 % та наблизити показники такої енергоустановки до виконання вимог екологічних нормативів рівня EURO III.

6. Набули подальшого розвитку науково-методологічні основи побудови схеми комплексної технології захисту атмосферного повітря при експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, що не відповідають чинним вимогам екологічної безпеки і не можуть бути виведені з неї на етапі життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Це дозволило отримати синергетичний ефект від комплексу природозахисних технологічних заходів – охолодження, очищення і рециркуляції відпрацьованих газів, утилізації їх теплової енергії, переведення двигуна на споживання альтернативного моторного палива і раціоналізації структури моделі його експлуатації. На основі запропонованого інтегративного показника рівня екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} в умовах негативного впливу енергогенеруючих об’єктів на атмосферне повітря реалізовано взаємоузгоджений принцип роботи складових системи управління екологічною безпекою, заснований на комплексному врахуванні чинників техногенного навантаження на атмосферне повітря.

7. Розроблена система управління екологічною безпекою та технологія захисту навколишнього середовища впроваджені для забезпечення нормативно встановленого рівня комплексу показників екологічної безпеки при безаварійній експлуатації транспортних і електрогенеруючих енергоустановок з поршневим ДВЗ, моторкомпресорів газотранспортної системи і газовидобувних станцій на ТОВ «Армко-Інжинірінг» (м. Київ) та транспортних і електрогенеруючих енергоустановок з поршневим ДВЗ на ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «Харківський насосний завод» (м. Харків). Розроблені науково-методологічні основи підвищення

рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу та індексу ефективності функціонування фільтра твердих частинок, система класифікацій способів роботи і конструкцій фільтрів твердих частинок та систему класифікацій засобів реалізації процесу їх регенерації використані у науково-дослідній діяльності відділу водневої енергетики Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України (м. Харків) і навчальній діяльності кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України (м. Харків). Це підтверджено актами впровадження та довідками про використання результатів дисертаційного дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вамболь С. О., Строков О. П., Вамболь В. В., Кондратенко О. М. Сучасні способи підвищення екологічної безпеки експлуатації енергетичних установок : монографія. Харків : Стиль-Іздат, 2015. 212 с. ISBN 978-617-7256-09-9.

2. Vambol S. O., Vambol V. V., Suchikova Y. O., Mishchenko I. V., Kondratenko O. M. Scientific and practical problems of application of ecological safety management systems in technics and technologies : Monograph. Opole : Academy of Management and Administration, 2017. 205 p. ISBN 978-83-62683-42-0.

3. Вамболь С. О., Вамболь В. В., Кондратенко О. М., Міщенко І. В. Критеріальне оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергетичних установок: монографія. Харків : Стиль-Іздат, 2018. 320 с. ISBN 978-617-7555-60-4.

4. Кондратенко О. М. Метрологічні аспекти комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки експлуатації поршневих двигунів енергетичних установок : монографія. Харків : Стиль-Іздат, 2019. 532 с. ISBN 978-617-7738-33-5.

5. Кондратенко О. М., Колосков В. Ю., Деркач Ю. Ф., Коваленко С. А. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія. Харків: Стиль-Іздат, 2020. 522 с. ISBN 978-617-7912-64-3.

6. Парсаданов І. В. Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію : монографія. Харків : Центр НТУ «ХПІ», 2003. 244 с. – ISBN 966-593-319-1.

7. Двигуни внутрішнього згоряння / А. П. Марченко, І. В. Парсаданов, Л. Л. Товажнянський, А. Ф. Шеховцов; за ред. А. П. Марченко та А. Ф. Шеховцова: серія підручників у 6 томах, 2004. Т. 5 : Екологізація ДВЗ. Харків : Прапор. 360 с.

8. Оценка и контроль выброса дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей / В. А. Звонов, Г. С. Корнилов, А. В. Козлов, Е. А. Симонова. Москва : Издательство Прима-Пресс-М, 2005. 312 с.

9. Марков В. А., Баширов Р. М., Гамбитов И. И. Токсичность отработавших газов дизелей. 2-е изд. перераб. И доп. – Москва : МГТУ им. М.Э. Баумана, 2002. 376 с.

10. Кульчицкий А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей :

учебное пособие. Владимир: Владим. гос. ун-т., 2000. 256 с.

11. Каніло П. М., Бей І. С., Ровенський О. І. Автомобіль та навколишнє середовище. Харків : Прапор, 2000. 304 с.

12. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А. А. Александров, И. А. Ирхаров, В. В. Багров и др. Под ред. А. А. Александрова, В. А. Маркова. – Москва : ООО НИЦ «Инженер», ООО "Онико-М", 2012. 791 с.

13. Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. Москва : Легион-Автодата, 2004. 344 с.

14. Mollenhauer K., Tschoke H. Handbook of Diesel Engines. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 634 p.

15. BOSCH. Автомобильный справочник : перевод с английского / Robert Bosch GmbH. М. : ЗАО КЖИ «За рулем», 2002. 896 с.

16. BOSCH. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. / Robert Bosch GmbH. М. : ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. 485 с.

17. Сары Л. О. Защита воздуха от выбросов автотранспорта. Аналитическая справка. Рига : Латвийский информационный центр, 1991. 16 с.

18. Полив'янчук А. П. Науково-практичні основи підвищення ефективності визначення викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизеля : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / СНУ ім. В. Даля. Луганськ, 2013.

19. Heywood John B. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill inc., 1988. 485 p.

20. Eastwood P. Particulate emissions from vehicles. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2008. 513 p.

21. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positive-ignition (P.I.) engines fuelled with liquefied petroleum gas (LPG) and vehicles equipped with C.I. and NG engines and P.I. engines fuelled with LPG, with regard to the emissions of pollutants by the engine: regulation United Nations Economic and Social Council Economics Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles of 26 January 2013 year Regulation No. 49, Revision 6 [Electronic recourse]. Geneva : UNECE, 2013. 434 p. URL: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R049 r6e.pdf.

22. Regulation № 96. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with the regard to the emissions of pollutants by the engine. Geneva, 1995. 109 p.

23. Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change. Official text in English (1998) [Electronic resource], 20 p. URL: http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf.

24. ГОСТ 33754-2016. Выбросы вредных веществ и дымность отработавших газов автономного тягового и моторвагонного подвижного состава. Нормы и методы определения. Введ. 07.01.2017. М. : ИПК Изд-во стандартов, 2017. 73 с.

25. ISO 8178-4:2017 Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Test cycles for different engine applications. 237 p. URL: https://www.iso.org/standard/65278.html.

26. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хазяйству загрязнением окружающей среды / А. С. Быстров, В. В. Варанкин, М. А. Виленский и др. – Москва : Экономика, 1986. 96 с.

27. Математична модель ефективності роботи фільтра твердих частинок дизеля / О. М. Кондратенко, О. П. Строков, С. О. Вамболь, А. М. Авраменко // Науковий вісник НГУ. 2015. № 6 (150). С. 55–61.

28. Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arrangement of pollutants neutralization system / S. Vambol, V. Vambol, O. Kondratenko, Y. Suchikova, O. Hurenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 3/10 (87). pp. 63–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102314.

29. Criteria based assessment of the level of ecological safety of exploitation of electric generating power plant that consumes biofuels / O. Kondratenko, I. Mishchenko, G. Chernobay, Yu. Derkach, Ya. Suchikova // 2018 IEEE 3rd International International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS–2018): Book of Papers. 10 – 14 September, 2018. Kharkiv, Ukraine. pp. 57-1–57-6. DOI: 10.1109/IEPS.2018. 8559570.

30. Criteria based assessment of efficiency of conversion of reciprocating ICE of hybrid vehicle on consumption of biofuels / O. Kondratenko, V. Koloskov, S. Kovalenko, Y. Derkach, O. Strokov // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 – Conference Proceedings, 2020. Kharkiv, Ukraine. pp. 177–182. DOI: 10.1109/

KhPIWeek51551.2020.9250118.

31. Відношення до життя та смерті в умовах надзвичайної ситуації: ціннісно-смисловий аспект: монографія / Д. В. Лєбєдєв, С. Ю. Лєбєдєва, О. О. Назаров, Н. В. Оніщенко, В. П. Садковий, О. В. Садковий, О. В. Тімченко [та ін.] ; Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, Університет цивільного захисту України. – Харків : УЦЗУ, 2009. 128 с. – ISBN 978-966-303-241-2.

32. Правила дорожнього руху України. Відповідає офіційному тексту, погодж. з ЦБДД та АС при МВС України, затв. пост. Кабміну України № 1306 від 10.10. 2001, введ. у дію 01.01.2002, зі змін. і доп. згідно до пост. Кабміну України № 869 від 21.10. 2015. К. : Арій, 2016. 48 с.

33. ГОСТ 4840:2007. Паливо дизельне підвищеної якості. Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 16 с.

34. Manus W., Bruck R., Hogdson J. Electrostatic particulate filter for nanoparticle reduction. MTZ : Motortechn. Z., 2011. Vol. 72. p. 22–27.

35. D.E.W. Controlling Automobile Emissions. Platinum Metals Review. 1991. № 35 (2). pp. 94–95.

36. C.J., R.D.O'S. Advances and Developments in Emissions Control. A review of the 1992 SAE International Congress. Platinum Metals Review. 1992. № 36(2). pp. 86–89.

37. C.J. Substantial Emissions Control Progress to Meet Future Legislation. Selective report of the 1994 International SAE Congress. Platinum Metals Review. 1994. № 38 (2). pp. 57–59.

38. D.E.W. Progress in Emission Control Technology. A selective report of the SAE Detroit Meeting . Platinum Metals Review. 1995. № 39 (2). pp. 73–74.

39. Twigg M.V. Emission Control Technology: Progress Reported at the Spring SAE Conference. Platinum Metals Review. 1996. № 40 (3). pp. 110–111.

40. Twigg M.V. Emission Control Technology at Detroit. A selective report from the 1997 SAE Annual Congress. Platinum Metals Review. 1997. № 41 (2). pp. 76–78.

41. Twigg M.V., Emission Control Technology at Detroit: A Selective Report from the 1998 SAE Annual Congress. Platinum Metals Review. 1998. № 42 (2). pp. 56–59.

42. Twigg M.V. Developments in Emission Control Technology. Platinum Metals

Review. 1999. № 43 (1). p. 28.

43. Twigg M.V. Aftertreatment for Low Emission Vehicle: A Selective Report from the 1999 SAE Annual Congress. Platinum Metals Review. 1999. № 43 (3). pp. 119–121.

44. Twigg M.V. Advanced Exhaust Emissions Control. A selective review of the Detroit 2000 SAE World Congress. Platinum Metals Review. 2000. № 44 (2). pp. 67–71.

45. Twigg M.V. Exhaust Emissions Control Developments: A selective review of the Detroit 2001 SAE World Congress. Platinum Metals Review. 2001. № 45 (2). pp. 71–73.

46. Twigg M.V. Vehicle Emissions Control Technologies. Platinum Metals Review. 2003. № 47 (1). pp. 15–19.

47. Twigg M.V. Automotive Exhaust Emissions Control. Platinum Metals Review. 2003. № 47 (4). pp. 157–162.

48. York A.P.E. 2007 Fuel and Emissions Conference: A selective report on the SAE International Conference. Platinum Metals Review. 2007. № 51 (3). pp. 145–149.

49. Johnson T. SAE 2008 World Congress: Vehicle emissions technology highlights from the SAE Annual International Congress. Platinum Metals Review. 2008 № 53 (1). pp. 37–39.

50. Johnson T.V. SAE 2009 World Congress: Key developments in diesel emissions control and catalysis. Platinum Metals Review. 2009. № 54 (1). pp. 37–43.

51. Johnson T.V. SAE 2010 World Congress: Diesel emissions control highlights of the annual Society of Automotive Engineers (SAE) International Congress. Platinum Metals Review. 2010. № 54 (4). pp. 216–222.

52. Johnson T.V. SAE 2011 World Congress: Vehicular emissions control highlights of the annual Society of Automotive Engineers (SAE) International Congress. Platinum Metals Review. 2012. № 56 (2). pp. 75–82.

53. Johnson T.V. SAE 2012 World Congress: Vehicular emissions control highlights of the annual Society of Automotive Engineers (SAE) International Congress. Platinum Metals Review. 2013. № 57 (2). pp. 117–122.

54. Gorsmann C. SAE 2014 Havy-Duty Diesel Emiccions Controll Symposium. Platinum Metals Review. 2014. № 59 (2). pp. 139–151.

55. Twigg M. V. Automotive Exhaust Emissions Control. Platinum Metal Review. 2003. № 47 (4). pp. 157–162.

56. Totbati R. 6th International Worksop on Catalityc Combustion. Platinum, Palladium and Rhodium Catalytic Feature in Combustion Development. Platinum Metal Review. 2006. № 50 (2). pp. 64–66.

57. Twigg M. V., Phillips P. R. Cleaning the Air We Breathe – Controlling Diesel Particulate Emissions from Passenger Cars. Platinum Metals Rev. 2009. № 53 (1). pp. 27–34.

58. Volkswagen Service Training. Пособие по программе самообразования 336. Сажевый фильтр с каталитическим покрытием. Устройство и принцип действия [Электронный ресурс]. URL: www.volkswagen-training-online.com.

59. Кобрін В. М. , Куліков П. М. , Нечипорук М. В. й ін.; Екологічна безпека, природно-техногенна безпека і цивільний захист в Україні: навч.посібн. Мін-во освіти і науки України. Харків : НТУ «ХПІ», 2007. 406 с.

60. Нечипорук Н. В., Кобрин В. Н. , Вамболь В. В. , Полищук Е. А. Утилизация летательных аппаратов: монография Харьков : НАКУ «ХАІ», 2014. 304 с.

61. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86 / ЛЭПТ. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. 93 с.

62. Air Quality Index (AQI) Basis. EPA official website [Electronic resource]. URL: https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi.

63. Weißbach D., Ruprecht G., Huke A., Czerski K., Gottlieb S., Hussein A. (2013), «Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants», Energy, Volume 52, pp. 201–221.

64. Harrington E.C.Jr. The Desirability Function. Industrial Quality Control. 1965. № 21 (10). P. 494–498.

65. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств. Исследования наукограда. 2012. № 1. С. 25–28.

66. Шмандий В. М., Харламова Е. В., Ригас Т. Е. Методологические подходы к анализу влияния экологической опасности на состояние здоровья населения в регионе. Электронный научно-образовательный вестник «Здоровье и образование в XXI веке». – Москва : ИПК РУДН, 2016. Т. 18. № 2. с. 54–57.

67. Шмандий В. М., Харламова Е. В., Ригас Т. Е. Управление экологической безопасностью в регионе: антропоцентрические аспекты. Монография. Гамбург : Lambert Academic Publ., 2014. 78 с.

68. Парсаданов И.В., Белик С.Ю. Мультифакторный анализ механических потерь в быстроходном дизеле с газотурбинным наддувом. Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. науч.-техн. журнал. 2008. № 1. С. 34–37.

69. Zhao X. G. et al. Assessment of ecological safety under different scales based on ecological tension index [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture. 2007. Vol. 6. p. 032.

70. Chapman P. M., Fairbrother A., Brown D. A critical evaluation of safety (uncertainty) factors for ecological risk assessment. Environmental Toxicology and Chemistry. 1998. Vol. 17. №. 1. pp. 99–108.

71. Akhmetzyanov I. M. et al. Criteria of ecological safety. Conference in the Spg scientific centre. 1994. Vol. 31. №. 2.06. C. 1993.

72. Roberts C. M. et al. Application of ecological criteria in selecting marine reserves and developing reserve networks. Ecological applications. 2003. pp. 215–228.

73. Snyder S. A. et al. Ecological criteria, participant preferences and location models: a GIS approach toward ATV trail planning. Applied Geography. 2008. Vol. 28. №. 4. pp. 248–258.

74. Sanvido O. et al. Evaluating environmental risks of genetically modified crops: ecological harm criteria for regulatory decision-making. Environmental Science & Policy. 2012. Vol. 15. №. 1. pp. 82–91.

75 Cairns Jr J., Niederlehner B. R. Ecological function and resilience: neglected criteria for environmental impact assessment and ecological risk analysis. Environmental Professional; (United States). 1993. Vol. 15. № 1. pp. 115–120.

76. Bo X. H. L. A Study on indices system and assessment criterion of ecological security for city [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science). 2004. Vol. 5. p. 025.

77. Turnhout E., Hisschemöller M., Eijsackers H. Ecological indicators: between the two fires of science and policy. Ecological indicators. 2007. Vol. 7. №. 2. pp. 215–228.

78. Fernández M. D., Vega M. M., Tarazona J. V. Risk-based ecological soil quality criteria for the characterization of contaminated soils. Combination of chemical and biological tools. Science of the Total Environment. 2006. Vol. 366. №. 2. pp. 466–484.

79. Lin J., Lin T., Cui S. Quantitative selection model of ecological indicators and its solving method. Ecological indicators. 2012. Vol. 13. №. 1. pp. 294–302.

80. Trubetskoi K. N., Galchenko Y. P. Methodological basis of ecological safety standards for the technogenic impact of mineral resource exploitation. Russian journal of ecology. 2004. Vol. 35. №. 2. pp. 65–70.

81. Sandvik H. et al. Generic ecological impact assessments of alien species in Norway: a semi-quantitative set of criteria. Biodiversity and conservation. 2013. Vol. 22. №. 1. pp. 37–62.

82. Sazykina T. G., Kryshev I. I. Multi-criteria analysis for evaluating the radiological and ecological safety measures in radioactive waste management. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Yadernaya Energetika. 2006. pp. 39–45.

83. Bolsunovskaya Y. A., Bolsunovskaya L. M. Ecological risk analysis as a key factor in environmental safety system development in the Arctic region of the Russian Federation. IOP conference series: earth and environmental science. IOP Publishing, 2015. Vol. 24. №. 1. pp. 012003.

84. Ilyichev V. et al. Estimation of indicators of ecological safety in civil engineering. Procedia Engineering. 2015. Vol. 117. pp. 126–131.

85. Gong J., Xia B., Guo L. Assessment and prediction models of urban ecological security. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni. 2006. Vol. 45. №. 1. pp. 107–111.

86. Linkov I. et al. Multi-criteria decision analysis and environmental risk assessment for nanomaterials. Journal of Nanoparticle Research. 2007. Vol. 9. №. 4. pp. 543–554.

87. Brandowski A., Liberacki R. Environmental Safety of a Seagoing Ship Power Plant. Probabilistic Safety Assessment and Management. Springer, London, 2004. pp. 3485–3490.

88. Forman R. T.T. Road ecology: science and solutions. Island Press, 2003. 155 p.

89. Buchholz T. et al. Multi criteria analysis for bioenergy systems assessments. Energy Policy. 2009. Vol. 37. №. 2. pp. 484–495.

90. Ostapenko O., Slobodianiuk O. Energy, ecological and economic efficiency of steam compressor heat pump plants as compared with alternative sources of heat supply. Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. 2015. №. 2. pp. 112–117.

91. Fehrenbach H. et al. Criteria for sustainable bioenergy use on a global scale. Criteria for sustainable bioenergy use on a global scale. 2007. №. 211. pp. 118–130.

92. Berdesheva G. A. et al. Criterion Indicators in Environment Quality Assessment. Mediterranean Journal of Social Sciences. 2014. Vol. 5. №. 23. p. 2638.

93. Zorpas A. A. et al. Environmental and technical evaluation of the use of alternative fuels through multi-criteria analysis model. Progress in Industrial Ecology, an International Journal. 2016. Vol.10. №. 1. pp. 3–15.

94. Braga L. B. et al. Comparative analysis between a PEM fuel cell and an internal combustion engine driving an electricity generator: Technical, economical and ecological aspects. Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 63. №. 1. pp. 354–361.

95. Ahmadi M. H. et al. Optimal design of a solar driven heat engine based on thermal and thermo-economic criteria. Energy conversion and management. 2013. Vol. 75. pp. 635–642.

96. Pernebekov S. S. et al. Modeling of traffic flows with due regard to ecological criteria. Life Science Journal. 2014. Vol. 11. №. 5s. pp. 44–49.

97. Łosiewicz Z. Identifying the Issue of Reducing the Emission of Harmful Compounds in the Exhaust Gas from Marine Main Engines and Description of the Emission Process of These Compounds in Probabilistic Approach. Polish Maritime Research. – 2017. Vol. 24. №. 2. pp. 89–95.

98. Офіційний обмінний курс гривні до іноземних валют. Національний банк України: офіційний веб-сайт [Електронний ресурс]. URL: ttps://bank.gov.ua/control/en/curmetal/detail/currency?period=daily (дата звернення: 11.01.2021 р.).

99. Измайлова М. О., Рахманкулов И. Ш. Категория "средняя величина" и её методологическое значение в научном исследовании. Казань, 1982. 144 с.

100. Елисеева Е. И., Юзбашев М. М. Общая теория статистики: Учебник. 5 изд. перераб. и доп. – Москва : Финансы и статистика, 2004. 656 с.

101. Лукутин Б. В., Шандарова Е. Б. Режимы работы синхронного генератора инверторной дизельной электростанции [Електронний ресурс]. Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. 2013. № 3. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9619 (дата звернення: 11.01.2021 р.).

102. Клименко О. М. Оцінка впливу регулювання температурного стану порш-

нів на техніко-економічні показники дизеля : дис. … канд. техн. наук: 05.05.03 Харків, 2016. 165 с.

103. Рыкова И.В. Разработка нестационарной теоретической модели нагружения деталей камеры сгорания тепловозного дизеля. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. 2013. № 32 (1005). С. 115–118.

104. Парсаданов И.В., Кунах Е.А. Топливно-экологическая оценка дизеля городского автобуса с учетом условий эксплуатации. Двигатели внутреннего сгорания. № 2. 2006. С. 139–144.

105. Осетров О. О. Поліпшення техніко-економічних показників дизеля 4ЧН12/14, що працює на біопаливах : дис. … канд. техн. наук : 05.05.03 Харків, 2005. 145 с.

106. Білик С. Ю. Оцінка механічних втрат в автотракторних дизелях з газотурбінним наддувом : дис. … канд. техн. наук : 05.05.03. Харків, 2013. 150 с.

107. Краснокутський Є. В. Закономірності кінетичних і масообмінних процесів конверсії газових викидів у каталітичному нейтралізаторі: дис... канд. техн. наук: 05.17.08. Харків, 2014. 201 с.

108. Савченко А.В. Вибір та обґрунтування параметрів автотракторного дизеля при його роботі на водопаливній емульсії: дис. … канд. техн. наук: 05.05.03. Харків, 2019. 185 с.

109. Мордвінцева І. О. Моделювання в САПР нестаціонарних термічних навантажень та ресурсної міцності поршнів швидкохідних дизелів: дис. … канд. техн. наук: 05.05.03. Харків, 2019. 28 с.

110. Індекс інфляції (Україна). Minfin: фінанансовий портал [Електронний ресурс]. URL: http://index. minfin.com.ua/index/infl (дата звернення: 11.01.2021 р.).

111. Динамика темпов глобальной инфляции: закономерности и прогнозы / А. А. Акаев, А. В. Коротаев, А. А.Фомин. Москва : Книжный дом, 2012. 32 с.

112. Матвеева Т. Ю. Введение в макроэкономику / Т.Ю. Матвеева. Москва : Изд. дом ГУ-ВШЭ, 2004. 512 с.

113. Теплота сгорания. Физическая энциклопедия: в. 5 т. Том 5 «Стробоскопические приборы – Яркость» / Гл. ред. А. М. Прохоров. Москва : Большая российская энциклопедия, 1999. С. 81–691 с.

114. Дизели с воздушным охлаждением Владимирского тракторного завода /

Эфрос В. В. [и др.]. Москва : Машиностроение, 1976. 277 с.

115. Сигал И. Я., Славин В. И., Шило В. В. Очистка промышленных выбросов от оксидов серы и азота. Харьков : Оригинал, 1999. 142 с.

116. Раевски П. Снижение уровня эмиссии оксидов серы на судах морского флота. Двигателестроение. 2007. №1. С. 43–45.

117. Розенкноп З.П. Извлечение двуокиси серы из газов. Москва : ГХИ, 1952. 192 с.

118. Руководящие указания по переводу котлоагрегатов, работающих на сернистых жидких топливах в режиме сжигания с предельно малыми избытками воздуха. Москва : Союзтехэнерго, 1980. 34 с.

119. ГОСТ 32511-2013. Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. Москва : Стандартинфом, 2014. 19 с.

120. ГОСТ Р 54299-2010. Топлива судовые. Технические условия. Москва : Стандартинфом, 2012. 36 с.

121. ГОСТ 305-82. Топливо дизельное. Технические условия. Москва : Стандартинфом, 2009. 22 с.

122. ГОСТ 2084-77. Бензины автомобильные. Технические условия. Москва : МПК Изд-во стандартов, 2006. 9 с.

123. ГОСТ Р 51866-2002. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. Москва : Стандартинфом, 2009. 43 с.

124. ГОСТ 12337-84. Масла моторные для дизельных двигателей. Технические условия. Москва : МПК Изд-во стандартов, 2002. 12 с.

125. ГОСТ 33305-2015. Масла смазочные. Метод определения фосфора, серы, кальция и цинка энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопией. Москва : Стандартинфом, 2016. 11 с.

126. Анисимов И. Г., Бадыштова К. М., Бнатов С. А. и др. Топлива, смазочные материаллы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник / под ред. В. М. Школьникова. Изд. 2-е перераб. и доп. Москва : Издательский центр "Техинформ", 1999. 596 с.

127. Нормы расхода моторних масел на эксплуатационные нужды стационарных дизельних электростанций РД 34.10.563-94. Москва : ОРГРЕС, 1997. 7 с.

128. Р 3112194-0366-03. Новые нормы расхода топлив и смазочных материа-

лов на автомобильном транспорте. Москва : ИНФРА-М, 2003. 50 с.

129. Мотоциклы ИЖ Планета и ИЖ Юпитер 4-го и 5-го поколений. Руководство по ремонту и техническому обслуживанию / под ред. А. М. Перевозчикова. Москва : АТЛАС-ПРЕСС, 2006. 256 с.

130. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. Москва : Стандартинформ, 2013. 15 с.

131. Сорокин П. Как экологические нормы двигают прогресс автопрома. Інтернет-издание «За рулём» [Електронний ресурс]. Дата публикации 03.09.2015. URL: https://www.zr.ru/content/articles/809243-kak-ekologicheskie-normy-dvigayutprogress-avtoproma (дата звернення: 11.01.2021 р.).

132. Андрющенко С. Киотский протокол собрались продлевать. Новостной портал Украины Delo.ua [Електронний ресурс]. Дата публикации 08.12.2009. URL: https://delo.ua/econonomyandpoliticsinukraine/kiotskij-protokol-sobralis-pro-134967 (дата звернення: 11.01.2021 р.).

133. Парсаданов И. В., Васильев И. П. Определение состава твердых частиц отработавших газов дизелей. Двигатели внутреннего сгорания. 2013. № 2. С. 97–101.

134. Угнефук А. А. Экспериментальные исследования структуры и состава твердых частиц в отработавших газах вихрекамерного дизеля : дисс. канд. техн. наук. спец. : 05.04.02. Барнаул, 2012. 163 с.

135. Бердин В. Х., Грицевич И. Г., Кокорин А. О., Федоров Ю. Н. Парниковые газы – глобальный экологический ресурс. Справочное пособие Москва : WWF России, 2004. 137 с.

136. CDIAC Carbon Dioxide Information Analysis Center of Berkeley Lab & U.S. Department of Energy [Electronic resource]. URL: https://cdiac.ess-dive.lbl.gov.

137. Мирзоев В., Пищук Е. Бензин и этанол – мировые перспективы. Способы получения, стандарты, обзор мирового рынка и производителей топлива [Электронный ресурс] Интернет журнал «Проблемы местного самоуправления». – 2010. № 20. С. 10-1–10-6. URL: http://www.samoupravlenie.ru/40-10.php.

138. Канило П. М. Токсичность ГТД и перспективы применения водорода Киев : Наукова думка, 1982. 140 с.

139. Канило П. М. Автотранспорт. Топливно-экологические проблемы и перспективы: монография. Харьков : ХНАДУ, 2013. 270 с.

140. Канило П. М. Глобальное потепление климата. Антропогенно-экологическая реальность: монография Харьков : ХНАДУ, 2015. 312 с.

141. Овчаров О. В. Зниження викидів канцерогенних речовин з відпрацьованими газами автомобільних бензинових двигунів [Рукопис]: дис. канд. техн. наук, спец. : 05.05.03. Харків, 2000. 140 с.

142. Сарапина М. В. Топливно-экономические и экологические показатели двигателей пожарных автомобилей на примере автоцистерн. Проблемы пожарной безопасности. 2014. Вып. 36. С. 218–223.

143. Канило П. М., Костенко К. В., Сарапина М. В. Минимизация канцерогенной опасности автомобилей. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2013. Вып. 60. С. 133–142.

144. Канило П. М., Сарапина М. В. Будущее автотранспорта – альтернативные топлива и канцерогенная безопасность. Автомобильный транспорт. 2012. Вып. 31. С. 40–49.

145. Анализ европейских требований к экологической безопасности легковых автомобилей / П. М. Канило, А. Л. Шубенко, К. В. Костенко, М. В. Сарапина. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2013. Вып. 63. С. 67–75.

146. Канило П. М., Соловей В. В., Сарапина М. В. Антропогенно-экологические факторы глобального потепления климата. Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 8. – С. 53–60.

147. Канило П. М., Сарапина М. В., Костенко К. В. Глобальные энерго-экологические проблемы и фотосинтез. Проблемы машиностроения. 2013. Т. 16, № 4. С. 49–55.

148. Левтеров А. М., Мараховский В. П., Бганцев В. Н., Сарапина М. В. Экспериментальная оценка энерго-экологических показателей автомобильного двигателя на бензоэтаноле. Автомобильный транспорт. 2008. Вып. 22. С. 98–101.

149. Канило П.М., Костенко К.В., Сарапина М.В. Пути улучшения экологических показателей автомобилей при использовании высокоароматизированных нефтяных топлив. Автомобильный транспорт. 2008. Вып. 22. С. 31–37.

150. Аврунин А.Г. Тепловозные дизели 2Д100 и 10Д100. Москва : Изд-во «Транспорт», 1970. 320 с.

151. Bosch. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. Москва : ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. 480 с.

152. Bosch. Системы управления бензиновыми двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. Москва : ЗАО «КЖИ «За рулем», 2005. 432 с.

153. Епифанов К.С. Расчет параметров рабочего цикла двигателей внутреннего сгорания. Методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Теория рабочих процессов теплових машин». Харьков : НАКУ «ХАИ», 2014. 57 с.

154. ГОСТ 32330-2013 Масла смазочные. Определение потерь от испарения методом Ноак. Москва : Стандартинформ, 2014. 25 с.

155. ГОСТ 32391-2013 Масла моторные. Определение испаряемости методом капиллярной газовой хроматографии. Москва : Стандартинформ, 2014. 25 с.

156. Новохатько О. В., Мазницкая О. В. Улучшение качества всесезонных моторных масел. Науковий вісник КУЕІТУ. № 3 – 4 (41 – 42). 2013. С. 129–134.

157. ГОСТ 2177–82 Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава. Москва : МПК Издательство стандартов, 1982. 30 с.

158. ГОСТ 15823-70 Масла и смазки. Метод определения давления насыщенных паров. Москва : МПК Издательство стандартов, 1986. 10 с.

159. Макушев Ю. П., Михайлова Л. Ю., Филатов А. В. Химмотология. Учебное пособие. Омск : Из-во СибАДИ, 2010. 165 с.

160. Хафизов Ф.Ш., Краснов А.В. Давление насыщенных паров нефтепродуктов. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 3. С. 406–413.

161. Гаврилов А. А., Морозов В. В., Сысоев С. Н. О расходе картерных газов быстроходных дизелей [Электронный ресурс]. Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 1–4. URL: https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6486. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

162. Дьяченко В. Г. Методические указания к курсовой работе: Расчет рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания. Харків : ХНАДУ, 2001. 34 с.

163. Герасимов А. Д., Голубчик С. Ф., Кульчицкий Р. И., Ходулин Ю. А., Цыганенко В. Р., Шаанов А. И. Трактор Т-25 (устройство и эксплуатация) – Ленинград : «Колос», Ленингр. отд., 1972. 175 с.

