

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

КОНДРАТЕНКО ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 504.064.4 : 621.431 : 389.14 : 528.088

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

21.06.01 – екологічна безпека (технічні науки)

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки України
Андронов Володимир Анатолійович,
Національний університет цивільного
захисту України (м. Харків),
проректор з наукової роботи –
начальник науково-дослідного центру

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шмандій Володимир Михайлович,
Кременчуцький національний університет
ім. Михайла Остроградського (м. Кременчук),
завідувач кафедри екологічної безпеки
та організації природокористування

доктор технічних наук, професор,
Козуля Тетяна Володимирівна,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут» (м. Харків),
професор кафедри програмної інженерії
та інформаційних технологій управління

доктор технічних наук, доцент,
Гурець Лариса Леонідівна,
Сумський державний університет (м. Суми),
доцент кафедри екології та природоохоронних
технологій

Захист відбудеться «06» травня 2021 р. о 9-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.707.04 при Національному університеті цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94 та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.707.04 за електронною адресою: <https://nuczu.edu.ua/ukr/nauka/spetsializovani-vcheni-rady/50-katehoriia-uk-ua/spetsializovani-vcheni-rady/366-spetsializovana-vchena-rada-d64-707-04>

Автореферат розіслано «31» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. Ю. Колосков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 поршне-вим 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 поллютантів у відпрацьованих газах (ВГ) та утримання твердих частинок (ТЧ). Встановлено, 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 відповідають 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, Jhonson Metthey. 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.

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. Додатково актуальність теми дослідження визначено відповідністю пунктам 1, 2 і 3 паспорту спеціальності 21.06.01 – екологічна безпека.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дане наукове дослідження 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 поршнеvim 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 визначен-

ня екологічно ефективних процесів роботи енергоустановок з поршнеvim 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 поршнеvim 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 поршнеvim ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу.

4. Розробити комплекс технологічних і технічних рішень з організації та впровадження екобезпечних робочих процесів «безаварійної експлуатації» енергоустановок з поршнеvim 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 поршнеvim 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.

Об'єктом дослідження є комплексні системи технічних рішень та управління експлуатацією енергоустановок з поршнеvim 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 поршнеvim 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 поршнеvim ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, що забезпечують заданий рівень екологічної безпеки, та комплексної системи екологічного управління процесом експлуатації енергоустановок з поршнеvim ДВЗ.

Методи дослідження: 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 поршнеvim 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 поршнеvim ДВЗ. Це дозволило об'єднати в єдиний комплекс математичні моделі процесів у фільтрі впродовж міжрегенерацийного 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 поршнеvim 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 поршнеvim ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу на етапі їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Система управління дозволяє врахувати пріоритетність екологічних показників роботи енергоустановки з поршнеvim 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 поршнеvim 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 напрямку 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 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.

Практичне значення одержаних результатів.

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 функціонування 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-Інжиніринг» (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, мотор-компресорів 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 технологій 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.).

Особистий внесок здобувача. У дослідженнях, викладених у рукописі дисертаційної роботи, особисто здобувачеві належать такі результати: розроблена СУЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ [1–5, 22, 24–27, 47, 53, 58, 59]; створені такі системи класифікацій з ієрархічними класифікаторами: чинників екологічної небезпеки, джерелом яких є ПДВЗ у складі ЕУ; способів та засобів очищення потоку ВГ дизельних ПДВЗ від ТЧ; способів та засобів реалізації процесу регенерації ФТЧ дизельних ПДВЗ; критеріальних математичних апаратів для оцінювання рівня екологічної безпеки при експлуатації ЕУ з ПДВЗ [1, 3–5, 15–17, 21, 23, 28, 47, 49, 50, 52, 55, 61]; побудована ТЗНС від негативного впливу ПДВЗ у складі ЕУ на НПС [5];

вдосконалено конструкцію модульного ФТЧ із сітчастими касетами, наповнених природним цеолітом, і способи та засоби здійснення процесу регенерації I і II роду [1–3, 5, 7, 8, 10, 12, 15–17, 21, 23, 48, 50]; вдосконалено конструкцію системи відбору проб ВГ на токсичність і димність моторного випробувального стенду з автотракторним дизелем Д21А1 [2, 3, 5–7, 10, 18, 31, 44, 45, 49]; розроблено математичні моделі гідравлічного опору (ГО) ФТЧ, роботи ФТЧ у реальних умовах експлуатації та впливу значення ГО ФТЧ на показники паливної економічності ПДВЗ, що об'єднані у єдиний комплекс для визначення умов ефективного функціонування ФТЧ [3, 5–7, 11, 13, 14, 19, 20, 54, 56]; розроблено методологічні основи комплексного критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ [3, 5, 22, 24–27, 47, 52, 53, 57–59]; запропоновані вдосконалення базового варіанту математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію відповідно до сформульованої концепції індикатору екобезпеки ПДВЗ і його ТЗНС [2–5, 37, 41, 63, 65]; досліджено ефективність практичного застосування вдосконаленого базового варіанту математичного апарату комплексного паливно-екологічного критерію в запропонованій системі комплексного оцінювання екологічної безпеки при роботі ЕУ з ПДВЗ [3–5, 8, 9, 39, 42, 46, 69]; розроблено підхід до визначення вагомості паливної складової комплексного паливно-екологічного критерію [4, 38]; розширення номенклатури врахованих математичним апаратом комплексного паливно-екологічного критерію чинників екологічної безпеки відповідно до розробленого класифікатора [4, 32–36, 40, 66–68, 70, 71]; виконано аналіз кількісних і якісних особливостей структури врахованих чинників екологічної безпеки при критеріальному оцінюванні рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ за допомогою математичного апарату інтегративного показника [2, 3, 5]; розроблено підходи до визначення еталонних значень комплексного паливно-екологічного критерію та вагомості витрат палива як реперних точок психофізичної шкали і отримання відповідної йому часткової функції бажаності [4, 43, 71]; запропоновані засоби формування набору вихідних даних для здійснення комплексного критеріального оцінювання [2, 3, 5–7, 10]; впроваджено метрологічні засади для перерахунку показників димності й токсичності ВГ у викид ТЧ [4]; постановка задачі, формування набору вихідних даних і аналіз результатів застосування математичного апарату сімейства кривих Пірсона [3, 30, 60, 64]; досліджено співвідношення показників ефективності роботи ФТЧ [4, 5, 29, 62]; запропоновано комплексну систему управління експлуатації ЕУ з ПДВЗ відповідно до вимог екологічної безпеки атмосферного повітря [1, 4, 5, 28].

Апробація результатів дослідження. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались 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); Меж-

дународная 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: проблемы 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 «ХП», Харків, Україна); III Міжнародна науково-технічна конференція «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).

Публікації. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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 надано аналіз науково-технічної, довідникової, нормативної та патентної літератури щодо визначення екологічно ефективних процесів роботи ЕУ з ПДВЗ на етапі життєвого циклу «безаварійна експлуатація» для захисту атмосферного повітря від викиду екологічно небезпечних речовин та дії чинників фізичного впливу. Питання розробки методів та засобів захисту атмосферного повітря від техногенного впливу при роботі ПДВЗ всебічно розглянуті та дослідженні з позиції теорії і практики в роботах таких провідних учених з України і держав СНД Ф.І. Абрамчука, А.М. Авраменка, А.І. Атамася, Р.М. Баширова, В.В. Бразовського, І.Л. Варшавського, І.П. Васильєва, Л.В. Грехова, С.А. Єрощенко, В.А. Звонова, П.М. Каніла, В.Г. Колобородова, А.П. Кудряша, А.Р. Кульчицького, А.М. Левтерова, В.П. Матейчика, А.П. Марченка, В.А. Маркова, А.Л. Новоселова, І.В. Парсаданова, А.П. Поливянчука, В.Ф. Шапка, В.М. Семикіна, В.І. Смайліса, В.В. Солов'я, Н.К. Шокотова, В.А. Юрченко, учених, що спеціалізуються на питаннях управління екологічною безпекою М.М. Биченка, С.О. Вамболя, В.В. Вамболь, О.М. Касимова, В.М. Кобріна, Г.Д. Коваленка, О.Д. Липенкова, М.С. Мальованого, І.С. Масленнікової, В.М. Навроцького, М.В. Нечипорука, Л.Д. Пляцука, С.С. Рижкова, Ю.М. Саталкіна, В.М. Федосєєва, В.Я. Шевчука, В.М. Шмандія та ін.; і в працях 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 Environmental Protection

Agency, University of Cincinnati, University of Auckland, University of Tennessee та ін., серед яких слід виокремити наступні 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.

Результати аналізу зазначених вище наукових досягнень з екологічної безпеки при роботі ЕУ з ПДВЗ, що відповідають вимогам правил ЄЕК ООН, і організації, складу та технічних рішень технологій захисту навколишнього середовища при безаварійній їх експлуатації показали відсутність науково-методологічних основ комплексного захисту АП при експлуатації ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу. Відповідно до цього зроблені висновки щодо врахування чинників екологічної небезпеки, які мають місце при роботі ПДВЗ, відомих методик комплексного оцінювання техногенного впливу ЕУ ПДВЗ на стан атмосферного повітря (табл. 1).

Таблиця 1 – Аналіз врахування чинників екологічної небезпеки в методиках комплексного оцінювання впливу ПДВЗ на атмосферне повітря

Шифр класифі	ЧИННИК ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ	Поточний статус
A	ПОЛЮТАНТИ	2 з 14
<i>A.a</i>	<i>Газоподібні й аерозольні речовини-полютанти</i>	2 з 8
<i>A.a.1</i>	<i>Законодавчо нормовані прямо</i>	2 з 2
A.a.1.1	Викид продуктів неповного згоряння моторного палива, у потоці аерозолі ВГ (C_nH_m , CO, PM)	так
A.a.1.2	Викид продуктів повного згоряння моторного палива, у потоці аерозолі ВГ (NO_x)	так
<i>A.a.2</i>	<i>Законодавчо нормовані опосередковано</i>	0 з 3
A.a.2.1	Викид оксидів сірки у потоці аерозолі ВГ (SO_x)	ні
A.a.2.2	Викид ПАВ та сполук важких металів у потоці аерозолі ВГ (бенз(а)пірен, ПАУ, ТЕС)	ні
A.a.2.3	Викид парникових газів у потоці аерозолі ВГ (CO_2 , H_2O , CH_4 , NO_x)	ні
<i>A.a.3</i>	<i>Законодавчо ненормовані</i>	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 аерозолі картерних газів	ні
A.a.3.3	Підвищення вологості атмосферного повітря (H_2O)	ні
<i>A.b</i>	<i>Рідкі речовини-полютанти</i>	0 з 6
<i>A.b.1</i>	<i>Горючі й вибухонебезпечні</i>	0 з 2
A.b.1.1	Забруднення НПС моторним паливом	ні
A.b.1.2	Забруднення НПС моторною оливою	ні
<i>A.b.2</i>	<i>Негорючі</i>	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

В	ШКІДЛИВІ ФАКТОРИ ВПЛИВУ	1 з 6
<i>В.а</i>	<i>Енергетичне забруднення НПС</i>	<i>0 з 3</i>
<i>В.а.1</i>	<i>Забруднення НПС шумом та вібрацією</i>	ні
<i>В.а.2</i>	<i>Забруднення НПС теплотою</i>	ні
<i>В.а.3</i>	<i>Забруднення НПС електромагнітними полями</i>	ні
<i>В.б</i>	<i>Інформаційне забруднення НПС</i>	<i>0 з 3</i>
<i>В.б.1</i>	<i>Забруднення НПС хибною інформацією</i>	ні
<i>В.б.2</i>	<i>Забруднення НПС інформаційним шумом</i>	ні
<i>В.б.3</i>	<i>Забруднення НПС турбуючими факторами</i>	ні
<i>В.с</i>	<i>Споживання невідновного джерела енергії</i>	<i>так, 1 з 1</i>
С	ВІДХОДИ (ТВЕРДІ РЕЧОВИНИ-ПОЛЮТАНТИ)	0 з 3
<i>С.а</i>	<i>Забруднення НПС сплавами чорних та кольорових металів</i>	ні
<i>С.б</i>	<i>Забруднення НПС полімерними та композиційними матеріалами</i>	ні
<i>С.с</i>	<i>Забруднення НПС склом та керамічними речовинами</i>	ні

Таким чином, за наявною більшістю неврахованих чинників у існуючих методах комплексного оцінювання дії техногенних факторів на стан атмосферного повітря визначено, що необхідно розробити методологію комплексного оцінювання рівня екологічної безпеки при експлуатації ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу на етапі «безаварійної експлуатації».

Надано характеристику особливостей дії дисперсної фази аерозолію відпрацьованих газів дизельного ПДВЗ на атмосферне повітря, оскільки для двигунів з високим ступенем фізичного зносу має місце різке зростання вмісту ТЧ у викидах. Побудовано класифікації способів та засобів зниження токсичності ВГ таких дизельних ПДВЗ шляхом їх очищення від ТЧ (рис. 1).

Виявлено, що серед числа найбільш широко вживаних та комерційно успішних систем видалення ТЧ з аерозолію ВГ є фільтри фірм Bosch, Engelhard, Ecomix, DCL і Johnson Matthey, які обмежено придатні як засоби захисту АП від негативного впливу при роботі ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу. Для обґрунтованого вибору фільтруючих систем і управління їх роботою з позицій екологічної безпеки АП при експлуатації ПДВЗ запропоновано класифікацію способів і засобів реалізації процесу регенерації ФТЧ дизельних ПДВЗ (рис. 2).

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.