164. Суханов В. П. Переработка нефти. 2-е изд. перераб. и доп. Москва : Высшая школа, 1979. 335 с.

165. Лаврушко П.Н., Муравьев В.М. Эксплуатацыя нефтяных и газовых скважин. Москва : Недра, 1974. 367 с.

166. Большаков Г. Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов, 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Недра: Ленингр. отд-ние, 1982. 350 с.

167. Оценка взрывопожарной опасности паров топлива во внутреннем объеме бронеобъекта / А. А. Назаренко, О. В. Стаховский, К. В. Корытченко, С. П. Данилевский. Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. 2012. Вип. 2 (31). С. 138–143.

168. Харківський регіональний центр з гідрометеорології. Офіційний інформаційний сервер [Електронний ресурс]. URL: http://kharkiv.meteo.gov.ua (дата звернення: 11.01.2021 р.).

169. Інформаційний ресурс «Метеопост» [Електронний ресурс]. URL: https://meteopost.com/weather/climate/year (дата звернення: 11.01.2021 р.).

170. Рекоммендации по межгосударственной стандартизации РМГ 75–2014. Государственная система обеспечения единства измерений Измерения влажности веществ. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2015. 20 с.

171. ГОСТ 30494-2011 Будівлі житлові і суспільні. Параметри мікроклімату в приміщеннях. Київ : Держстандарт України, 2011. 15 с.

172. Кувшинов Ю. Я. Теоретические основы обеспечения микроклимата помещения. Учебное пособие для студентов специальности 270109. Москва : Изд. АСВ, 2007. 184 с.

173. СанПиН 2.2.4.548-96. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Москва : Госкомсанэпиднадзор РФ, 1996. 12 с.

174. СНиП 31-04-2001 Складские здания. Госстрой России. Москва : ГУП ЦПП, 2001. 9 с.

175. СНиП 2.04.05-91 Отопление, вентиляция и кондиционирование. Госстрой России. Москва : ГУП ЦПП, 1997. 72 с.

176. Артемьева Я. А., Ленкова Е. И. Оптимальные условия для жизнедеятельности организма человека. Значение влажности воздуха для человека. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11-4. С. 600.

177. Зиневич А. М., Глазков В. И., Котик В. Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. Москва : «Недра», 1975. 288 с.

178. Пейч Н. Н., Царёв Б. С. Сушка древесины. Учебник для проф.-тех. училищ и подготовки робочих на производстве. Изд. 2-е перераб. и доп. Москва : «Высшая школа», 1971. 220 с.

179. Филатов А. Н., Вудвуд Т. Н. Ячеистый бетон – технология, проектные решения, производство (в помощь проектировщикам и строителям). Строительные материалы и изделия. 2015. № 3-4. С. 50–53.

180. Вамболь С. А. Системы управления экологической безопасностью, которые используют многофазные дисперсные структуры : монография. Харьков : НАКУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2013. 204 с.

181. Екологічна безпека, природно-техногенна безпека і цивільний захист в Україні: навч. посібн. / Кобрін В. М. , Куліков П. М. , Нечипорук М. В. й ін.; Мін-во освіти і науки України. – Харків : НАКУ ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2007. 406 с.

182. Биченок М. М., Трофімчук О. М. Проблеми природно-техногенної безпеки в Україні. Київ. : УІНСіР, 2002. 268 с.

183. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.

184. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. 272 с.

185. Біляховський Г. О. Основи екологічних знань. Київ : Либідь, 1997. 286 с.

186. Боков В. А., Лущик А. В. Основы экологической безопасности. Симферополь : СОНАТ, 1998. 224 с.

187. Зеркалов Д. В. Экологическая безопасность : учеб. пособие. Киев : Основа, 2009. 513 с.

188. Измалков В. И. Экологическая безопасность, методология прогнозирования антропогенных загрязнений и основы построения химического мониторинга окружающей среды. Санкт-Петербург : Наука, 1994. 131 с.

189. Инженерная защита окружающей среды: учеб. пособие / под ред. О. Г. Воробьева. – Санкт-Петербург : Лань, 2002. 288 с.

190. Касимов А. М., Шмандий В. М. , Кучук А. Н. Современные методы контроля загрязнения атмосферного воздуха при управлении техногенной

безопасностью на региональном уровне. Б-ка журн. ІТЕ. – Харьков : КДПУ. 2001. № 3. 136 с.

191. Качинський А. Б. Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращення. Київ : НІСД, 2001. 312 с.

192. Лозанський В.Р. Екологічне управління в розвинутих країнах світу у порівнянні з Україною. Харків : УкрНДІЕП, 2000. 68 с.

193. Масленникова И. В. Управление экологической безопасностью. Санкт-Перербург : СПбУ, 2001. 130 с.

194. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. 176 с.

195. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1986. 183 с.

196. Семенов В. Ф., Михайлюк О. Л., Галушкіна Т. П. Екологічний менеджмент: навч. посібн. Київ : Центр навч. літ-ри, 2004. 516 с.

197. Сугак Е. В., Войнов М. А., Желткова Н. Ю. Очистка газовых выбросов от высокодисперсных частиц в дисперсионно-кольцевом потоке / Химия растительного сырья. – Москва. 2000. № 4. С. 85–91.

198. Залесский Л.Б. Экологический менеджмент: учеб. пособие для вузов Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 220 с.

199. Касимов А. М., Товажнянский Л. Л., Тошинский В. И., Сталинский Д. В. Управление опасными промышленными отходами. Современные проблемы и решения: монография. Харьков : НТУ «ХПІ», 2009. 500 с.

200. Хван Т. А. Промышленная экология. Ростов на Дону : Феникс, 2003. 320 с.

201. Черняховский Э. Р. Управление экологической безопасностью : учеб.-практ. пособ. Москва : Альфа-Пресс, 2007. 248 с.

202. Шевчук В. Я. , Саталкін Ю. М. , Білявський Г.О. Екологічне управління: підручник. Київ : Либідь, 2004. 432 с.

203. Шмандий В. М. Теоретические и практические основы управления техногенной безопасностью на региональном уровне. Захист довкілля від антропогенного навантаження. Вип. 4(6). Кременчук : КрНУ, 2001. С. 95–100.

204. Шмандий В. М. Управление техногенной безопасностью урбосистемы на

стадии образования и поступления отходов в окружающую среду: монография. Харьков : КДПУ, 2001. 152 с.

205. Шмандий В. М. Управление экологической безопасностью на региональном уровне: дис. … д-ра техн. наук: 21.06.01; Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського. Кременчук, 2003. 381 с.

206. Шмандій В. М., Некос В. Ю. Екологічна безпека: підручник. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2008. 436 с.

207. Шмандій В. М. Практичні основи розробки комплексної системи заходів по управлінню техногенною безпекою в техногенно навантаженому регіоні. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2002. № 20. С. 217–221.

208. Экологическая безопасность, устойчивое развитие и природоохранные проблемы / под ред. К. Ф. Фролова. Москва : Знание, 1999. 704 с.

209. Экология, охрана окружающей среды, экологическая безопасность: учеб. пособие / под общ. ред. А. Т. Никитина, С. А. Степанова. Москва : Новь, 2000. 648 с.

210. Экология, охрана природы, экологическая безопасность / под ред. В. И. Данилова-Данильяна. Москва : МИЭПУ, 1997. 744 с.

211. Адлер Ю. П, Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва : Наука, 1976. 279 с.

212. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. Москва : Высшая школа, 1985. 327 с.

213. Эберт К., Эдерер Х. Компьютеры. Применение в химии: Пер. с нем. Москва : Мир, 1988. 416 с.

214. Тойберт П. Оценка точности результатов измерений: пер. с нем. Москва : Энергоиздат, 1988. 88 с.

215. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Ленинград: Энергия,1978. 262 с.

216. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев : Техника, 1975. 168 с.

217. Alkidas A.C. Relationship between smoke measurements and particulate measurements. SAE Technical Paper Series, № 840412, 1984. С. 10–21.

218. Muntean G.G. A theoretical model for the correlation of smoke number to dry particulate concentration in diesel exhaust. SAE paper, № 1999-01-0515, 1999. 9 с.

219. Hardenberg H., Albreht H. Grenzen der Ruβmassnbestimmung aus optishen

Transmessungen // MTZ: Motortechn. Z, 1987. 48/2. C. 51–54.

220. Vambol S., Vambol V., Kondratenko O., Koloskov V., Suchikova Y. Substantiation of expedience of application of high-temperature utilization of used tires for liquefied methane production. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2018. Volume 87. Issue 2. pp. 77–84. DOI: 10.5604/01.3001. 0012.2830.

221. Diesel engine reference book. Second edition. Ed. by B. Challen, R. Baranescu. Butterworth Heinemann, 1999. 675 p.

222. Дымомер ИНФРАКАР Д. Паспорт ВЕКМ.41531.007ПС. 8 с.

223. Газоанализатор пятикомпонентный Автотест-02.03П. Руководство по эксплуатации М 057.000.000РЭ. 12 с.

224. ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. Москва : Изд-во стандартов, 1988. 78 с.

225. ГОСТ 14846-87. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. Москва : Изд-во стандартов, 1987. 42 с.

226. Психрометры аспирационные. Паспорт Л82.844.000.ПС. 9 с.

227. Преобразователь измерительный разности давлений ДМ-3583М. Паспорт 2.833.004.ПС. 3 с.

228. Термометр стеклянный лабораторный ТЛ-2. Паспорт АЖ2.82.168.ПС. 4 с.

229. Барометр-анероид метеорологический БАММ-1. Паспорт Л82.832.001.ПС 5 с.

230. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. Минск: Современная школа, 2005. 608 с.

231. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника Москва : Радио и связь, 1982. 624 с.

232. Дэннис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. Москва.: Мир, 1988. 440 с.

233. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технооологии. Москва : Высшая школа, 1985. 327 с.

234. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений 2-е изд. Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1991. 304 с.

235. Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям. Санкт-Петербург : Наука, 2001. 295 с.

236. Вамболь С. О. , Міщенко І. В. , Кондратенко О. М. , Бурменко О. А. Апроксимація закону розподілу експериментальних даних за допомогою бета-розподілу. Частина 1. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2015. № 18 (1127). С. 36–44.

237. Вамболь С. О. , Міщенко І. В. , Вамболь В. В. , Кондратенко О. М. Апроксимація закону розподілу експериментальних даних за допомогою бета-розподілу. Частина 2. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2015. № 41 (1150). С. 11–16.

238. Вамболь С. О. , Міщенко І. В. , Вамболь В. В. , Кондратенко О. М. Апроксимація закону розподілу експериментальних даних за допомогою бета-розподілу. Частина 3. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Мареатичне моделювання в техніці та технологіях. 2015. № 41 (1150). С. 16–21.

239. Наказ Міністерства надзвичайних ситуацій України № 575 від 13.03. 2012 р. «Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту», зареєстр. у Мінюсті України 25.05.2012 р. за № 853/ 21147, чинний від 16.07.2012 р. [Електронний ресурс]. 137 с. URL: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0835-12/page (дата звернення: 11.01.2021 р.).

240. Брушлинский Н. Н. Системный анализ деятельности Государственной противопожарной службы: учебник. Москва : МИПБ МВД России, 1998. 255 с.

241. Калиновський А. Я., Коваленко Р. І. Статистичне дослідження характеру небезпечних подій, які виникають в місті Харкові [Електронний ресурс]. Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». Серія: технічні науки та архітектура. 2017. № 135. С. 159–166. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2017_135_28. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

242. Ларін О. М., Калиновський А. Я., Коваленко Р. І. Дослідження параметрів функціонування пожежно-рятуваль-них підрозділів міста Харкова на сучасному етапі для розробки програмного блоку «ПРОГНОЗ НС» [Електронний ресурс]. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць.

Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2015. № 62 (1171). С. 77–83. URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/21035. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

243. Association for the Study of Peak Oil and Gas (ASPO) [Електронний ресурс]. URL: https:// www.peakoil.net. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

244. Дацик Ю. Типы гибридных силовых установок [Електронний ресурс]. Електронний журнал «Автоцентр». 26.06.2016 [Електронний ресурс]. URL: https://www.autocentre.ua/ opyt/tehnologii/tipy-gibridnyh-silovyh-ustanovok-305550.html (дата звернення: 11.01.2021 р.).

245. Производство биотоплива: прогнозы – Международный независимый институт аграрной политики [Електронний ресурс]. URL: http://мниап.рф/analytics/ Proizvodstvo-biotoplivaprognozy. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

246. Biofuels Barometer [Електронний ресурс]. EurObservER. 2018. 14 p. URL: https:// www.eurobserv-er.org/biofuels-barometer-2018. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

247. Биодизель: обзор мирового рынка 2019 г. и прогноз до 2028 г. [Електронний ресурс]. Market Publishers Report Database. 231 p. URL: https://market publishers.ru/report/industry/chemicals_petrochemicals/biodiesel_world_market_outlook _ 204/09.html. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

248. Joyce M. Biofuels production drives growth in overall biomass energy use over past decade [Електронний ресурс]. US Energy Information Administration. 2013. URL: https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=15451. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

249. Mielke T., Vegetable oil and oilseeds outlook, Canola Digest, March 2017 [Електронний ресурс]. URL: https://canoladigest.ca/march-2017/vegetable-oil-and-oilseeds-outlook. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

250. Kotrba R. As fuel prices rise, biodiesel production margins widen. Biodiesel magasine, 26 October 2018 [Електронний ресурс]. URL: http://www.biodieselmagazine. com/articles/2516500/as-fuel-prices-rise-biodiesel-production-margins-widen. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

251. Gay J.E. Green Peace: Can Biofuels Accelerate Energy Security? Joint Force Quarterly 73 (2nd Quarter, April 2014) [Електронний ресурс]. 2014. pp. 44–51. URL: https://ndupress.ndu.edu/Portals/68/Documents/jfq/jfq-73/jfq-73_44-51_Gay.pdf?ver=

2014-04-01-122203-717. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

252. Diesel Fuel Explained. Factors Affecting Diesel Prices [Електронний ресурс]. US Energy Information Administration. 22 August 2018. URL: https://www.eia.gov/ energyexplained/index.php?page=diesel_factors_affecting_prices. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

253. Global EV Outlook 2018. Towards Cross-modal electrification. International Energy Agency [Електронний ресурс]. 2018. 141 p. URL: https://www.connaissance desenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/globalevoutlook 2018.pdf. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

254. Капустин А. А., Раков В. А. К 20 Гибридные автомобили: учебное пособие [Електронний ресурс]. М-во образ. и науки РФ, Вологод. гос. ун-т. Вологда: ВоГУ, 2016. 96 с. URL: http://emp.vogu35.ru/vse-materialy/send/187-metodmat/18741-. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

255. Карта загальнодоступних зарядних станцій для електромобілів [Електронний ресурс]. URL: http://electrocars.ua/charging-map. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

256. Аналіз ринку електромобілів. Компанія IRS Group. Маркетингові дослідження споживачів [Електронний ресурс]. URL: http://irsgroup.com.ua/ecars. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

257. Проектирование электрических машин : учебник для вузов [Електронний ресурс] / под ред. И.П. Копылова. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Издательство Юрайт, 2011. 767 с. URL: http://library.psu.kz/fulltext/buuk/b643.pdf. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

258. Zablodskij N., Pliugin V., Petrenko A. Using of object-oriented design principles electric machines development [Електронний ресурс]. Electrical Engineering and Electromechanics. No. 1. 2016. P. 17–20. URL: https://cyberleninka.ru/ article/v/usingobjectoriented-design-principles-in-electric-machines-development. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

259. Лукутин Б. В., Шандарова Е. Б. Режимы работы синхронного генератора инверторной дизельной электростанции [Електронний ресурс]. Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. 2013. № 3. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9619. (дата звернення:

11.01.2021 р.).

260. GOST 4840:2007 «Diesel fuel of improved quality. Technical specifications» [Електронний ресурс]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrai`ny, 2007. 16 p. URL: https://dnaop.com/html/34100/ doc-ДСТУ_4840_2007. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

261. Shvedun V. O. Experience of EU countries in ensuring public administration of advertising activity. Actual Problems of Economics. 2015. № 168 (6). art. no. A084. pp. 84–90.

262. Яцик А.В. Екологічна безпека в Україні. Київ : Вид. Генеза, 2003. 216 с.

263. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 р. № 1264-XII у редакції від 12.10.2018. URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12.

264. Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 № 2059-VIII . URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19.

265. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992 № 2707-XII у редакції від 18.12.2017. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12.

266. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» від 18.01.2001 № 2245-III у редакції від 26.04.2014. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14.

267. Закон України «Про відходи» від 05.03.1998 № 187/98-ВР у редакції від 13.02.2020. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98.

268. ДК 005-96 Державний класифікатор відходів від 29.02.1996 № 89 у редакції від 01.05.2008. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0089217-96.

269. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) (ДСП-201-97), затв. наказом Міністерства охорони здоров'я України від 09.07.1997 № 201. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0201282-97.

270. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовими установками: Учебное пособие / С. В. Бахмутов, А. Л. Карунин, А. В. Круташов и др. Москва : МГТУ «МАМИ», 2007. 71 с.

271. Лєвтєров А. М., Савицький В. Д. Покращення екологічних характеристик дизеля, що працює на біодизельних паливних композиціях [Електронний ресурс]. Автомобільний транспорт. 2015. Вип. 36. С. 110–117. URL: https://cyberleninka.ru/article/v/pokraschennya-ekologichnih-harakteristik-dizelya-scho-pratsyue-

na-biodizelnihpalivnih-kompozitsiyah. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

272. Markov V., Kamaltdinov V., Loboda S. Biofuel mixture composition and parameters of exhaust gases toxicity [Електронний ресурс]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 327. 022068. URL: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/2/022068/pdf. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

273. Research of energy effectiveness and exhaust emissions of direct injection diesel engine running on RME and its blends with DO [Електронний ресурс] / A. Marchenko, I. Parsadanov, A. Prokhorenko and etc. Proceedings of the 12th International Conference Transport Means (Kaunas University of Technology). 2008. pp. 312–319. URL: https://www.dropbox.com/s/3jyo8d7k1z0a4zv/Transport%20means%202012.pdf ?dl=0. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

274. Марков В. А., Нагорнов С. А., Деянин С. Н. Состав и теплота сгорания биотоплив, получаемых из растительных масел [Електронний ресурс] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2012. № 2. С. 65–80. URL: https://cyberleninka.ru/article/v/sostav-i-teplota-sgoraniya-biotopliv-poluchaemyh-iz-rastitelnyhmasel. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

275. Зацерклянний М. М., Зацерклянний О. М., Столевич Т. Б. Процеси захисту навколишнього середовища: підручник. Одеса: ОНАХТ, Фенікс, 2017. 454 с.

276. Апостолюк С. О., Джигирей В. С., Соколовський І. А. та ін. Промислова екологія: навчальний посібник 2-ге вид., випр. і доповн. Київ : Знання, 2012. 430 с.

277. Вамболь С. О., Вамболь В. В., Колосков В. Ю. Проектування й конструювання систем забезпечення екологічної безпеки. Методичні вказівки до виконання контрольних (модульних) робіт. Харків : НУЦЗУ, 2018. 64 с.

278. Жилинская Я. А., Глушанкова И. С., Дьяков М. С., Висков М. В. Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности : учеб. пособие. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2012. 401 с.

279. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы). Учебное пособие Пенза: Изд-во ПТИ, 2004. 249 с.

280. Рыбаков Ю.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Конспект лекций для студентов всех форм обучения специальности 280202 – Инженерная защита окружающей среды. Екатеринбург, 2005. 196 с.

281. Семенова И.В. Промышленная экология: учеб. пособ. для студ. высш. учеб. Заведений. Москва : Изд. центр «Академия», 2009. – 528 с.

282. Ветошкин А.Г. Инженерная защита атмосферы от вредных выбросов. Учебно-практическое пособие. 2-е изд. доп. и перераб. Москва : Инфра-Инженерия, 2016. 316 с.

283. Вамболь С. О., Міщенко І. В., Колосков В. Ю., Кондратенко О. М. Системи управління екологічною безпекою : Конспект лекцій. Харків : НУЦЗУ, 2018. 224 с.

284. Вамболь С. О., Міщенко І. В., Кондратенко О. М. Технічна механіка рідин та газів. Підручник. Харків : НУЦЗУ, 2016. 350 с.

285. Екологічний паспорт регіону. Харківська область. 2019 рік. [Електронний ресурс]. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/eco_passport/2017. (дата звернення: 11.01.2021 р.).

286. Наказ МОЗ України «Про затвердження методологічних рекомендацій «Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря» від 13.04.2007 р. № 184. URL: http://old.moz.gov.ua/ua/portal/dn_20070413_184.html.

287. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух. Издание шестое, перераб. и доп. Санкт-Петербург: НИИ Атмосфера, 2005. 260 с.

Додаток А SWOT-АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Переваги, сильні сторони (***S – Strengths***). Результати досліджень, послідовно викладених у рукописі цієї кваліфікаційної роботи, вирізняються такими перевагами.

Дослідження має комплексний та послідовний характер, а результати його окремих різнорідних за застосовуваними методами частин добре узгоджуються між собою. Це пояснюється тим, що науково-методологічні основи розробленої СУЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ та реалізації її етапів є, водночас, як головним науковим результатом, отриманим у дисертації, так і структурною основою самого дослідження, викладеного у рукописі.

Послідовність дослідження полягає у тому, що виявлену при аналізі літературних джерел відсутність впорядкованих і систематичних наукових (стратегічний рівень), методологічних (тактичний рівень) та практичних (технічний рівень) основ забезпечення законодавчо встановленого (у тому числі й у світлі невідворотних перспектив введення в дію більш суворих обмежень з плином часу), вирішено шляхом побудови відповідної СУЕБ (рішення на стратегічному рівні), для реалізації її матеріальної частини побудовано відповідну ТЗНС (рішення на тактичному рівні), одним з основних виконавчих пристроїв якої виступив ФТЧ вдосконаленої конструкції, методик експериментальних і розрахункових досліджень, вдосконаленого лабораторного обладнання і метрологічного забезпечення (рішення на технічному рівні). При цьому додатково для реалізації першого та другого етапів СУЕБ також побудовано декілька класифікацій з розробкою відповідних їх ієрархічних і фасетних класифікаторів, третього етапу – вдосконалено методики, матеріальну базу та комплекс ЗВТ для експериментального і розрахункового дослідження показників роботи як джерела екологічної небезпеки (ПДВЗ) так і засобів її зниження (ФТЧ), а також побудовано математичні моделі робочих процесів у них, четвертого етапу – всебічне дослідження відомих критеріальних математичних апаратів для оцінювання ефективності функціонування самої СУЕБ та організації зворотного зв’язку у ній. У результаті запропоновано новий критеріальний математичний апарат, що поєднує переваги найкращих з досліджених відомих апаратів та нівелює більшість їх недоліків, а також відкриває перспективи, по-перше, врахування ще більшої номенклатури чинників ЕНБ, та, по-друге, виходу за рамки дослідженого етапу

ЖЦ вказаного технічного об'єкту та за рамки окремо взятої ЕУ з різною кількістю ПДВЗ різного призначення, потужності, типу, моделі, у тому числі й тих, що споживають різні види моторного палива.

Недоліки, слабкі сторони (***W – Weaknesses***). Результати цього дослідження вирізняються п'ятьма основними недоліками.

Перший – не запропоновано конкретну реалізацію повного комплексу досліджень щодо введення у структуру розробленого нового критеріального математичного апарату чинників ЕНБ, відмінних за своїм фізичним змістом від викиду чи споживання речовини, зокрема показників шуму, вібрації, теплового забруднення компонентів НПС.

Другий – не наведено міркувань щодо способу та форми введення у структуру розробленого нового критеріального математичного апарату інформаційного забруднення компонентів НПС як чинників ЕНБ.

Третій – не наведено опису реалізації ідей щодо розширення діапазону етапів життєвого циклу ЕУ з ПДВЗ з «безаварійна експлуатація» послідовно на весь етап «експлуатація» (тобто з урахуванням планових і позапланових технічних обслуговувань і ремонтів ПДВЗ), етап «утилізація» (тобто після досягнення ПДВЗ граничного технічного стану у зв'язку з фізичним чи моральним зносом) та частину етапу «проектування і виготовлення», зокрема «виготовлення, випробування, обкатка».

Четвертий – не розроблено проекту методики оцінювання, в основі якої лежить запропонований новий критеріальний апарат, у формі нормативно-правового акту, по прикладу «ОНД-86 – Методика розрахунку концентрацій у атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств» чи «Тимчасова типова методика визначення економічної ефективності здійснення природоохоронних заходів і оцінки економічного збитку, що завдається народному господарству забрудненням навколишнього середовища», рівно як і комплекту документів на фінансування подальших досліджень чи впровадження наявних результатів у вигляді екологічної програми щодо здійснення такого виду природоохоронної діяльності (відповідно до «Переліку видів діяльності, що належать до природоохоронних заходів», затвердженому остановою Кабінету Міністрів України від 17.09.1996 р. № 1147) з Державного чи Обласного чи фонду охорони навколишнього природного середовища.

Пятий – не надано інформації щодо захисту прав інтелектуальної власності на отриманий у ході реалізації даного дослідження науковий продукт.

Можливості, перспективи (***O – Opportunities***). Результати роботи, викладені у рукописі дисертації, відкривають такі можливості для подальшого їх практичного застосування, а також окреслюють коло напрямків подальших досліджень.

1. Вдосконалення розробленої СУЕБ як основи для приведення комплексу показників рівня ЕкБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ до актуальних і перспективних нормативно встановлених показників чи зведення деяких з них нанівець, а також основи для розробки СУЕБ більшого масштабу, котра охопить більшу кількість етапів ЖЦ означених технічних об'єктів.

2. Подальше вдосконалення процедури оцінювання за новим критеріальним апаратом шляхом врахування нових впливаючих чинників ЕНБ, та розробка методики оцінювання для набуття нею статусу нормативно-правового акту.

3. Пошук нових конструкційно-технологічних рішень на основі вдосконалення комплексів з класифікацій щодо ФТЧ як виконавчих пристроїв відповідної ТЗНС, від ідеї до готового до впровадження у виробництво технічного рішення, захищеного документом про право інтелектуальної власності.

4. Прогнозування показників роботи подібного роду технічних об'єктів на основі вдосконалених методик експериментальних і розрахункових досліджень, вдосконаленого лабораторного обладнання і метрологічного забезпечення та формування у зв'язку з цим частини набору вихідних даних для комплексного критеріального оцінювання для застосування розробленого критеріального апарату на основі вдосконаленого комплексу з розроблених математичних моделей.

5. Ранжування за пріоритетністю чинників ЕНБ і критеріальних апаратів, а також моделей експлуатації такої техніки, й визначення напрямків подальших досліджень щодо забезпечення щонайвищого рівня ЕБ означеного процесу і вдосконалення самих критеріальних апаратів.

6. Доведення базового критеріального апарату до об'єктивної межі розвитку та його використання у структурі принципово нового за фізичним змістом і структурою критеріального апарату як окремого самостійного чинника ЕНБ.

7. Розробка переліків рекомендацій щодо практичної реалізації розроблених

СУЕБ та ТЗНС для конкретної енергоустановки з конкретним ПДВЗ з урахуванням його призначення, потужності, типу та поточного технічного стану.

Ризики, загрози (***T – Threats***). Результати, отримані у даній роботі, складаючи основу пунктів розробленого списку рекомендацій щодо практичного їх застосування, водночас є джерелом таких ризиків.

1. Необов'язковість врахування результатів цього дослідження взагалі та впровадження розроблених СУЕБ, ТЗНС і ФТЧ, класифікацій і класифікаторів, математичних моделей і результатів ранжування зокрема, через відсутність відповідної законодавчої основи.

2. Скорочення кола спеціалізованих науково-дослідницьких підрозділів у структурі НАН України, конструкторських бюро промислових підприємств галузі транспортного машинобудування та закладів вищої освіти – відпорядкування МОН України та галузевих, на лабораторно-експериментальній базі яких та у співпраці зі висококваліфікованими спеціалістами котрих можливим було б доведення повного комплексу дослідно-конструкторських робіт щодо впровадження розроблених СУЕБ, ТЗНС і доведення та оптимізації конструкції ФТЧ чи інших виконавчих пристроїв природоохоронних технологій.

3. Катастрофічне звуження кола вітчизняних підприємств-виробників ПДВЗ, котрі потребували б обладнання своєї конкурентоспроможної та сертифікованої продукції такими агрегатами технологій захисту навколишнього середовища, або ж здійснювали модернізацію, конверсію, форсування чи ремонт ЕУ з ПДВЗ, що перебувають в експлуатації, та у зв'язку з чим вирішували завдання задоволення сучасним екологічним стандартам.

4. Відсутність документів щодо захисту прав інтелектуальної власності на окремі елементи накового продукту, отриманого у дослідженні.

5. Складна політична, економічна та пандемічна ситуація у нашій державі відсувають проблеми забезпечення законодавчо встановленого рівня показників ЕБ на другорядні позиції.

Намічено напрямки подальших досліджень згідно до сформованих **стратегій** SWOT-аналізу.

SO-стратегія, спрямована на подальше посилення *сильних* сторін за рахунок

використання *можливостей*.

Полягає у реалізації подальших етапів вдосконалення запропонованих СУЕБ, ТЗНС і ФТЧ, класифікацій і класифікаторів, математичних моделей і результатів ранжування, методик експериментальних і розрахункових досліджень, вдосконаленого лабораторного обладнання і метрологічного забезпечення у комплексі одне з одним на основі розроблених впорядкованих і структурованих науково-методологічних основ, розповсюдження їх на більшу кількість врахованих чинників ЕНБ, етапів ЖЦ оцінюваних об'єктів, їх видів, призначення, потужності, моделей експлуатації, здійснення ранжування за пріоритетністю чинників ЕНБ і критеріальних апаратів, а також моделей експлуатації такої техніки, методик відповідних експериментальних і розрахункових досліджень.

ST-стратегія, спрямована на усунення *загроз* шляхом використання *сильних* сторін.

Передбачає доведення запропонованих СУЕБ, ТЗНС і ФТЧ, класифікацій і класифікаторів, математичних моделей і результатів ранжування, методик експериментальних і розрахункових досліджень, вдосконаленого лабораторного обладнання і метрологічного забезпечення до стану, за якого розробки перетворюються на конкретний завершений інтелектуальний продукт, повністю готовий до комерціалізації, тобто до реалізації «в металі» для ФТЧ та вдосконалених частин лабораторного обладнання та у виді програмного продукту і документів для СУЕБ, ТЗНС, класифікацій і класифікаторів, математичних моделей і результатів ранжування, методик експериментальних і розрахункових досліджень та метрологічних рекомендацій, обґрунтування громадянської ініціативи щодо закріплення процедур перевірки відповідності технічного стану ПДВЗ за показниками екологічності законодавчо встановленим нормативам про ввезенні ЕУ з ними на територію держави, щорічного технічного огляду, зміні власника тощо.

WO-стратегія, спрямована на посилення поки що *слабких* сторін за рахунок використання *можливостей*.

Включає в себе доведення пропонованого комплексу розробок до стану інтелектуального продукту, повністю готового до комерціалізації, на основі створених у ході здійснення цих досліджень згаданих у попередніх стратегіях науково-методоло-

гічній та матеріальній основах, за рахунок пошуку потенційного інвестора державної чи недержавної форми власності та отримання конкретного технічного завдання, а також створення соціального рекламного продукту для підвищення обізнаності та рівня екологічної свідомості експлуатантів ЕУ з ПДВЗ.

WT-стратегія, спрямована на посилення поки що *слабких* сторін шляхом уникнення *загроз*.

Пропонується подолати сформульовані недоліки шляхом розробки проекту нормативного документу, що включатиме оновлену технічну документацію, що може набути статусу нормативно-правового акту, та патенти на деякі технічні розробки, а також запитів на фінансування екологічної програми щодо здійснення такого виду природоохоронної діяльності (відповідно до «Переліку видів діяльності, що належать до природоохоронних заходів», затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України від 17.09.1996 р. № 1147) з Державного чи Обласного чи фонду охорони навколишнього природного середовища згідно до вмісту «Положення про Державний фонд охорони навколишнього природного середовища», затвердженому Постановою кабінету Міністрів України від 07.05.1998 р. № 634 а також вмісту «Порядку планування та фінансування природоохоронних заходів», затверджений Наказом Міністерства екології та природних ресурсів України від 12.06.2015 р. № 194, а також впровадження методики оцінювання для одиниць аварійно-рятувальної та пожежної техніки відповідно до основних пунктів «Стратегії сталого розвитку «Україна–2020», схваленої Указом Президента України № 5/2015 від 12.01.2015 р., «Положення про організацію екологічного забезпечення ДСНС України», затвердженого наказом № 618 (з основної діяльності) від 20.09.2013 р., «Типового положення про регіональну та місцеву комісію з питань техногенно-екологічної безпеки і надзвичайних ситуацій», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України № 409 від 17.06.2015 р.