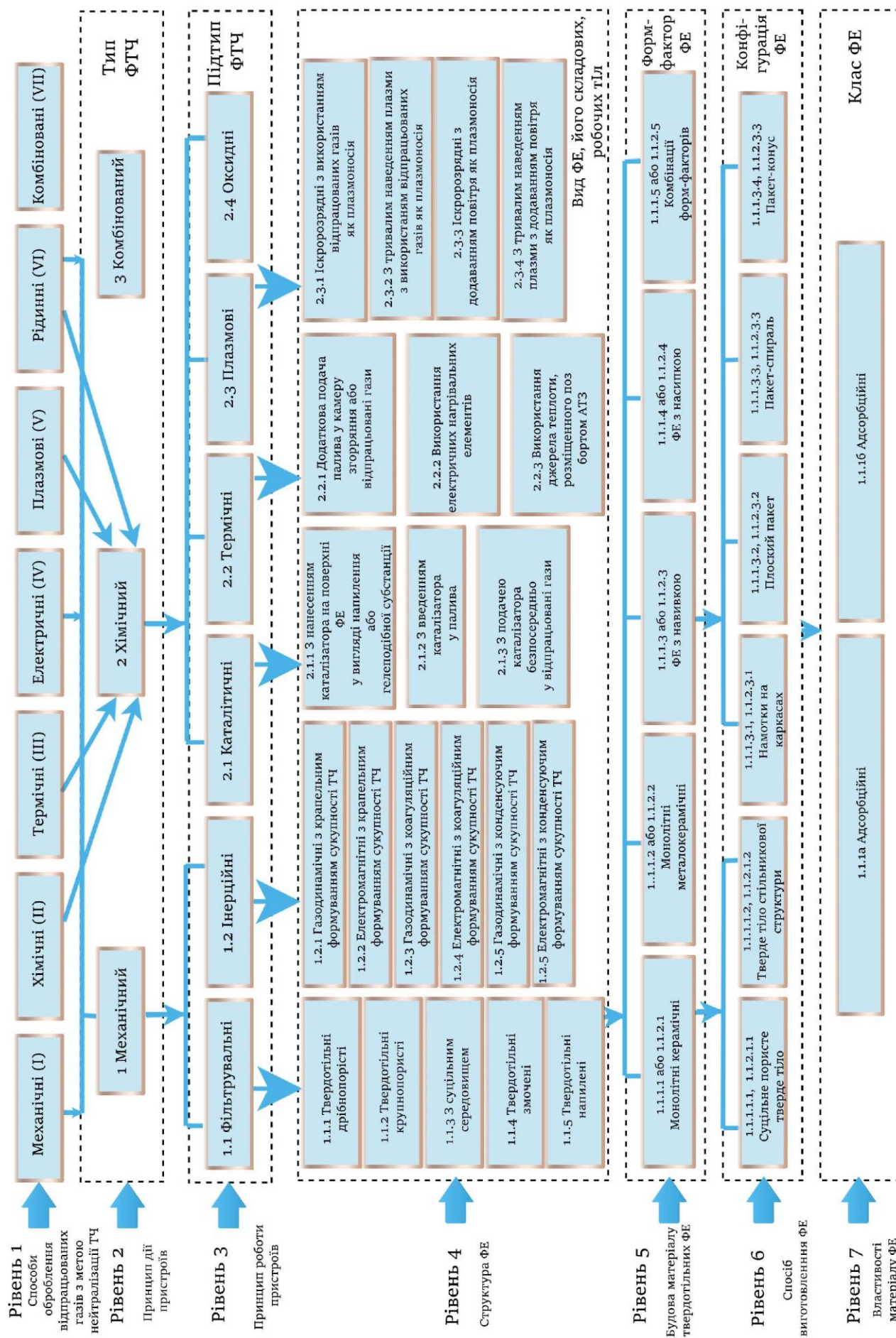


Рисунок 1 – Класифікація систем комплексного очищення аерозолу відрізняваних газів дизельних поршневих ДВЗ від твердих частинок

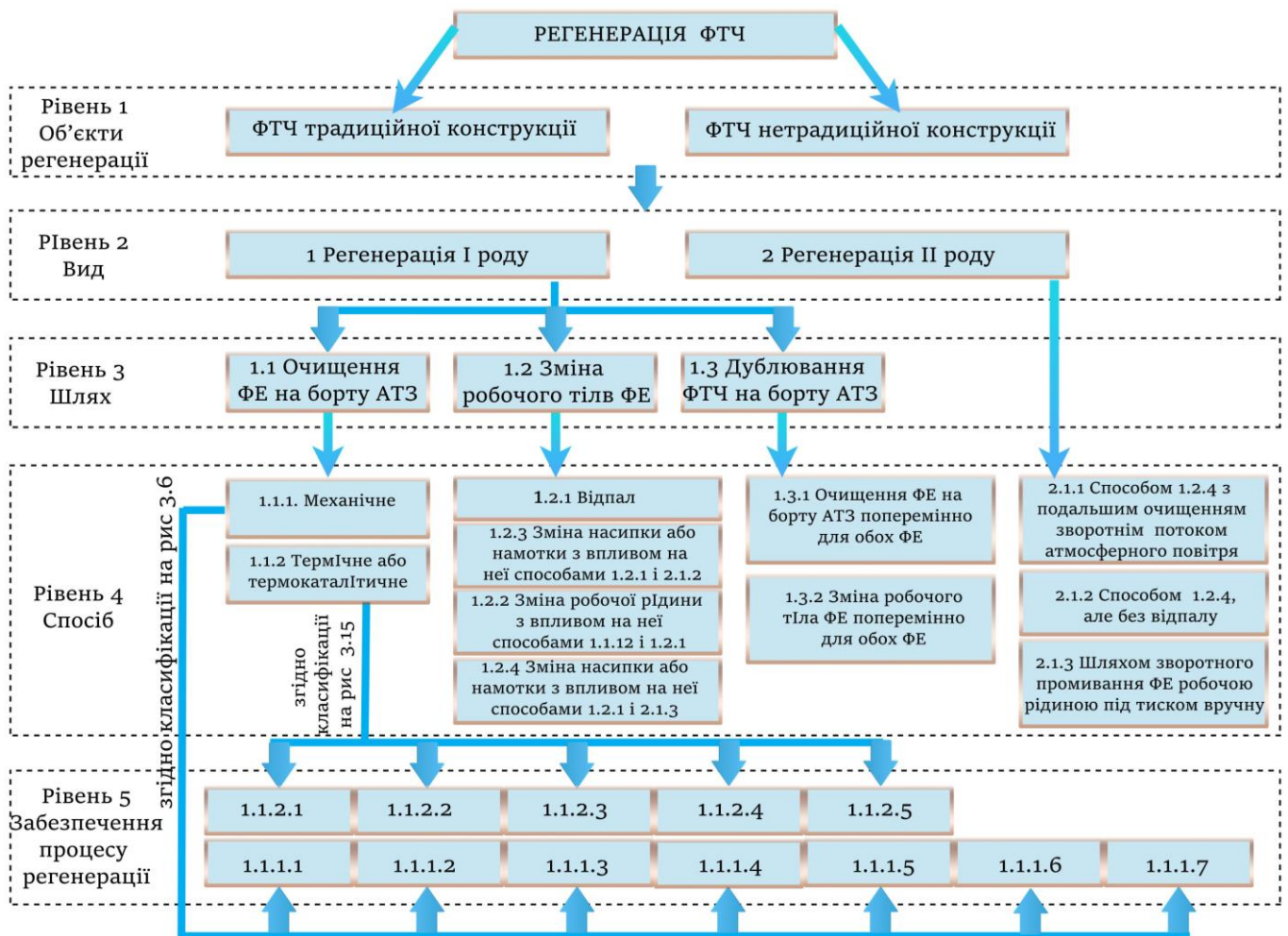


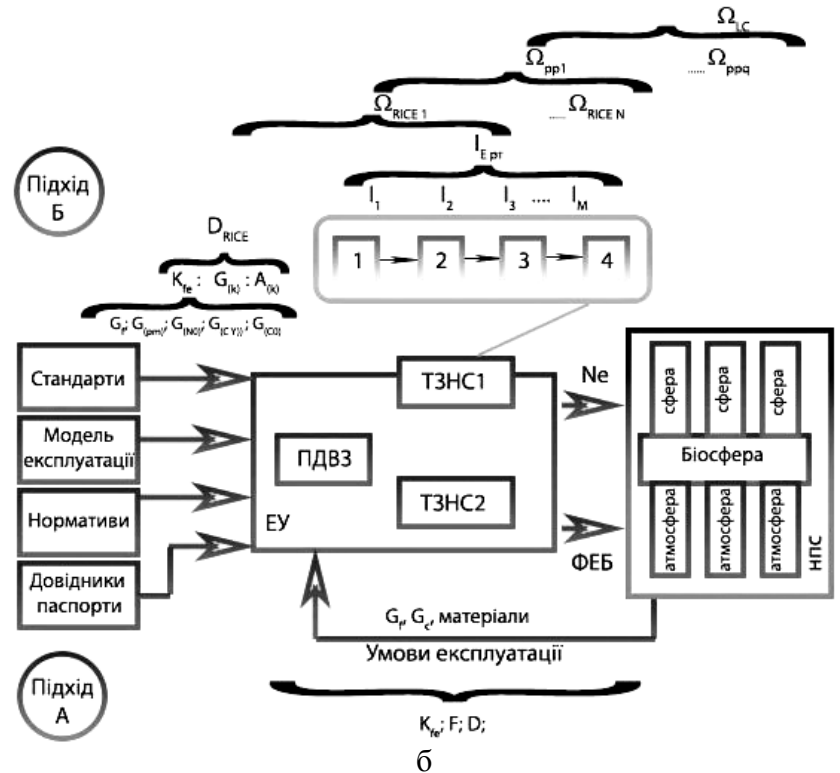
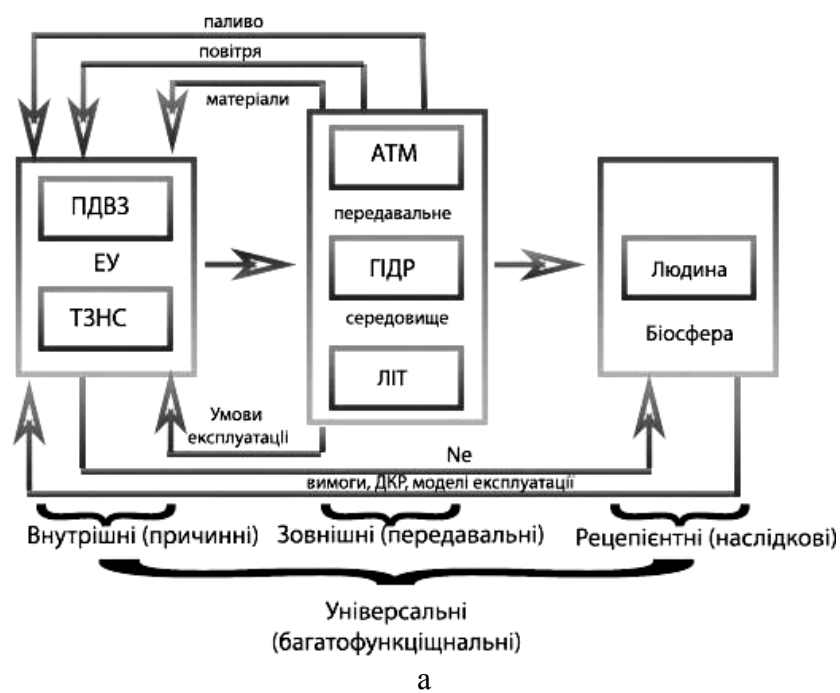
Рисунок 2 – Схема класифікації способів і засобів реалізації процесу регенерації фільтрів твердих частинок дизельних поршневіх ДВЗ

Другий розділ роботи містить результати системного аналізу відомих науково-методологічних досліджень щодо комплексного оцінювання впливу ЕУ з ПДВЗ при безаварійній експлуатації на стан атмосферного повітря. Відповідно до теми і мети дисертаційної роботи визначені основні особливості комплексного врахування факторів негативної дії на АП при роботі ПДВЗ за методологією критеріального оцінювання, яка розроблена професором НТУ «ХПІ» І.В. Парсадановим, за методологією еколого-хімічної оцінки, що запропонована професором ХНАДУ П.М. Каніло, за системою індексів оцінювання Air Quality Index of EPA та ERoEI Index, стандартизованою методикою, що міститься у Правилах ЄЕК ООН R-49. Описано алгоритми їх застосування, проаналізовано переваги і недоліки.

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». Зважаючи на необхідність при оцінці впливу ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем зносу враховувати вказані чинники, запропоновано інтегративний показ-

ник рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} . При його визначенні прийнято до уваги доцільність використання зважених оцінок параметрів дії факторів небезпеки при роботі ПДВЗ на стан атмосферного повітря у комплексному паливно-екологічному критерії K_{fe} . Встановлено за доцільне застосування критерію K_{fe} як складової інтегративного показника D_{RICE} і відповідним чином надавати порожимні та середньоексплуатаційні значення інтегративного показника.

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 факторів їх екологічно небезпечного техногенного впливу на атмосферне повітря за інтегративним принципом визначення (рис. 3).



Відповідно до необхідності врахування у запропонованому критерії впливу на АП двигунів із високим ступенем фізичного зносу показника викиду ТЧ з потоком відпрацьованих газів досліджено метрологічні аспекти застосування формули перерахунку показників димності (ступінь пропускання світлового потоку N_D , %) й токсичності ВГ (об'ємна концентрація незгорілих вуглеводнів $C(C_nH_m)$, ppm) у масовий годинний викид ТЧ ($G(PM)$, кг/год, де PM – це стандартне міжнародне позначення твердих частинок).

а – традиційний підхід до визначення критеріальної оцінки рівня екологічної безпеки експлуатації ЕУ з ПДВЗ;
 б – запропонований комплексний підхід з інтегративної оцінки впливу роботи ПДВЗ на атмосферне повітря на критеріальній основі

Рисунок 3 – Схема апарату критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з ПДВЗ із високим ступенем фізичного зносу

Також надано опис розподілу значень викиду ТЧ на основі математичного апарату сімейства кривих Пірсона. Це дозволило зменшити систематичну похибку при комплексному критеріальному оцінюванні рівня екологічної безпеки при роботі ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу до $\pm 16,8\%$.

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.

У **третьому розділі** роботи науково обґрунтовано новий підхід до оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ, що враховує особливості роботи ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу.

Розроблено індикатор екобезпеки роботи ПДВЗ і його ТЗНС Ω_{RICE} як інтегративний показник рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок. Величина індикатора Ω_{RICE} становить суму 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} . Значення інтегративного показника екологічної якості ТЗНС J_{EPT} залежить від величини індексу ефективності функціонування ТЗНС I_{EPT} .

Таким чином, оцінювання рівня екологічної безпеки ЕУ з ПДВЗ враховує особливості роботи ПДВЗ як джерела чинників негативного впливу на АП та ефективність нівелювання цієї негативної дії на АП системою забезпечення екологічної якості роботи ЕУ, що являє собою ТЗНС. Це дозволяє запропонувати узгоджену комплексну систему управління рівнем екологічної безпеки при експлуатації ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу і його ТЗНС відповідно до вимог чинного законодавства. Особливістю наданої комплексної оцінки впливу на АП при роботі ПДВЗ із високим рівнем фізичного зносу є врахування у структурі інтегративного показника рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} значення комплексного паливно-екологічного критерію K_{fe} , який поєднує в своїй структурі показники викиду повного набору законодавчо нормованих поллютантів у складі ВГ ПДВЗ та специфічний чинник екологічної безпеки споживання моторного палива:

$$\Omega_{RICE} = J_{RICE} + J_{EPT} = D_{RICE} + (1 - D_{RICE})^{I_{EPT}}, \quad (1)$$

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.

$$\begin{aligned} D_{RICE} &= \sum_{i=1}^n v(k_i) \sqrt{\prod_{i=1}^n d(k_i)^{v(k_i)}} = (v(k_1) + v(k_2) + \dots + v(k_n)) \sqrt{d_1(k_1)^{v(k_1)} \cdot d_1(k_2)^{v(k_2)} \cdot \dots \cdot d_1(k_n)^{v(k_n)}} = \\ &= v(K_{fe}) + \sum_{k=1}^h v(k_i) \sqrt{K_{fe}^{v(K_{fe})} \cdot \prod_{i=1}^h G(k_i)^{v(k_i)}}; k = \text{SO}_2; \text{CO}_2; \text{CO}_{2\text{GH}}; \text{H}_2\text{O}; \text{CG}; \text{RB}; \text{Q}, \quad (2) \end{aligned}$$

де D_{RICE} – інтегративний показник рівня екобезпеки процесу безаварійної експлуатації ПДВЗ в ЕУ; $d(k_i)$ – часткова функція бажаності, що відповідає k -му критерію

якості, $d(k_i) = [0 \dots 1,0]$; $v(k_i)$ – коефіцієнт вагомості k -го критерію якості, що розглядаються, $0 < v(k_i) \leq 1$; n – кількість критеріїв якості, що розглядаються; K_{fe} – комплексний паливно-екологічний критерій; $G(k_i)$ – масовий годинний викид k -го політанта, кг/год; $v(K_{fe})$ – коефіцієнт вагомості критерію K_{fe} ; $v(k_i)$ – коефіцієнт вагомості величини викиду $G(k_i)$; РМ – тверді частинки; NO_x – оксиди азоту; C_nH_m – незгорілі вуглеводні; CO – монооксид вуглецю; SO_2 – оксиди сірки; CO_2 – діоксид вуглецю як токсичний політнт; CO_{2HG} – діоксид вуглецю як парниковий газ; H_2O – водяна пара; CG – картерні гази; RB – пара моторного палива; Q – теплова енергія.

$$v(k_i) = 1/A(k_i), \quad v(K_{fe}) = 1/(A(\text{PM}) + A(\text{NO}_x) + A(\text{C}_n\text{H}_m) + A(\text{CO}) + A_{fuel}) = 1/238,7, \quad (3)$$

де $v(k_i)$ – коефіцієнт вагомості k -го критерію якості; $A(k_i)$ – безрозмірний індекс відносної агресивності k -го політанта; A_{fuel} – вагомість витрати моторного палива як чинника екологічної небезпеки; $A(\text{PM}) = 200$; $A(\text{NO}_x) = 41,1$; $A(\text{C}_n\text{H}_m) = 3,2$; $A(\text{CO}) = 1$; $A_{fuel} = 38,4$; $A(\text{SO}_x) = 22$; $A(\text{CO}_2) = 0,02$; $A(\text{CO}_{2HG}) = 0,0004$; $A(\text{H}_2\text{O}) = 0,002$; $A(\text{CG}) = 25,5$; $A(\text{RB}) = 38,4$; $A(Q) = 28,8$.

$$d(k_i) = \exp[-\exp(a(k_i) + b(k_i) \cdot r(k_i))], \quad (4)$$

$$a(k_i) = (\ln(-\ln(d(k_i)_{up})) \cdot r(k_i)_{dn} - \ln(-\ln(d(k_i)_{dn})) \cdot r(k_i)_{up}) / (r(k_i)_{dn} - r(k_i)_{up}), \quad (5)$$

$$b(k_i) = (\ln(-\ln(d(k_i)_{dn})) - \ln(-\ln(d(k_i)_{up}))) / (r(k_i)_{dn} - r(k_i)_{up}), \quad (6)$$

де $d(k_i)$ – часткова функція бажаності, що відповідає k -му критерію якості; $r(k_i)$ – дійсне значення k -го критерію якості на 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 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 $d(k_i)_{up} = 0,63 \dots 0,8$) і «погано» (тобто $d(k_i)_{dn} = 0,2 \dots 0,32$) з урахуванням особливостей величин $r(k_i)$.

$$I_{EPT} = \sum_{y=1}^m \left(\frac{1}{I_{EDy} \cdot WF_{EDy}} \right) = \sum_{y=1}^m \left(\left(I_{EDy} \cdot A(k_i) / \sum_{k=1}^{h+5} A(k_i) \right)^{-1} \right), \quad (7)$$

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; $A(k_i)$ – безрозмірний індекс відносної агресивності k -го політанта; $h = 5$ – кількість факторів екологічної небезпеки, які враховуються критерієм K_{fe} .

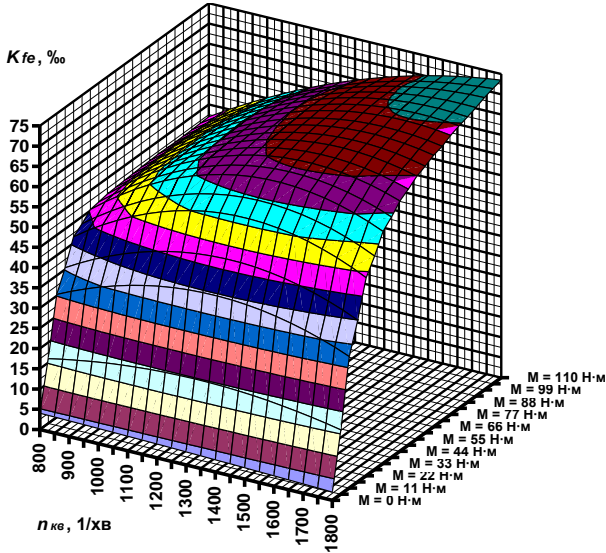
Перевагою наданого комплексного оцінювання техногенного впливу на АП при роботі фізично зношеного ПДВЗ є всебічне врахування вагомості всіх чинників, що відповідають за величину інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації двигуна в ЕУ D_{RICE} . Введено коефіцієнт A_{fuel} , що за фізичною суттю визначається як безрозмірний показник відносної агресивності k -го законодавчо нормованого політанта у потоці ВГ ПДВЗ $A(k)$. Введений коефіцієнт вагомості урівнює вирази для частинних похідних критерію K_{fe} за величиною масової годинної витрати палива ПДВЗ $\partial K_{fe} / \partial G_{fuel}$ та за величиною масового годинного викиду законодавчо нормованого політанта з потоком ВГ ПДВЗ $\partial K_{fe} / \partial G(k)$. Встановлено, що у першому наближенні раціональним є використання значень цієї величини, усереднених за всіма робочими режимами ПДВЗ:

$$A_{fuel} = (G_{fuel} + 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma(A(k) \cdot G(k)))^2 - 2 \cdot (\sigma \cdot f \cdot \Sigma(A(k) \cdot G(k)))^2 / (\sigma \cdot f \cdot G_{fuel}^2), \quad (8)$$

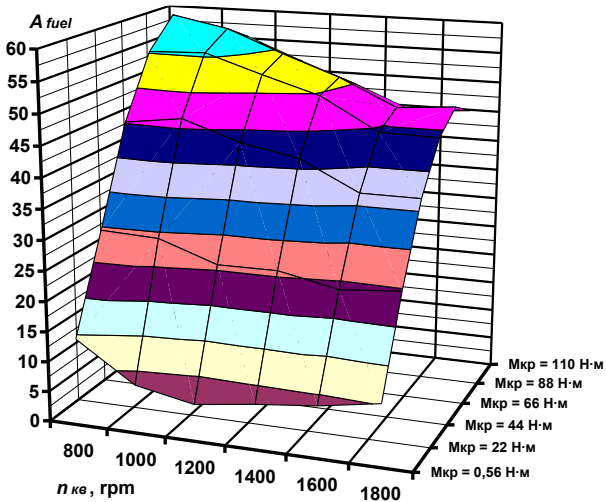
де A_{fuel} – вагомість витрат моторного палива як чинника екологічної небезпеки; G_{fuel} – масова годинна витрата моторного палива, кг/год; σ – безрозмірний показник відносної небезпеки забруднення для різних територій; f – безрозмірний коефіцієнт, що враховує характер розсіювання ВГ у атмосфері; $\Sigma(A(k) \cdot G(k))$ – сумарний приведений масовий годинний викид повного набору законодавчо нормованих політантів у складі потоку ВГ, кг/год; H_u – теплотворна здатність палива, МДж/кг.

Розподіл значень критерію K_{fe} з базовим набором чинників впливу за полем робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 наведено на рисунку 4 а, розподіл значень вагомості витрати палива та картерних газів – на рисунку 4 б і 4 в.

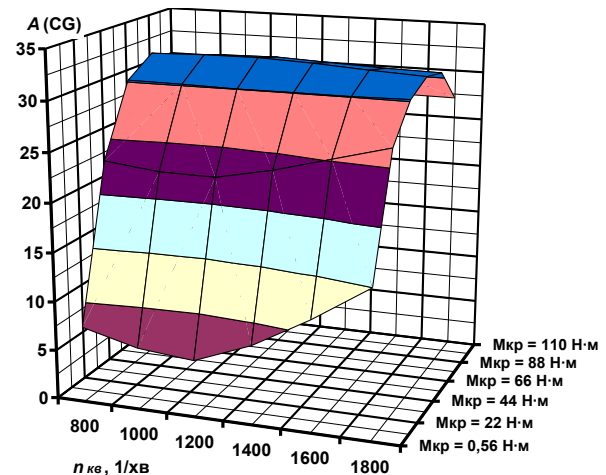
Запропоновано розширити номенклатуру чинників екологічної небезпеки, що визначатимуть величини критерію K_{fe} і запропонованого інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} , а саме масовий годинний викид з потоком ВГ оксидів сірки $G(SO_2)$ (рис. 5 а), діоксиду вуглецю як політанту $G(CO_2)$ і як парникового газу $G(CO_2)_{GH}$ (рис. 5 б), бензо(а)пірену (В(а)Р) $G(B(a)P)$ (рис. 5 в) та поліциклічних ароматичних вуглеводнів $G(ПАН)$ (рис. 5 г), парів води $G(H_2O)$ (рис. 5 з), викид аерозолу картерних газів $G(CG)$ (рис. 5 д), парів моторного палива, спричинених явищами великого $G(IB)$ (рис. 5 е) та малого $G(SB)$ дихання резервуарів (рис. 5 ж) й викид теплової енергії $G(Q)$ (див. рис. 5 і). Структура вагомості чинників екологічної небезпеки базового і вдосконаленого варіантів критерію K_{fe} та інтегративного показника D_{RICE} показані на рисунку 6.



а



б



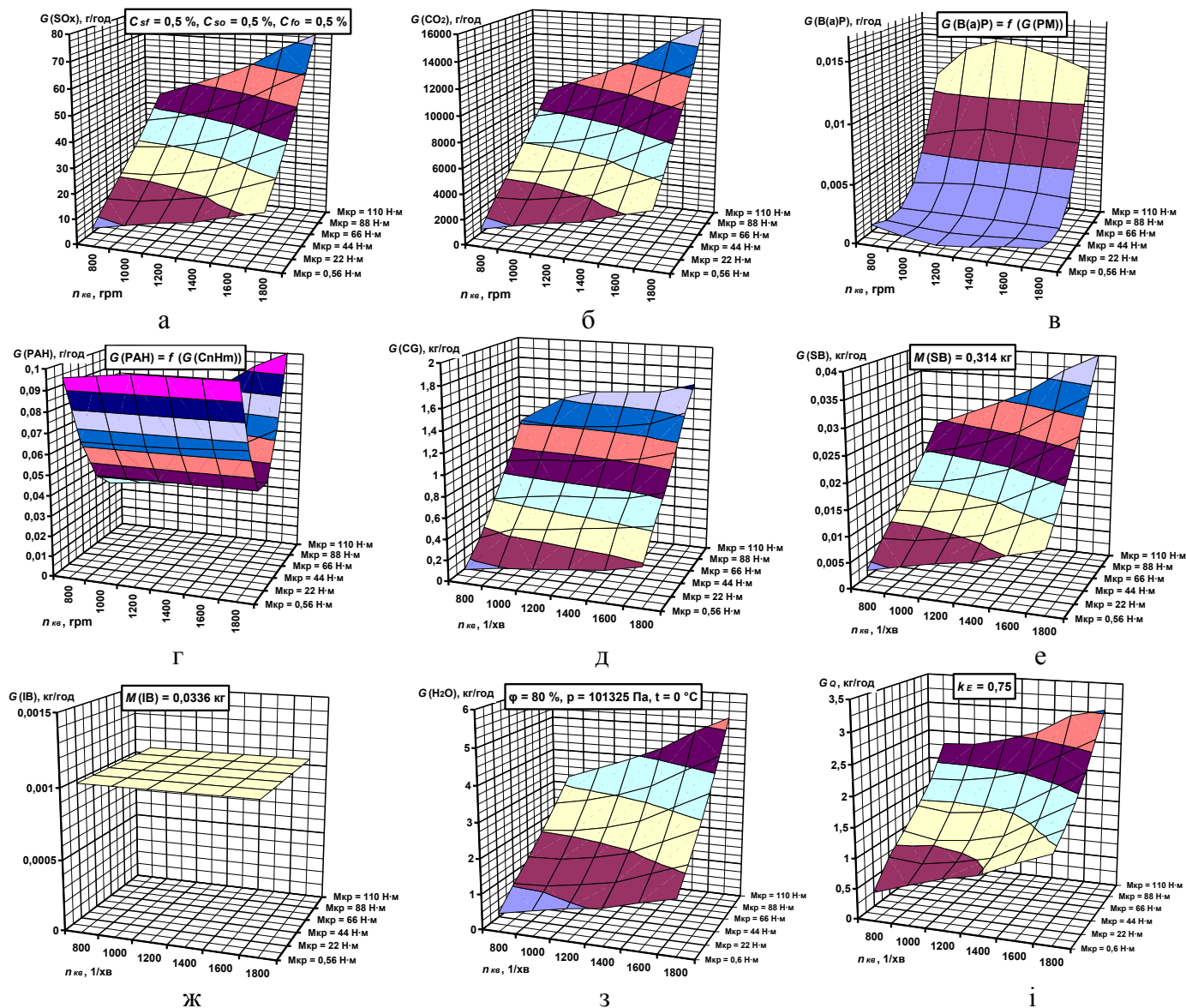
в

а – розподіл значень критерію K_{fe} ;