Додаток Б МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРІАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОЦЕСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМ ДВЗ

Б.1 Метрологічні аспекти застосування формули перерахунку показників димності й токсичності відпрацьованих газів у викид твердих частинок

Б.1.1 Постановка задачі

Наразі на території України діють законодавчо встановлені нормативи показників токсичності ВГ ПДВЗ будь-яких типів, зокрема питомого ефективного масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ g_e(PM) у г/(кВт·год) [1–20]. При цьому самі значення величини g_e(PM) отримують шляхом віднесення значення величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ G(PM) у г/год до значень величини ефективної потужності ПДВЗ N_e у кВт. Як буде показано далі, отримання величини N_e та значень її інструментальної абсолютної і відносної похибки не являє собою складної задачі. Основна складність в отриманні значень g_e(PM) як законодавчо нормованого показника екологічності ПДВЗ за найтоксичнішою забруднюючою речовиною полягає в отриманні значень величини G(PM).

Як відомо з основних положень наукової дисципліни «Метрологія», жодні вимірювання – прямі чи непрямі – неможливо виконати з абсолютною (ідеальною) точністю, а лише з деякою навизначеністю, тобто похибкою [214, 215], що також слід враховувати при плануванні експериментальних чи розрахункових досліджень [216]. Нормативні вимоги [21, 22] до такого показника токсичності ВГ ПДВЗ різного призначення також встановлюють спосіб експериментального отримання значень величини G(PM) – гравіметричний [1–20]. Проте, через вказані вище обставини, характерні для нашої країни, широкого розповсюдження набули формули перерахунку різного виду, найбільш широкого розповсюдження серед яких набула формула проф. Ігоря Парсаданова (НТУ «ХПІ»), описана у монографії [6].

Означена формула перерахунку, на відміну від альтернативних їй, враховує не тільки показники димності ВГ (зокрема, коефіцієнт ослаблення світлового потоку N_D у %), а ще й токсичності ВГ (зокрема, об’ємна концентрація незгорілих вуглевод-

нів $C(C_nH_m)$ у млн$^{-1}$ чи ppm) та отримати на основі цих двох незалежних змінних значення величини G(PM) у кг/(кВт·год). При цьому у таку формулу входять у якості ще двох незалежних змінних значення масових годинних витрат палива G_{fuel} та повітря G_{air} ПДВЗ у кг/год.

Аналіз науково-технічної літератури щодо використання обраної для дослідження формули перерахунку не виявив ні методики оцінювання її точності, ні, власне, кількісних і якісних результатів такого оцінювання (окрім монографії [8], але в обмеженому виді). Аналізу кількісних і якісних аспектів точності отримання значень величини G(PM) гравіметричним методом наведено у роботі [18].

Іншою проблемним питанням застосування обраної (і будь-якої альтернативної) формли перерахунку є вибір одиниць вимірювання показників димності ВГ та, відповідного лабораторного обладнання, зокрема димомірів різних принципів дії та конструкції. Як буде показано далі, різні показники димності ВГ з притаманними їм одиницями вимірювання співвідносяться одне з одним, та тим, що входить до досліджуваної формули перерахунку, за нелінійними законами і безпосереднє використання у ній альтернативних показників димності ВГ не є можливим.

Такі питання постають на практиці у таких випадках: 1) вибір ЗВТ при комплектуванні моторного стенду новоствореної чи модернізованої лабораторії; 2) стендові моторні дослідження ПДВЗ у лабораторії, вже обладнаній ЗВТ певного типу, що дає альтернативні показники димності ВГ; 3) критеріальне оцінювання ПДВЗ за наявності готового набору вихідних даних, отриманого іншими дослідниками, серед яких присутні лише альтернативні показники димності ВГ.

У зв'язку з вищенаведеними міркуваннями, постає також питання впливу виду одиниць вимірювання показників димності ВГ на кількісні та якісні аспекти інструментальної точності формул перерахунку.

Б.1.2 Аналіз математичного апарату формули перерахунку

Формула перерахунку, запропонована проф. І.В. Парсаданова (НТУ «ХПІ») отримана як результат аналізу даних сертифікаційних випробувань автотракторного дизельного ПДВЗ СМД-31 на моторному стенді фірми Ricardo, обладнаного повно поточним тунелем розведення, описана у монографії [6], має вид формули (Б.1).

$$G(PM)=\left(2{,}3\cdot10^{-3}\cdot N_D+5\cdot10^{-5}\cdot N_D^2+0{,}145\cdot\frac{C(C_nH_m)\cdot4{,}78\cdot10^{-7}\cdot\left(G_{air}+G_{fuel}\right)}{0{,}7734\cdot G_{air}+0{,}7239\cdot G_{fuel}}+\right.$$

$$\left.+0{,}33\cdot\left(\frac{C(C_nH_m)\cdot4{,}78\cdot10^{-7}\cdot\left(G_{air}+G_{fuel}\right)}{0{,}7734\cdot G_{air}+0{,}7239\cdot G_{fuel}}\right)^2\right)\times\frac{\left(0{,}7734\cdot G_{air}+0{,}7239\cdot G_{fuel}\right)}{1000},\ \text{кг/год.}\quad (Б.1)$$

Для виконання даного дослідження та за результатами аналізу математичного апарату формули (Б.1), ця формула перетворена на формулу (Б.2).

$$\begin{aligned}&G(PM)=A\cdot N_D\cdot\left(D\cdot G_{air}+H\cdot G_{fuel}\right)+B\cdot N_D^2\cdot\left(D\cdot G_{air}+H\cdot G_{fuel}\right)+\\&+C\cdot C(C_nH_m)\cdot\left(G_{air}+G_{fuel}\right)+M\cdot C(C_nH_m)^2\cdot\left(G_{air}+G_{fuel}\right)^2/\left(D\cdot G_{air}+H\cdot G_{fuel}\right)=,\\&=f\left(N_D;C_{CH};G_{fuel};G_{air}\right)=f\left(x_1;x_2;x_3;x_4\right)\end{aligned}\quad (Б.2)$$

де $A=2{,}3\cdot10^{-6}$ кг/(год·%); $B=5{,}0\cdot10^{-8}$ кг/(год·%^{2}); $C=6{,}93\cdot10^{-9}$; кг/(год·ppm); $D=0{,}7734$; $H=0{,}7239$; $M=7{,}54\cdot10^{-17}$ кг/(год·ppm^2).

На рис. В.3,а (див. Додаток В) наведено графіки залежностей величини G(PM) від значень коефіцієнту N_D та концентрації $C(C_nH_m)$ (іноді позначається як C_{CH} чи C_{CHx}) при постійних значеннях G_{fuel} та G_{air}, тобто для певного режиму роботи ПДВЗ (зокрема для середини поля робочих режимів $n_{кв}$ = 1200 хв$^{-1}$ і $M_{кр}$ = 55 Н·м).

Б.1.3 Методика розрахункового оцінювання інструментальної точності отримання величини масового годинного викиду твердих частинок з потоком відпрацьованих газів за формулою перерахунку

Як відомо з основних положень наукової дисципліни «Метрологія», за наявності дискретної вибірки вихідних даних достатнього об'єму, кожний елемент якої являє собою результат вимірювання на одному й тому ж режимі роботи ПДВЗ, показником інструментальної точності може виступати середньоквадратичне відхилення, що описується формулою (Б.3) [214, 215]. З тих же положень відомо, що у разі наявності аналітичних чи емпіричних залежностей між впливаючими факторами (результатами прямих вимірювань) та результатами непрямих вимірювань, показником інструментальної точності може виступати абсолютна похибка, що описується формулою (Б.4) [214, 215]. При цьому за кількості впливаючих факторів, більшій за одиницю, та якщо усі вони є незалежними одне від одного змінними, у формулі

(Б.4) використовуються абсолютні значення відповідних частинних похідних для реалізації найгіршого сценарію накопичення похибок. При одному впливаючому факторі слід використовувати алгебраїчне значення частинної похідної для отримання інформації про алгебраїчне значення абсолютної похибки. Такий підхід використано у оботі [4]. Величини абсолютних і відносних похибок співвідносяться між собою за формулами (Б.5) і (Б.6). Формули (Б.3) і (Б.4) для випадку досліджуваної формули перерахунку набувають виду формул (Б.7) і (Б.8), (Б.9) [4].

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(\left(\partial y / \partial x_j\right)^2 \cdot \sigma_{x_j}^2\right)}, [y]; \quad \text{(Б.3)}$$

$$\Delta y = \sum_{j=1}^{n}\left(\left|\partial y / \partial x_j\right| \cdot \Delta x_j\right), [y]; \quad \text{(Б.4)}$$

$$\Delta x = \delta x \cdot x / 100, [x]; \quad \text{(Б.5)}$$

$$\delta x = \Delta x / x \cdot 100, \%; \quad \text{(Б.6)}$$

де σ_y – середньоквадратичне відхилення результату непрямого вимірювання величини y, $[y]$; n – кількість впливаючих факторів; σ_{xj} – середньоквадратичне відхилення j-го впливаючого фактора, $[x]$; $\partial y/\partial x_j$ – частинна похідна величини y за величиною x; Δy – абсолютна похибка результату непрямого вимірювання величини y, $[y]$; Δx – абсолютна похибка визначення впливаючого фактора, $[x]$; δx – відносна похибка визначення впливаючого фактора, %.

$$\sigma_{G_{PM}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{4}\left(\left(\frac{\partial G_{PM}}{\partial x_j}\right)^2 \cdot \sigma_{x_j}^2\right)} = \sqrt{\begin{array}{l}\left(\frac{\partial G_{PM}}{\partial N_D}\right)^2 \cdot \sigma_{N_D}^2 + \left(\frac{\partial G_{PM}}{\partial C_{CH}}\right)^2 \cdot \sigma_{C_{CH}}^2 + \\ + \left(\frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{fuel}}\right)^2 \cdot \sigma_{G_{fuel}}^2 + \left(\frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{air}}\right)^2 \cdot \sigma_{G_{air}}^2\end{array}}, \text{ кг/год}; \quad \text{(Б.7)}$$

$$\begin{array}{l}\Delta G_{PM} = \sum_{j=1}^{4}\left(\left|\frac{\partial G_{PM}}{\partial x_j}\right| \cdot \Delta x_j\right) = \left|\frac{\partial G_{PM}}{\partial N_D}\right| \cdot \Delta N_D + \left|\frac{\partial G_{PM}}{\partial C_{CH}}\right| \cdot \Delta C_{CH} + \\ + \left|\frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{fuel}}\right| \cdot \Delta G_{fuel} + \left|\frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{air}}\right| \cdot \Delta G_{air} = \left|\frac{\partial G_{PM}}{\partial N_D}\right| \cdot \Delta N_D + W\end{array}, \text{ кг/год}; \quad \text{(Б.8)}$$

$$W = \left|\frac{\partial G_{PM}}{\partial C_{CH}}\right| \cdot \Delta C_{CH} + \left|\frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{fuel}}\right| \cdot \Delta G_{fuel} + \left|\frac{\partial G_{PM}}{\partial G_{air}}\right| \cdot \Delta G_{air} = const, \text{ кг/год}; \quad \text{(Б.9)}$$

де N_D, C_{CH}, G_{fuel}, G_{air} – впливаючі фактори; ΔN_D, ΔC_{CH}, ΔG_{fuel}, ΔG_{air} – абсолютні похибки визначення впливаючих факторів; $\partial G_{PM}/\partial N_D$, $\partial G_{PM}/\partial C_{CH}$, $\partial G_{PM}/\partial G_{fuel}$, $\partial G_{PM}/\partial G_{air}$ –

частинні похідні, формули для яких наведено у [4].

Результати застосування розробленого підходу наведено на рис. Б.1.

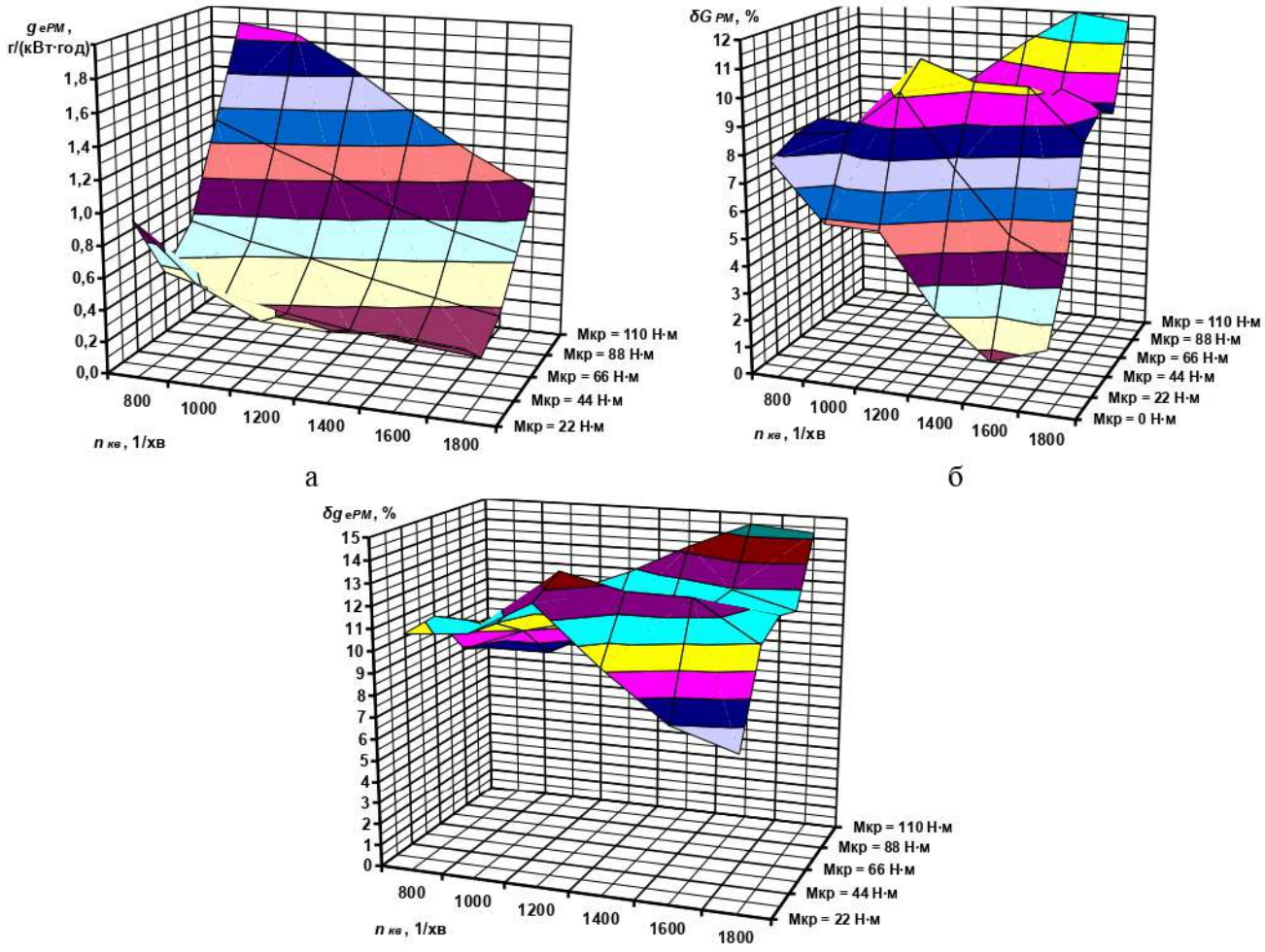


Рисунок Б.1 – Розподіл значень величини g_e(РМ) для всієї області робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 (а) та таки розподіл значень величин δG(РМ) (б) і δg_e(РМ) (в)

Б.1.4 Виявлення впливу типу одиниць вимірювання показників димності відпрацьованих газів на інструментальну точність формули перерахунку

Для випадків використання у формулі перерахунку альтернативних показників димності ВГ абсолютна похибка визначення впливаючого фактора N_D визначається не за формулою (Б.5), а за формулою (Б.14).

$$\Delta N_D = \left|\partial N_D / \partial x_{1,k}\right| \cdot \Delta x_{1,k}; \qquad \text{(Б.14)}$$

де $x_{1,k}$ – альтернативний показник димності ВГ, індекс $k = 1$ для N_D; $k = 2$ для K; $k = 3$ для BSU; $k = 4$ для C_C; $k = 5$ для HSN; $\partial N_D/\partial x_{1,k}$ – частинна похідна величини N_D за

величиною $x_{1,k}$.

Співвідношення значень абсолютних похибок визначення величини G_{PM} при використанні альтернативного і базового показника токсичності ВГ ПДВЗ визначаються формулою (Б.15), а її складові – формулами (Б.16) і (Б.17).

$$\frac{\Delta G_{PM}(x_{1k})}{\Delta G_{PM}(x_{11})} = \frac{\left|\partial G_{PM}(x_{11})/\partial x_{11}\right| \cdot \left|\partial x_{11}(x_{1k})/\partial x_{1k}\right| \cdot \Delta x_{1k} + W}{\left|\partial G_{PM}(x_{11})/\partial x_{11}\right| \cdot \Delta x_{11} + W} = \\ = \frac{\left|\partial G_{PM}(N_D)/\partial N_D\right| \cdot \left|\partial N_D(x_{1k})/\partial x_{1k}\right| \cdot \Delta x_{1k} + W}{\left|\partial G_{PM}(N_D)/\partial N_D\right| \cdot \Delta N_D + W}; k = [2;3;4;5] \quad \text{(Б.15)}$$

$$x_{11} = N_D = a_{4,k} \cdot x_{1k}^4 + a_{3,k} \cdot x_{1k}^3 + a_{2,k} \cdot x_{1k}^2 + a_{1,k} \cdot x_{1k} + a_{0,k}; \quad \text{(Б.16)}$$

$$\partial x_{11}/\partial x_{1k} = \partial N_D/\partial x_{1k} = 4 \cdot a_{4,k} \cdot x_{1k}^3 + 3 \cdot a_{3,k} \cdot x_{1k}^2 + 2 \cdot a_{2,k} \cdot x_{1k} + a_{1,k}. \quad \text{(Б.17)}$$

Наразі димність ВГ характеризують значенням коефіцієнта ослаблення світлового потоку (непрозорості – opacity) N (далі у цій кваліфікаційній роботі буде позначатися як N_D) [8] визначається формулами (Б.18) і (Б.19).

$$N = 100 - \tau, \%; \quad \text{(Б.18)}$$

$$\tau = I/I_0 \cdot 100, \%; \quad \text{(Б.19)}$$

де τ – коефіцієнт світлопропускання (transmittance); I і I_0 – світловий потік крізь пробу ВГ що вийшов з джерела світла та прийшов на прийомник світла відповідно, лм.

За визначенням величини N та K співвідносяться між собою за формулою (Б.20) при L = 0,43 м [6, 15].

$$K = -\ln(1 - N/100)/L, \text{ м}^{-1}. \quad \text{(Б.20)}$$

Формула перерахунку MIRA (The Motor Industry Research Association) має вид сукупності формул (Б.21) – (Б.23) [8].

$$N = 100 \cdot (1 - \exp(-\varepsilon \cdot l \cdot C)), \%; \quad \text{(Б.21)}$$

$$C_C = \ln(1 - N/100)/(\varepsilon \cdot l), \text{ г/м}^3; \quad \text{(Б.22)}$$

$$\varepsilon = 3 \cdot d_A^2/(2 \cdot \rho \cdot d_v^3), \text{ м}^2/\text{г}; \quad \text{(Б.23)}$$

де C_C – концентрація ТЧ, г/м^3; ε ≈ 6,82 м^2/г – питомий коефіцієнт світлопропускання; ρ ≈ 1 г/м^3 – щільність ТЧ; $d_A \approx 0{,}1 \cdot 10^{-6}$ м – еквівалентний проекційний діаметр; $d_v \approx$

$\approx 0{,}13 \cdot 10^{-6}$ м – еквівалентний об'ємний діаметр.

Формула перерахунку A.C. Alkidas`a має вид (Б.24) [217].

$$C_C = 565 \cdot \left(\ln\left(\frac{10}{10 - BSU} \right) \right)^{1{,}206}, \text{ мг/м}^3; \qquad \text{(Б.24)}$$

де BSU – димність ВГ за шкалою Bosch.

Формула перерахунку G.G. Muntean`a має вид (Б.25) [218].

$$C_C = \left(-184 \cdot BSU - 727{,}5\right) \cdot \log\left(1 - BSU/10\right), \text{ мг/м}^3. \qquad \text{(Б.25)}$$

Співвідношення між одиницями вимірювання димності ВГ за шкалами Harritage HSN та Bosch BSU описується формулою (Б.26) [8].

$$HSN = -2{,}64 \cdot 10^{-4} \cdot BSU^2 + 0{,}111642 \cdot BSU - 1{,}023 \cdot 10^{-3}. \qquad \text{(Б.26)}$$

У дослідженні [4] проілюстровано залежність нормативно встановленого значення димності ВГ дизельного ПДВЗ від об'ємної секундної витрати ВГ за за ГОСТ 33754-2016 [220]. На рис. Б.8 проілюстровано співвідношення між альтернативними показниками димності ВГ та базовим показником за даними джерел [9, 221]. Графіки таких залежностей описано поліномами методом найменших квадратів [213], коефіцієнти яких наведено у дослідженні [4], оскільки показник R^2 для цих поліномів знаходиться у діапазоні 0,999… …1,0, то отримані поліноми можна використовувати як альтернативні формулам (Б.18) – (Б.26).

Вихідні дані для розрахункового дослідження, а саме параметри впливаючих факторів у формулі (Б.1), отримані з нормативної літератури та за результатами стендових випробувань дизеля 2Ч10,5/12, наведено у джерелі [4].

Результати розрахункового дослідження співвідношень абсолютних значень, абсолютних і відносних похибок різних показників димності ВГ за розробленим алгоритмом для обраних трьох особливих режимів роботи автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 – режим мінімального холостого ходу (Режим А), режим максимального крутного моменту (Режим В) та режим номінальної потужності (Режим С) проілюстровано на рис. Б.3. У цій таблиці також наведено послідовність кроків алгоритму

такого попереднього розрахункового дослідження.

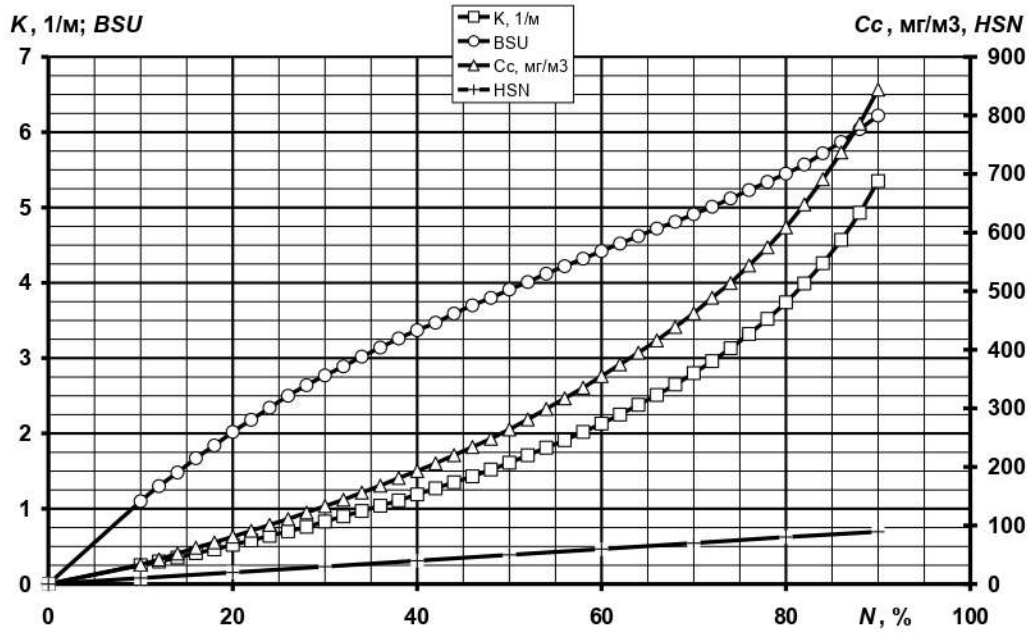


Рисунок Б.2 – Співвідношення між альтернативними показниками димності ВГ дизельного ПДВЗ та базовим показником за даними [8, 9, 220, 222]

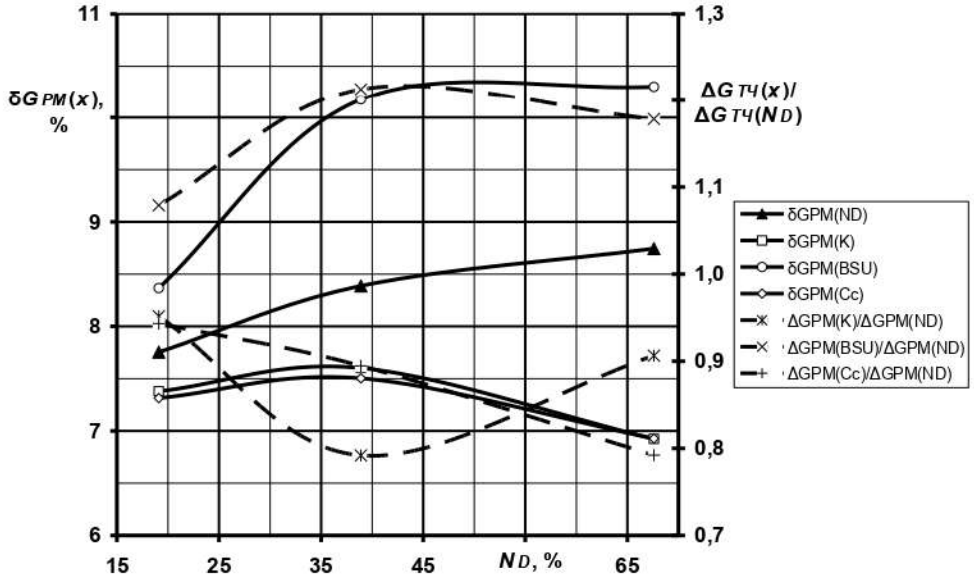


Рисунок Б.3 – Графіки залежностей значень відносної похибки та співвідношення абсолютних похибок величин викиду ТЧ G_{PM} для різних одиниць вимірювання димності ВГ від значення базової одиниці – N_D

Вказаний алгоритм попереднього оцінювання величини похибки визначення показника димності для випадку використання альтернативних одиниць її вимірювання полягає у такому. **Крок 1** – отримання абсолютних значень базового показника димності ВГ – величини N_D – за експериментальними даними → **Крок 2** – отри-

мання абсолютних значень альтернативних показників димності за формулами (Б.18) – (Б.26) чи за отриманими поліномами (див. [4]) → **Крок 3** – отримання паспортних значень відносної похибки ЗВТ для альтернативних показників димності з нормативно-технічної літератури, наприклад з джерел [220, 224, 225] → **Крок 4** – отримання значень абсолютної похибки альтернативних показників димності за формулою (Б.5) → **Крок 5** – отримання абсолютної похибки базового показника димності ВГ за формулами, зворотними до формул (Б.18) – (Б.26) чи за отриманими поліномами (див. [4]) → **Крок 6** – отримання відносної похибки базового показника димності ВГ за формулою, зворотною до формули (Б.6) → **Крок 7…9** – отримання значень співвідношень значень альтернативних і базового значень показників димності, а також значень їх абсолютних і відносних похибок.

Аналіз отриманих результатів дозволяє при використанні у досліджуваній формулі перерахунку альтернативних показників димності ВГ враховувати значення описаної вище складової інструментальної похибки. За значенням цієї похибки показники димності ВГ можливо ранжувати і перевагу слід надавати їх використанню у такій послідовності: $C_C \rightarrow K \rightarrow N_D$ і $HSN \rightarrow BSU$. Таке ранжування проілюстровано на рис. Б.4.

Ознака ранжування		Відносна інструментальна похибка визначення масового годинного викиду твердих частинок за формулою перерахунку			
Показник ознаки	$\delta G_{PM}(x_{1,i})$, %	±7,2	±7,3	±8,3	±9,6
Показник димності відпрацьованих газів		C_C, мг/м^3 →	K, м$^{-1}$ →	N_D, % та HSN →	BSU
Пріоритетність застосування		Вища →			Нижча

Рисунок Б.4 – Ранжування показників димності ВГ за ознакою похибки застосування формули перерахунку

Розрахунково оцінено значення інструментальної точності отримання величини такого питомого викиду ТЧ g_e(PM) з використанням досліджуваної формули перерахунку для актуального значення паспортної точності ЗВТ, усереднене по всьому полю робочих режимів ПДВЗ, воно склало ±9,8 %.

Здійснено верифікацію отриманих значень інструментальної точності отримання величини питомого ефективного масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ, отриманими за 13-режимним стаціонарним стандартизованим випробувальним циклом, за даними відомих досліджень вітчизняних науковців (монографія [9]). Отримано наближену оцінку усередненого значення методичної складової результуючої систематичної похибки, що склало ±22,8 %.

Б.2 Метрологічні аспекти застосування комплексного паливно-екологічного критерію

Б.2.1 Постановка задачі

Питання інструментальної точності отримання значень критеріїв рівня ЕБ будь-якого процесу чи об'єкту як складової результуючої систематичної похибки дозволяє кількісно і якісно охарактеризувати такі важливі методичні аспекти комплексного критеріального оцінювання: 1) надання пріоритету при виборі певного критеріального математичного апарату з числа відомих, вдосконалених чи новостворених; 2) вибір способів та засобів отримання складових набору первинних вихідних даних для комплексного критеріального оцінювання за обраним апаратом; 3) кількісне оцінювання роздільної здатності певного критеріального математичного апарату з числа відомих, вдосконалених чи новостворених при порівняльних дослідженнях.

Величини масових годинних викидів NO_x, C_nH_m та CO тобто $G(NO_x)$, $G(C_nH_m)$ та $G(CO)$ у кг/год перераховуються з отриманих експериментально значень об'ємних концентрацій $C_V(NO_x)$, $C_V(C_nH_m)$ і $C_V(CO)$ з пробі ВГ, ppm або млн$^{-1}$ за методиками з [4, 6, 27–30] за такими формулами з поправочними коефіцієнтами на вологість повітря лабораторії F_{NOxi} і F_{COi}.

$$G_{NOxi} = 1{,}587 \cdot 10^{-3} \cdot C_{VNOxi} \cdot F_{NOxi} \cdot \left(G_{палі} + G_{повi}\right), \qquad (Б.27)$$

$$G_{COi} = 9{,}66 \cdot 10^{-4} \cdot C_{VCC\,i} \cdot F_{COi} \cdot \left(G_{палі} + G_{повi}\right), \qquad (Б.28)$$

$$G_{CnHmi} = 4{,}78 \cdot 10^{-4} \cdot C_{VCnHmi} \cdot \left(G_{палі} + G_{повi}\right), \qquad (Б.29)$$

$$F_{NOxi} = \begin{pmatrix} 1 + \left(0{,}044 \cdot G_{палі} / G_{повi} - 0{,}0038\right) \cdot \left(7 \cdot d - 75\right) + \\ + \left(0{,}0053 - 0{,}116 \cdot G_{палі} / G_{повi}\right) \cdot 1{,}8 \cdot \left(T_0 - 302\right) \end{pmatrix}^{-1}, \qquad (Б.30)$$

$$d = 6{,}21 \cdot \varphi_0 \cdot P_s / \left(B_0 - 0{,}01 \cdot \varphi_0 \cdot P_s\right), \qquad (Б.31)$$

$$F_{COi} = 1 - 1{,}85 \cdot G_{палі} / G_{пові}, \quad \text{(Б.32)}$$

$$P_s = 6{,}1121 \cdot \exp\left(\left(18{,}678 - t_0 / 234{,}5\right) \cdot t_0 / \left(257{,}14 + t_0\right)\right), \quad \text{(Б.33)}$$

де d = 5,367 г/кг – вміст водяної пари у повітрі НПС; φ_0 = 50 % – відносна вологість повітря НПС; B_0 = 995 гПа – барометричний тиск; P_s = 17,052 гПа – тиск насичених парів води [230]; t_0 = 15 °С – температура повітря НПС.