б – розподіл значень величини A_{fuel} ;

в – розподіл значень вагомості картерних газів

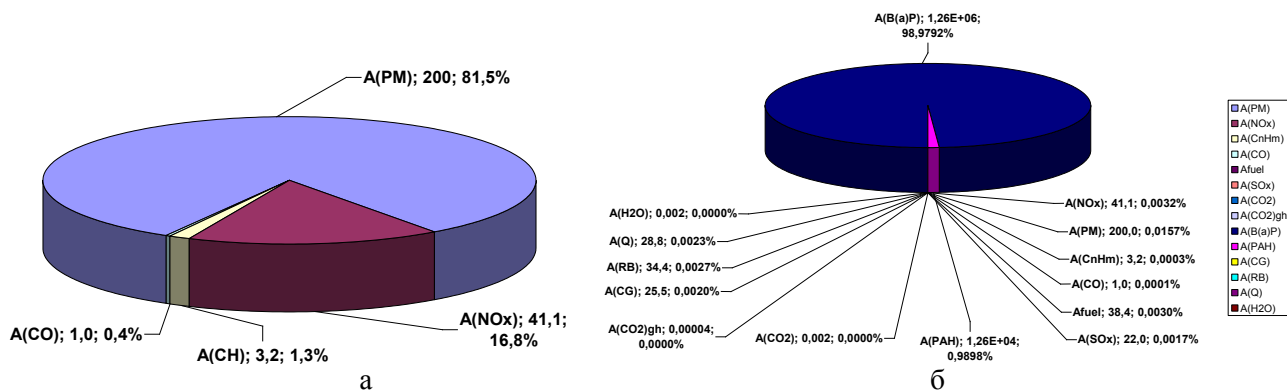
Рисунок 4 – Розподіл значень критерію K_{fe} та вагомостей чинників екологічної небезпеки по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12



а – викид оксидів сірки $G(SO_2)$; б – викид діоксиду вуглецю як поллютанту $G(CO_2)$ і парникового газу $G(CO_2)_{GH}$; в – викид бензо(а)пірену $G(B(a)P)$; г – викид поліциклічних ароматичних вуглеводнів $G(PAH)$; д – аерозолі картерних газів $G(CG)$; е – парів моторного палива, спричинених явищем малого дихання резервуарів $G(SB)$; ж – парів моторного палива, спричинених явищем великого дихання резервуарів $G(IB)$; з – викид парів води $G(H_2O)$; і – викид теплової енергії $G(Q)$

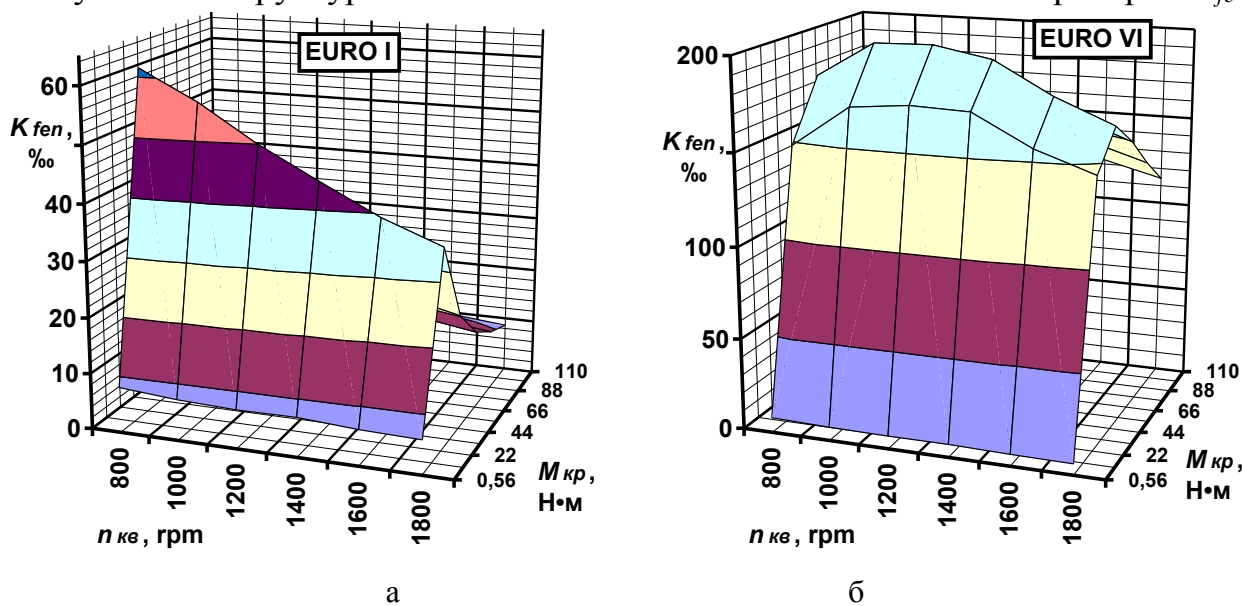
Рисунок 5 – Розподіл значень масових годинних викидів введених у структуру критерію K_{fe} поллютантів по всьому полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12

Виконано аналіз особливостей структури врахованих чинників екологічної небезпеки при критеріальному оцінюванні рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ за інтегративним показником екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} з урахуванням значень критерію K_{fe} . Запропоновано визначення еталонних значень критерію K_{fe} як реперних точок психофізичної шкали, що відповідає частковій функції бажаності $d(K_{fe})$. Розподіл еталонних значень критерію K_{fe} за робочими режимами дизеля 2Ч10,5/12 для крайніх рівнів екологічних нормативів EURO I та VI проілюстрований на рисунку 7.



а – базовий варіант критерію K_{fe} ; б – вдосконалений варіант K_{fe}

Рисунок 6 – Структура вагомості чинників екологічної безпеки критерію K_{fe}



а – рівень EURO I; б – рівень EURO VI

Рисунок 7 – Розподіл еталонних значень критерію K_{fe} за робочими режимами дизеля 2C10,5/12

Розроблено два підходи до отримання параметрів часткової функції бажаності критерію K_{fe} для його середньоексплуатаційних і порежимних значень (рис. 8 а):

$$d(K_{fe}) = \exp[-\exp(0,666 - 4,425 \cdot 10^{-3} \cdot K_{fe})], \quad (9)$$

$$d(K_{fe}) = \exp[-\exp(a(K_{fe})(g_e) + b(K_{fe})(g_e) \cdot K_{fe})], \quad (10)$$

$$a(K_{fe})(g_e) = 2,075 \cdot 10^{-3} \cdot g_e + 0,181, \quad (11)$$

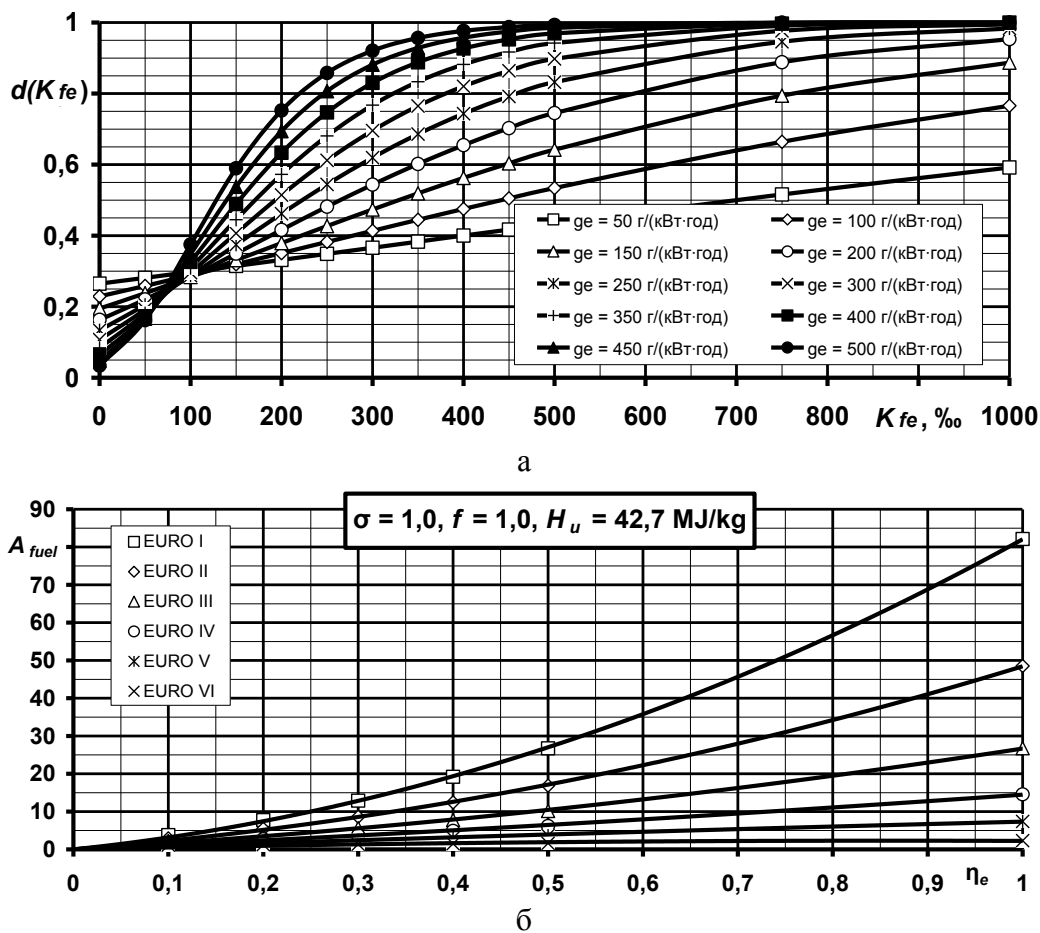
$$b(K_{fe})(g_e) = -2,462 \cdot 10^{-8} \cdot g_e^2 - 1,190 \cdot 10^{-5} \cdot g_e - 2,735 \cdot 10^{-4}, \quad (12)$$

де $d(K_{fe})$ – часткова функція бажаності критерію K_{fe} ; $a(K_{fe})$ і $b(K_{fe})$ – коефіцієнти, що визначаються на основі встановлення відповідності між парою характерних значень $d(K_{fe})$ та $r(K_{fe}) = K_{fe}$ згідно до психофізичної шкали; g_e – питома ефективна масова годинна витрата моторного палива, кг/(кВт·год).

Здійснено розрахункове оцінювання еталонних значень коефіцієнта вагомості A_{fuel} паливної складової критерію K_{fe} у залежності від величин рівня екологічних нормативів EURO, ефективного ККД двигуна η_e та нижчої теплотворної здатності моторного палива H_u за запропонованою методикою (рис. 8 б).

$$A_{fuel} = \left((G_{fuel}(\eta_e) + 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma(A(k) \cdot G(k))(\text{EURO}))^2 - 2 \cdot \sigma \cdot f \cdot \Sigma(A(k) \cdot G(k))(\text{EURO})^2 \right) / (\sigma \cdot f \cdot G_{fuel}(\eta_e)^2), \quad (13)$$

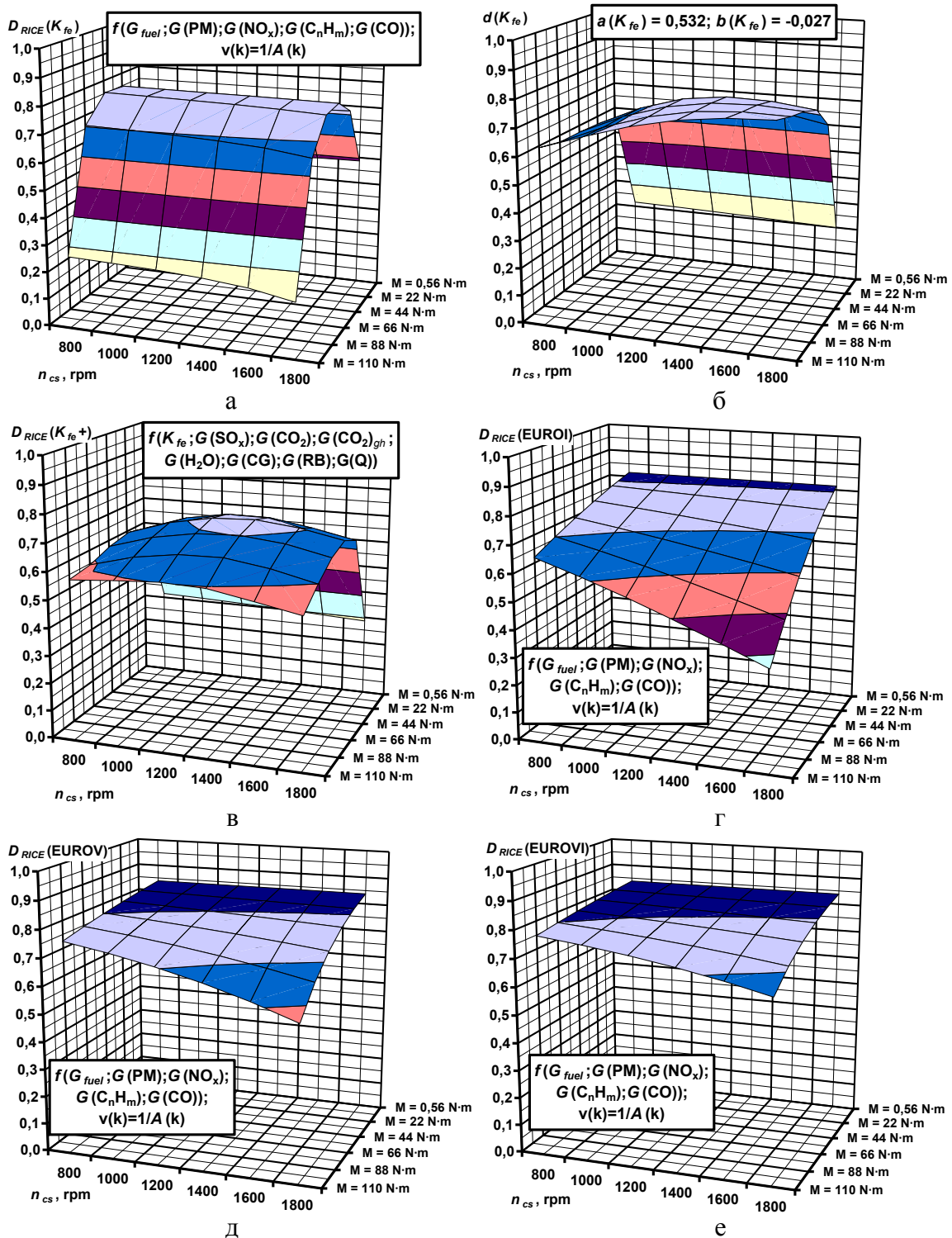
де G_{fuel} – масова годинна витрата моторного палива, кг/год; η_e – ефективний ККД двигуна; σ – безрозмірний показник відносної небезпеки забруднення для різних територій; f – безрозмірний коефіцієнт, що враховує характер розсіювання ВГ у атмосфері; $\Sigma(A(k) \cdot G(k))$ – сумарний приведений масовий годинний викид повного набору законодавчо нормованих політантив у складі потоку ВГ, кг/год; EURO – рівень законодавчо встановлених екологічних вимог за Правилами ЄЕК ООН; H_u – теплотворна здатність моторного палива, МДж/кг.



а – залежності значень часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ від порежимних значень критерію K_{fe} та величини g_e ; б – залежності значень величини A_{fuel} від значень величини η_e за фіксованого значення рівня норм EURO

Рисунок 8 – Графіки для визначення значень часткової функції бажаності $d(K_{fe})$ та значення величини коефіцієнта вагомості A_{fuel}

Отримано розподіли значень розробленого інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} , який також є критерієм ефективності функціонування СУЕБ процесу безаварійної експлуатації ЕУ з ПДВЗ, на основі результатів обробки даних стендових випробувань дизеля 2Ч10,5/12 для різних варіантів структури врахованих ним факторів екологічної небезпеки (рис. 9).



а – інтегративний показник D_{RICE} зі структурою впливаючих чинників, аналогічній структурі критерію K_{fe} ; б – інтегративний показник D_{RICE} з критерієм K_{fe} у якості самостійного і єдиного врахованого чинника; в – інтегративний показник D_{RICE} з критерієм K_{fe} у якості самостійного чинника та усіма іншими чинниками, котрі додатково введено до його структури для поршневого ДВЗ без ТЗНС; г – інтегративний показник D_{RICE} зі структурою впливаючих чинників, аналогічній структурі критерію K_{fe} для нормативів рівня EURO I; д – варіант «а» для нормативів рівня EURO V; е – варіант «а» для нормативів рівня EURO VI

Рисунок 9 – Розподіл значень розробленого інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в енергоустановці D_{RICE} та для різних рівнів стандартів екобезпеки EURO по полю робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 для різних варіантів структури врахованих ним чинників екологічної небезпеки

Таким чином, у розділі 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.

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.

Четвертий розділ роботи містить результати розробки науково-методологічних основ побудови СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ на етапі їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація» з врахуванням особливостей їх технічного стану.

Описано передумови розробки СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ на основі аналізу тенденцій щодо підвищення рівня екологічної безпеки відповідно до матеріалів Всесвітніх конгресів Товариства інженерів автомобільної промисловості (Society of Automotive Engineers (SAE)), за період з 1991 по 2019 рр.

Розроблена СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ на етапі його життєвого циклу «безаварійна експлуатація» являє собою послідовність чотирьох етапів, кожен з яких складається з двох рівнів. На першому етапі (етап 1) здійснюється оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ до розробки (етап 2) і впровадження (етап 3) елементів ТЗНС, а на останньому (етап 4) – оцінювання ефективності роботи ТЗНС, а значить і самої СУЕБ. Ця інформація передається по гілці зворотного зв'язку, що і формує управляючий імпульс у системі (рис. 11).

Описано склад і сутність усіх чотирьох послідовних етапів СУЕБ та їх рівнів, виконано формалізацію вирішення проблеми практичної реалізації СУЕБ шляхом описання функцій її складових вербально-логічними формулами:

$$F_j^i = (A, B, C) = F(\text{система забезпечення рівня ЕБ}) = [\text{показники рівня ЕБ (A) технологічного процесу вилучення і оброблення відходів й поллютантів, джерелом яких є ПДВЗ (B), за раціональними організаційно-технічними параметрами із застосуванням нових або вдосконалених технологій забезпечення рівня ЕБ (C)}], \quad (14)$$

де 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.

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 (табл. 2).

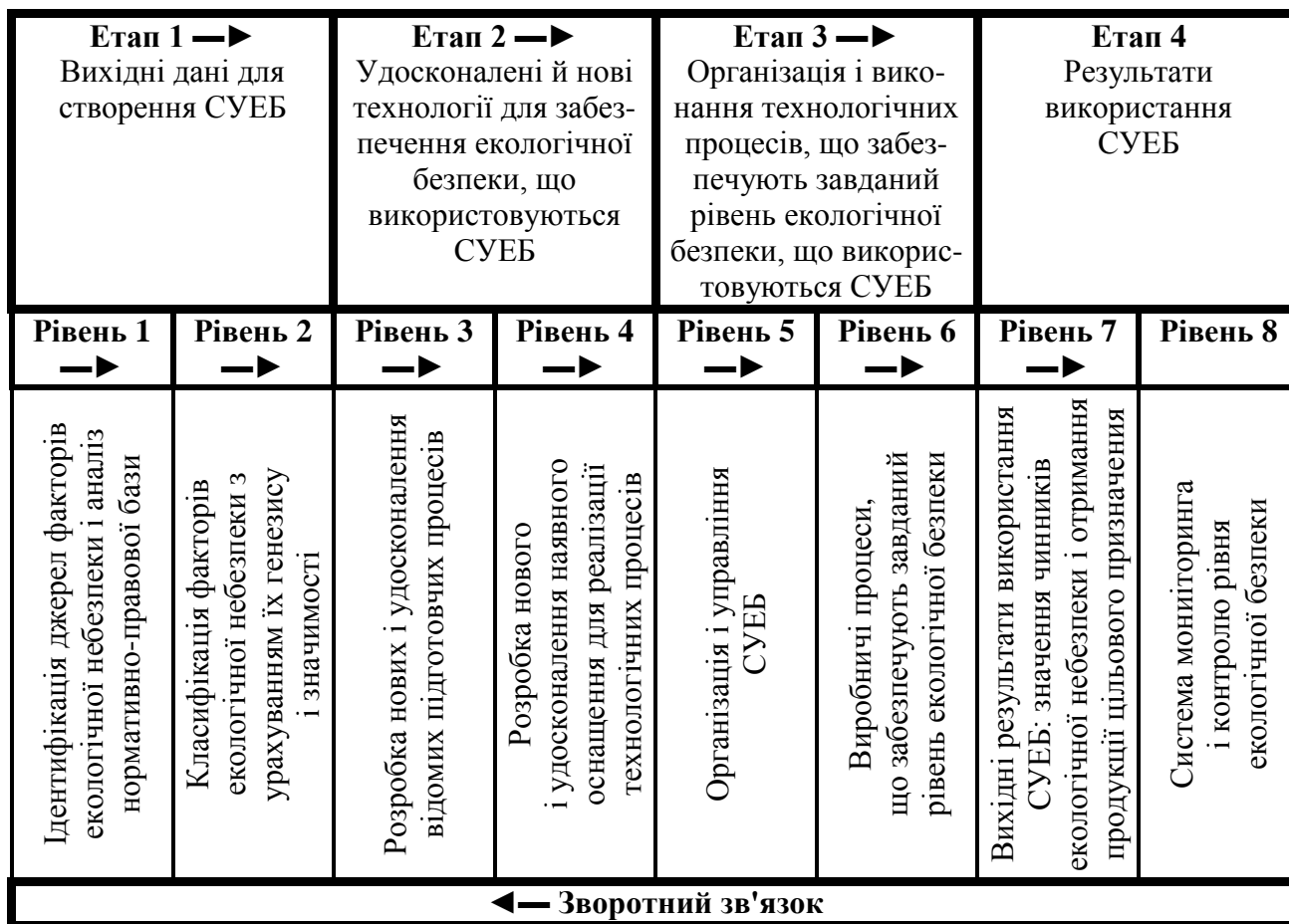


Рисунок 11 – Схема розробленої системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу

Таблиця 2 – Кроки алгоритму реалізації етапу 4 системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу

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 екобезпеки.
Б	« Дія СУЕБ на об'єкт ». Розробка виду або послідовності заходів щодо забезпечення екологічної безпеки 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'єкта 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.
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 органів, що забезпечують необхідний рівень екологічної безпеки. Перехід до кроку А.

Визначено значення і місце критеріального математичного апарату інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} в означеній системі управління екологічною безпекою (рис. 12).

Таким чином, 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.

Доведено ефективність функціонування СУЕБ процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ на основі результатів моніторингу показників екологічної безпеки атмосферного повітря і контролю ефективності функціонування самої СУЕБ.

У **п'ятому розділі** дисертації надано результати дослідження ефективності функціонування запропонованої ТЗНС щодо захисту атмосферного повітря з метою підвищення рівня екологічної безпеки енергоустановок з поршнеvim ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу.

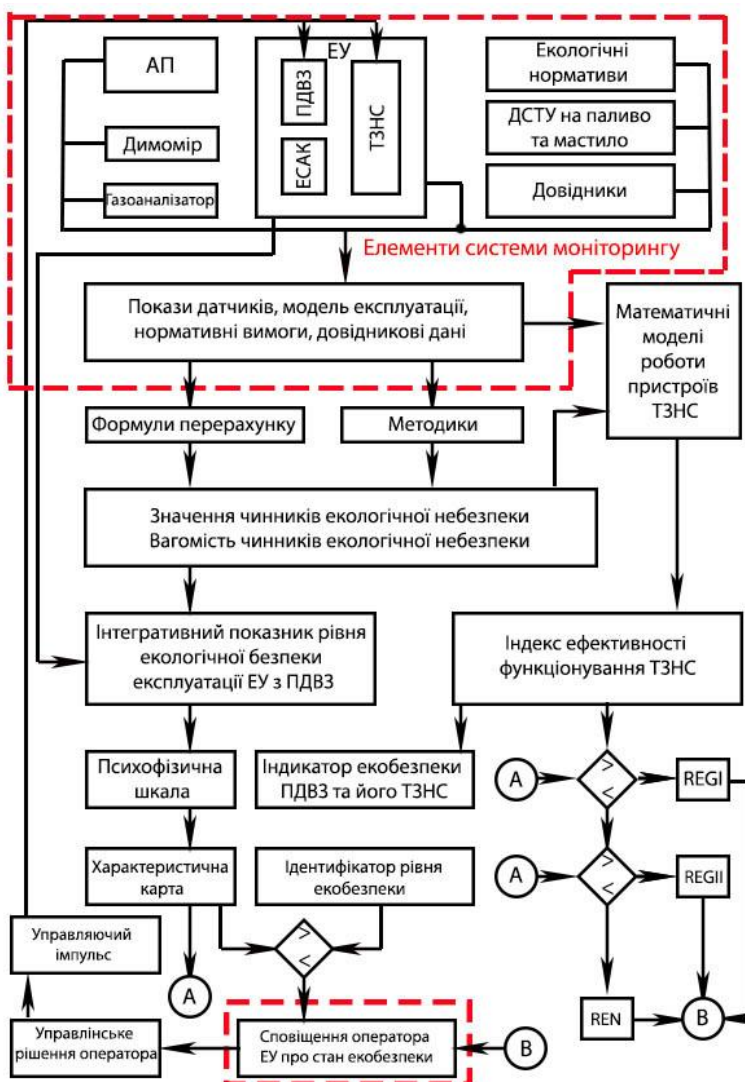
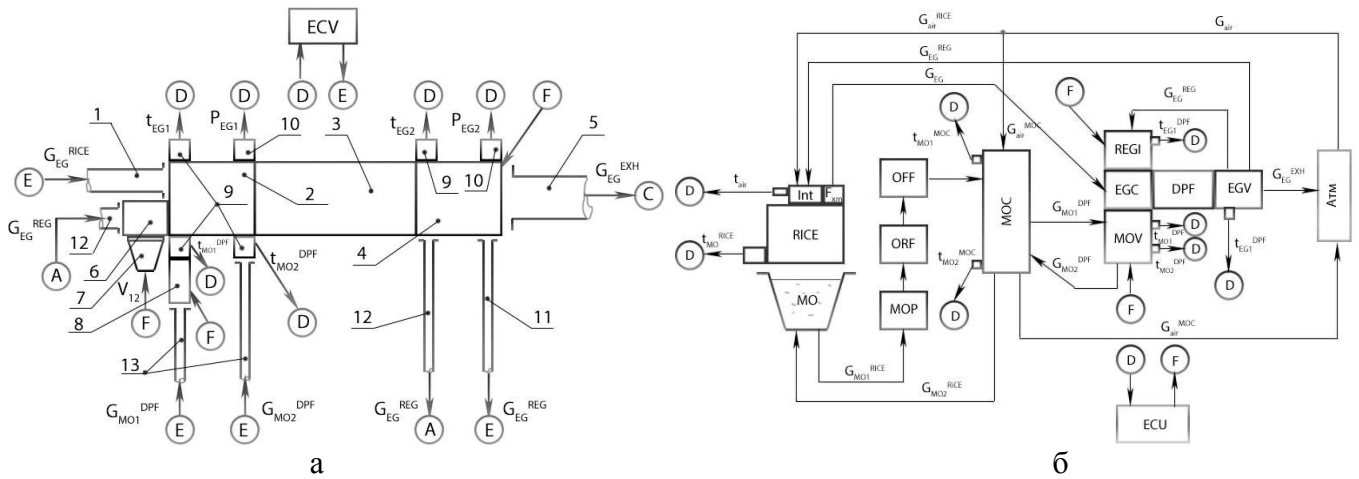


Рисунок 12 – Алгоритм оцінки ефективності функціонування системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу та моніторингу її роботи

Розв'язано задачу удосконалення системи уловлювання твердих частинок у відпрацьованих газах ПДВЗ з високим рівнем фізичного зносу, оскільки середньоексплуатаційне значення їх масового годинного ефективного питомого викиду в потоці ВГ таких ЕУ значно підвищена, а саме до $1,0 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$, на відміну від вимог Правил ЄЕК ООН № 49 рівня EURO I має бути не більшою за $0,6 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$, а рівнів EURO V і VI – $0,02$ і $0,01 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ відповідно.