Особливості й результати експериментального отримання складових формул (Б.27) – (Б.33) у дослідженнях [27–30] – у праці [4].

Б.2.2 Методика оцінювання інструментальної складової відносної результуючої систематичної похибки отримання значень комплексного паливно-екологічного критерію

У загальному випадку оцінювання точності багаторазових непрямих вимірювань слід використовувати формули (Б.4)–(Б.6), якщо у якості вихідних даних виступає вибірка окремих результатів вимірювань (тобто, дані статистичного характеру). Для досліджуваного критерію основна розрахункова формула набуває виду (Б.34).

$$\Delta K_{fe} = \left|\frac{\partial K_{fe}}{\partial \eta_e}\right| \cdot \Delta \eta_e + \left|\frac{\partial K_{fe}}{\partial \beta}\right| \cdot \Delta \beta = 100 \cdot \left(\left|\frac{\partial K_{fe}}{\partial \eta_e}\right| \cdot \delta \eta_e \cdot \eta_e + \left|\frac{\partial K_{fe}}{\partial \beta}\right| \cdot \delta \beta \cdot \beta\right), \text{‰}; \quad \text{(Б.34)}$$

де $\partial K_{fe}/\partial \eta_e$, $\partial K_{fe}/\partial \beta$, $\partial \eta_e/\partial g_e$, $\partial g_e/\partial G_f$, $\partial g_e/\partial N_e$, $\partial \beta/\partial Z_f$, $\partial \beta/\partial Z_e$, $\partial Z_f/\partial g_e$, $\partial Z_e/\partial g_e$, $\partial Z_e/\partial U_e$, $\partial U_e/\partial g_{pr}$, $\partial N_e/\partial M_{кр}$, $\partial N_e/\partial n_{кв}$, $\partial g_{pr}/\partial G_{PM}$, $\partial g_{pr}/\partial G_{CnHm}$, $\partial g_{pr}/\partial G_{NOx}$, $\partial g_{pr}/\partial G_{CO}$, $\partial g_{pr}/\partial G_f$ – частинні похідні; $\Delta n_{кв}$, $\Delta M_{кр}$, ΔG_f, ΔG_{PM}, ΔG_{NOx}, ΔG_{CnHm}, ΔG_{CO}, Δg_{pr}; ΔU_e, ΔN_e, Δg_e, ΔZ_e, ΔZ_f, $\Delta \beta$; $\Delta \eta_e$; ΔK_{fe} – абсолютні похибки; $\delta n_{кв}$, $\delta M_{кр}$, δG_f, δG_{PM}, δG_{NOx}, δG_{CnHm}, δG_{CO} – відносні похибки.

За наявності повного набору вихідних даних для формули (2.1) у вигляді певної сукупності значень величин масових годинних витрат палива G_{fuel}, масових годинних викидів законодавчо нормованих полютантів G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO}, відповідних значенням координат поля робочих режимів ПДВЗ $n_{кв}$ і $M_{кр}$ (згідно до прийнятої моделі експлуатації з відповідними значеннями вагових факторів WF), а також фіксованих значень коефіцієнтів δ, σ, f, P_f, відповідних наявним умовам експлуатації,

для вирішення поставленої задачі можна скористатися формулою (Б.34) та іншими з джерела [4], при цьому також необхідною є наявність щодо паспортної точності ЗВТ, яка міститься у джерелах [24, 222–229].

Однак, моторні випробувальні стенди лабораторій підрозділів наукових організацій на території України не обладнані ЗВТ, покази яких є значеннями величин G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO}, і тому у документації до них відсутня інформація щодо абсолютної чи відносної похибки прямих вимірювань таких величин. У монографії [6] наведено формули для визначення значень масових годинних викидів законодавчо нормованих полютантів шляхом непрямих вимірювань – це формули (Б.27) – (Б.33) для величин G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO}, та формула (Б.1) для величини G_{PM}. Інформація щодо паспортної точності ЗВТ, більш доступних і менш коштовних, значення показів яких при входять до цих формул, міститься у джерелах [24, 222–229].

Відповідно до вищесказаного, постає питання оцінювання інструментальної точності визначення значень величин G_{PM}, G_{NOx}, G_{CnHm}, G_{CO} за формулами (Б.27) – (Б.33). Користуючись тим самим принципом, що і у попередніх розділах, таке оцінювання можна здійснити розрахунком за формулами (Б.35) – (Б.41) та іншими з роботи [4].

$$\Delta G_{NOx} = \left|\frac{\partial G_{NOx}}{\partial C_{VNOx}}\right| \cdot \Delta C_{VNOx} + \left|\frac{\partial G_{NOx}}{\partial F_{NOx}}\right| \cdot \Delta F_{NOx} + \left|\frac{\partial G_{NOx}}{\partial G_{fuel}}\right| \cdot \Delta G_{fuel} + \left|\frac{\partial G_{NOx}}{\partial G_{air}}\right| \cdot \Delta G_{air}, \text{кг/год;} \quad \text{(Б.35)}$$

$$\Delta G_{CO} = \left|\frac{\partial G_{CO}}{\partial C_{VNOx}}\right| \cdot \Delta C_{VCO} + \left|\frac{\partial G_{CO}}{\partial F_{CO}}\right| \cdot \Delta F_{CO} + \left|\frac{\partial G_{CO}}{\partial G_{fuel}}\right| \cdot \Delta G_{fuel} + \left|\frac{\partial G_{CO}}{\partial G_{air}}\right| \cdot \Delta G_{air}, \text{ кг/год;} \quad \text{(Б.36)}$$

$$\Delta G_{CnHm} = \left|\frac{\partial G_{CnHm}}{\partial C_{VCnHm}}\right| \cdot \Delta C_{VCnHm} + \left|\frac{\partial G_{CnHm}}{\partial G_{fuel}}\right| \cdot \Delta G_{fuel} + \left|\frac{\partial G_{CnHm}}{\partial G_{air}}\right| \cdot \Delta G_{air}, \text{ кг/год;} \quad \text{(Б.37)}$$

$$\Delta F_{NOx} = \left|\frac{\partial F_{NOx}}{\partial G_{fuel}}\right| \cdot \Delta G_{fuel} + \left|\frac{\partial F_{NOx}}{\partial G_{air}}\right| \cdot \Delta G_{air} + \left|\frac{\partial F_{NOx}}{\partial d}\right| \cdot \Delta d + \left|\frac{\partial F_{NOx}}{\partial T_0}\right| \cdot \Delta T_0; \quad \text{(Б.38)}$$

$$\Delta F_{CO} = \left|\frac{\partial F_{CO}}{\partial G_{fuel}}\right| \cdot \Delta G_{fuel} + \left|\frac{\partial F_{CO}}{\partial G_{air}}\right| \cdot \Delta G_{air}; \quad \text{(Б.39)}$$

$$\Delta d = \left|\frac{\partial d}{\partial \varphi_0}\right| \cdot \Delta \varphi_0 + \left|\frac{\partial d}{\partial P_s}\right| \cdot \Delta P_s + \left|\frac{\partial d}{\partial B_0}\right| \cdot \Delta B_0, \text{ г/кг;} \quad \text{(Б.40)}$$

$$\Delta P_s = \left|\frac{\partial P_s}{\partial t_0}\right| \cdot \Delta t_0, \text{ кПа;} \quad \text{(Б.41)}$$

де $\partial G_{NOx}/\partial C_{vNOx}$, $\partial G_{NOx}/\partial F_{NOx}$, $\partial G_{NOx}/\partial G_{fuel}$, $\partial G_{NOx}/\partial G_{air}$, $\partial G_{CnHm}/\partial C_{vCnHm}$, $\partial G_{CnHm}/\partial G_{fuel}$; $\partial G_{CnHm}/\partial G_{air}$; $\partial G_{CO}/\partial C_{vCO}$, $\partial G_{CO}/\partial F_{CO}$, $\partial G_{CO}/\partial G_{fuel}$; $\partial G_{CO}/\partial G_{air}$, $\partial F_{NOx}/\partial G_{fuel}$, $\partial F_{NOx}/\partial G_{air}$, $\partial F_{NOx}/\partial d$, $\partial F_{NOx}/\partial T_0$, $\partial F_{CO}/\partial G_{fuel}$, $\partial F_{CO}/\partial G_{air}$, $\partial d/\partial \varphi_0$ = 0,108 г/(кг·%) = const; $\partial d/\partial P_S$ = = 3,175, г/(кг·кПа) = const; $\partial d/\partial B_0$ = –0,054 г/(кг·кПа) = const; $\partial P_S/\partial t_0$ = 0,111 кПа/°С = = const – частинні похідні.

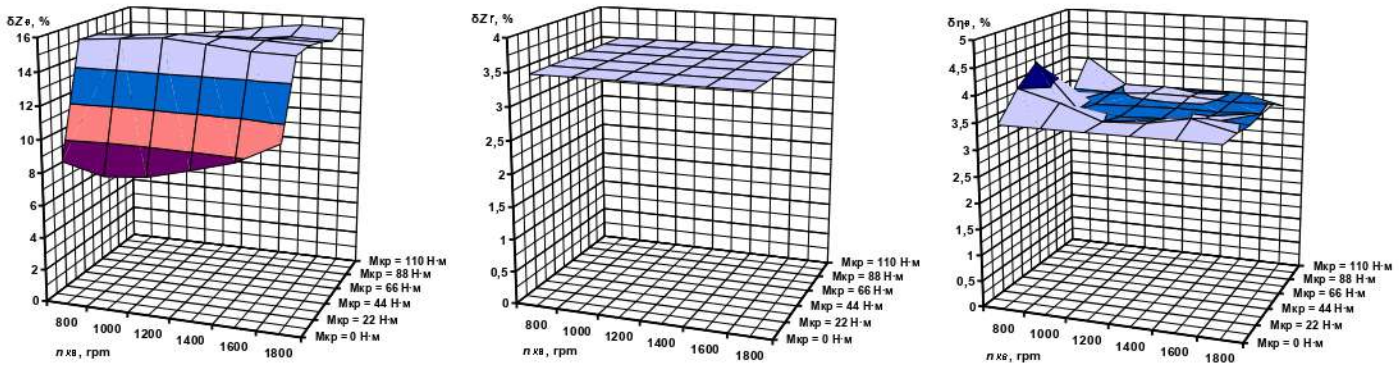
Абсолютні та відносні похибки величин, що входять у вищенаведені формули, отримані з паспортів до відповідних ЗВТ, мають такі значення: $\delta\varphi_0$ = ±5,0 % [226]; δP_s = ±1,0 % [227]; Δt_0 = ±1,0 °С [228]; ΔB_0 = ±0,2 кПа [229]; δC_{vNOx} = ±5,0 % [222]; δC_{vCnHm} = ±5,0 % [223]; δC_{vCO} = ±5,0 % [223], $\delta n_{кв}$ = ±1,0 % [24, 224, 225], $\delta M_{кр}$ = ±1,5 % [24, 224, 225]. Тоді ΔP_S = ±0,111 кПа = const; Δd = ±0,3455 г/кг = const; δd = ±6,44 % = const, а величини ΔF_{CO}, δF_{CO}, у %; ΔF_{NOx}, δF_{NOx}, у %; ΔG_{CnHm}, у кг/год; δG_{CnHm}, у %, отримано у подальших розрахункових дослідженнях. При цьому використано дані з [230].

Б.2.3 Результати оцінювання інструментальної точності комплексного паливно-екологічного критерію та їх аналіз

У роботі [4] наведено, проаналізовано та проілюстровано у вигляді графіків залежності від координат поля робочих режимів ПДВЗ значення частинних похідних $\partial K_{fe}/\partial \eta_e$, $\partial K_{fe}/\partial \beta$, $\partial \eta_e/\partial g_e$, $\partial g_e/\partial G_f$, $\partial g_e/\partial N_e$, $\partial \beta/\partial Z_f$, $\partial \beta/\partial Z_e$, $\partial Z_f/\partial g_e$, $\partial Z_e/\partial g_e$, $\partial Z_e/\partial U_e$, $\partial U_e/\partial g_{pr}$, $\partial N_e/\partial M_{кр}$, $\partial N_e/\partial n_{кв}$, $\partial g_{pr}/\partial G_f$, $\partial g_{pr}/\partial G_{PM}$, $\partial g_{pr}/\partial G_{CnHm}$, $\partial g_{pr}/\partial G_{NOx}$, $\partial g_{pr}/\partial G_{CO}$, величин g_{pr}, Δg_{pr}, δg_{pr}, U_e, ΔU_e, δU_e, g_e, Δg_e, δg_e, Z_e, ΔZ_e, δZ_e, Z_f, ΔZ_f, δZ_f, β, $\Delta\beta$, $\delta\beta$, η_e, $\Delta\eta_e$, $\delta\eta_e$, K_{fe}, ΔK_{fe}, δK_{fe} для всього поля робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12. На рис. Б.5 і Б.6 наведено розподіл значень величин δZ_e, δZ_f , $\delta\eta_e$, δK_{fe} відповідно для всього поля робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12.

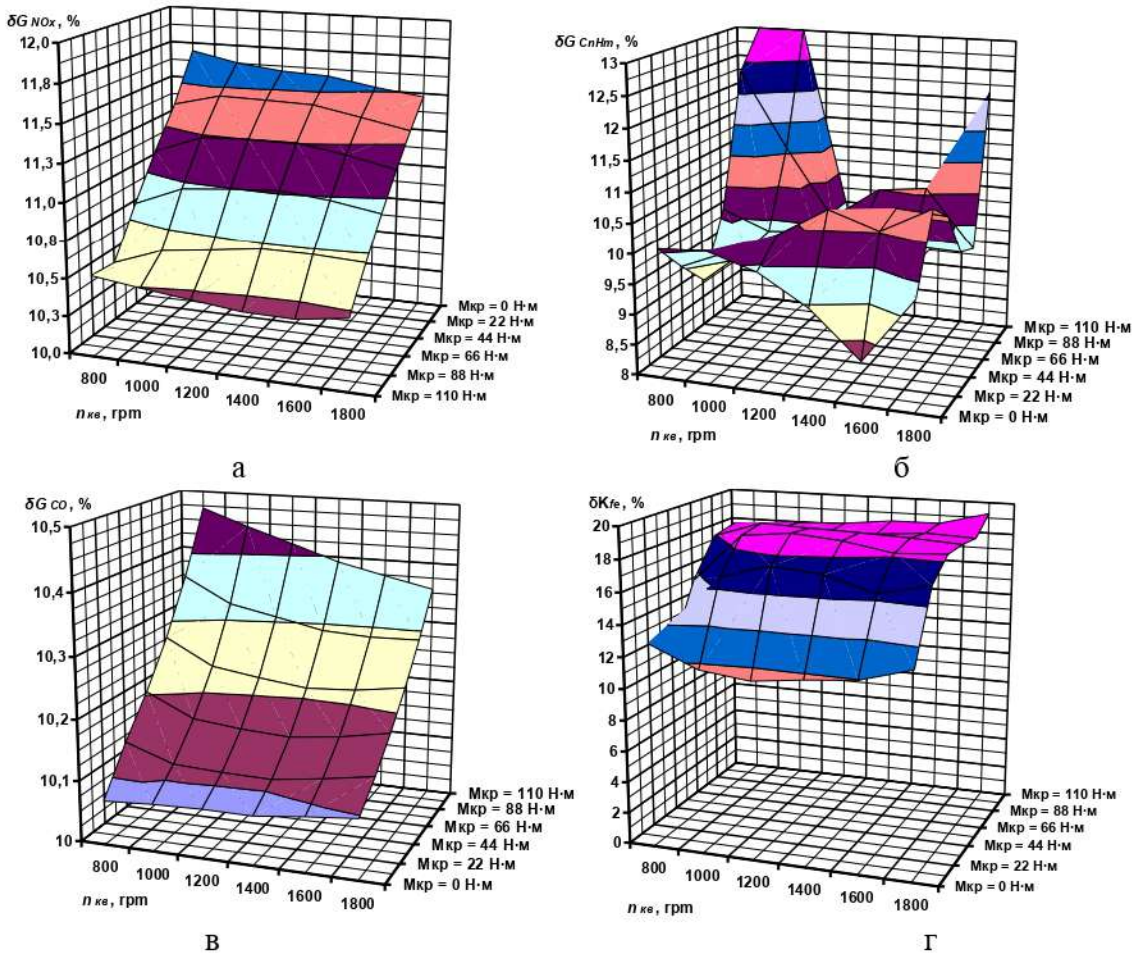
На рис. Б.5 видно, що значення відносної інструментальної похибки визначення значень грошових витрат на компенсацію екологічної шкоди, спричиненої викидами законодавчо нормованих полютантів з ВГ ПДВЗ, Z_e розподіляється по полю робочих режимів ПДВЗ нерівномірно у межах діапазону від ±8,2 % ($n_{кв}$ = 1000 rpm, $M_{кр}$ = 0 Н·м) до ±15,9 % ($n_{кв}$ = 1200 rpm, $M_{кр}$ = 22 Н·м). Для величини грошових вит-

рат на паливо Z_f така характеристика точності розподіляється по полю робочих режимів ПДВЗ рівномірно і дорівнює ±3,5 % (див. рис. Б.5).



а б

Рисунок Б.5 – Розподіл значень величин δZ_e (а) та δZ_f (б) та $\delta\eta_e$ (в) для всього поля робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12



а б

в г

Рисунок Б.6 –Розподіл значень величини δG_{NOx} (а), величини δG_{CnHm} (б), величини δG_{CO} (в) та величини δK_{fe} (г) для всієї області робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12

Результати розрахунку значень величин δG_{NOx}, δG_{CnHm} та δG_{CO} для всього поля робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12, отримані за формулами (Б.27)–(Б.29), (Б.35)–(Б.37). Така інформація проілюстрована на рис. Б.6.

У дослідження також проаналізовано результати оцінювання усереднених значень інструментальної складової результуючої відносної похибки визначення значень комплексного паливно-екологічного критерію та його складових для актуального значення паспортної точності ЗВТ, усереднене по всьому полю режимів роботи ПДВЗ, воно склало ±16,8 %, для величин грошових витрат на паливо ±3,5 %, грошових витрат на компенсацію екологічної шкоди ±14,2 %, ефективного ККД ПДВЗ ±3,6 %, питомої ефективної масової годинної витрати палива ±3,5 %, коефіцієнта відносних експлуатаційних екологічних грошових витрат ±4,1 %. При тому, що відносні похибки визначення значень впливаючих факторів є такими: ±7,8 % для G_{PM}, ±11,0 % для G_{NOx}, ±10,5 % для G_{CnHm}, ±5,0 % для G_{CO}, ±1,0 % для G_{fuel}, ±1,0 % для N_e.

Б.3 Застосування математичного апарату сімейства кривих Пірсона для описання результатів застосування формули перерахунку

Б.3.1 Постановка задачі

Для проведення експериментальних досліджень, результати яких можна порівнювати з результатами, отриманими з використанням тунелів розведення, розробляють та використовують різного виду формули перерахунку показів димоміра N_D та газоаналізатора C_{CH} (у даному випадку ИНФРАКАР-Д та АВТОТЕСТ-02.03.П) у масовий годинний викид ТЧ, до яких слід віднести формули Парсаданова, Алкідаса, Мунтяна, MIRA, Bosch, Harritage тощо, які усі є нелінійними залежностями [4], зокрема у формулі перерахунку проф. Парсаданова ці впливаючі фактори входять у формулу як у першому, так і у другому ступені. Згадані прилади – димомір та газоаналізатор – характеризуються певними значеннями точності вимірювань, які вказані у паспорті цих ЗВТ [222, 223].

Як відомо з основних положень наукової дисципліни «Метрологія» [214, 215], характер розподілу випадкових значень результатів непрямих вимірювань (а застосування згаданих формул перерахунку можна розглядати саме як непряме вимірювання) при нелінійній залежності цих результатів від значень результатів прямих вимі-

рювань (показів димоміра та газоаналізатора) має характер, що суттєво відрізняється від закону нормального розподілу за асиметрією та ексцесом. Причому такий ефект наявний навіть за умови відповідності законів розподілу випадкових значень результатів прямих вимірювань нормальному закону, який зумовлений інструментальними похибками ЗВТ. Такий ефект тим сильніший, чим меншою є кількість повторних вимірювань з одним і тим же значенням математичного очікування (тобто на одній і тій же режимній точці поля робочих режимів ПДВЗ).

При стендових моторних випробуваннях зазвичай обмежуються 3…10 кратним вимірюванням на одній режимній точці, тобто про наявність вибірки даних, обсягом 50…1000 (за різними рекомендаціями [231]) значень без автоматизації процесу вимірювання і об'єднання згаданих приладів у єдиний вимірювальний комплекс мови не йде з очевидних причин (грошові, часові, трудові витрати на проведення експерименту). Як показано у [231, 232], в такому випадку для більш адекватного фізичній реальності описання можна апроксимувати емпіричний закон розподілу величини $G_{ТЧ}$ у вигляді гістограми за допомогою сімейства кривих щільностей ймовірностей Пірсона, не близьких до нормального розподілу, а саме бета-щільностей.

Однак, таких досліджень досі не виконувалось, тому отримання параметрів бета-розподілу величини G(РМ), визначеної за відомою формулою перерахунку з урахуванням точності приладів, покази яких нелінійно впливають на досліджувану величину, для деяких особливих режимів роботи ПДВЗ, є актуальним науково-технічним задачами [236–238].

Б.3.2 Методика визначення параметрів β-розподілу

Аналіз математичного апарату сімейства кривих Пірсана, тобто β-розподілу, наведено у роботі [3]. При розрахунках застосовано вирази (Б.42)–(Б.44), в цих виразах $C_n^k = \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!\cdot(n-k)!}$, $k \le n$ – біноміальні коефіцієнти, $\Gamma(\bullet)$ – гамма-функція, яка за визначенням [233] формулою (Б.45). Для обчислення значення гамма-функції використано наближення Стірлінга – формулу (Б.46). Для узагальненого бета-розподілу математичне очікування $m_1(p,q)$, дисперсія $D(p,q)$, коефіцієнти аси-

метрії *Sk* й ексцесу *Ex* мають вигляд формул (Б.47)–(Б.50). Параметри такого двопараметричного розподілу визначаються за формулами (Б.51)–(Б.52). Для визначення кількості інтервалів групування (кількості стовчикиів у гістограмі розподілу) m_{CT} використано формулу (Б.53). Похідна гама-функції визначається за формулою Стірлінга (Б.57) та псі-функції – формули (Б.54)–(Б.56).

$$f(G_{TЧ}) = \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)\cdot\Gamma(q)} \cdot \frac{(G_{TЧ} - G_{TЧ\min})^{p-1} \cdot (G_{TЧ\max} - G_{TЧ})^{q-1}}{(G_{TЧ\max} - G_{TЧ\min})^{p+q-1}}, \quad (Б.42)$$

$$m_n(p,q) = \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)} \cdot \sum_{k=0}^{n} C_n^k \cdot (G_{TЧ\max} - G_{TЧ\min})^k \cdot G_{TЧ\min}^{n-k} \cdot \frac{\Gamma(p+k)}{\Gamma(p+q+k)}, \quad (Б.43)$$

$$\mu_n(p,q) = (G_{TЧ\max} - G_{TЧ\min})^n \cdot \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)} \cdot \sum_{k=0}^{n} (-1)^k \cdot C_n^k \cdot \left(\frac{p}{p+q}\right)^k \cdot \frac{\Gamma(p+n-k)}{\Gamma(p+q+n-k)}. \quad (Б.44)$$

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \cdot e^{-z} \cdot dt, \quad (\mathrm{Re}\, z > 0). \quad (Б.45)$$

$$\Gamma(z) \approx e^{-z} \cdot z^{z-\frac{1}{2}} \cdot (2\pi)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1 + \frac{1}{12\cdot z} + \frac{1}{288\cdot z^2} - \frac{139}{51840 z^3} - \frac{571}{2488320\cdot z^4} + \frac{163879}{209018880\cdot z^5} + \frac{5246819}{75246796800\cdot z^6}\right]. \quad (Б.46)$$

$$m_1(p,q) = \frac{G_{TЧ\min}\cdot q + G_{TЧ\max}\cdot p}{p+q}, \quad (Б.47)$$

$$D(p,q) = \frac{(G_{TЧ\max} - G_{TЧ\min})^2 \cdot p \cdot q}{(p+q)^2 \cdot (p+q+1)}, \quad (Б.48)$$

$$Sk = \frac{2\cdot(q-p)}{p+q+2} \cdot \sqrt{\frac{p+q+1}{p\cdot q}}, \quad (Б.49)$$

$$Ex = \frac{6\cdot\left((p-q)^2\cdot(p+q+1) - p\cdot q\cdot(p+q+2)\right)}{p\cdot q\cdot(p+q+2)\cdot(p+q+3)}. \quad (Б.50)$$

$$p = \frac{\widetilde{m}_1 - G_{TЧ\min}}{G_{TЧ\max} - G_{TЧ\min}} \cdot \left[\frac{(\widetilde{m}_1 - G_{TЧ\min})\cdot(G_{TЧ\max} - \widetilde{m}_1)}{\widetilde{S}^2} - 1\right], \quad (Б.51)$$

$$q = \frac{G_{TЧ\max} - \widetilde{m}_1}{G_{TЧ\max} - G_{TЧ\min}} \cdot \left[\frac{(\widetilde{m}_1 - G_{TЧ\min})\cdot(G_{TЧ\max} - \widetilde{m}_1)}{\widetilde{S}^2} - 1\right]. \quad (Б.52)$$

$$m_{cm} = \log_2 N + 1 = 3{,}322\cdot\lg N + 1. \quad (Б.53)$$

$$\Psi(z) = \frac{d[\ln(z)]}{dz} = \frac{\Gamma_1'(z)}{\Gamma_1(z)}, \quad (Б.54)$$

$$\Gamma_2'(z) = \Psi(z)\cdot\Gamma(z), \quad (Б.55)$$

$$\Psi(z) \approx \ln z - \frac{1}{2z} - \frac{1}{12z^2} + \frac{1}{120z^4} - \frac{1}{252z^6}. \qquad \text{(Б.56)}$$

$$\Gamma_1'(z) \approx e^{-z} z^{z-\frac{1}{2}} (2\pi)^{\frac{1}{2}} \left[\left(1 + \frac{1}{12z} + \frac{1}{288z^2} - \frac{139}{51840z^3} - \frac{571}{2488320z^4} + \ldots \right) \cdot \left(\ln z - \frac{1}{2z} \right) - \left(\frac{1}{12z^2} + \frac{1}{144z^3} - \frac{139}{17280z^4} - \frac{571}{622080z^5} + \ldots \right) \right] \qquad \text{(Б.57)}$$

У якості вихідних даних використано результати стендових моторних досліджень дизеля 2Ч10,5/12: а) режим з максимальною димність ВГ – це режим максимального крутного моменту з $n_{кв}$ = 1200 хв$^{-1}$ та $M_{кр}$ = 110 Н·м; б) режим з максимальною концентрацією продуктів неповного згоряння палива у ВГ – режим номінальної потужності з $n_{кв}$ = 1800 хв$^{-1}$ та $M_{кр}$ = 95 Н·м.

Поряд з аналізом «близькості» емпіричного розподілу до нормального з використанням коефіцієнтів асиметрії Sk та ексцесу Ex за гістограмою також застосовують такі критерії [234]: а) критерій згоди Стьюдента (хі-квадрат) – див. формулу (Б.58); б) критерій у вигляді ентропійного коефіцієнту $K_{ЕНТР}$ – формулу (Б.59).

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{m_{cm}} \frac{\left(r_j - N \cdot e_j \right)^2}{N \cdot e_j}, \qquad \text{(Б.58)}$$

$$K_{ЕНТР} = \frac{d_\Gamma \cdot N}{2 \cdot \widetilde{S}} \cdot 10^{\mathrm{X}}, \; \mathrm{X} = -\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^{m_{СТ}} r_j \cdot \lg\left(r_j \right), \qquad \text{(Б.59)}$$

де d_Γ (або $\Delta G_{ТЧ}$) – ширина стовпчика гістограми, N – обсяг вибірки (кількість вимірювань), $\widetilde{S}$ – середньоквадратичне відхилення, $m_{СТ}$ – число стовпчиків гістограми, r_j – число спостережень (кількість «влучань») у j-му стовпчику; e_j – площа під кривою розподілу.

Б.3.3 Результати дослідження та їх аналіз

Результати розрахунків, осереднені для 15 незалежних моделювань за усіма варіантами обсягу вибірки вихідних даних N наведено у праці [3] для N = 50, 200, 400 і 700 та для точки $M_{КР\max}$, осереднені за результатами 15 незалежних моделювань, при N_D = var, $C_{СН}$ = const у виді гістограм емпіричного та графіків нормального і бета-розподілу, так само як і для випадку $C_{СН}$ = var, N_D = const.