Розроблено методичні основи побудови ТЗНС у складі ЕУ при збільшеному техногенному впливі на атмосферне повітря у разі тривалого перебування в експлуатації ПДВЗ з урахуванням необхідності вдосконалення ФТЧ у зв'язку зі збільшенням вмісту дисперсної фази аерозолі відпрацьованих газів ПДВЗ із високим ступенем фізичного зносу.

Надано опис запропонованої конструкції ФТЧ та принципів його роботи як складової ТЗНС, що потребує періодично здійснення процесу регенерації I і II роду (рис. 13).



а – вдосконалений устрій ФТЧ:

А – потік ВГ у систему регенерації I роду ФТЧ; В – потік ВГ у систему рециркуляції ПДВЗ; С – потік ВГ у випускную систему ПДВЗ; D – сигнал показів датчиків ЕСАК; Е – 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

б – вдосконалений принцип роботи ФТЧ:

ECU – ЕБК ЕСАК; D – сигнал показів датчиків ЕСАК; F – керуючий імпульс від ЕБК ЕСАК; RICE – ПДВЗ; МО – 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 13 – Вдосконалений фільтр твердих частинок дизельного ПДВЗ

Викладено результати розробки математичних моделей гідравлічного опору (ГО) розробленого ФТЧ. Проаналізовано можливості ефективної роботи фільтру при різних значеннях опору та впливу ГО на паливну економічність ПДВЗ за даними стендових моторних випробувань.

Визначена математична модель ГО ФТЧ для стаціонарного режиму роботи ПДВЗ має такий вид:

$$\Delta P_{DPF} = \Delta P_{PhM} (g_{EG} (n_{cs}; M_{kp})) \cdot k_0 \cdot k_t (t_{DPF}) \cdot k_L (L_{DPF}) \cdot k_\tau (\tau_{IRP}; N_e; WF), \quad (15)$$

де ΔP_{DPF} – гідравлічний опір ФТЧ у реальних умовах експлуатації, Па; ΔP_{PhM} – ГО зразка ФТЧ при фізичному моделюванні, Па; g_{EG} – питома витрата текучого середовища крізь вхідний отвір модуля фільтрувального елемента ФТЧ, кг/(с·м²); n_{cs} – частота обертання колінчастого валу, хв⁻¹; M_{kp} – крутний момент, Н·м; k_0 , k_t , k_L , k_τ – настроювальний, температурний, компоновочний і часовий коефіцієнти відповідно; τ_{IRP} – тривалість міжрегенеративного періоду, год; L_{DPF} – відстань від фланця випускного колектора до фланця корпусу ФТЧ вздовж випускного тракту, м; t_{DPF} – температура ВГ на вході у ФТЧ, °С; N_e – ефективна потужність двигуна, кВт; WF – ваговий фактор стаціонарного режиму роботи у моделі експлуатації ПДВЗ.

При кількості модулів у фільтрувальному елементі $z_m = 1$ шт. і площі вхідного отвору модуля фільтрувального елемента $S_m = 55$ мм², температурі текучого середо-

вища $t_0 = 15$ °С; барометричного тиску $B_0 = 95$ кПа та $g_{EG} = 10\text{--}110$ кг/(с·м²) величина опору становить

$$\Delta P_{PhM} = 0,122 \cdot g_{EG}^3 - 1,964 \cdot g_{EG}^2 + 173,7 \cdot g_{EG}, \quad (16)$$

$$g_{EG} = G_{EG} / (\Sigma S_{DPF} \cdot 3600) = (G_{fuel} + G_{air}) / (z_m \cdot S_m \cdot 3600), \quad (17)$$

де ΔP_{PhM} – ГО зразка ФТЧ при фізичному моделюванні, Па; g_{EG} – питома витрата текучого середовища крізь вхідний отвір модуля фільтрувального елемента ФТЧ, кг/(с·м²); G_{EG} – масовий годинний викид ВГ двигуном, кг/год; ΣS_{DPF} – сумарна площа вхідних отворів модулів фільтрувального елемента ФТЧ, м²; G_{fuel} – масова годинна витрата моторного палива двигуном, кг/год; G_{air} – масова годинна витрата повітря двигуном, кг/год; z_m – кількість модулів у фільтрувальному елементі ФТЧ, шт.; S_m – площа вхідного отвору модуля фільтрувального елемента ФТЧ, м².

Показано можливості використання наданої вище моделі гідравлічного опору фільтра твердих частинок для всіх робочих режимів ПДВЗ, для характеристики будь-якого відрізка міжрегенеративного періоду τ_{IRP} і для всіх варіантів компонування випускної системи ПДВЗ L_{DPF} , а саме

$$\Delta P_{DPF}(g_{EG}(n_{cs}; M_{kp})) = a_{pg} \cdot n_{cs}^2 + b_{pg} \cdot n_{cs} + c_{pg} \cdot n_{cs} \cdot M_{kp} + d_{pg} \cdot M_{kp} + e_{pg} \cdot M_{kp}^2 + g_{pg}, \quad (18)$$

$$\Delta P_{DPF}(L_{DPF}; \tau_{IRP}) = a_{pl} \cdot L_{DPF}^2 + b_{pl} \cdot L_{DPF} + c_{pl} \cdot L_{DPF} \cdot \tau_{IRP} + d_{pl} \cdot \tau_{IRP} + e_{pl} \cdot \tau_{IRP}^2 + g_{pl}, \quad (19)$$

де $a_{pg}, b_{pg}, c_{pg}, d_{pg}, e_{pg}, g_{pg}, a_{pl}, b_{pl}, c_{pl}, d_{pl}, e_{pl}, g_{pl}$ – постійні коефіцієнти моделі.

Для коефіцієнтів моделі ГО ФТЧ для стаціонарного режиму роботи ПДВЗ надано фізичний зміст та значення: k_0 – настроювальний коефіцієнт – враховує різницю умов, у яких перебуває текуче середовище при фізичному моделюванні та при експериментальних дослідженнях на моторному стенді; k_t – температурний коефіцієнт – враховує зміни температури ВГ на вході у корпус ФТЧ за режимами роботи ПДВЗ; k_L – компоновочний коефіцієнт – враховує вплив місця розміщення ФТЧ вздовж випускного тракту дизеля на температуру ВГ на вході у фільтр; k_τ – часовий коефіцієнт – враховує залежність гідравлічного опору ФТЧ від часу роботи дизельного ПДВЗ на стаціонарному режимі.

Для оцінки ефективності роботи запропонованого ФТЧ у реальних умовах експлуатації використано величину коефіцієнта ефективності очищення ВГ від ТЧ:

$$K_{CE}(G(PM)) = 100 \cdot (G(PM)_{RICE} - G(PM)_{DPF}) / G(PM)_{RICE} = K_{CE}(G(PM))(g_{EG}(n_{cs}; M_{kp})) \cdot k_L(L_{DPF}) \cdot k_\tau(\tau_{IRP}; N_e; WF), \quad (20)$$

де $K_{CE}(G(PM))$ – коефіцієнт ефективності очищення потоку ВГ від ТЧ фільтром, %; $G(PM)_{RICE}$ – масовий годинний викид ТЧ двигуном без ФТЧ, г/год; $G(PM)_{DPF}$ – масовий годинний викид ТЧ двигуном з ФТЧ, г/год; k_L, k_τ – компоновочний і часовий коефіцієнти відповідно.

Для оцінки ефективності роботи ФТЧ в умовах зміни тривалості міжрегенеративного періоду τ_{IRP} і варіантів компонування випускної системи ПДВЗ L_{DPF} конкретизовано вираз для визначення коефіцієнту ефективності очищення відпрацьованих газів від твердих частинок:

$$K_{CE}(G(PM))(g_{EG}(n_{cs}; M_{kp})) = a_{kg} \cdot n_{cs}^2 + b_{kg} \cdot n_{cs} + c_{kg} \cdot n_{cs} \cdot M_{kp} + d_{kg} \cdot M_{kp} + e_{kg} \cdot M_{kp}^2 + g_{kg}, \quad (21)$$

$$K_{CE}(G(PM))(L_{DPF}; \tau_{IRP}) = a_{kl} \cdot L_{DPF}^2 + b_{kl} \cdot L_{DPF} + c_{kl} \cdot L_{DPF} \cdot \tau_{IRP} + d_{kl} \cdot \tau_{IRP} + e_{kl} \cdot \tau_{IRP}^2 + g_{kl}, \quad (22)$$

де $a_{kg}, b_{kg}, c_{kg}, d_{kg}, e_{kg}, g_{kg}, a_{kl}, b_{kl}, c_{kl}, d_{kl}, e_{kl}, g_{kl}$ – постійні коефіцієнти моделі.

Для визначення впливу гідравлічного опору ФТЧ на паливну економічність ПДВЗ запропоновано функцію такого виду:

$$\delta G_{fuel}^* = 100 \cdot \Delta G_{fuel}^* / G_{fuel} = \partial G_{fuel} / \partial \Delta P_{DPF} \cdot \Delta P_{DPF} (n_{cs}; M_{kp}; L_{DPF}; \tau_{IRP}), \quad (23)$$

$$G_{fuel} = M_{kp} \cdot n_{cs} \cdot 3600 / (9550 \cdot H_u \cdot \eta_e), \quad (24)$$

$$\partial G_{fuel} / \partial \Delta P_{DPF} = z \cdot V_h \cdot n_{cs} \cdot 3600 / (\tau \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot H_u \cdot \eta_e / \eta_m), \quad (25)$$

де δG_{fuel}^* – відносне значення ефекту впливу, %; ΔG_{fuel}^* – абсолютне значення ефекту впливу, кг/год; G_{fuel} – масова годинна витрата моторного палива, кг/год; ΔP_{DPF} – гідравлічний опір ФТЧ, Па; H_u – теплотворна здатність палива, МДж/кг; η_e – ефективний ККД двигуна; $\partial G_{fuel} / \partial \Delta P_{DPF}$ – частинна похідна, кг/(год·Па); z – кількість циліндрів двигуна, шт.; V_h – робочий об'єм циліндра двигуна, м³; τ – тактність двигуна, тактів/цикл; η_m – механічний ККД двигуна.

Вихідними даними для визначення впливу ГО ФТЧ на паливну економічність ПДВЗ є результати застосування математичної моделі ГО ФТЧ (див. формулу (15)).

Результати застосування запропонованих вище функцій характеристики роботи ФТЧ у складі ТЗНС використано у якості вихідних даних для здійснення критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки при роботі ЕУ з ПДВЗ із високим рівнем фізичного зносу на основі даних стендових моторних випробувань (рис. 14).

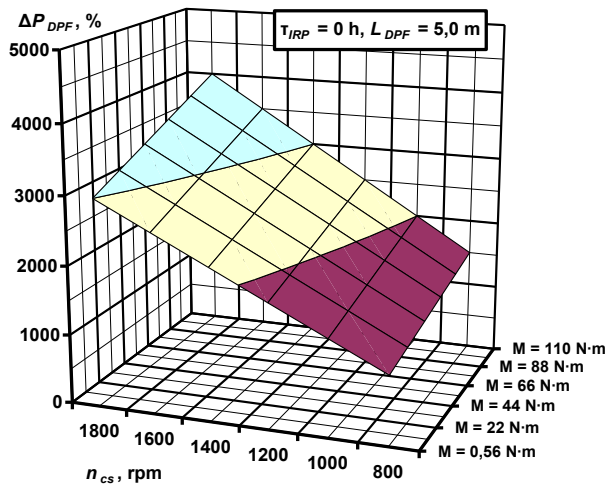
В якості єдиної цільової функції характеристики екологічної ефективності роботи ФТЧ запропоновано застосувати індекс ефективності функціонування I_{DPF} :

$$I_{DPF} = A(PM) \cdot G(PM)(n_{cs}; M_{kp}; N_D; C(C_n H_m); G_{fuel}; G_{air}) / (A_{fuel}(\partial K_{fe} / \partial G_{fuel}; (\partial K_{fe} / \partial G(k)) \cdot G_{fuel}(n_{cs}; M_{kp})) \cdot K_{CE}(G(PM))(n_{cs}; M_{kp}; L_{DPF}; \tau_{IRP}) / \delta G_{fuel}^*(G_{fuel}; H_u; \Delta P_{DPF}(n_{cs}; M_{kp}; L_{DPF}; \tau_{IRP})), \quad (26)$$

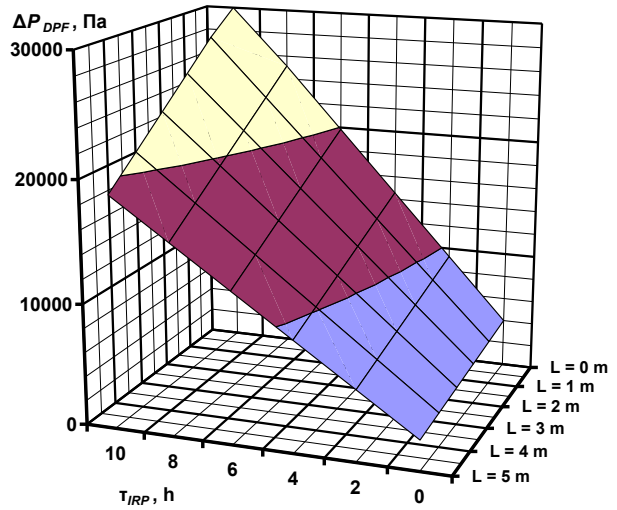
де I_{DPF} – індекс ефективності функціонування ФТЧ; $A(PM) = 200$ – вагомість ТЧ як полютанта; $G(PM)$ – масовий годинний викид ТЧ у потоці ВГ, кг/год; N_D – показник димності ВГ, %; $C(C_n H_m)$ – концентрація незгорілих вуглеводнів у ВГ, %; G_{fuel} – масова годинна витрата моторного палива, кг/год; G_{air} – масова годинна витрата повітря, кг/год; A_{fuel} – вагомість витрати моторного палива як чинника екологічної небезпеки; K_{fe} – комплексний паливно-екологічний критерій, %; $G(k)$ – масовий годинний викид k-го полютанту у ВГ, кг/год; $K_{CE}(G(PM))$ – коефіцієнт ефективності роботи ФТЧ, %; δG_{fuel}^* – ефект впливу ГО ФТЧ на паливну економічність ПДВЗ, %; ΔP_{DPF} – гідравлічний опір ФТЧ, Па.

Результати практичного використання індексу I_{DPF} для оцінки екологічної якості роботи ФТЧ для всього поля робочих режимів дизеля 2Ч10,5/12 (значення $L_{DPF} = 5,0$ м, тривалість міжрегенераційного періоду ФТЧ $\tau_{IRP} = 0$ год) та для характеристики будь-якого відрізка міжрегенераційного періоду τ_{IRP} і для всіх варіантів компонування випускної системи ПДВЗ L_{DPF} надано на рисунку 15.

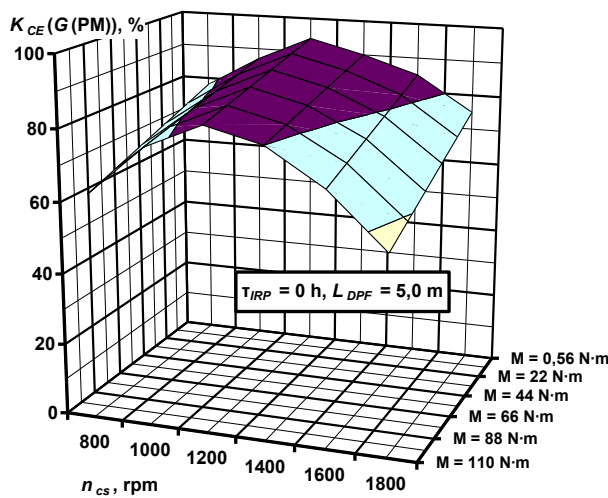
Здійснено критеріальне оцінювання ефективності застосування ФТЧ як виконавчого пристрою ТЗНС для дизельного ПДВЗ впродовж міжрегенераційного періоду з урахуванням його ГО за допомогою індексу I_{DPF} та інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} для пожежної та аварійно-рятувальної техніки ДСНС України.



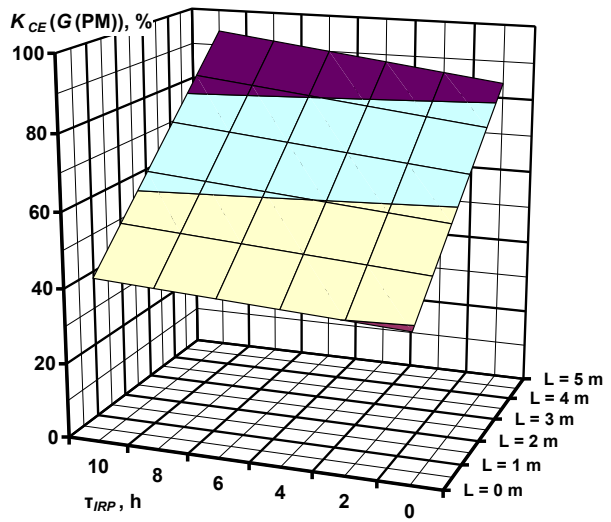
а



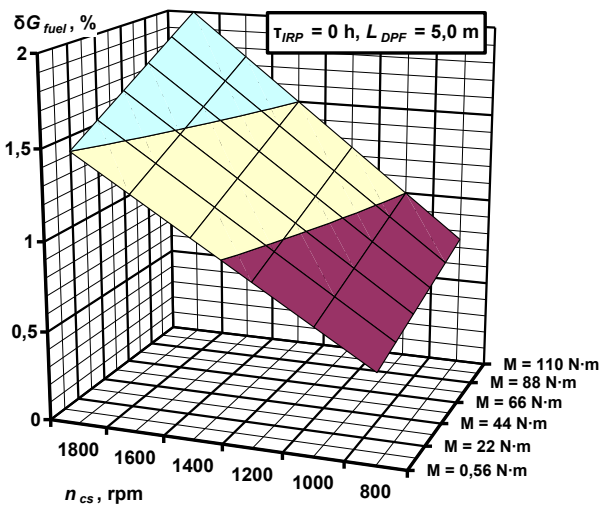
б



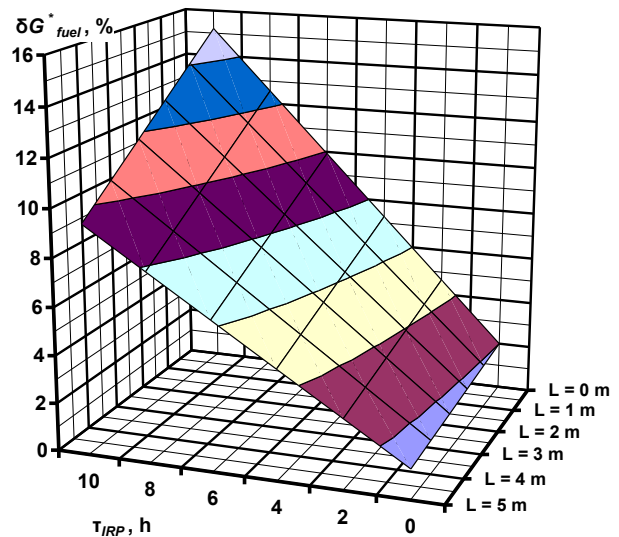
в



г



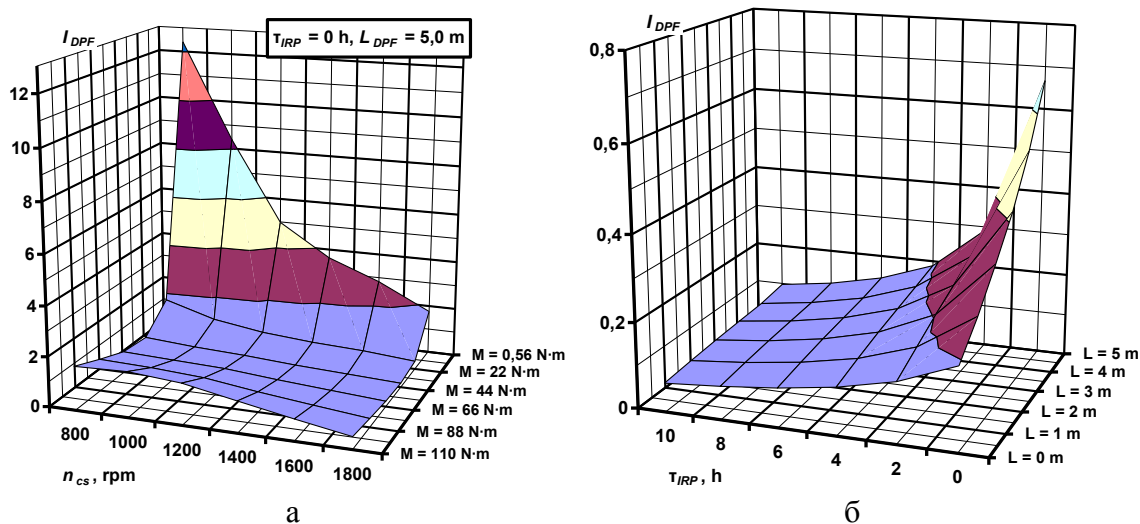
д



е

а – величина ΔP_{DPF} для режимів роботи ПДВЗ; б – величина ΔP_{DPF} для міжрегенераційного періоду та компонок ПДВЗ; в – величина $K_{CE}(G(PM))$ для режимів роботи ПДВЗ; г – величина $K_{CE}(G(PM))$ для міжрегенераційного періоду та компонок ПДВЗ; в – величина δG_{fuel}^* для режимів роботи ПДВЗ; е – величина δG_{fuel}^* для міжрегенераційного періоду та компонок ПДВЗ

Рисунок 14 – Результати застосування розроблених математичних моделей



а – для поля робочих режимів ПДВЗ;
 б – для факторної площини міжрегенераційного періоду та компоновки ПДВЗ

Рисунок 15 – Результати оцінювання значень індексу I_{DPF}

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.

До складу **шостого розділу** дисертації увійшли результати практичної реалізації комплексної системи управління екологічно безпечною 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.

Отримано усі необхідні складові для реалізації розробленого алгоритму управління рівнем екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, що не відповідають чинним вимогам екологічного законодавства України. Кроки розробленого алгоритму систематизовано за ознаками послідовності та підпорядкованості (рис. 16).

Алгоритм передбачає прийняття управлінських рішень електронною системою автоматичного керування (ЕСАК) 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 (1)). Значення індикатора Ω_{RICE} формують значення інтегративного показника рівня екобезпеки процесу експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} (формули (2) і (3)) та індексу ефективності функціонування ТЗНС I_{EPT} (формулу (4)). Визначення характеристичної карти за значенням індикатора екобезпеки ЖЦ ЕУ Ω_{LC} проводиться наступним чином (формули (27)-(29)):

КРОК 1 →		КРОК 2 →	КРОК 3 →	КРОК 4 →	КРОК 5 →	КРОК 6 →	
Рівень ША		Рівень ША	Рівень ШВ	Рівень ШВ	Рівень ШВ	Рівень ШВ	
«Джерело вихідних даних»							
<p>а. Нормативи, довідники, паспорти</p> <p>а.1. Екологічні нормативи.</p> <p>а.2. Стандарти на моторне паливо.</p> <p>а.3. Моделі експлуатації.</p> <p>а.4. Паспорти ЗВТ, довідники</p>	<p>б. Результати експериментальних досліджень на МВС</p> <p>б.1. ПДВЗ.</p> <p>б.2. НП.</p> <p>б.3. ЗВТ.</p> <p>б.4. ФТЧ.</p>	<p>с. Результати моделювання</p> <p>с.1. Фізичне моделювання на БДУ.</p> <p>с.2. Математична модель ΔP_{DPP}.</p> <p>с.3. Математична модель $K_{CF}(G(PM))$.</p> <p>с.4. атематична модель ΔG_{fuel}.</p>	<p>а. $[g(k)]; Q_{\#}; \Delta P_{\#}; n_{\#}; M; WF; \sigma, f$.</p> <p>б. $n_{\#}; M; C(NO_x); C(C_nH_m); C(CO); C_5; N_B; K; BSU; HSN; S_m; \tau_m; G_{arr}; B_0; t_0; \phi_0; t_{EG}; \Delta P_{\#}; \Delta P_{DPP}; t_{EG}; L_{DPP}; \tau_{REF}; K_{CF}(G(PM)) = f(n_{\#}, M, L_{DPP}, \tau_{REF}); \Delta G_{fuel} = f(n_{\#}, M, \Delta P_{DPP}, G_{fuel})$</p>	<p>$N_D = f(C, K, BSU); HSN; G(PM) = f(N_D, C(C_nH_m), G_{fuel}, G_{arr}); G(k) = f(G(k), B_0, t_0, \phi_0); k = [SO_x, CO_2, CO_{2\#}, H_2O, B(a)P, PAH, CG, RB, Q, \eta_e]$</p>	<p>«Значення факторів ЕБ та їх вагомість»</p> <p>$K_{\#} = f(G_{fuel}, G(PM), G(NO_x), G(C_nH_m), G(CO), Q_{\#}, WF, \sigma, f); A_{fuel} = f(K_{\#}, \partial G_{fuel}, \partial K_{\#}, \partial C(k), Q_{\#}, WF, \sigma, f); G(k); k = [C_{fuel}, PM; NO_x, C_nH_m, CO; SO_x, CO_2, CO_{2\#}, H_2O, B(a)P, PAH, CG, RB, Q, \eta_e]; G(PM) = \delta G(PM) = \beta(p, q, N, K_{arr})$</p>	<p>«Гочність отримання значень факторів ЕБ»</p>	
КРОК 7 →	КРОК 8 →	КРОК 9 →	КРОК 10 →	КРОК 11 →	КРОК 12 →	КРОК 1	
Рівень ШВ	Рівень ПС	Рівень ПС	Рівень ПС	Рівень ІС	Рівень ІА	Рівень ІА	
<p>«Еталонні значення факторів ЕБ»</p> <p>$r(K_{\#})_{\#}, r(K_{\#})_{\#} = f(K_{\#}, [G(k)](EURO)); r(G(k))_{\#}, r(G(k))_{\#} = f(G(k), [G(k)](EURO)); r(A(k))_{\#}, r(A(k))_{\#} = f(A(k), [A(k)](EURO)); k = [G_{fuel}, PM, NO_x, C_nH_m, CO, SO_x, CO_2, CO_{2\#}, H_2O, B(a)P, PAH, CG, RB, Q, \eta_e]$</p>	<p>«Часткові функції бажаності факторів ЕБ та її вагомість»</p> <p>$d(K_{\#}) = f(K_{\#}, a(K_{\#}), b(K_{\#})); d(G(k)) = f(G(k), a(G(k)), b(G(k))); v(G(k)) = f(A(k)); k = [K_{\#}, G_{fuel}, PM, NO_x, C_nH_m, CO, SO_x, CO_2, CO_{2\#}, H_2O, B(a)P, PAH, CG, RB, Q, \eta_e]$</p>	<p>«Критерій рівня ЕБ ПДВЗ та індекс ефективності роботи ТЗНС»</p> <p>$D_{RICE} = f(d(K_{\#})); d(G(k)), v(K_{\#}), v(G(k)); k = [SO_x, CO_2, CO_{2\#}, H_2O, B(a)P, PAH, CG, RB, Q, \eta_e]; I_{EFF} = f(I_{ED}, WF_{ED}); I_{ED} = f(\Delta P_{ED}, \Delta G_{fuel, ED}); WF_{ED} = f(A(k))_{ED}, \Sigma A(k))$</p>	<p>«Рівень ЕБ експлуатації ЕУ з ПДВЗ»</p> <p>$\Omega_{LC} = f(Q_{DPP}, \tau_{\#}, D); \Omega_{DPP} = f(\Omega_{RICE}, n); \Omega_{RICE} = f(D_{RICE}, I_{EFF}); ESL = f(\Omega_{RICE}, [Q_{RICE}]);$</p>	<p>«Обробка вихідних даних»</p> <p>$N_{\#} = f(n_{\#}, M); G_{\#} = f(G_{fuel}, G_{arr}); g_{\#} = f(G_{DPP}, S_m, \tau_m); [G(k)] = f(g_{\#}(k), N_{\#})$</p>	<p>«Формули перерахунку»</p> <p>$N_D = f(C, K, BSU); HSN; G(PM) = f(N_D, C(C_nH_m), G_{fuel}, G_{arr}); G(k) = f(G(k), B_0, t_0, \phi_0); k = [NO_x, C_nH_m, CO]$</p>	<p>«Об'єкти управління»</p> <p>ЕУ з ПДВЗ та ЕСАК</p> <p>$REG_1 = f(I_{DPP}, [L_{DPP}]); REG_2 = f(\tau_{REF}, [\tau_{REF}]); REN = f(\tau_{REF}, [\tau_{REF}]); REG_1, REG_2, REN = [ON, READY, OFF]$</p>	<p>«Значення факторів ЕБ та їх вагомість»</p> <p>СУЕБ та ЕСАК: ВО типу А – для газоподібних полотантів; ВО типу В – для рідких полотантів; ВО типу С – для твердих відходів; ВО типу D – для факторів впливу</p>