На рис. Б.7 – Б.10 у вигляді графіків залежності значень кількості колонок гістограм розподілу m_{col}, параметрів бета-розподілу p і q, коефіцієнтів асиметрії A_S й E_X ексцесу бета-розподілу, ентропійного коефіцієнта K_{entr} від обсягу вибірки вихідних даних N за умови варіювання одного з двох впливаючих факторів (коефіцієнта послаблення світлового потоку N_D у ВГ та об'ємної концентрації незгорілих вуглеводнів у потоці ВГ C_{CH}) у межах паспортної точності засоба вимірювальної техніки та інваріантності другого. Вказані графіки апроксимовано методом найменших квадратів з отриманням формул (Б.60) – (Б.37).

$$A_S(N_D) = A_S(C_{CH}) = 0{,}015 = const; R^2 = 1{,}0; \quad \text{(Б.60)}$$

$$E_X(N_D) = E_X(C_{CH}) = 0{,}0948 \cdot \ln(N) - 0{,}743; R^2 = 0{,}987; \quad \text{(Б.61)}$$

$$p(N_D) = q(N_D) = 0{,}833 \cdot \ln(N) - 1{,}381; R^2 = 0{,}988; \quad \text{(Б.62)}$$

$$K_{entr}(N_D) = 0{,}074 \cdot \ln(N) + 1{,}588; R^2 = 0{,}916; \quad \text{(Б.63)}$$

$$p(C_{CH}) = q(C_{CH}) = 0{,}863 \cdot \ln(N) - 1{,}548; R^2 = 0{,}978; \quad \text{(Б.64)}$$

$$K_{entr}(C_{CH}) = 0{,}066 \cdot \ln(N) + 1{,}648; R^2 = 0{,}918. \quad \text{(Б.65)}$$

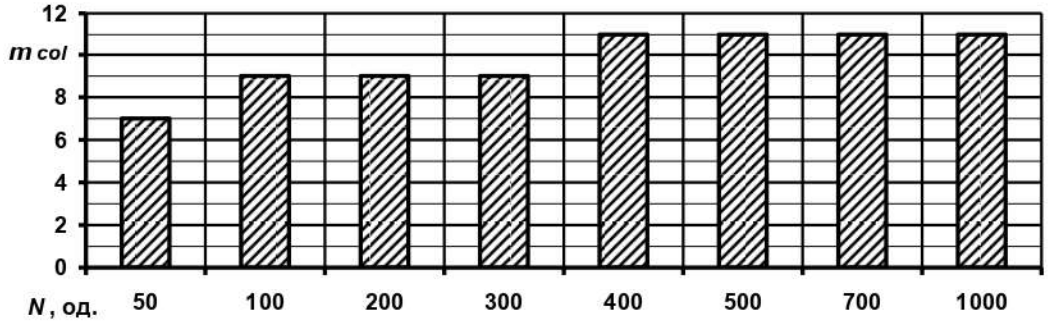


Рисунок Б.7 – Гістограма залежності значень величини m_{col} від обсягу вибірки вихідних даних N для усіх варіантів розрахунку

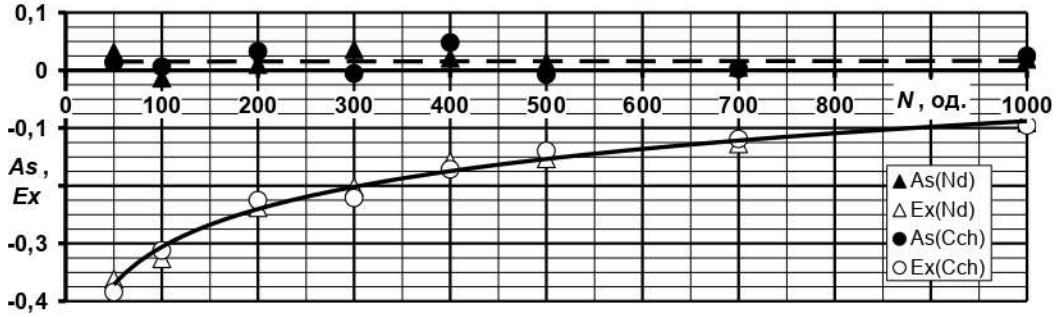


Рисунок Б.8 – Графіки залежності значень величин A_S та E_X від обсягу вибірки вихідних даних N, осереднені за результатами 15 незалежних моделювань, при варіюванні величинами N_D та C_{CH}

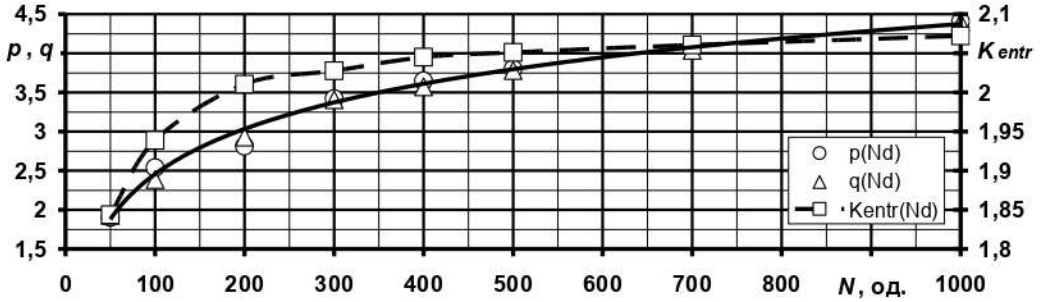


Рисунок Б.9 – Графіки залежності значень величин p і q та K_{entr} від обсягу вибірки вихідних даних N, осереднені за результатами 15 незалежних моделювань, при N_D = var, C_{CH} = const

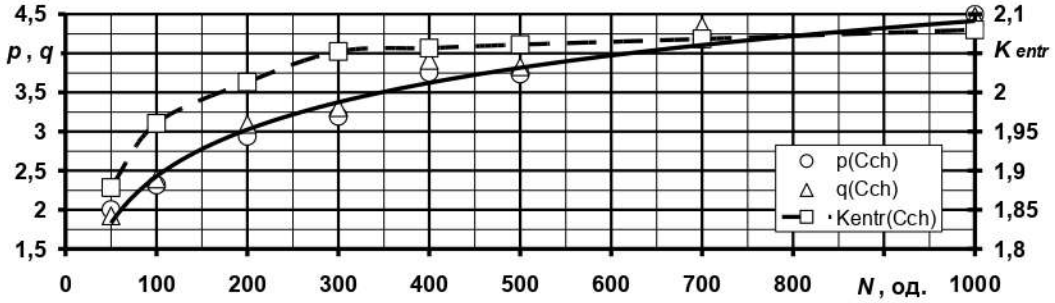


Рисунок Б.10 – Графіки залежності значень величин p і q та K_{entr} від обсягу вибірки вихідних даних N, осереднені за результатами 15 незалежних моделювань, при C_{CH} = var, N_D = const

Як видно з формули (Б.60), присутня незначна лівостороння асиметрія ($A_S > 0$) усіх запропонованих кривих щільності β-розподілу емпіричних даних застосування формули перерахунку, величина якої інваріантна відносно обсягу вибірки. Для нормального закону $A_S = 0$. Також з рис. Б.8 та формули (Б.8) видно, що усі криві щільності β-розподілу таких емпіричних даних при варіюванні обох впливаючих факторів мають однаковий виражений характерний вид піку з малою гостротою (гладкий $E_X < 0$), при цьому гострота піку нелінійно залежить від обсягу вибірки, зростаючи з його зростанням і наближаючись до гостроти піку нормального закону розподілу ($E_X = 0$). З рис. Б.9 і Б.10 та формул (Б.62) і (Б.64) видно, що параметри β-розподілу p і q рівні одне одному при варіюванні обох впливаючих факторів (що також зумовлює практично симетричний вид кривої щільності розподілу), мають практично однаковий вид нелінійної залежності від обсягу вибірки, зростаючи з його зростанням практично у 2 рази. Дані на рис. Б.9 і Б.10 та формул (Б.63) – (Б.65) показують, що значення ентропійного коефіцієнту K_{entr} приблизно рівні одне одному при варіюван-

ні обох впливаючих факторів та мають однаковий вид нелінійної залежності від обсягу вибірки. Величина K_{entr} інтенсивно зростає зі збільшенням обсягу вибірки у межах 50 – 300 вимірювань від 1,84 до 2,05, а потім виходять на поличку, асимптотично наближаючись до 2,07, що характерно для закону нормального розподілу.

Б.4 Висновки по додатку Б

Таким чином, за результатами аналізу результатів дослідження, описаного у цьому додатку рукопису кваліфікаційної роботи, можна зробити такі висновки.

1. Здійснено аналіз формули перерахунку проф. Ігоря Парсаданова, виявлено особливості впливу на значення отримуваної за нею фізичної величини незалежних змінних. Перетворено формулу до виду, адаптованого до виконання дослідження.

Розрахунково оцінено значення інструментальної точності отримання величини такого викиду ТЧ за досліджуваною формулою перерахунку за розробленою методикою для актуального значення паспортної точності ЗВТ, усереднене по особливим режимам роботи ПДВЗ, воно склало ±8,3 %.

Виявлено і проаналізовано вплив виду показника димності ВГ з відповідними йому одиницями віимірювання на інструментальну точність досліджуваної формули перерахунку. За ознакою величини такої точності для актуального значення паспортної точності ЗВТ відомі показники димності ВГ ранжовано таким чином (у порядку погіршення точності): $C_C \rightarrow K \rightarrow N_D$ і $HSN \rightarrow BSU$.

Розрахунково оцінено значення інструментальної точності отримання величини такого питомого викиду ТЧ з використанням досліджуваної формули перерахунку за розробленою методикою для актуального значення паспортної точності ЗВТ, усереднене по всьому полю робочих режимів ПДВЗ, воно склало ±9,8 %.

Здійснено верифікацію отриманих значень інструментальної точності отримання величини питомого ефективного масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ. Отримано наближену оцінку усередненого значення методичної складової результуючої систематичної похибки, що склало ±22,8 %.

2. Розрахунково оцінено значення інструментальної точності отримання величини комплексного паливно-екологічного критерію для актуального значення паспортної точності ЗВТ за розробленою методикою.

Усереднені значення інструментальної складової результуючої відносної похибки визначення значень цього критерію та його складових для актуального значення паспортної точності ЗВТ, усереднене по всьому полю режимів роботи ПДВЗ, склалі ±16,8 %, для величин грошових витрат на паливо ±3,5 %, грошових витрат на компенсацію екологічної шкоди ±14,2 %, ефективного ККД ПДВЗ ±3,6 %, питомої ефективної масової годинної витрати палива ±3,5 %, коефіцієнта відносних експлуатаційних екологічних грошових витрат ±4,1 %. Відносні похибки визначення значень впливаючих факторів є такими: ±7,8 % для G_{PM}, ±11,0 % для G_{NOx}, ±10,5 % для G_{CnHm}, ±5,0 % для G_{CO}, ±1,0 % для G_{fuel}, ±1,0 % для N_e.

3. Встановлено, що отримані вимірюваннями газоаналізатором і димоміром значення складових цих формул перерахунку чинять на результат їх застосування нелінійний вплив та відповідну рознормалізацію результатів її застосування у межах точності. Виявлено, що значення коефіцієнта послаблення світлового потоку N_D визначається з точністю ±2,5 %, а об'ємної концентрації незгорілих вуглеводнів у потоці ВГ C_{CH} – з точністю ±5,0 %, аезультати вимірювань у межах цих похибок розподіляються за нормальним законом. Для досліджуваного випадку встановлено відповідність емпіричного розподілу досліджуваної фізичної величини до I типу розподілів за класифікацією Пірсона – бета-щільності.

Здійснено розрахункове оцінювання значень параметрів бета-щільності для апроксимації значень величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ ПДВЗ як функції N_D за умови розподілу його значень за нормальним законом у межах паспортної точності вимірювань димоміру та за фіксованого значення C_{CH} у потоці ВГ у першому випадку, а у другому ці випадкові величини міняються місцями.

Встановлено, що емпіричний розподіл значень масового годинного викиду ТЧ з ВГ ПДВЗ, отриманих при застосуванні однієї з відомих формул перерахунку як функція показників димності ВГ суттєво відрізняється від нормального закону за кількості вимірювань, меншій за 50. Здійснено вибір раціональної кількості багаторазових вимірювань N_D і одному випадку та C_{CH} у другому на одному режимі роботи дизельного двигуна при стендових моторних випробуваннях для випадку автоматизації процесу вимірювань. Отримано параметри бета-щільності для описання досліджуваного чинника ЕНБ та їх залежності від кількості вимірювань.

Додаток В ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО КОМПЛЕКСНОГО ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КРИТЕРІЮ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ І МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ НАБОРУ ВИХІДНИХ ДАНИХ

В.1 Розробка комплексу організаційно-технічних заходів щодо вдосконалення процедури отримання набору вихідних даних для комплексного критеріального оцінювання

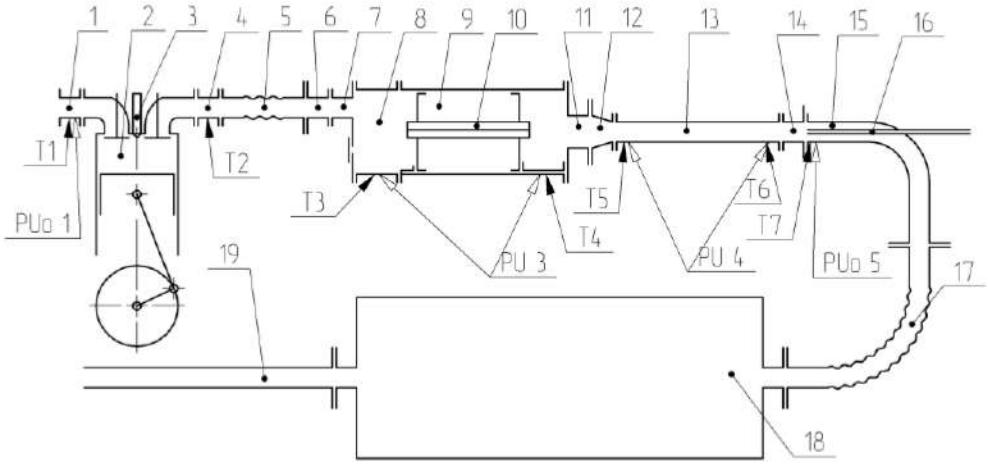
У даному дослідженні такий опис буде здійснено на основі аналізу експериментально отриманих даних – результатів стендових моторних досліджень автотракторного дизеля, випускну систему якого обладнано діючим експериментальним зразком ФТЧ нетрадиційної конструкції.

З метою визначення техніко-економічних показників роботи ФТЧ з цеолітовою насипкою у сітчастих касетах, вдосконаленого у дисертації, як виконавчого пристрою розробленої ТЗНС, верифікації результатів фізичного і математичного моделювання процесів у ФТЧ та отримання набору вихідних даних для здійснення комплексного критеріального оцінювання, сплановано і здійснено експериментальне дослідження у формі моторних випробуваню. Експериментальними зразками виступили діючі зразки ФТЧ, що встановлювались випускну систему МВС з автотракторним дизелем 2Ч10,5/12 у лабораторії відділу водневої енергетики ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України. Систему відбору проб ВГ на токсичність і димність МВС при цьому вдосконалено шляхом обладнання МТ, у який встановлюється діючий зразок ФТЧ (див. рис. В.1). Умови проведення, методика і програма стендових моторних випробувань, здійснених у 4 етапи, особливості варіантів конструкції експериментальних зразків ФТЧ, описано у джерелах [3, 5].

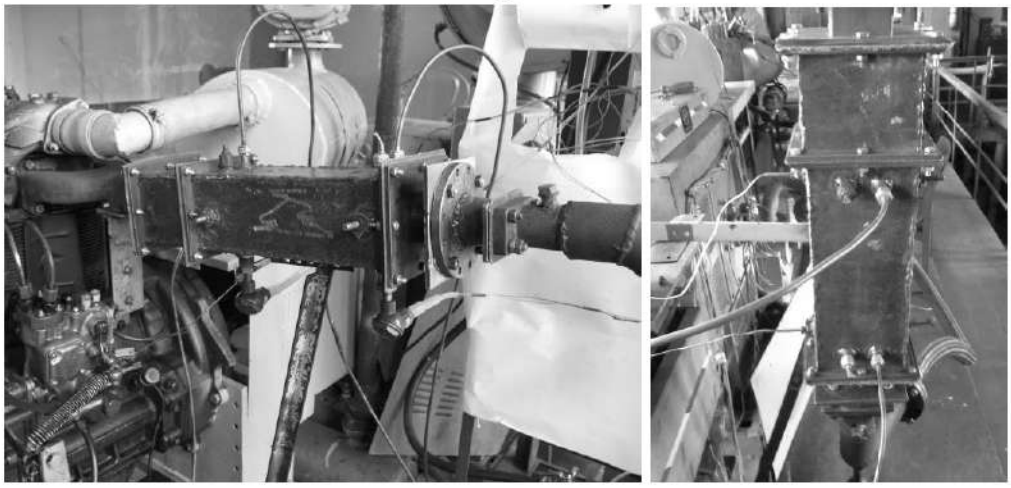
У цьому дослідженні запропоновано і застосовано підхід до отримання форм розподілів значень складових набору вихідних даних, проміжних і основних результатів розрахункових досліджень по полю робочих режимів ПДВЗ, згідно до якого такі розподіли задаються у відносних величинах, отриманих за формулою (В.1) та таблицею зразкових значень таких фізичних величин, отриманих для обраного особливого режиму роботи ПДВЗ, у даному випадку – режиму максимального крутного

моменту зі значеннями координат поля робочих режимів $M_{кр} = M_{кр\max} = 110$ Н·м та $n_{cs} = 1200$ rpm. Результати застосування підходу проілюстровано на рис. В.2.

$$X_{rev} = X_{abs} / X_{abs}(n_{cs} = 1200 \text{ rpm}, M_{кр} = 110 \text{ Н·м}). \quad \text{(В.1)}$$



а



б

1 – впускний колектор дизеля; 2 – камера згоряння дизеля; 3 – паливна форсунка дизеля; випускний колектор дизеля; 4 – перехідник колектора; 5, 17 – гнучкий жароміцний трубопровід; 6 – перехідник на вході у корпус фільтра універсальний; 7 – вхідний патрубок корпуса фільтра; 8 – камера згоряння корпуса фільтра; 9 – корпус фільтра; 10 – діючий макет фільтрувального елементу; 11 – вихідний патрубок корпуса фільтра; 12 – перехідник на виході з корпуса фільтра; 13 – потокозаспокійлива трубка пробовідбірної системи; 14 – перехідник на виході з трубки універсальний; 15 – коліно пробовідбірної системи; 16 – пробовідбірний зонд; 18 – глушник шуму випуску дизеля; 19 – газовивідна трубка; T1, …, T7 – місця встановлення (штуцери) датчиків температури (термопар ТХА); $PU_0$1 і $PU_0$5 – місця встановлення (штуцери) імпульсних трубок U-подібних рідинних диференційних манометрів, друга імпульсна трубка яких сполучена з атмосферою; PU3 і PU4 – місця встановлення (штуцери) імпульсних трубок U-подібних рідинних диференційних манометрів, що вимірюють перепад тисків на елементах випускної системи дизеля

Рисунок В.1 – Схема розміщення датчиків у модернізованій випускній системі з МТ (а) та зовнішній вид МТ на МВС з автотракторним дизелем 2Ч10,5/12 (б) [5]

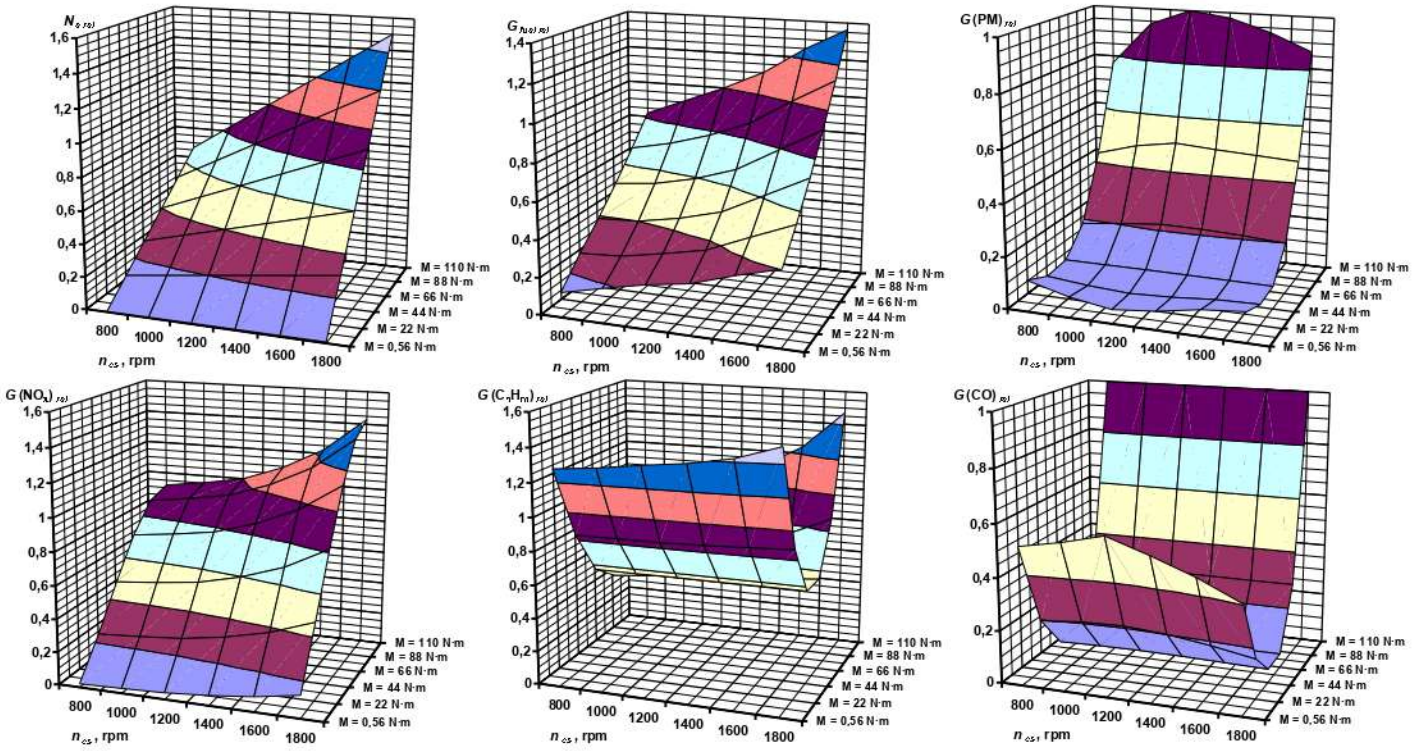


Рисунок В.2 – Розподіл значень техніко-економічних і екологічних показників роботи автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 по полю його робочих режимів

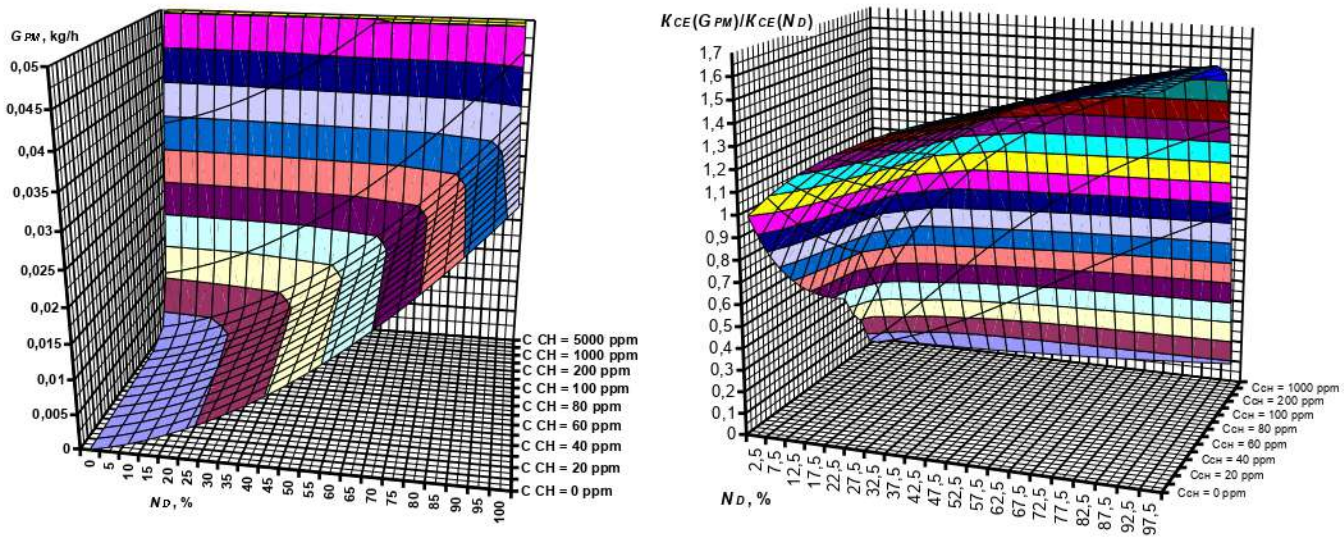
Як видно з формули перерахунку проф. Ігоря Парсаданова, G(PM) має складові, що залежать від N_D і $C(C_nH_m)$ як лінійно, так і квадратично (див. рис. В.3,а) [3, 5]. Тому в формулі для визначення $K_{EO}(G(\text{PM}))$ присутня не лише різниця N_D, а й різниця їх квадратів. Окрім того, за ненульового значення C_{CH}, навіть за нульового $K_{EO}(C(C_nH_m))$, у деякому діапазоні значень N_D $K_{EO}(N_D)$ перевищує $K_{EO}(G(\text{PM}))$ (див. рис. В.3,б). Під коефіцієнтами ефективності роботи ФТЧ за викидом ТЧ, димністю та викидом незгорілих вуглеводнів розуміються величини, описані формулами (В.2)–(В.4) [3, 5].

$$K_{CE}\left(G(PM)\right)=\left(G(PM)_{RICE}-G(PM)_{DPF}\right)/G(PM)_{RICE}\cdot 100\%, \qquad \text{(В.2)}$$

$$K_{CE}\left(N_D\right)=\left(N_{D.RICE}-N_{D.DPF}\right)/N_{D.RICE}\cdot 100\%, \qquad \text{(В.3)}$$

$$K_{CE}\left(C\left(C_nH_m\right)\right)=\left(C\left(C_nH_m\right)_{RICE}-C\left(C_nH_m\right)_{DPF}\right)/C\left(C_nH_m\right)_{RICE}\cdot 100\%, \qquad \text{(В.4)}$$

де індексами *DPF* і *RICE* позначено величини для випадку дизеля, випускну систему якого обладнано і не обладнано ФТЧ.



а б

Рисунок В.3 – Графік залежності величини масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ дизельного ПДВЗ $G_{ТЧ}$ від значень коефіцієнту ослаблення світлового потоку у ВГ N_D та об'ємної концентрації незгорілих вуглеводнів у ВГ C_{CH} (а) та графік залежності відношення величин $K_{EO}(G_{ТЧ})$ і $K_{EO}(N_D)$ від величини $N_{D.ICE}$ за постійних значень C_{CH}, усередненне на кроці ΔN_D = 10 %, для повного діапазону зміни значень N_D = 0 – 100 % та C_{CH} = 0 – 5000 ppm (а)

В.2 Критеріальне оцінювання ефективності застосування фільтра твердих частинок як виконавчого пристрою технології захисту навколишнього середовища для дизельного ДВЗ впродовж міжрегенераційного періоду з урахуванням гідравлічного опору

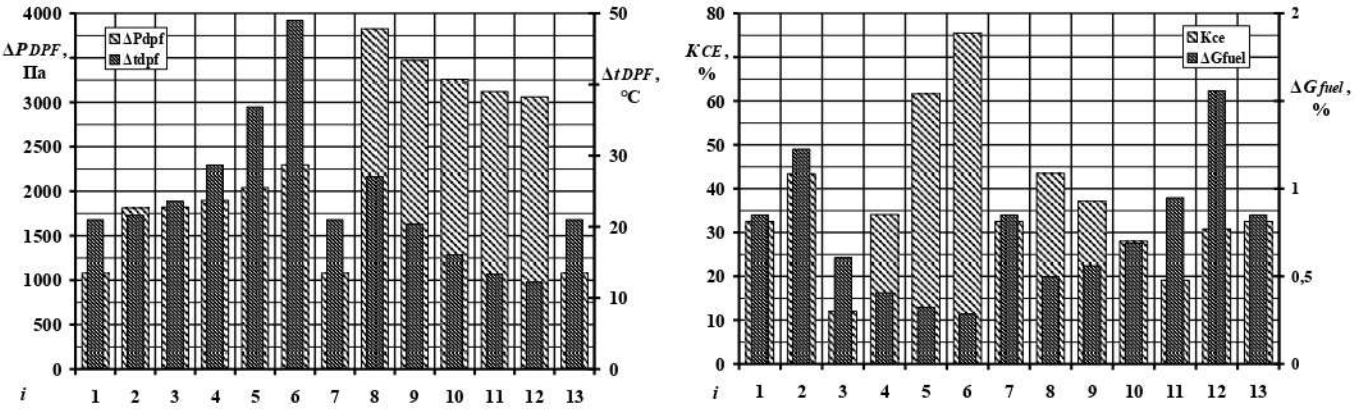
З метою зниження масового викиду ТЧ з потоком ВГ дизелів застосовують ФТЧ різноманітних конструкції та принципів дії. Однак, такі пристрої характеризуються меншою за 100 % ефективністю роботи та значним значенням ГО, що періодично змінюється у процесі експлуатації [1].

Для оцінки ефективності функціонування СУЕБ наразі не створено єдиного критерію, рівно як і для оцінювання ефективності застосування таких виконавчих пристроїв ТЗНС як матеріальної основи СУЕБ, як ФТЧ, тому для цього можна скористатися комплексним паливно-екологічним критерієм. При цьому застосування ФТЧ має чинити вплив на значення такого критерію одночасно позитивно – за рахунок зменшення грошових витрат на компенсацію шкоди НПС від забруднення

його законодавчо нормованими полютантами з ВГ шляхом їх очищення від ТЧ; і негативно – за рахунок підвищення витрат палива дизелем для подолання додаткового ГО у випускній системі.

З числа 25 відомих стаціонарних стандартизованих і нестандартизованих випробувальних циклів, які є моделями експлуатації дизельних ПДВЗ, проаналізованих у роботах [3–5], для виконання цього дослідження обрано 13-режимний цикл, описаний у [3–6, 21]. Дослідження виконано на прикладі автотракторного дизеля Д21А1 (2Ч10,5/12 за ISO 3046-1:2002), основні техніко-економічні характеристики якого містяться у джерелах [114, 163], та ФТЧ, розробленого, описаного, дослідженого та вдосконаленого у роботах [1–5].

На рис. В.4 містяться експериментально і розрахунково отримані у дослідженнях [1, 3, 5] дані, що використані як вихідні дані для даного дослідження – значення складових формул математичних апаратів комплексного паливно-екологічного критерію у вигляді діаграм, що являють собою значення основних техніко-економічних параметрів роботи дизеля 2Ч10,5/12 і ФТЧ. З-поміж чотирьох запропонованих і досліджених у роботі [3] способів отримання порежимних значень цього критерію та його складових у даному дослідженні використано два: 1) спосіб ненульового холостого ходу; 2) спосіб індикаторних показників. Для реалізації обох способів необхідна інформація щодо розподілу значень індикаторної й ефективної потужності та індикаторного та ефективного ККД за режимами моделі експлуатації з [5].



а б

Рисунок В.4 – Розподіл значень величин ΔP_{DPF} та Δt_{DPF} по режимах 13-режимного стаціонарного стандартизованого випробувального циклу. Отримано з математичної моделі ГО ФТЧ (а) та такий розподіл значень величин $K_{CE}(G_{PM})$ та ΔG_{fuel} (б) [3]

Варіанти розрахункового дослідження

Досліджуваний ФТЧ характеризується двома параметрами роботи (факторами розрахунку) – значення коефіцієнту ефективності роботи за значенням масового годинного викиду ТЧ з потоком ВГ дизельного ПДВЗ $K_{CE}(G_{PM})$ у % та значення ГО ΔP_{DPF} у кПа. У зв'язку з вищевказаною обставиною повне коло можливих варіантів розрахункового дослідження включає 11 пунктів, позначення, назви, параметри і місце у межрегенераційному періоді ФТЧ варіантів – див. у табл. В.1. Розподіл варіантів розрахунку на факторній площині показано на рис. В.5,а. На цьому рисунку заштрихована область – міжрегенераційний період роботи ФТЧ. У роботі розрахунково досліджено такі п'ять варіантів з можливих як найбільш важливих – A, B, F, H та J (виділені у табл. В.1 курсивом та сірою заливкою).

Результати розрахункового дослідження та їх аналіз

На рис. В.5,б зображено результати критеріального оцінювання для базового варіанту розрахункового оцінювання (дизель 2Ч10,5/12 без ФТЧ) для обох способів отримання порежимних значень критерію K_{fe} та його складових. Результати критеріального оцінювання для обраних варіантів розрахункового дослідження для обох способів отримання порежимних значень критерію K_{fe} для дизеля 2Ч10,5/12, що працює за 13-режимним циклом, наведено на рис. В.6 – відповідно з використанням питомих ефективних та індикаторних показників роботи ПДВЗ.

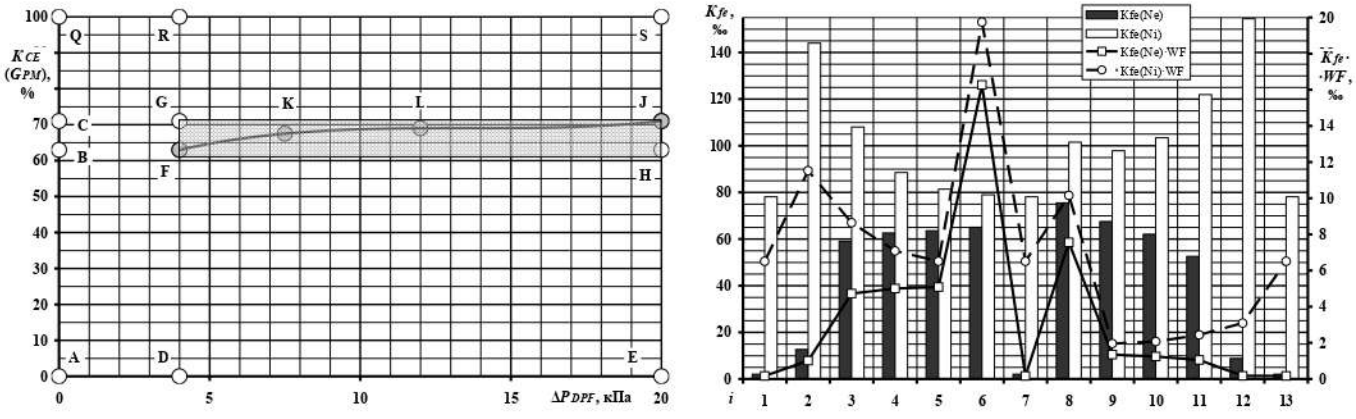
Головні результати порівняльного розрахункового дослідження – середньоексплуатаційні значення критерію K_{fe} для усіх варіантів розрахунку – зведено до табл. В.2 та проілюстровано на рис. В.6.

Аналіз результатів порівняльного розрахункового дослідження свідчить про таке. З усіх варіантів «налаштувань» математичних апаратів критерію K_{fe} найбільшою чутливістю, у середньому для усіх варіантів розрахунку становить 9,3 %, до змін масових годинних викидів ТЧ і масових годинних витрат палива дизелем, причиною яких є факт обладнання його випускної системи ФТЧ з його ГО, є варіант з використанням питомих ефактивних складових (див. рис. В.7). Варіант з використанням питомих індикаторних складових поступається за чутливістю, становить 7,4 %, в 1,26 разів. При цьому використанню питомих індикаторних складових у структурі критерію K_{fe} , хоча і дає гіршу «розрізнювальну здатність», слід надати

перевагу через можливість отримати оцінку паливно-екологічної ефективності режимів холостого ходу і малої ефективної потужності.

Таблиця В.1 – Параметри варіантів розрахункового дослідження

Варіант		Параметр		Місце у міжрегенераційному періоді
Позначення	Назва	$K_{CE}(G_{PM})$	ΔP_{DPF}	
		%	кПа	
A	*Базовий варіант*	0	0	–
B	*Початковий з ідеальним ТС*	63	0	початок
C	Кінцевий з ідеальним ТС	71	0	кінець
D	Початковий нульової ефективності	0	4	початок
E	Кінцевий нульової ефективності	0	20	кінець
F	*Реальний початок міжрегенераційного періоду*	63	4	початок
G	Міжрегенераційний період з постійним ГО	71	4	початок
H	*Міжрегенераційний період постійної ефективності*	63	20	кінець
J	*Реальний кінець міжрегенераційного періоду*	71	20	кінець
K	Середина міжрегенераційного за значенням ефективності	67	7,5	22 %
L	Середина міжрегенераційного за значенням ГО	69	12	середина
Q	Ідеальний ФТЧ	100	0	–
R	Міжрегенераційний період ідеальної ефективності	100	4	початок
S	Міжрегенераційний період постійної ідеальної ефективності	100	20	кінець

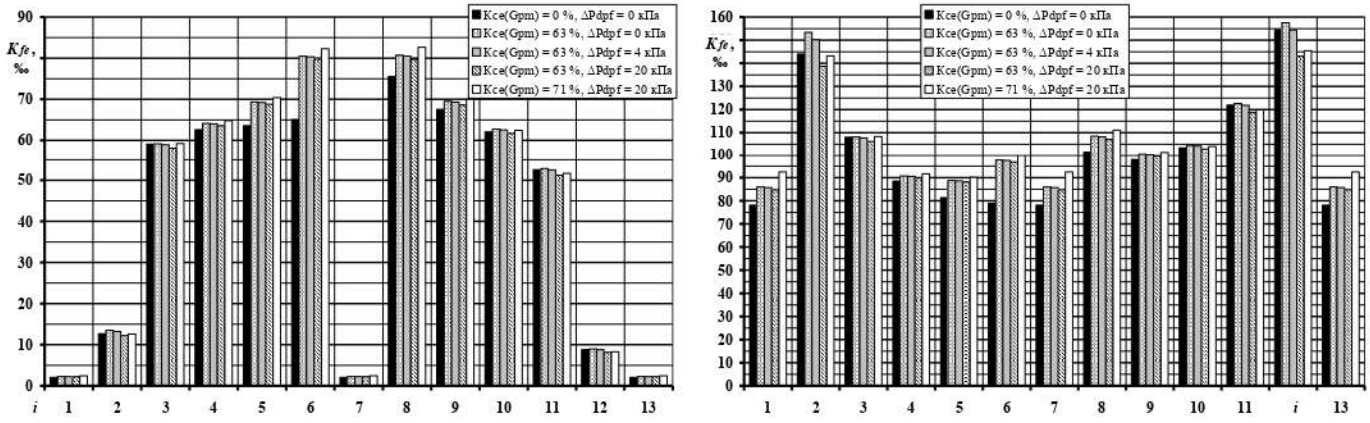


а б

Рисунок В.5 – Розподіл варіантів розрахункового дослідження на факторній площині (а) та результати критеріального оцінювання для базового варіанту розрахункового оцінювання для обох способів отримання порежимних значень критерію K_{fe} та його складових (б)

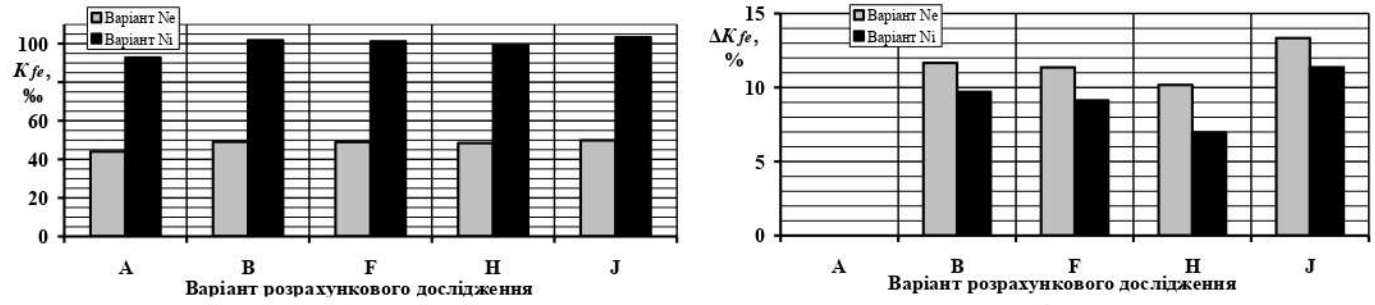
Таблиця В.2 – Середньоексплуатаційні значення критерію K_{fe}, отримані розрахунком, для усіх варіантів розрахункового дослідження

Варіант		Рівень паливно-екологічної ефективності		Ефект	
Позначення	**Назва і параметри**	K_{fe}, ‰		ΔK_{fe}, %	
A	«Базовий варіант» $K_{EO}(ТЧ) = 0$ %, $\Delta P_{ФТЧ} = 0$ кПа	43,989	92,736	–	–
B	«Початковий з ідеальним ТС» $K_{EO}(ТЧ) = 63$ %, $\Delta P_{ФТЧ} = 0$ кПа	49,119	101,735	11,7	9,7
F	«Реальний початок міжрегенераційного періоду» $K_{EO}(ТЧ) = 63$ %, $\Delta P_{ФТЧ} = 4$ кПа	48,986	101,201	11,4	9,1
H	«Міжрегенераційний період постійної ефективності» $K_{EO}(ТЧ) = 63$ %, $\Delta P_{ФТЧ} = 20$ кПа	48,466	99,194	10,2	7,0
J	«Реальний кінець міжрегенераційного періоду» $K_{EO}(ТЧ) = 71$ %, $\Delta P_{ФТЧ} = 20$ кПа	49,858	103,277	13,3	11,4
Вид питомих складових		N_e	N_i	N_e	N_i



а б

Рисунок В.5 – Результати розрахунку для дизеля 2Ч10,5/12 з ФТЧ за 13-режимним випробувальним циклом для питомих ефективних (а) та індикаторних (б) значень складових критерію K_{fe}



а б

Рисунок В.6 – Середньоексплуатаційні значення критерію K_{fe} (а) та ефекту δK_{fe} (б) для обраних варіантів розрахункового дослідження

Таким чином, у цій частині рукопису роботи на основі аналізу розрахункових даних здійснено ранжування основних модифікацій відомого підходу до комплексного критеріального оцінювання паливно-екологічної ефективності підвищення рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ. На основі цього рекомендовано використовувати з розглянутих модифікацій комплексного паливно-екологічного критерію рекомендовано надати перевагу використанню питомих індикаторних складових у його структурі.

В.3 Приклади практичного застосування вдосконаленого комплексного паливно-екологічного критерію

В.3.1 Визначення раціональної кількості режимів при стендових випробуваннях дизельного ДВЗ з урахуванням собівартості здійснення випробувань

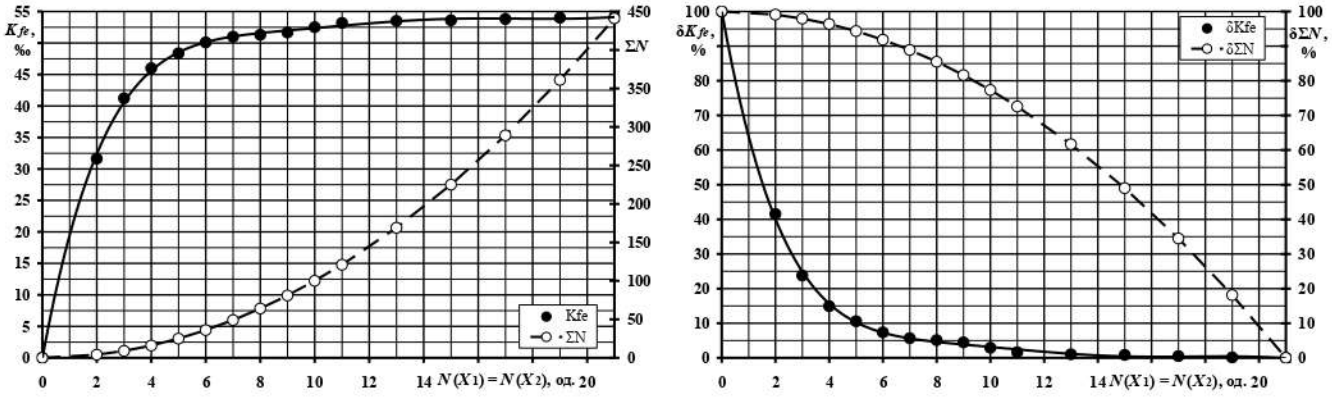
Встановлено, що форми розподілу значень техніко-економічних і екологічних показників роботи ПДВЗ як члени набору вихідних даних для здійснення розрахункового комплексного критеріального оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, рівно як і власне результати такого оцінювання, по полю робочих режимів ПДВЗ носить складний та відмінний одне від одного характер.

У дисертації запропоновано уніфікований підхід до описання вказаних розподілів, описаний вище у додатку, а також підхід до передумов формування набору вихідних даних безвідносно моделі експлуатації ПДВЗ, що передбачає отримання вказаних розподілів, описання їх поліномами методом найменших квадратів, аргументами таких залежностей є координати поля. При цьому, у разі застосування для описання особливостей процесу експлуатації певного стаціонарного випробувального циклу – стандартизованого чи ні – у якості моделі експлуатації, яких налічується близько 25, передбачає побудову програми відповідного до кількості режимів, їх координат на полі та їх вагового фактора.

Обидва вищеописані підходи розроблено для забезпечення можливості отримання набору вихідних даних для будь-якої довільної дискретної стаціонарної моделі експлуатації з сукупності побудованих і описаних розподілів [5].

Проте, при цьому постає задача визначення раціональної кількості режимів на цьому полі, у яких слід здійснити моторні стендові випробування чи розрахунки при моделюванні – мінімально достатньої (для максимального скорочення матеріально-часових витрат на здійснення експериментального дослідження чи моделювання) для побудови і описання розподілів кількості режимів (експериментальних точок), рівномірно чи не рівномірно розподілених по такому полю, з граничним значенням відповідної складової методичної похибки, на перед встановленим.

Вирішення такої задачі здійснено шляхом раціоналізації значення обраної цільової функції, у якості якої обрано комплексний паливно-екологічний критерій K_{fe}. Розрахункова сітка обрана двовимірною – частота обертання КВ $X_1 = n_{кв}$ та крутний момент $X_2 = M_{кр}$, та рівномірної щільності з однаковою кількістю рівнів варіювання обох факторів раціоналізації $N(X_1) = N(X_2)$, $N = 2, 3, \ldots, 11, 21$. При цьому загальна кількість експериментальних точок $\Sigma N = N(X_1) \cdot N(X_2) = N^2$, для варіанту $\Sigma N_{\max} = 441$. Граничне значенням відповідної складової методичної похибки встановлено 5 %. Результати дослідження проілюстровано на рис. В.7. Всього досліджено 11 варіантів з $\Sigma N = 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121$ і 441. Величині ΣN можна поставити у відповідність поняття усередненої собівартості здійснення моторних випробувань, а величині $\delta\Sigma N$ – економії матеріальних витрат на здійснення експериментального дослідження. Величині δK_{fe} можна поставити у відповідність поняття методичної похибки експериментального визначення середньоексплуатаційного значення критерію. Для $\delta K_{fe} = 5\%$ у зону рекомендованих рівнів варіювання можна віднести значення $N(X) = 8 \ldots 21$. Проте, для варіантів з $N(X) = 8$ та 9 значення $\delta K_{fe} = 5{,}1$ та 4,4 % відповідно. При цьому значення величини $\delta\Sigma N = 85{,}5 \ldots 81{,}6$ %, тому раціональним значенням числа рівнів варіювання координат поля робочих режимів ПДВЗ $N(X)$ слід визнати 8 (як варіант з більш рівномірним заповненням поля робочих режимів ПДВЗ розрахунковою сіткою) чи 9 (як варіант, що включає центральну точку поля робочих режимів ПДВЗ), при цьому варіант з $N(X) = 9$ забезпечує краще значення методичної похибки на 0,7 % в порівнянні з варіантом з $N(X) = 8$, але має більшу на 4,1 % усереднену собівартість здійснення [5].



а б

Рисунок В.7 – Результати розрахункового дослідження [5]

В.3.2 Вибір раціональної структури моделі експлуатації аварійно-рятувального транспортного засобу з дизельним ДВЗ

При аналізі науково-технічної та нормативної літератури не виявлено моделі експлуатації ПДВЗ аварійно-рятувального транспортного засобу (АРТЗ), а жодна з 25 відомих стаціонарних моделей не враховує особливості процесу таких технічних об'єктів [5], описаних у [239, 240] та усередненої діаграми розподілу часу бойового чергування ДПРЧ м. Харкова з [241, 242] – див. рис. В.8,е.

Пропонована модель безаварійної експлуатації ПДВЗ АРТЗ побудована на діаграмі розподілу часу бойового чергування екіпажу АРТЗ і складається з таких полігонів [241, 242]: **(1) Очікування виклику → (2) Прямування на виклик → → (3) Бойове розгортання → (4) Аварійно-рятувальні роботи → (5) Згортання обладнання → (6) Прямування на місце базування**. Кожному з M полігонів (M = = 5), які не пов'язані з безпосередньою задіяністю АРТЗ і його ПДВЗ (тобто усіх, що складають у сумі структуру й тривалість бойового виклику, а значить усіх, окрім полігону «Очікування виклику»), привласнено номер j (для полігону «Очікування виклику» $j = 0$). Усереднена тривалість j-го полігону у бойового виклику (а не в добовому чергуванні, у якому може бути 0,5 … 3 бойових викликів [241, 242]), віднесена до сумарної тривалості бойового виклику, є ваговим фактором II роду WF_{IIj}. Кожному j-му полігону пропонованої моделі експлуатації може бути поставлено у відповідність модель експлуатації з числа відомих, що містить N стаціонарних режимів роботи ПДВЗ, вагові фактори i-х режимів якої віднесено до I роду WF_{Ii}. Підбір відомих

моделей експлуатації у дослідженні [5] здійснено з врахуванням особливостей роботи АРТЗ на відповідних етапах бойового виклику.

У дослідженні здійснено ранжування варіантів структури пропонованої моделі безаварійної експлуатації ПДВЗ АРТЗ та остаточне формування її структури з поміж усіх варіантів дослідження за середньоексплуатаційними значеннями критерію K_{fe} (рис. В.8), його вартісних складових – грошових витрат на паливо Z_f і компенсацію екологічної шкоди Z_e (у \$/(кВт·год)), ефективної потужності N_e (у кВт), годинних грошових витрат на паливо z_f і компенсацію екологічної шкоди z_e (у \$/год, оскільки $z_f = Z_f \cdot N_e$), а також усереднена собівартість витрат бойового виклику на паливо CP_f і на компенсацію екологічної шкоди CP_e (у \$/виклик, оскільки $CP_e = z_e \cdot t_\Sigma$, де t_Σ – тривалість виклику у год).

З порівняльного аналізу результатів дослідження випливає: а) за ознакою паливно-екологічної ефективності найкращим варіантом структури пропонованої моделі експлуатації є C1b, а найгіршим – B2c, при цьому різниця між значеннями критерію ранжування складає 71,2 %; б) за ознакою грошових витрат на паливо, спожите ПДВЗ, найкращим варіантом структури пропонованої моделі експлуатації є A1c, а найгіршим – B2a, при цьому різниця між значеннями критерію ранжування складає 90,5 %; в) за ознакою грошових витрат на компенсацію екологічної шкоди, спричиненої ПДВЗ, найкращим варіантом структури пропонованої моделі експлуатації є A1c, а найгіршим – C2a, при цьому різниця між значеннями критерію ранжування складає 88,4 %; г) варіанти з індексом «1» більш бажані у структурі пропонованої моделі, аніж варіанти з індексом «2».

За результатами дисертації сформульовано такий перелік рекомендацій щодо забезпечення щонайвищого рівня ЕБ процесу безаварійної експлуатації аварійно-рятувальної техніки з ПДВЗ ДСНС України, наведений у праці [5]. Також список рекомендацій щодо використання агрегатів нейтралізації законодавчо нормованих полютантів у потоці ВГ ПДВЗ такої техніки, розроблений у праці [3].

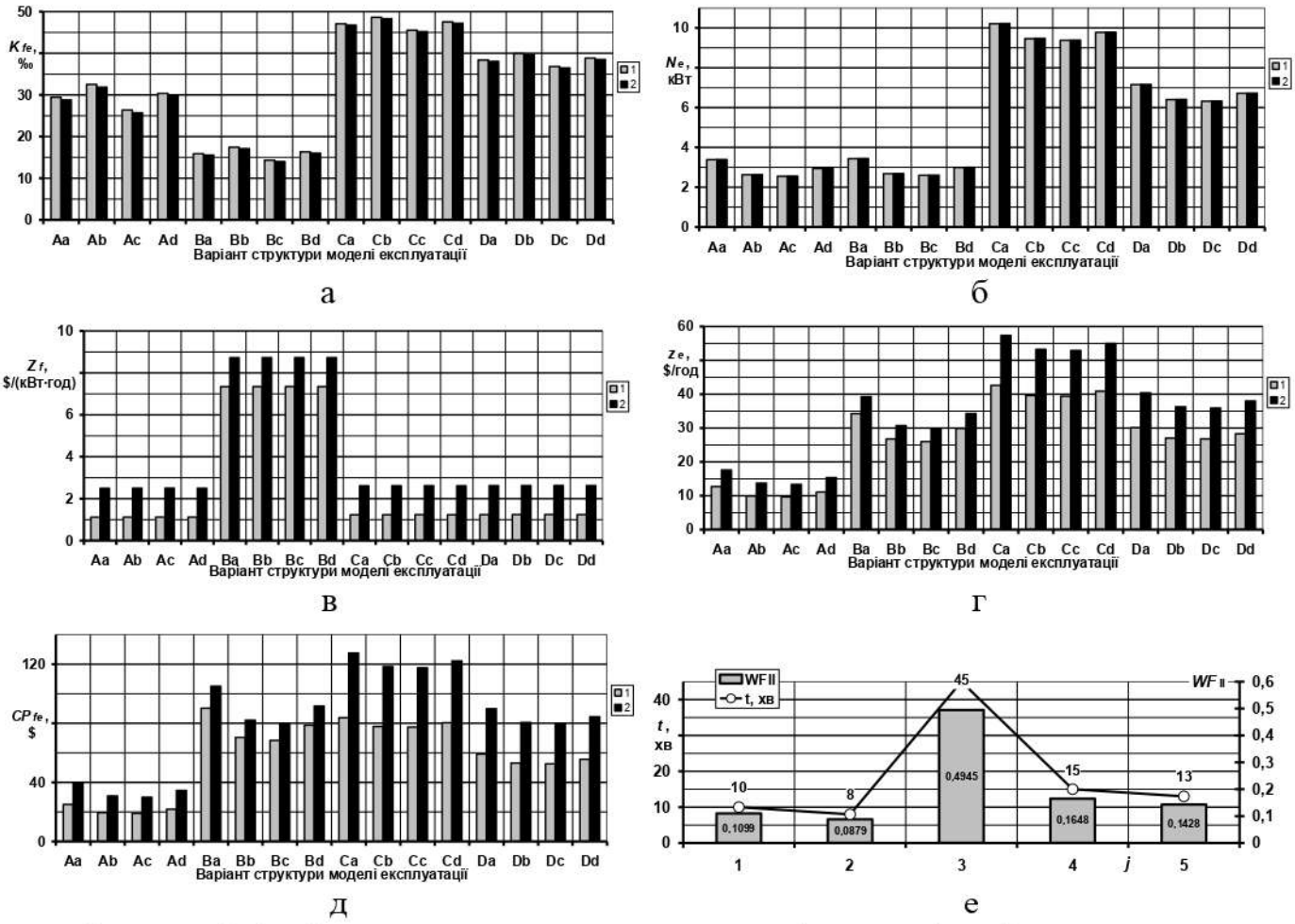


Рисунок В.8 – Результати розрахункового дослідження (а – д) та параметри полігонів пропонованої моделі експлуатації (е) [5, 241, 242]

В.3.3 Оцінювання паливно-екологічної ефективності переведення поршневого ДВЗ електромобіля на споживання біопалива

У дослідженні, описаному у джерелі [5] та статті [30], виконано аналіз світового сукупного видобутку нафти та інших паливних рідин (прогноз Association for the Study of Peak Oil and Gas за даними статистики BP та OPEC, квартальних звітів EIA, аналітичних оглядів агенцій Forbes та Bloomberg) за даними джерела [243], структури споживання енергоносіїв за видами у світі за даними джерела [245], структури споживання енергоносіїв за видами у світі за даними джерела [246], структури споживання біодизельного палива за регіонами світу за даними джерела [247], структури ринку рослинної сировини для виробництва біодизельного палива за даними джерела [248], динаміки виробництва моторного біопалива у світі за даними джерела [160], структури розподілу споживання рослинних олій за призначенням у світі за

даними джерела [249], динаміки зміни ціни на традиційне і сумішеве дизельне паливо та природний газ у світі за даними джерела [251], кореляції між цінами на сиру нафту та вироблене з неї дизельне моторне паливо за останні 10 років за даними джерела [252], динаміки зміни ціни на традиційне, альтернативне дизельне паливо та ріпакову олію у світі за даними джерела [250], динаміки обсягу виробництва продажу гібридних та електричних автотранспортних засобів, кількості електрозарядних станцій у світі за даними джерела [254], прогнозу зростання кількості гібридних та електричних АТЗ у світі до 2030 року за даними джерела [253], прогнозу зростання кількості гібридних та електричних АТЗ у світі до 2030 року за даними джерела [254], розповсюдженості електрозарядних станцій на території України станом на 2019 р [255], кількості електромобілів, зареєстрованих в Україні у 2018 р. [256] та даних щодо схем підключення ПДВЗ, ТЕД і акумулятора до рушія АТЗ з гібридним приводом [244, 270].

Встановлено, що одним з основних недоліків ПДВЗ у складі АТЗ як традиційної конструкції, так і гібридних, є споживання невідновного енергетичного ресурсу – моторного палива нафтового походження (мінерального, традиційного). Цей недолік принципово можливо подолати переведенням цих двигунів на споживання відновних (альтернативних) видів моторного палива біологічного походження – чистого чи у суміші з паливом нафтового походження (сумішевого). Серед таких рідких палив найбільшого розповсюдження набули метилові й етилові ефіри рапсової олії. Експериментально встановлено, що при їх використанні як у чистому, так і у сумішевому виді спостерігається деяке поліпшення показників токсичності ВГ двигунів, що їх споживають. Також теплотворна здатність такого палива є меншою ніж традиційного майже на 16 %, а теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння 1 кг такого палива менша лише на 10 %, щільність біопалива більша на 5 %, проте в'язкість більша на 96 %. Тому для отримання тієї ж самої ефективної потужності двигуна, а значить і електрогенератора, витрата палива збільшується до 20 % [5, 6, 30, 271–274]. У якості цільової функції для розрахункових досліджень обрано критерій K_{fe}, у якості моделі експлуатації ПДВЗ гібридного АТЗ у режимі безпосереднього приводу рушія крізь механічну трансмісію обрано стаціонарний стандартизо-

ваний випробувальний цикл ESC (Правила ЄЕК ООН № 49 [21]), у якості варіантів моделі експлуатації ПДВЗ гібридного АТЗ у режимі безпосереднього приводу рушія крізь електричну трансмісію обрано стаціонарні стандартизовані випробувальні цикли з ISO 8178-4:2017 Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Test cycles for different engine applications [21], а саме: C1 «Двигуни для позашляхового транспорту та позашляхового промислового обладнання» (дизельні), D1 «Двигуни з постійною частотою обертання колінчастого валу для силових установок» (дизельні), D2 «Двигуни з постійною частотою обертання колінчастого валу для електроустановок зі змінним навантаженням» (дизельні, у тому числі й дизель-генератори з короткочасним навантаженням (переривчастою, скачкоподібною), судові та тепловозні допоміжні (не для тяги)), F «Тепловозні двигуни» (дизельні, у тому числі й великотоннажні кар'єрні самоскиди з електричною трансмісією), G2 «Промислові двигуни потужністю менше за 20 кВт» (дизельні,у тому числі й портативні дизель-генератори) для різних значень відносного дольового напрацювання ДВЗ на традиційному паливі по способу A і B приводу рушія.

Результати оцінювання для різних моделей експлуатації та різних споживаних моторних палив наведено на рис. В.9 (порежимні значення критерію K_{fe}) та на рис. В.10,а (середньоексплуатаційні значення критерію K_{fe}).

Здійснено впорядкування отриманих результатів дослідження шляхом ранжування циклів C1, D1, D2, F та G2 відносно циклу ESC за пріоритетністю застосування за середньо експлуатаційними значеннями обраного критерію та ефекту, результати якого наведено на рис. 5.22,б таким чином (у порядку зменшення пріоритетності): а) за показником K_{fe}: **D1 → C1 → G2 → D2 → F**; б) за показником δK_{fe}: **F → D1 → C1 → G2 → D2**.

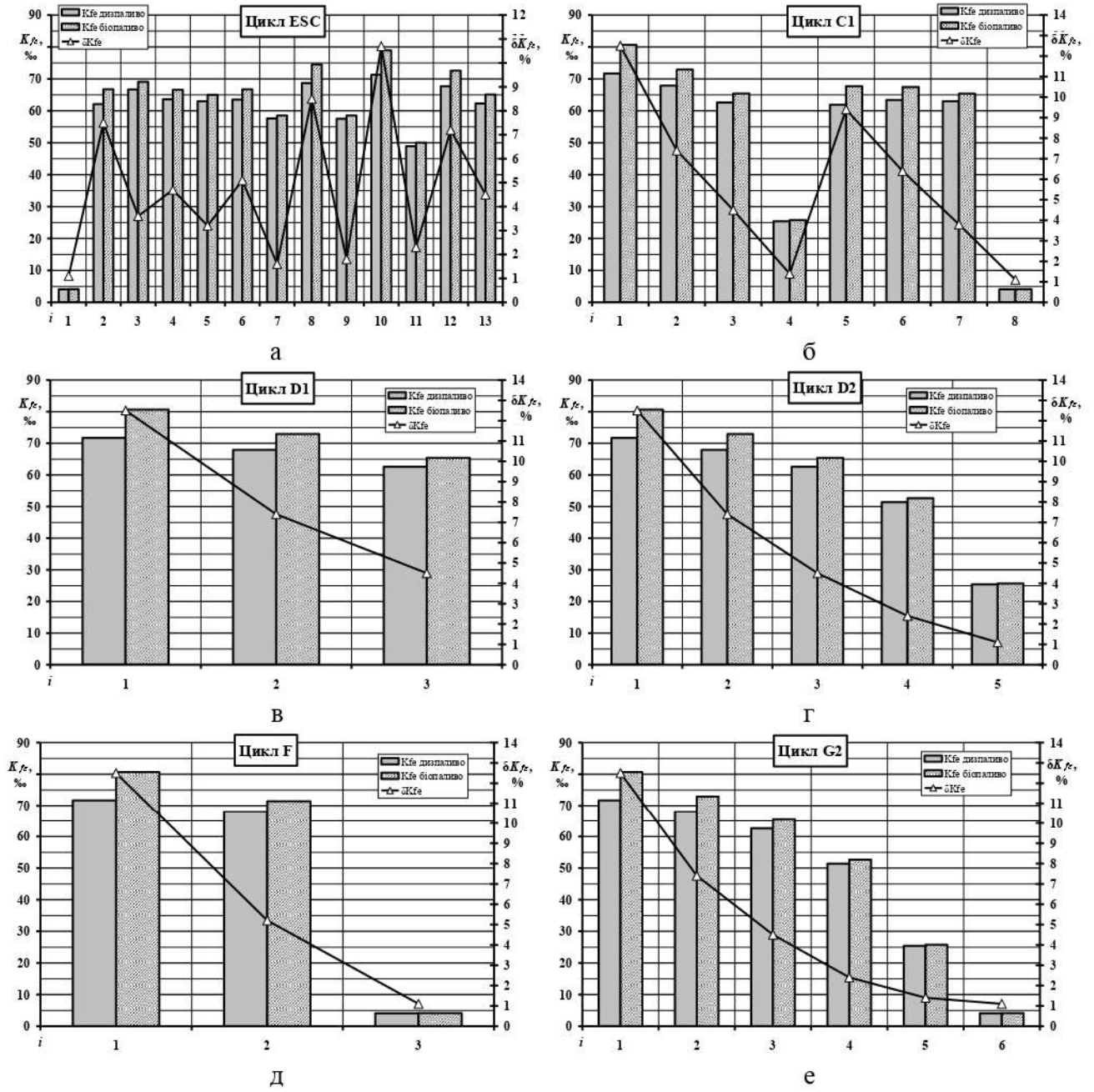


Рисунок В.9 – Результати оцінювання порежимних значень критерію K_{fe} [5, 30]

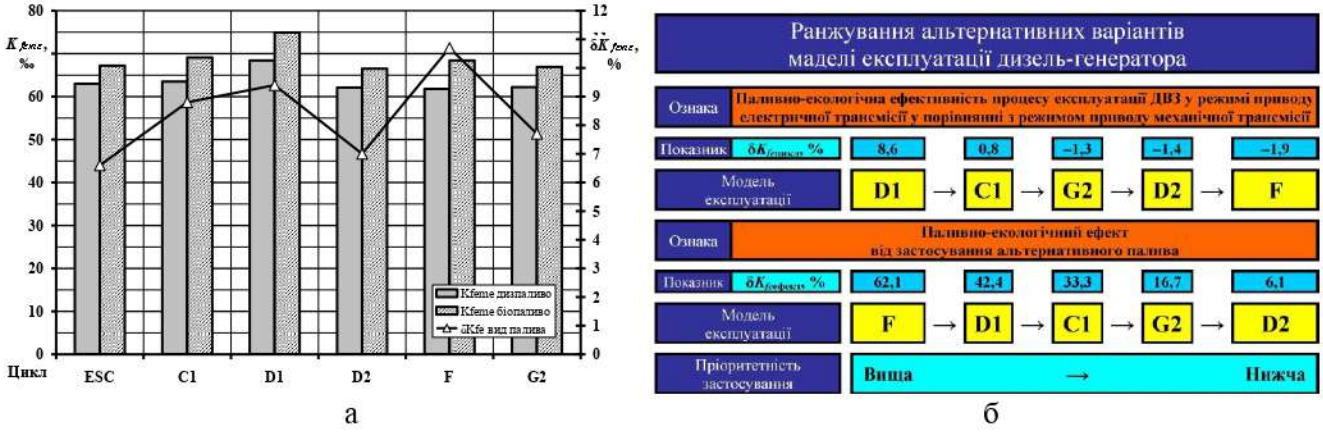
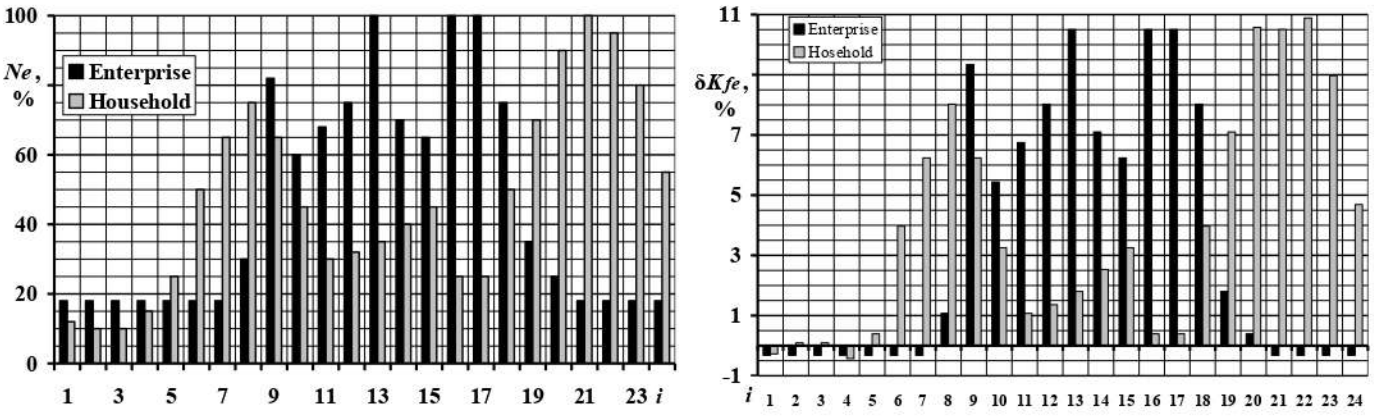


Рисунок В.10 – Результати оцінювання середньоексплуатаційних значень критерію K_{fe} та результат ранжування моделей експлуатації [5, 30]

В.3.4 Оцінювання екологічної ефективності переведення дизель-генератора на споживання палива біологічного походження за розробленими моделями експлуатації

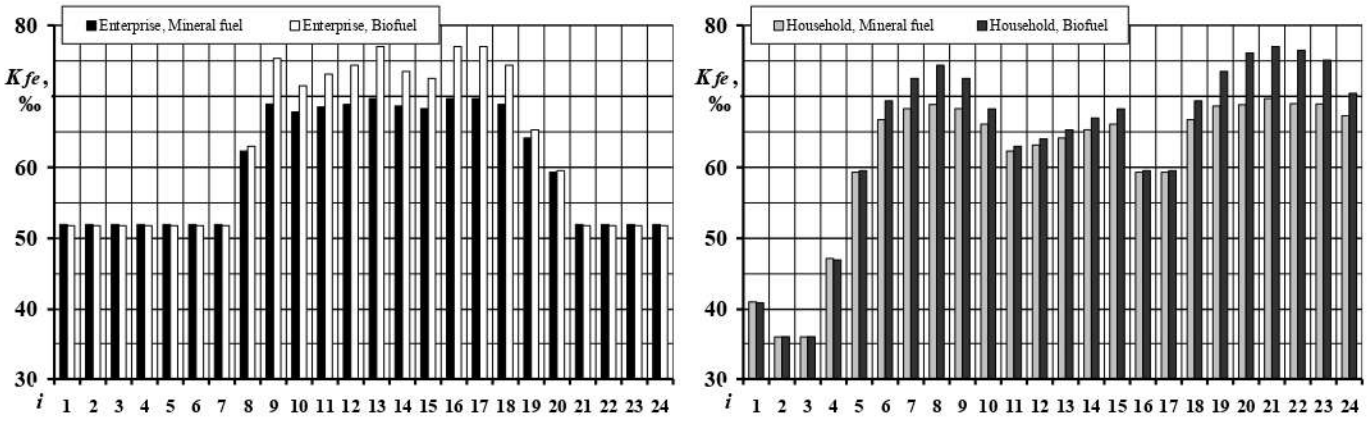
Встановлено, що у галузі резервного, аварійного і автономного електропостачання, особливо для віддалених промислових об'єктів та населених пунктів, а також потужного транспорту дальнього слідування (локомотиви, судна) широкого розповсюдження набули генератори електроенергії, первинним джерелом енергії у яких є ПДВЗ, зокрема дизельні. При цьому основними недоліками таких джерел механічної енергії у складі джерел електричної енергії є, по-перше, споживання невідновного енергоресурсу – моторного палива нафтового походження (традиційного), а по-друге, забруднення атмосферного повітря викидами законодавчо нормованих полютантів [5, 29]. У науково-технічній літературі модель експлуатації електрогенератора на базі ПДВЗ як єдиного цілого не виявлено, однак виявлено усереднені графіки розподілу ефективної потужності такої ЕУ впродовж доби за даними фірми VADO Technical Investment GmbH [259], для двох типів споживачів – житлового господарства та підприємства. При цьому вказані діаграми є континуальною і ламаною лініями, а будь-яка стаціонарна модель експлуатації є дискретною. На їх основі у дисертації розроблено 2 стаціонарні дискретні моделі експлуатації, наведені на рис. В.11. У якості цільової функції для розрахункових досліджень обрано критерій K_{fe}, у якості вихідних даних – результати стендових моторних випробувань дизеля 2Ч10,5/12 на 100 % мінеральному, 100 % біологічному та ряду сумішевих моторних полив з робіт [5, 29, 271–274]. Результати дослідження проілюстровано на рис. В.12.

З наведеного на рис. В.12 випливає, що середньоексплуатаційні значення критерію K_{fe} для обох пропонованих моделей експлуатації є величинами одного порядку і відрізняються не більше ніж на 2,5 %, а у межах одної моделі експлуатації при використанні різних палив – у межах 4,5 %.



а б

Рисунок В.11 – Параметри розроблених моделей експлуатації дизель-генератора (а) та результати порівняння порежимних значень критерію K_{fe} (б)



а б

Рисунок В.12 – Результати порежимних значень критерію K_{fe} для моделі експлуатації дизель-генератора «Промислове підприємство» (а) та «Домогосподарство» (б)

В.4 Висновки по додатку В

Таким чином, у цьому додатку рукопису дисертаційної роботи отримано такі результати.

1. Розроблено комплекс організаційно-технічних заходів щодо вдосконалення процедури отримання набору вихідних даних для комплексного критеріального оцінювання.

Розроблено підхід до описання розподілів значень компонентів набору вихідних даних для здійснення комплексного критеріального оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, проміжних та основних результатів такого оцінювання.

Вдосконалено систему відбору проб ВГ на токсичність та димність моторного

випробувального стенду з автотракторним дизелем 2Ч10,5/12 для експериментального отримання складових набору вихідних даних для здійснення комплексного критеріального оцінювання.

Досліджено співвідношення значень коефіцієнтів ефективності роботи ФТЧ дизельного ДВЗ за показниками димності й об'ємної концентрації незгорілих вуглеводнів у ВГ, які отримані прямими вимірюваннями у ході стендових моторних випробувань димоміром та газоаналізатором, та за показником викиду ТЧ з потоком ВГ, який отримано за формулою перерахунку. Встановлено, що неврахування такого співвідношення призводить до появи додаткової похибки.

2. Здійснено критеріальне оцінювання ефективності застосування ФТЧ як виконавчого пристрою ТЗНС для дизельного ПДВЗ впродовж міжрегенераційного періоду з урахуванням його гідравлічного опору за допомогою вдосконаленого математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію K_{fe} як складової розробленого показника рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} для стандартизованої моделі експлуатації, що з існуючих є найбільш характерною для одиниць пожежної та аварійно-рятувальної техніки ДСНС України.

3. Наведено приклади практичного застосування математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію. Зокрема, за допомогою вдосконаленого математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію: а) визначено раціональної кількості режимів при стендових випробуваннях дизельного ПДВЗ з урахуванням собівартості здійснення випробувань; б) обґрунтовано вибір раціональної структури моделі експлуатації аварійно-рятувального транспортного засобу з дизельним ПДВЗ; в) оцінено паливно-екологічну ефективність переведення ПДВЗ електромобіля на споживання біопалива; г) оцінено екологічну ефективності переведення дизель-генератора на споживання палива біологічного походження за розробленими моделями експлуатації.

Додаток Г ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації (всього – 70, з них: 5 монографій, 4 статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародної науко-метричної бази Scopus, 27 статей у наукових фахових виданнях України, 7 статей у наукових виданнях України, 3 статті у наукових виданнях інших країн та 24 наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації, з яких: 21 одноосібно, 11 у закордонних виданнях).

Монографії *(всього – 5, з яких 1 видана у Республіці Польщі, 1 – одноосібно):*

1. Вамболь С.О., Строков О.П., Вамболь В.В., **Кондратенко О.М.** Сучасні способи підвищення екологічної безпеки експлуатації енергетичних установок: монографія. Харків: Стиль-Іздат, 2015. 212 с. ISBN 978-617-7256-09-9.

Здобувачу особисто належать аналіз літературних джерел, класифікації конструкції ФТЧ та способів їх регенерації, структура і описання СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

2. Vambol S.O., Vambol V.V., Suchikova Y.O., Mishchenko I.V., **Kondratenko O.M.** Scientific and practical problems of application of ecological safety management systems in technics and technologies: Monograph. Opole: Academy of Management and Administration, 2017. 205 p. ISBN 978-83-62683-42-0.

Здобувачу особисто належать розроблені концепції методологічної, технічної і метрологічної основ та результати критеріального комплексного оцінювання ефективності функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ,а також обґрунтування застосування математичного апарату β-розподілу для описання процесів забезпечення рівня ЕБ.

3. Вамболь С.О., Вамболь В.В., **Кондратенко О.М.**, Міщенко І.В. Критеріальне оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергетичних установок: монографія. Харків: Стиль-Іздат, 2018. 320 с. ISBN 978-617-7555-60-4.

Здобувачу особисто належать класифікації критеріальних математичних апаратів для комплексного оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ та

чинників ЕНБ, джерелом яких є такі технічні об'єкти; математичні моделі ефективності роботи та гідравлічного опору ФТЧ дизельного двигуна; постановка задачі та аналіз результатів застосування математичного апарату β-розподілу для описання викиду ТЧ у потоці ВГ дизельного двигуна; підходи до отримання порежимних значень комплексного паливно-екологічного критерію, складу його набору врахованих чинників ЕНБ, одиниць вираження вартісних еквівалентів паливної та екологічної складової критерію; результати застосування критерію для дизельного двигуна, що працює за різними моделями експлуатації.

4. **Кондратенко О.М.** Метрологічні аспекти комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки експлуатації поршневих двигунів енергетичних установок : монографія. Харків: Стиль-Іздат, 2019. 532 с. ISBN 978-617-7738-33-5.

Здобувачу особисто належать усі результати, виладені у монографії.

5. **Кондратенко О.М.**, Колосков В.Ю., Деркач Ю.Ф., Коваленко С.А. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія. Харків: Стиль-Іздат, 2020. 522 с. ISBN 978-617-7912-64-3.

Здобувачу особисто належать підходи до розробки методологічних, технічних і метрологічних основ для фізичного і математичного моделювання процесів у ФТЧ та здійснення стендових моторних випробувань; розроблена ТЗНС від негативного впливу чинників ЕНБ, джерелом яких є ПДВЗ у складі ЕУ, як технічна основа відповідної СУЕБ; математична модель впливу ГО у виконавчих пристроїв такої ТЗНС на показники паливної економічності дизельного двигуна; розробка і виготовлення виставкового зразка ФТЧ; постановка задач і аналіз результатів практичного застосування вдосконаленого математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію.

***Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних науко-метричних баз**:*

6. **Кондратенко О.М.**, Строков О.П., Вамболь С.О., Авраменко А.М. Математична модель ефективності роботи фільтра твердих частинок дизеля. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015. № 6 (150). С. 55–61. (Scopus, Index

Copernicus, Google Scholar).

Особисто здобувачем виконано розробку математичної моделі ефективності роботи ФТЧ дизеля, здійснено аналіз результатів її застосування.

7. Vambol S., Vambol V., **Kondratenko O.**, Suchikova Y., Hurenko O. Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arrangement of pollutants neutralization system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 3/10 (87). С. 63–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102314. (Scopus, Index Copernicus, Google Scholar).

Особисто здобувачем виконано планування, здійснення й аналіз результатів експериментальних досліджень на моторному стенді з автотракторним дизельним двигуном та визначення фізичного змісту і значень коефіцієнтів математичної моделі ефективності роботи ФТЧ дизеля, які враховують температуру потоку ВГ на вході у ФТЧ та його розміщення у випускному тракті двигуна.

8. **Kondratenko O.**, Mishchenko I., Chernobay G., Derkach Yu, Suchikova Ya. Criteria based assessment of the level of ecological safety of exploitation of electric generating power plant that consumes biofuels. «*2018 IEEE 3rd International International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS–2018)»:* Book of Papers. Kharkiv, 2018. С. 57-1–57-6. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559570. (Scopus, Index Copernicus, Google Scholar).

Особисто здобувачем виконано розробку та ранжування моделей експлуатації дизельного двигуна у складі електрогенеруючої установки для енергопостачання промислового підприємства та приватного домогосподарства, на основі аналізу результатів комплексного критеріального оцінювання, а також здійснено аналіз енергетичного, екологічного і економічного ефектів від переведення такого двигуна на споживання альтернативного моторного палива біологічного походження.

9. **Kondratenko O.**, Koloskov V., Kovalenko S., Derkach Y., Strokov O. Criteria based assessment of efficiency of conversion of reciprocating ICE of hybrid vehicle on consumption of biofuels. «*2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020*» Conference Proceedings, Kharkiv, 2020. С. 177–182. DOI: 10.1109/KhPIWeek 51551.2020.9250118. (Scopus, Index Copernicus, Google Scholar).

Особисто здобувачем виконано ранжування відомих моделей експлуатації дизельного двигуна у складі електрогенеруючої установки для енергопостачання підрозділів ДСНС України під час локалізації та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, на основі аналізу результатів комплексного критеріального оцінювання, а також аналіз світових трендів і перспектив переведення такого двигуна на споживання альтернативного моторного палива біологічного походження.

Статті у наукових фахових виданнях України *(всього – 27, з яких 10 одноосібно):*

10. Вамболь С.О., Строков О.П., **Кондратенко О.М.** Стендові випробування автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 за стандартизованими циклами для визначення ефективності роботи ФТЧ. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування*. Харків, 2014. № 10(1053). С. 11–18.

Особисто здобувачем виконано планування, підготовку, здійснення і аналіз результатів стендових моторних випробувань дизельного двигуна з розробленим і виготовленим здобувачем ФТЧ, що покращує його екологічні показники роботи.

11. **Кондратенко О.М.,** Строков О.П., Вамболь С.О. Оцінка впливу гідравлічного опору ФТЧ на паливну економічність дизеля. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Транспортне машинобудування*. Харків, 2014. № 14(1057). С. 57–66.

Особисто здобувачем виконано розробку, застосування і аналіз результатів застосування математичної моделі впливу гідравлічного опору ФТЧ на показники паливної економічності дизельного двигуна як показника рівня ЕБ.

12. **Кондратенко О.М.,** Вамболь С.О., Строков О.П. Аналіз діючих ФТЧ нетрадиційної конструкції на відповідність сучасним нормам екологічних показників. *Науковий журнал «Екологічна безпека»*. Кременчук, 2014. № 1(17). С. 25–30.

Особисто здобувачем виконано аналіз науково-технічної, патентної, нормативної та довідникової літератури щодо питань конструкції, принципів роботи і ефективності роботи ФТЧ дизельних двигунів, що покращують їх екологічні показники роботи.

13. **Кондратенко А.Н.** Математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц дизеля. Часть 1: настроечный коэффициент. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків, 2014. № 18(1061). С. 68–80.

Особисто здобувачем виконано розробку математичної моделі ГО ФТЧ дизельного двигуна як виконавчого пристрою системи забезпечення рівня ЕБ, розробленого, виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, та визначення фізичного змісту і значень її настроювального коефіцієнту.

14. **Кондратенко А.Н.** Математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц дизеля. Часть 2: температурный коэффициент. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків, 2014. № 18(1061). С. 80–89.

Особисто здобувачем виконано визначення фізичного змісту і значень температурного коефіцієнту математичної моделі ГО ФТЧ дизельного двигуна, розробленого, виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, як виконавчого пристрою системи забезпечення рівня ЕБ.

15. **Кондратенко А.Н.**, Строков А.П., Вамболь С.А., Семикин В.М. Регенерация фильтров твердых частиц дизелей. *Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2014. № 1. С. 89–95.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних джерел на побудову класифікації способів та засобів здійснення процесу регенерації ФТЧ ПДВЗ як виконавчих пристроїв системи забезпечення рівня ЕБ.

16. **Кондратенко А.Н.**, Строков А.П., Вамболь С.А., Авраменко А.Н. Регенерация фильтра твердых частиц дизеля с насыпкой из природного цеолита. *Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2014. № 2. С. 76–81.

Особисто здобувачем виконано аналіз конструкції ФТЧ дизельного двигуна, розробленого виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, щодо його місця у розробленій ним класифікації способів та засобів здійснення процесу регенерації ФТЧ ПДВЗ.

17. **Кондратенко О.М.**, Строков О.П., Вамболь С.О., Мараховський В.П. Шляхи регенерації модульного ФТЧ дизеля з насипкою з природного цеоліту як засіб підвищення екологічної безпеки експлуатації транспорту. *Науковий журнал «Екологічна безпека»*. Кременчук, 2014. № 2(18). С. 107–113.

Особисто здобувачем виконано аналіз сосбливостей, переваг і недоліків способів функціонування засобів реалізації здійснення процесу регенерації ФТЧ дизельних двигунів, які відображені у розробленої ним класифікації.

18. **Кондратенко О.М.**, Строков О.П., Вамболь С.О., Бганцев В.М. Особливості визначення масового викиду твердих частинок у відпрацьованих газах дизеля. *Автомобільний транспорт: сб. науч. тр*. Харків, 2014. Вып. 35. С. 100–105.

Особисто здобувачем виконано аналіз основних методологічних особливостей процесу експериментального отримання показників рівня ЕБ експлуатації ПДВЗ у складі ЕУ та визначено шлях подолання виявлених об'єктивних труднощів.

19. **Кондратенко А.Н.** Математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц дизеля. Часть 3: компоновочный коэффициент. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків, 2015. № 6(1115). С. 29–40.

Особисто здобувачем виконано визначення фізичного змісту і значень компонувального коефіцієнту математичної моделі ГО ФТЧ дизельного двигуна, розробленого, виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, як виконавчого пристрою системи забезпечення рівня ЕБ.

20. **Кондратенко А.Н.** Математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц дизеля. Часть 4: временной коэффициент. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків, 2015. № 18(1127). С. 53–61.

Особисто здобувачем виконано визначення фізичного змісту і значень часового коефіцієнту математичної моделі ГО ФТЧ дизельного двигуна, розробленого, виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, як виконавчого пристрою системи забезпечення рівня ЕБ.

21. **Кондратенко О.М.,** Строков О.П., Вамболь С.О. Регенерація фільтрів твердих частинок дизелів як аспект екологічної безпеки експлуатації автотранспортних засобів. Частина 2. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2015. Вип. 3(92). Ч. 1. С. 137–143.

Особисто здобувачем виконано аналіз конструктивних рішень та робочих процесів засобів реалізації способів здійснення процесу регенерації ФТЧ дизельних двигунів, які відображені у розробленої ним класифікації.

22. Вамболь С.А., Строков А.П., Вамболь В.В., **Кондратенко А.Н.** Методологический подход к построению системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок. *Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2015. № 1. С. 48–52.

Особисто здобувачем виконано побудову структури СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, описано її функції та розкрито зміст її етапів та рівнів.

23. **Кондратенко О.М.,** Строков О.П., Вамболь С.О. Регенерація фільтрів твердих частинок дизелів як аспект екологічної безпеки експлуатації автотранспортних засобів. Частина 3. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2015. № 4(93). С. 96–102.

Особисто здобувачем виконано аналіз можливих варіантів практичної реалізації способів та засобів здійснення процесу регенерації ФТЧ дизельного двигуна, розробленого виготовленого і експериментально дослідженого здобувачем, згідно до розробленої ним відповідної класифікації.

24. **Кондратенко А.Н.,** Вамболь С.А., Вамболь В.В. Функции системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок. *Науковий вісник ХНАДУ*. Харків, 2015. Вип. 69. С. 95–100.

Особисто здобувачем виконано визначення та описання функцій рівнів та етапів СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, розробленої здобувачем.

25. **Кондратенко А.Н.** Концепция оценки эффективности управления экологической безопасностью процесса эксплуатации энергетических установок с поршневым ДВС. *Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2016. № 2. С. 68–72.

Особисто здобувачем виконано розробку концепції оцінювання ефективності управління рівнем ЕкБ процесу експлуатації енергоустановок з ПДВЗ.

26. Vambol S.O., **Kondratenko O.M.**, Vambol V.V., Mietielov O.V. Methodological basics of criterial integrated assessment of ecological safety management system functioning efficiency of power plants with piston ICE exploitation process. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. Кременчук, 2016. № 6(101), Ч. 1. С. 104–110.

Особисто здобувачем виконано описання методологічних основ концепції оцінювання ефективності управління рівнем ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, розробленої здобувачем.

27. Вамболь С.О., **Кондратенко О.М.**, Мєтєльов О.В. Методологічні основи критеріальної комплексної еколого-економічної оцінки ефективності експлуатації енергетичних установок з поршневим ДВЗ. *Автомобільний транспорт: сб. науч. тр*. Харків, 2016. Вип. 2. С. 139–149.

Особисто здобувачем виконано аналіз форм і способів реалізації оцінювання ефективності управління рівнем ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, згідно до методологічних основ відповідної концепції розробленої здобувачем.

28. **Kondratenko O.M.** Selection of criterial apparatus for complex assessment of ecological safety level of exploitation process of power plants. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. Харків, 2018. Вип. 3(1/2018). С. 75–84. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.1182858.

Особисто здобувачем виконано аналіз, описання, упорядкування у формі класифікації та визначення пріоритетності застосування відомих математичних апаратів, котрі придатні для здійснення комплексного оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ та ефективності функціонування відповідної СУЕБ.

29. **Kondratenko O.M.** Investigation of relationship between coefficients of operation efficiency of DPF of diesel ICE with using of conversion formula. Part 1: Particulate matter emission and opacity. *Двигуни внутрішнього згоряння: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2018. № 1. С. 49–55. DOI: 10.20998/0419-8719.2018.1.09.

Особисто здобувачем виконано постановку задачі, розрахунки та аналіз їх ре-

зультатів щодо особливостей застосування відомої формули перерахунку одних показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ у інші – димності ВГ у масовий годинний викид ТЧ.

30. Strokov O.P., **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Mishchenko I.V. Description of mass hourly emissions of particulate matter of diesel engine by beta-distribution with taking into account the passport accuracy of gas analyzer. *Двигуни внутрішнього згоряння: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2019. № 1. С. 49–62. DOI: 10.20998/0419-8719.2019.1.09.

Особисто здобувачем виконано постановку задачі та аналіз результатів застосування математичного апарату β-розподілу для описання викиду ТЧ у потоці ВГ дизельного двигуна як показника рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

31. **Kondratenko O.M.**, Chernobay G.O., Derkach Ju.F., Kovalenko S.A. Features of determination of the efficiency of devices for improvement of ecological safety level of vehicles with reciprocating ICE exploitation. *Двигуни внутрішнього згоряння: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2019. № 2. С. 36–44. – DOI: 10.20998/0419-8719.2019.2.07.

Особисто здобувачем виконано постановку задачі, розрахунки та аналіз їх результатів щодо особливостей застосування відомої формули перерахунку одних показників рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ у інші – концентрації незгорілих вуглеводнів у ВГ у масовий годинний викид ТЧ.

32. **Kondratenko O.M.** Taking into account the emissions of CO_2 as a toxic pollutant and as a greenhouse gas in fuel and ecological complex criteria-based assessment of diesel-generator operation process. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. Харків, 2019. № 6(2/2019). С. 12–23. DOI: 10.5281/zenodo.3558960.

Особисто здобувачем виконано розробка підходу та відповідної йому методики для розширення номенклатури врахованих чинників ЕНБ, джерелом яких є ПДВЗ у складі ЕУ, комплексного паливно-екологічного критерію на прикладі діоксиду вуглецю як полютанту та як парникового газу, здійснено таке оцінювання і проаналізовано його результати.

33. **Kondratenko O.M.** Assessment of ecological and chemical efficiency of explo-

itation process of reciprocating ICE of vehicle with concideration of emission of sulphur oxides, benzo(a)pyrene and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. Харків, 2020. № 7(1/2020). С. 38–50. DOI: 10.5281/zenodo.3780076.

Особисто здобувачем виконано методика оцінювання показників забруднення повітря оксидами сірки, поліциклічними ароматичними вуглеводнями, у тому числі й бенз(а)піреном, з потоком ВГ дизельного двигуна, аналіз та вдосконалення математичного апарату інтегрального індексу екологохімічної оцінки, проаналізовано результати його застосування.

34. **Kondratenko O.M.** Assessment of fuel and ecological efficiency of exploitation process of reciprocating ICE of power plants with consideration of emission of benzo (a)pyrene and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Двигуни внутрішнього згоряння: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2020. № 1. С. 52–59. DOI: 10.20998/0419-8719. 2020.1.07.

Особисто здобувачем виконано розробка підходу та відповідної йому методики для розширення номенклатури врахованих чинників ЕНБ, джерелом яких є ПДВЗ у складі ЕУ, комплексного паливно-екологічного критерію щодо поліциклічних ароматичних вуглеводнів та бенз(а)пірену, здійснено таке оцінювання і проаналізовано його результати.

35. **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Derkach Yu.F., Kovalenko S.A. Criteria-based assessment of fuel and ecological efficiency of exploitation process of reciprocating ICE of power plants considering of emission of sulfur oxides. *Двигуни внутрішнього згоряння: всеукр. научн.-техн. журнал*. Харків, 2020. № 2. С. 46–57. DOI: 0.20998/ 0419-8719.2020.2.07.

Особисто здобувачем виконано розробка підходу та відповідної йому методики для розширення номенклатури врахованих чинників ЕНБ, джерелом яких є ПДВЗ у складі ЕУ, комплексного паливно-екологічного критерію щодо оксидів сірки, здійснено таке оцінювання і проаналізовано його результати.

36. **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Kovalenko S.A., Derkach Yu.F., Botsmanovska O.S., Podolyako N.M. Determination of emissions of vapor of technic flamma-

ble liquids from enterprise for their storing and distribution and rational ajustments of their breathing valves. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. Харків, 2020. № 8(2/2020). С. 17–31. DOI: 10.5281/zenodo.4300753.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики до оцінювання викидів парів технічних горючих рідин, що перебувають на зберіганні, спричинені явищами великого і малого дихання резервуарів, оцінено екологічний, економічний та енергетичний ефекти від утилізації таких викидів.

Статті у наукових виданнях України *(всього – 7, з яких 1 одноосібно):*

37. Vambol S.O., **Kondratenko O.M.** Calculated substantiation of choice of units of monetary equivalents of complex fuel and ecological criteria components. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. Харків, 2017. Вип. 2. С. 53–60. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.1182890.

Особисто здобувачем виконано обґрунтування вибору одиниць вираження для паливної та екологічної складових комплексного паливно-екологічного критерію, які мають вартісні еквіваленти.

38. **Кондратенко О.М.,** Марчук Р.А., Воробйова Д.В. Визначення вагомості витрат палива при оцінюванні рівня паливно-екологічної ефективності експлуатації автомобіля для різних видів моторного палив. Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «*Енергетична безпека та енергоефективність на транспорті*» (29 листопада 2018 р., НАУ). Київ, 2018. С. 18–22.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу до визначення фізичного змісту та значень вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію, аналіз результатів його застосування.

39. **Кондратенко О.М.**, Коваленко С.А. Оцінювання паливно-екологічної ефективності застосування ФТЧ для дизеля з урахуванням його гідравлічного опору. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «*Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика*» (11 – 14 вересня 2019 р., ХДМА). Херсон, 2019. С. 219–224.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та на його основі побудовано методику оцінювання впливу ГО ФТЧ, яким обладнано дизельний двигун, на по-

казники рівня ЕБ процесу його експлуатації на основі вдосконаленого здобувачем математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію.

40. **Кондратенко О.М.**, Боцмановська О.С., Подоляко Н.М., Капінос Е.В. Врахування емісії пари моторного палива та аерозолю картерних газів як полютантів у критеріальному оцінюванні рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з ДВЗ. «*Інструменти та механізми модернізації наукових та освітніх процесів»:* Матеріали науково-практичної конференції (20–21 грудня 2019 р.). Херсон, 2019. С. 92–97.

Особисто здобувачем виконано розробку підходів та на їх основі побудовано методики оцінювання значень масового годинного викиду пари моторного палива, спричиненого явищами великого і малого дихання резервуарів, та аерозолю картерних газів як полютантів у критеріальному оцінюванні рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ, а також аналіз результатів їх застосування.

41. **Кондратенко О.М.,** Коваленко С.А. Обґрунтування вибору раціональних одиниць вираження вартісних складових комплексного паливно-екологічного критерію [Електронний ресурс]. *Електронна збірка наукових праць «Е-КОНОМІКА»*. Харків, 2019. № 1(3)/2019. С. 114–118. URL: http://e-conomics.hpi.kh.ua/index.php/e-conomics/article/view/86/70.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики врахування явища інфляції при розрахунку значень паливної та екологічної складових комплексного паливно-екологічного критерію, які мають вартісні еквіваленти, вибір одиниьі вираження для яких обрано за розробленим здобувачем підходом.

42. **Kondratenko O.M.** Assessment of fuel-ecology effect of using of alternative motor fuel for reciprocating ICE of hybrid vehicle / **O.M. Kondratenko** // Матеріали Міжнародного наукового симпозіуму SDEV'2020 *«Сталий розвиток – стан та перспективи»* (19–22 лютого 2020 р., НУ «Львівська політехніка», Львів). – 2020. – С. 177–180.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики для ранжування відомих стаціонарних стандартизованих випробувальних циклів дизель-генератора, що споживає як традиційне, так і альтернативне моторне па-

ливо, як моделей експлуатації АТЗ з гібридним привдом рушія на основі математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію.

43. **Kondratenko O.M.**, Kovalenko S.A., Botsmanovska O.S., Podolyako N.M. Determination of reference values of complex fuel-ecological criterion and ponderability of its fuel component. Збірник наукових праць XVIII Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екологічної безпеки*» (06 – 08 жовтня 2020 р., КрНУ). Кременчук, 2020. С. 60–65.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики для визначення фізичного змісту та значень еталонних величин вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію як реперних точок психофізичної шкали часткової функції бажаності та здійснено аналіз отриманих за допомогою їх результатів.

Статті у наукових виданнях інших країн *(всього – 3):*

44. **Кондратенко А.Н.,** Бурменко А.О. Система отбора проб отработавших газов дизеля моторного испытательного стенда как объект метрологических исследований. Материалы XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «*IIсследования и разкаботки в области машиностроения, энергетики и управления*» (23 – 24 апреля 2015 г., УО ГГТУ им. П.О. Сухого). Гомель, 2015. С. 202–205. (Стаття у науковому виданні Республіки Беларусь).

Особисто здобувачем виконано аналіз особливостей комплексу засобів вимірювальної техніки моторного випробувального стенду для експериментального отримання показників рівня ЕБ процесу експлуатації дизельного двигуна у світлі метрологічного забезпечення здійснення комплексного критеріального оцінювання такого рівня.

45. Vambol' S.O., **Kondratenko O.M.**, Dejneko N.V. Engine test bench as a sourse of danger factors in experimental researches. *Вестник Кокшетауского технического института Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан*. Кокшетау, 2015. № 3(19). С. 7–12. (Стаття у науковому виданні Республіки Казахстан).

Особисто здобувачем виконано аналіз особливостей складових моторного випробувального стенду для експериментального отримання показників рівня ЕБ процесу експлуатації дизельного двигуна у світлі безпеки дослідника при отриманні складових набору вихідних даних для здійснення комплексного критеріального оцінювання такого рівня.

46. **Kondratenko O.M.,** Achkasova M.A., Polikanova O.V. Main results of complex criterial fuel and ecological assessment of diesel engine 2Ch10.5/12 for emergency and rescue vehicles. Сб. материалов V Международной научно-практической конференции «*Проблемы гражданской защиты: управление, предупреждение, аварийно-спасательные и специальные работы*» (17 марта 2017 г., РГУ КТИ КЧС МВД РК). Кокшетау, 2017. С. 146–150. (Стаття у науковому виданні Республіки Казахстан).

Особисто здобувачем виконано розрахункове дослідження показників рівня ЕБ процесу експлуатації автотракторного дизеля для випадку його застосування у складі одиниць аварійно-рятувальної техніки за допомогою вдосконаленого здобувачем математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації *(всього – 24, з яких 8 одноосібно, 21 у матеріалах міжнародних конференцій і конгресів, 6 у матеріалах закордонних конференцій):*

47. **Кондратенко А.Н.** Использование ФТЧ дизелей в качестве искрогасителей выпускной системы автотранспортного средства. «*Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации*»: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (22–23 мая 2014 г.). Гомель, 2014. С. 221–222.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

48. **Кондратенко А.Н.,** Строков А.П., Вамболь С.А., Авраменко А.Н. Регенерация фильтра твердых частиц дизеля с насипкой из природного цеолита. «*XIX Міжнародний конгрес двигунобудівників*»: Тези доповідей. Присв. 100-річчю генерального конструктора В.О. Лотарєва. (06–10 вересня 2014 р.) – Харків, 2014. – С. 59.

Особисто здобувачем виконано аналіз місця ФТЧ, розробленого, виготовленого і випробуваного здобувачем, у класифікації способів та засобів здійснення процесу регенерації таких фільтрів.

49. **Кондратенко О.М.,** Раманов Б.Б. Актуальні аспекти технегенно-екологічної безпеки процесу регенерації ФТЧ дизелів. *Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми екологічної безпеки»:* Збірник тез доповідей (8–9 жовтня 2014 р.). Кременчук, 2014. С 10.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних щодо аспектів технегенно-екологічної безпеки процесу регенерації ФТЧ дизелів.

50. Stel'makh H.S., Vambol' S.O., **Kondratenko O.M.** Development of scientific thought and global trends in questions of ensure compliance with legislative established norms of vehicle exhaust gas toxity between 1991 and 2010. Сборник материалов Международной научно-практической конференции «*Роль местной противовоздушной обороны и пожарной охраны в годы великой отечественной войны*» (27 марта 2015). Кокшетау, 2015. С. 238–240.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних щодо загальносвітових тенденцій у питаннях екологізації процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ за останні 15 років.

51. Stel'makh H.S., Vambol' S.O., **Kondratenko O.M.** Structure of vehicle fleet of Ukraine as a factor of ecological safety. Сборник материалов IX Научно-практической конференции молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) «*Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы*». Часть 2 (2–3 апреля 2015). Минск, 2015. С. 140–141.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних щодо структури парку АТЗ України як чинника ЕНБ.

52. Вамболь С.А., Строков А.П., Вамболь В.В., **Кондратенко А.Н.** Методологический подход к построению системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок. «*XX Міжнародний конгрес двигунобудівників»:* Тези доповідей (05–10 вересня 2015 р.). – Х.: НАКУ «ХАІ», 2015. – С. 45.

Особисто здобувачем виконано описання розробленого здобувачем методологічного підходу до побудови СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ.

53. **Кондратенко О.М.,** Вамболь С.О., Авраменко А.М. Математична модель ефективності роботи фільтра твердих частинок ІПМаш у реальних умовах експлуа-

тації. Матеріали 17-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників «*Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору*», що проведена в рамках XIV Міжнародного виставкового форуму «*Технології захисту/ПожТех–2015*» (22–23 вересня 2015 р.). Київ, 2015. С. 194–196.

Особисто здобувачем виконано описання розробленої здобувачем математичної моделі ефективності роботи ФТЧ, розробленого, виготовленого і випробуваного здобувачем, у реальних умовах експлуатації.

54. **Kondratenko O.M.,** Skrynnyk K.V., Gurbanov R. Main pollutants in diesel exhaust gases. XII Міжнародна науково-практична конференція «*Проблеми екологічної безпеки*»: Збірник тез доповідей (6–8 жовтня 2015 р.). Кременчук, 2015. С. 25.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних щодо структури ансамблю законодавчо нормованих полютантів у складі ВГ дизельних двигунів.

55. **Кондратенко А.Н.** Математическая модель гидравлического сопротивления ФТЧ дизеля в реальных условиях эксплуатации. «*Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки*»: збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції (04 грудня 2015 р., НУЦЗ України). Харків, 2015. С. 66–67.

Особисто здобувачем виконано описання розробленої здобувачем математичної моделі ГО ФТЧ, розробленого, виготовленого і випробуваного здобувачем, у реальних умовах експлуатації.

56. Вамболь С.А., **Кондратенко А.Н.** Аспекты пожарной и взрывной безопасности процесса регенерации ФТЧ дизелей. Материалы Международной научно-практической конференции «*Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации*» *«ЧС–2016»* (19–20 мая 2016 г., ГУО Гомельский инженерный институт). Гомель, 2016. С. 172–174.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних даних щодо аспектів пожежної та вибухової безпеки процесу регенерації ФТЧ дизелів.

57. **Кондратенко А.Н.** Концепция оценки эффективности управления экологической безопасностью процесса эксплуатации энергетических установок с поршневым ДВС. «*XXI Міжнародний конгрес двигунобудівників*»: Тези доповідей (05–10 вересня 2016 р., НАКУ «ХАІ»). Харків, 2016. С. 37.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

58. **Кондратенко О.М.,** Мєтєльов В.О. Концепція критеріальної оцінки ефективності заходів щодо підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації транспорту. XIII Міжнародна науково-практична конференція «*Проблеми екологічної безпеки*»: Збірник тез доповідей (12–14 жовтня 2016 р., КрНУ ім. М. Остроградського). – Кременчук, 2016. С. 54.

Особисто здобувачем виконано розробку та описання концепції критеріального оцінювання ефективності заходів щодо підвищення рівня ЕБ процесу експлуатації транспорту.

59. Vambol S.O., Mishchenko I.V., **Kondratenko A.N.** Background of mathematical tools beta distribution application to certain characteristics of aerosol diesel exhaust gases dispersed phase. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «*Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика*» (24 листопада 2016 р., НУЦЗ України). Харків, 2016. С. 23–25.

Особисто здобувачем виконано обгрунтування доцільності застосування математичного апарату бета-розподілу для описання характеристик дисперсної фази аерозолю ВГ дизелів.

60. **Кондратенко О.М.,** Семчук В.М. Аналіз критеріальних апаратів для оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації автотранспортних засобів. Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції «*Проблеми екологічної безпеки*» (11–13 жовтня 2017 р., КрНУ ім. М. Остроградського). Кременчук, 2017. С. 122.

Особисто здобувачем виконано аналіз літературних джерел щодо особливостей існуючих критеріальних апаратів для оцінювання рівня ЕБ процесу експлуатації АТЗ з ПДВЗ.

61. **Kondratenko O.M.** Investigation of relationship between coefficients of operation efficiency of DPF of diesel ICE with using of conversion formula. Part 1: Particulate matter emission and opacity. «*XXIII Міжнародний конгрес двигунобудівників*»: Тези доповідей (05–10 вересня 2016 р., НАКУ «ХАІ»). Харків, 2016. С. 47–48.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

62. Vambol S.O., Bohdanov I.T., Vambol V.V., **Kondratenko O.M.**, Suchikova Y.O. Selection of obtaining method of criterion`s individual regime values of ecological safety level of power plants with engines exploitation process. 5-й Міжнародний конгрес «*Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*»: Збірник матеріалів (26–29 вересня 2018 р., НУ «Львівська політехніка»). Львів, 2018. С. 34.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики отримання порежимних значень комплексного паливно-екологічного критерію як показника рівня ЕБ процесу експлуатації ЕУ за ПДВЗ.

63. Strokov O.P., **Kondratenko O.M.**, Koloskov V.Yu., Mishchenko I.V. Description of mass hourly emissions of particulate matter of diesel engine by beta-distribution with taking into account the passport accuracy of gas analyzer. «*XXIV Міжнародний конгрес двигунобудівників*»: Тези доповідей (02–07 вересня 2019 р., НАКУ «ХАІ»). Харків, 2019. С. 44 – 45.

Особисто здобувачем виконано постановку задачі, формування набору вихідних даних та аналіз розрахунків по темі публікації.

64. **Кондратенко О.М.** Результати екологохімічної оцінки експлуатації дизеля 2Ч10,5/12 за випробувальним циклом ESC. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «*Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика*» (21–22 листопада 2019 р., НУЦЗ України). Харків, 2019. С. 126 – 128.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

65. **Kondratenko O.M.**, Gaponova A.S., Muzyka B.V., Verzun V.V., Podolyako N.M. Determination of influence of the emission of fuel vapour on fuel-ecological performance of diesel engine. Збірник XI Міжнародної науково-методичної конференції, 138 Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS) «*Безпека людини у сучасних умовах*» (05–06 грудня 2019 р., НТУ «ХПІ»). Харків, 2019. С. 188–190.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики для визначення кількісних і якісних параметрів викиду парів моторного палива як полютанта та врахування цього чинника ЕНБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ у

критеріальному оцінюванні її рівня.

66. **Kondratenko O.M.**, Gaponova A.S., Muzyka B.V., Verzun V.V., Podolyako N.M. Taking into account the emission of carter gases in criteria-based assessment of ecological safety level of reciprocating ICE exploitation process. Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції «*Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології*» (11–12 грудня 2019 р., ОДАБА). Одеса, 2019. С. 122–123.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики для визначення кількісних і якісних параметрів викиду картерних газів як полютанта та врахування цього чинника ЕНБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ у критеріальному оцінюванні її рівня.

67. **Kondratenko O.M.** Determination of CO_2 emission from reciprocating internal combustion engine of emergency and rescue vehicle as an ecological safety factor. «*Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы*»: сб. материалов XIV Международной научно-практической конференции курсантов (студентов), слушателей и адїюнктов (аспирантов, соискателей), в 2-х томах, Т. 1. (08–09 апреля 2020 г., УГЗ МЧС Беларуси). Минск, 2020. С. 296–298.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

68. **Kondratenko O.M.** Selection of rational ecological safety structure of exploitation process model of emergency and rescue vehicle with reciprocating ICE. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «*Problems of emergency situation*» *(PES – 2020)* (20 травня 2020 р., НУЦЗ України). Харків, 2020. С. 363–365.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

69. **Kondratenko O.M.** Determination of fuel-ecological efficiency of exploitation process of diesel ICE of power plants with considering of emission of benzo(a)pyrene and polycyclic aromatic hydrocarbons in exhaust gas flow. «*XXV Міжнародний конгрес двигунобудівників*»:Тези доп. (08–11 вересня 2020 р., НАКУ «ХАІ»). Харків, 2020. С. 29.

Особисто здобувачем виконано усі дослідження, відображені у публікації.

70. **Kondratenko O.M.**, Kovalenko S.A., Tkachenko O.O., Kapinos Ye.V. Some aspects of complex criteria-based assessment of the level of ecological safety of the exploitation process of reciprocating internal combustion engines. Abstracts of III International

Scientific and Practical Conference «*Science and education: problems, prospects and innovations*» (29–31 December 2020, Kyoto, Japan). Kyoto, 2020. С. 56–66.

Особисто здобувачем виконано розробку підходу та відповідної йому методики для визначення кількісних і якісних параметрів викиду поліциклічних ароматичних вуглеводнів, у тому числі бенз(а)пірену, а також реперних точок для вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію для психофізичної шкали часткової функції бажаності.

Додаток Д

ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Продовження Додатку Д

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор
з навчальної та методичної роботи
Національного університету
цивільного захисту України
канд. психол. наук, професор
_____ Олег НАЗАРОВ
«19» _____ 2020 р.

ДОВІДКА
про використання у навчальному процесі результатів
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека (21 – національна безпека)
доцента кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища
Національного університету цивільного захисту України
к.т.н., доцента *Олександра Кондратенка*, за темою
«НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМИ ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ»

Комісія у складі: декана факультету техногенно-екологічної безпеки Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук, доцента *Олександра Мєтєльова*, завідувача кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук, доцента *Володимира Колоскова* та старшого викладача кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук *Олени Серікової* склала довідку про використання результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека (21 – національна безпека) доцента кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук, доцента *Олександра Кондратенка* за темою **«Науково-методологічні основи захисту атмосферного повітря від техногенного впливу енергоустановок з поршневими двигунами внутрішнього згоряння»** у навчальному процесі та стверджує наступне.

Матеріали роботи передано для практичного використання в навчальному процесі при викладанні навчальних дисциплін «Системи управління екологічною безпекою», «Технології захисту навколишнього середовища» для слухачів денної та заочної форми навчання за другим (магістерським) рівнем вищої освіти та навчальних дисциплін «Технології утилізації небезпечних відходів» і «Методологія та методи наукового аналізу» за третім (освітньо-науковим), що навчаються за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища» у Національному університеті цивільного захисту України.

Форма надання матеріалів – електронні версії (у репозитарій університету та на офіційний сайт кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища як частини офіційного сайту факультету техногенно-екологічної безпеки) та друковані примірники (у бібліотеку університету та кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища) монографій за авторством та співавторством здобувача:

1. Сучасні способи підвищення екологічної безпеки експлуатації енергетичних установок: монографія / С.О. Вамболь, О.П. Строков, В.В. Вамболь, О.М. Кондратенко. – Х.: Стиль-Издат, 2015. – 212 с. – ISBN 978-617-7256-09-9.

Продовження Додатку Д

2. Scientific and practical problems of application of ecological safety management systems in technics and technologies: Monograph / S.O. Vambol, V.V. Vambol, Y.O. Suchikova, I.V. Mishchenko, O.M. Kondratenko. – Opole: Publ. Academy of Management and Administration, 2017. – 205 p. – ISBN 978-83-62683-42-0.

3. Критеріальне оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергетичних установок: монографія / С.О. Вамболь, В.В. Вамболь, О.М. Кондратенко, І.В. Міщенко. – Х.: НУЦЗУ, Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2018. – 320 с. – ISBN 978-617-7555-60-4.

4. Кондратенко О.М. Метрологічні аспекти комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки експлуатації поршневих двигунів енергетичних установок: монографія / О.М. Кондратенко. – Х.: Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2019. – 532 с. – ISBN 978-617-7738-33-5.

5. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія / О.М. Кондратенко, В.Ю. Колосков, Ю.Ф. Деркач, С.А. Коваленко. – Х.: Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2020. – 522 с. – ISBN 978-617-7912-64-3.

Створені підходи до побудови систем управління екологічною безпекою, технологій захисту навколишнього середовища, розробки їх виконавчих органів, технічного, методологічного і метрологічного забезпечення експериментальних і розрахункових досліджень показників їх роботи, класифікації та класифікатори факторів екологічної небезпеки, критеріальних математичних апаратів, способів й засобів зниження екологічної небезпеки від енергоустановок з поршневим двигуном внутрішнього згоряння протягом 2019 і 2020 рр. використані у навчальному процесі кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України у складі матеріалів лекційних курсів за вказаними навчальними дисциплінами.

Голова комісії:
декан факультету
техногенно-екологічної безпеки,
к.т.н., доцент — Олександр МЄТЄЛЬОВ

Члени комісії:
завідувач кафедри прикладної
механіки та технологій захисту
навколишнього середовища,
к.т.н., доцент — Володимир КОЛОСКОВ

старший викладач кафедри прикладної
механіки та технологій захисту
навколишнього середовища,
к.т.н. — Олена СЄРІКОВА

Продовження Додатку Д

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор
Інституту проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України,
чл.-кор. НАН України
_____ Андрій РУСАНОВ
«__» 01 2021 р.

ДОВІДКА

про використання у відділі водневої енергетики
Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України
результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека (21 – національна безпека)
доцента кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього
середовища Національного університету цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій
к.т.н., доцента *Олександра Кондратенка*, за темою
«НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМИ ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ»

Комісія у складі: голови комісії *Авраменка А. М.* – в.о. завідувача відділу водневої енергетики ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України, д.т.н., с.н.с.,
та членів комісії:

– *Лєвтєрова А. М.* – старшого наукового співробітника відділу водневої енергетики ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України, к.т.н., с.н.с.;

– *Семикіна В. М.* – інженера І-ої категорії відділу водневої енергетики ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України,

провела роботу з оцінки впровадження основних результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека (21 – національна безпека) доцента кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій кандидата технічних наук, доцента *Олександра Кондратенка* за темою **«Науково-методологічні основи захисту атмосферного повітря від техногенного впливу енергоустановок з поршневими двигунами внутрішнього згоряння»**, у практику наукової діяльності відділу.

Комісія встановила і стверджує наступне.

А. У дисертаційній роботі, метою якої є розробка науково-методологічних основ системи комплексного оцінювання рівнем екологічної безпеки технології захисту атмосферного повітря при безаварійній експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу та впровадження її в управління технології захисту навколишнього середовища, **наукова новизна** якої полягає у науково-прикладному обґрунтуванні методологічних основ системи комплексного оцінювання рівня екологічної безпеки технології захисту атмосферного повітря при роботі енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу на етапі «безаварійної експлуатації» та системи управління технології захисту навколишнього середовища, що дозволило отримати наступні наукові результати.

Продовження Додатку Д

1. *Вперше* науково обґрунтовано індекс ефективності функціонування фільтра твердих частинок, що є частиною технології захисту навколишнього середовища в енергоустановці з поршневим ДВЗ. Це дозволило об'єднати в єдиний комплекс математичні моделі процесів у фільтрі впродовж міжрегенераційного періоду. На основі індексу визначено систему керування рівнем екологічної ефективності роботи фільтра. За значенням індексу забезпечується підтримування показників ефективності фільтра на стабільному рівні для різних режимів роботи поршневого ДВЗ.
2. *Вперше* науково обґрунтовано інтегративний показник рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу. Показник враховує особливості та повний перелік чинників негативного впливу такого технічного об'єкту на атмосферне повітря етапу їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Показник включає комплексний паливно-екологічний критерій у якості окремого самостійного чинника техногенного впливу на стан атмосферного повітря та дозволяє надати окрему оцінку екологічній безпеці роботи поршневих ДВЗ і технології захисту навколишнього середовища у енергоустановці.
3. *Вперше* розроблено наукові основи системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу на етапі їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Система управління дозволяє врахувати пріоритетність екологічних показників роботи енергоустановки з поршневим ДВЗ над техніко-економічними на цьому етапі життєвого циклу. Механізми екологічного управління запропонованої системи процесуально реалізуються на матеріальній основі відповідної технології захисту навколишнього середовища в межах енергоустановки з поршневим ДВЗ певного рівня фізичного зносу. Функцією управління та зворотним зв'язком у системі управління виступає інтегративний показник, що комплексно оцінює екологічну ефективність роботи поршневого ДВЗ та його технології захисту навколишнього середовища.
4. *Вдосконалено* систему класифікацій способів роботи і конструкції фільтрів твердих частинок та систему класифікацій способів і засобів реалізації процесу їх регенерації як складових технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу енергоустановок з поршневим ДВЗ за якісним і кількісним складом класифікаційних ознак та класифікованих об'єктів. Система класифікацій дозволяє комплексно і адекватно оцінювати поточний стан рівня екологічної безпеки системи очищення відпрацьованих газів.
5. *Набули подальшого розвитку* методологічні засади побудови технологій захисту навколишнього середовища як матеріальної основи системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, які не відповідають чинним вимогам екологічної безпеки і не можуть бути виведені з експлуатації. Розвиток здійснено у напрямку виокремлення ієрархічного місця такої технології та її елементів у системі управління та побудови синергетичних ланцюгів із засобів захисту атмосферного повітря. Це дозволяє врахувати чинники техногенного впливу при роботі таких технічних об'єктів на екологічний стан атмосферного повітря, зумовлені розбіжністю вимог законодавчих екологічних обмежень щодо якості моторного палива та екологічних вимог до складу відпрацьованих газів.
6. *Набули подальшого розвитку* науково-методологічні основи побудови схеми технології захисту атмосферного повітря при експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, що не відповідають чинним вимогам екологічної безпеки і не можуть бути виведені з неї на етапі

Продовження Додатку Д

життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Це здійснено у напрямку та дозволило отримати синергетичний ефект від комплексу природозахисних технологічних заходів – охолодження, очищення і рециркуляції відпрацьованих газів, утилізації їх теплової енергії, переведення двигуна на споживання альтернативного моторного палива й раціоналізації структури моделі його експлуатації.

Б. Основні науково-методологічні, експериментальні й розрахункові результати вказаної дисертаційної роботи, що передані до відділу на безоплатній основі, на думку складу комісії, мають ознаки наукової новизни і практичної цінності та використані у практиці наукової діяльності відділу водневої енергетики ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України під час виконання літературно-патентного пошуку до науково-дослідних робіт, при підготовці аспіранта за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки та при комплексному паливно-екологічному оцінюванні результатів стендових моторних досліджень.

В. Форма надання матеріалів – електронні версії та друковані примірники монографій за авторством та співавторством здобувача:

1. Сучасні способи підвищення екологічної безпеки експлуатації енергетичних установок: монографія / С.О. Вамболь, О.П. Строков, В.В. Вамболь, О.М. Кондратенко. – Х.: Стиль-Издат, 2015. – 212 с. –ISBN 978-617-7256-09-9.
2. Scientific and practical problems of application of ecological safety management systems in technics and technologies: Monograph / S.O. Vambol, V.V. Vambol, Y.O. Suchikova, I.V. Mishchenko, O.M. Kondratenko. – Opole: Publ. Academy of Management and Administration, 2017. – 205 p. – ISBN 978-83-62683-42-0.
3. Критеріальне оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергетичних установок: монографія / С.О. Вамболь, В.В. Вамболь, О.М. Кондратенко, І.В. Міщенко. – Х.: НУЦЗУ, Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2018. – 320 с. – ISBN 978-617-7555-60-4.
4. Кондратенко О.М. Метрологічні аспекти комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки експлуатації поршневих двигунів енергетичних установок: монографія / О.М. Кондратенко. – Х.: Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2019. – 532 с. – ISBN 978-617-7738-33-5.
5. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія / О.М. Кондратенко, В.Ю. Колосков, Ю.Ф. Деркач, С.А. Коваленко. – Х.: Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2020. – 522 с. – ISBN 978-617-7912-64-3.

Слід зауважити, що у роботі у якості вихідних даних використані результати стендових моторних досліджень, здійснених у відділі за участю здобувача та опублікованих у відкритому друку.

Голова комісії: _____ Андрій АВРАМЕНКО

Члени комісії: _____ Антон ЛЄВТЄРОВ

_____ Віталій СЕМИКІН

Продовження Додатку Д

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
директор
ТОВ «Армко-Інжинірінг»
_____ Швець С. М.
«24» 11 2020 р.

АКТ

про впровадження у практику господарчої діяльності результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека (21 – національна безпека) доцента кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій к.т.н., доцента *О. М. Кондратенка*, за темою

«НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМИ ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ»

Комісія у складі: голови комісії директора ТОВ «Армко-Інжинірінг» Швеця С.М. та членів комісії: технічного директора Гурова Ю.К. та сервісного інженера Зотова В.С. провела роботу з оцінки використання основних теоретичних та розрахункових результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека (21 – національна безпека) доцента кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій кандидата технічних наук, доцента *Олександра Кондратенка* за темою **«Науково-методологічні основи захисту атмосферного повітря від техногенного впливу енергоустановок з поршневими двигунами внутрішнього згоряння»** у практику господарчої діяльності компанії.

Комісія дійшла висновку і засвідчує наступне.

1. У роботі *вперше* науково обґрунтовано інтегративний показник рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу. Показник враховує особливості та повний перелік чинників негативного впливу такого технічного об'єкту на атмосферне повітря етапу їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Показник включає комплексний паливно-екологічний критерій у якості окремого самостійного чинника техногенного впливу на стан атмосферного повітря та дозволяє надати окрему оцінку екологічній безпеці роботи поршневих ДВЗ і технології захисту навколишнього середовища у енергоустановці.
2. У роботі *вдосконалено* систему класифікацій способів роботи і конструкції фільтрів твердих частинок та систему класифікацій способів і засобів реалізації процесу їх регенерації як складових технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу енергоустановок з поршневим ДВЗ за якісним і кількісним складом класифікаційних ознак та класифікованих об'єктів. Система класифікацій дозволяє комплексно і адекватно оцінювати поточний стан рівня екологічної безпеки системи очищення відпрацьованих газів.

Продовження Додатку Д

3. У роботі *набули подальшого розвитку* науково-методологічні основи побудови схеми технології захисту атмосферного повітря при експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, що не відповідають чинним вимогам екологічної безпеки і не можуть бути виведені з неї на етапі життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Це здійснено у напрямку та дозволило отримати синергетичний ефект від комплексу природозахисних технологічних заходів – охолодження, очищення і рециркуляції відпрацьованих газів, утилізації їх теплової енергії, переведення двигуна на споживання альтернативного моторного палива й раціоналізації структури моделі його експлуатації.
4. Перелічені у трьох попередніх пунктах результати дисертаційної роботи та сформований на їх основі список рекомендацій щодо підвищення паливно-екологічної ефективності експлуатації техніки, оснащеної поршневими ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, передано на безоплатній основі у тимчасове користування ТОВ «Армко-Інжинірінг» у експериментальному порядку.
5. Означені результати впроваджено у практику господарчої діяльності ТОВ «Армко-Інжинірінг» при розробці плану заходів щодо забезпечення нормативного рівня показників екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок компанії поршневими ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, а саме транспортних, електрогенеруючих та мотор-компресорів газотранспортної системи і газовидобувних станцій, побудови схеми технології захисту навколишнього середовища від їх негативного впливу, а також при плануванні витрат на паливо-мастильні матеріали з урахуванням можливості переведення деяких з них на альтернативне моторне паливо біологічного походження.

Матеріали дисертаційного дослідження передано ТОВ «Армко-Інжинірінг» у формі електронні версії монографій за авторством та співавторством здобувача:

1. Сучасні способи підвищення екологічної безпеки експлуатації енергетичних установок: монографія / С.О. Вамболь, О.П. Строков, В.В. Вамболь, О.М. Кондратенко. – Х.: Стиль-Издат, 2015. – 212 с. – ISBN 978-617-7256-09-9.

2. Scientific and practical problems of application of ecological safety management systems in technics and technologies: Monograph / S.O. Vambol, V.V. Vambol, Y.O. Suchikova, I.V. Mishchenko, O.M. Kondratenko. – Opole: Publ. Academy of Management and Administration, 2017. – 205 p. – ISBN 978-83-62683-42-0.

3. Критеріальне оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергетичних установок: монографія / С.О. Вамболь, В.В. Вамболь, О.М. Кондратенко, І.В. Міщенко. – Х.: НУЦЗУ, Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2018. – 320 с. – ISBN 978-617-7555-60-4.

4. Кондратенко О.М. Метрологічні аспекти комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки експлуатації поршневих двигунів енергетичних установок: монографія / О.М. Кондратенко. – Х.: Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2019. – 532 с. – ISBN 978-617-7738-33-5.

5. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія / О.М. Кондратенко, В.Ю. Колосков, Ю.Ф. Деркач, С.А. Коваленко. – Х.: Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2020. – 522 с. – ISBN 978-617-7912-64-3.

Голова комісії: С.М. Швець
Члени комісії: Ю.К. Гуров
В.С. Зотов

Продовження Додатку Д

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
директор
ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство
«Харківський насосний завод»
_____ Соларьов О.П.
«__12__» _____ 20_20_ р.

А К Т

про впровадження у практику виробничої діяльності результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека (21 – національна безпека) доцента кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій к.т.н., доцента *О. М. Кондратенка*, за темою

«НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПОРШНЕВИМИ ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ»

Комісія у складі: голови комісії *Соларьова О.П.* – директора ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «Харківський насосний завод», та членів комісії: *Красненко О.О.* – головного бухгалтера, та *Дурихіна В.В.* – головного інженера провела роботу з оцінки використання основних теоретичних та розрахункових результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека (21 – національна безпека) доцента кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій кандидата технічних наук, доцента *Олександра Кондратенка* за темою **«Науково-методологічні основи захисту атмосферного повітря від техногенного впливу енергоустановок з поршневими двигунами внутрішнього згоряння»** у практику виробничої діяльності підприємства.

Комісія дійшла висновку і засвідчує наступне.

1. У роботі *вперше* розроблено наукові основи системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу на етапі їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Система управління дозволяє врахувати пріоритетність екологічних показників роботи енергоустановки з поршневим ДВЗ над техніко-економічними на цьому етапі життєвого циклу. Механізми екологічного управління запропонованої системи процесуально реалізуються на матеріальній основі відповідної технології захисту навколишнього середовища в межах енергоустановки з поршневим ДВЗ певного рівня фізичного зносу. Функцією управління та зворотним зв'язком у системі управління виступає інтегративний показник, що комплексно оцінює екологічну ефективність роботи поршневого ДВЗ та його технології захисту навколишнього середовища.

Продовження Додатку Д

2. У роботі *вперше* науково обґрунтовано інтегративний показник рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу. Показник враховує особливості та повний перелік чинників негативного впливу такого технічного об'єкту на атмосферне повітря етапу їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Показник включає комплексний паливно-екологічний критерій у якості окремого самостійного чинника техногенного впливу на стан атмосферного повітря та дозволяє надати окрему оцінку екологічній безпеці роботи поршневих ДВЗ і технології захисту навколишнього середовища у енергоустановці.
3. У роботі *набули подальшого розвитку* методологічні засади побудови технологій захисту навколишнього середовища як матеріальної основи системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, які не відповідають чинним вимогам екологічної безпеки і не можуть бути виведені з експлуатації. Розвиток здійснено у напрямку виокремлення ієрархічного місця такої технології та її елементів у системі управління та побудови синергетичних ланцюгів із засобів захисту атмосферного повітря. Це дозволяє врахувати чинники техногенного впливу при роботі таких технічних об'єктів на екологічний стан атмосферного повітря, зумовлені розбіжністю вимог законодавчих екологічних обмежень щодо якості моторного палива та екологічних вимог до складу відпрацьованих газів.
4. Перелічені у трьох попередніх пунктах результати дисертаційної роботи та сформований на їх основі список рекомендацій щодо підвищення паливно-екологічної ефективності експлуатації техніки підприємства, оснащеної поршневими ДВЗ зі значним ступенем фізичного зносу, передано на безоплатній основі ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «Харківський насосний завод» у експериментальному порядку.
5. Означені результати впроваджено у практику виробничої діяльності ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «Харківський насосний завод» при розробці плану заходів щодо забезпечення нормативного рівня показників екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок компанії, як транспортних, так і електрогенеруючих, побудови схеми технології захисту навколишнього середовища від їх негативного впливу, а також при плануванні витрат на паливо-мастильні матеріали з урахуванням можливості переведення деяких з них на альтернативне моторне паливо.

Матеріали дисертаційного дослідження передано ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «Харківський насосний завод» у формі електронних версій монографій за авторством та співавторством здобувача:

1. Сучасні способи підвищення екологічної безпеки експлуатації енергетичних установок: монографія / С.О. Вамболь, О.П. Строков, В.В. Вамболь, О.М. Кондратенко. – Х.: Стиль-Издат, 2015. – 212 с. – ISBN 978-617-7256-09-9.

2. Scientific and practical problems of application of ecological safety management systems in technics and technologies: Monograph / S.O. Vambol, V.V. Vambol,

Продовження Додатку Д

Y.O. Suchikova, I.V. Mishchenko, O.M. Kondratenko. – Opole: Publ. Academy of Management and Administration, 2017. – 205 p. – ISBN 978-83-62683-42-0.

3. Критеріальне оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергетичних установок: монографія / С.О. Вамболь, В.В. Вамболь, О.М. Кондратенко, І.В. Міщенко. – Х.: НУЦЗУ, Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2018. – 320 с. – ISBN 978-617-7555-60-4.

4. Кондратенко О.М. Метрологічні аспекти комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки експлуатації поршневих двигунів енергетичних установок: монографія / О.М. Кондратенко. – Х.: Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2019. – 532 с. – ISBN 978-617-7738-33-5.

5. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія / О.М. Кондратенко, В.Ю. Колосков, Ю.Ф. Деркач, С.А. Коваленко. – Х.: Стиль-Издат (ФОП Бровін О.В.), 2020. – 522 с. – ISBN 978-617-7912-64-3.

Голова комісії: _____ О.П. Соларьов

Члени комісії: _____ О.О. Красненко

_____ В.В. Дурихін