Рисунок 16 – Алгоритм управління рівнем екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_{LC} = [0; \dots; 1, 0]; \\ \Omega_{LC} < 0,2 \Rightarrow ESL = 1 : \text{Forbidden} \Rightarrow AFEP = \text{OFF}; \\ \Omega_{LC} = (0,2; \dots; 0,37] \Rightarrow ESL = 2 : \text{Acceptable} \Rightarrow AFEP = \text{EPT}; \\ \Omega_{LC} = (0,37; \dots; 0,63] \Rightarrow ESL = 3 : \text{Permissible} \Rightarrow AFEP = \text{ELEESL}; \\ \Omega_{LC} = (0,63; \dots; 0,8] \Rightarrow ESL = 4 : \text{High} \Rightarrow AFEP = \text{IESL}; \\ \Omega_{LC} > 0,8 \Rightarrow ESL = 5 : \text{Excellent} \Rightarrow AFEP = \text{PLEESL}; \end{array} \right. \quad (27)$$

$$\Omega_{LC} = \sum_{q=1}^l (\Omega_{PPq} \cdot WF_{\tau}) / l = \sum_{q=1}^l \left(\Omega_{PPq} \cdot \tau_q / \sum_{q=1}^l \tau_q \right) / l, \quad (28)$$

$$\Omega_{PP} = \sum_{j=1}^n (\Omega_{RICEj} \cdot WF_N) / n = \sum_{j=1}^n \left(\Omega_{RICEj} \cdot N_{ej} / \sum_{j=1}^n N_{ej} \right) / n, \quad (29)$$

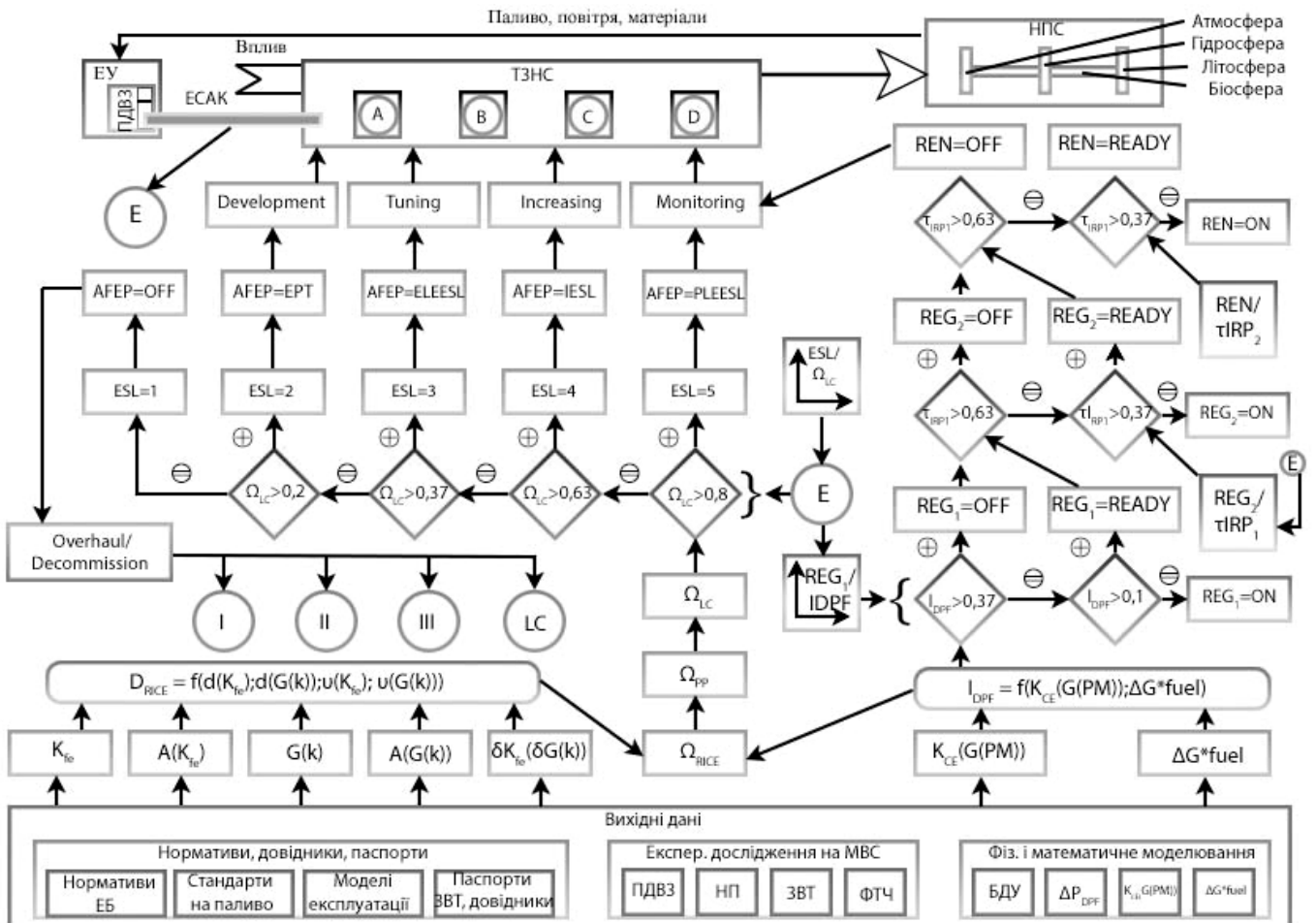
де Ω_{LC} – індикатор екобезпеки ЖЦ ЕУ; ESL – ідентифікатора рівня екобезпеки; $AFEP$ – процедура «Безаварійна експлуатація»; OFF – режим «Кінець безаварійної експлуатації»; EPT – режим «Захист НПС»; $ELEESL$ – режим «Забезпечення законодавчо встановленого рівня екобезпеки»; $IESL$ – режим «Покращення 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; $\sum \tau_q$ – 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; $\sum N_{ej}$ – 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 органів; 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 органів 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 органи 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 органи 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 мотор-

ного 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 електронною системою автоматичного керування двигуном чи самої ТЗНС (кроки алгоритму 9–12) на прикладі застосування ФТЧ наведена на рисунку 17.



RICE – ПДВЗ, ІМ – впускний колектор, ЕМ – випускний колектор, ТФТ – резервуар з традиційним дизпаливом, АФТ – 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, МОС – радіатор охолодження моторної оливи, ChT – характеристична карта ЕБУ ЕСАК, FPU – блок визначення параметрів моторного палива

Рисунок 17 – Алгоритм роботи керуючої частини системи управління виконавчими органами технології захисту навколишнього середовища від впливу поршневого ДВЗ

Найбільш ефективним з розглянутих технічних рішень є обладнання випускної системи ПДВЗ ФТЧ нетрадиційної конструкції, вдосконаленої у роботі. Моніторинг ефективності роботи фільтра та управління процесом його регенерації проводиться з використанням наданого індексу ефективності функціонування ФТЧ I_{DPF} (формула (26)), що є основою для формування управляючого імпульсу СУЕБ.

Управління процесами регенерації I і II роду ФТЧ пропонується узгоджувати з психофізичною шкалою і характеристичною картою ЕСАК, яка визначається у даному разі таким чином:

$$\begin{cases} I_{EPT} = [0; \dots; \infty]; I_{EPT} > 1,0 \Rightarrow I_{EPT} = 1,0; \\ I_{EPT} < 0,1 \Rightarrow REG_1 = ON; \\ I_{EPT} = (0,1; \dots; 0,37] \Rightarrow REG_1 = READY; \\ I_{EPT} > 0,37 \Rightarrow REG_1 = OFF. \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} \tau_{IRP1} = [0; \dots; \tau_{IRP1max}]; \\ \tau_{IRP1} < 0,37 \cdot \tau_{IRP1max} \Rightarrow REG_2 = ON; \\ \tau_{IRP1} = (0,37; \dots; 0,63] \cdot \tau_{IRP1max} \Rightarrow REG_2 = READY; \\ \tau_{IRP1} > 0,63 \cdot \tau_{IRP1max} \Rightarrow REG_2 = OFF. \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} \tau_{IRP2} = [0; \dots; \tau_{IRP2max}]; \\ \tau_{IRP2} < 0,37 \cdot \tau_{IRP2max} \Rightarrow REN = ON; \\ \tau_{IRP2} = (0,37; \dots; 0,63] \cdot \tau_{IRP2max} \Rightarrow REN = READY; \\ \tau_{IRP2} > 0,63 \cdot \tau_{IRP2max} \Rightarrow REN = OFF. \end{cases} \quad (32)$$

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 міжрегенерацийного періоду I роду на попередньому кроці, год; $\tau_{IRP1max}$ – граничне значення тривалості міжрегенерацийного періоду I роду, год; τ_{IRP2} – тривалість міжрегенерацийного періоду I роду на попередньому кроці, год; $\tau_{IRP2max}$ – граничне значення тривалості міжрегенерацийного періоду I роду, год.

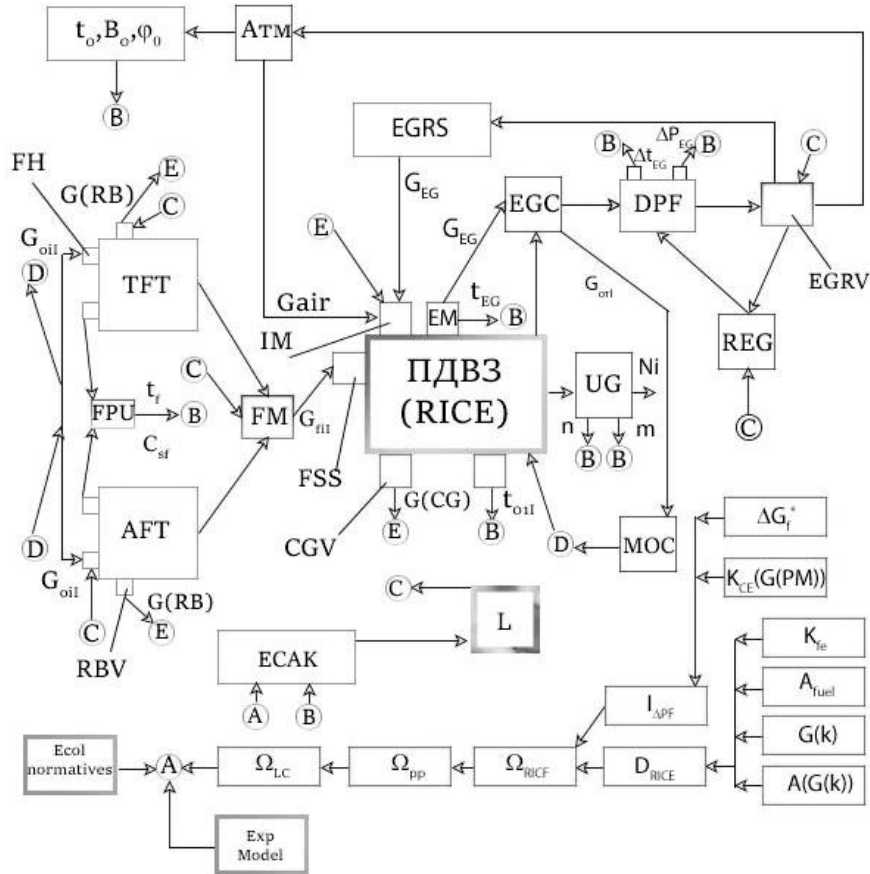
Для випадку застосування розробленого алгоритму для забезпечення певного рівня екологічної безпеки процесу експлуатації ЕУ з ПДВЗ зі значним ступенем фізичного і морального зносу, що не мають виконавчих пристроїв ТЗНС, але не можуть бути виведеними з експлуатації, розроблено відповідну ТЗНС з удосконаленим режимом роботи та запровадженням певних способів підвищення рівня її екологічної безпеки (рис. 18).

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 холодильник, очищення ВГ у ФТЧ, подача частини потоку ВГ крізь триходовий клапан ФТЧ у систему рециркуляції ВГ, подача іншої частини ВГ з клапану до системи регенерації ФТЧ I 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.

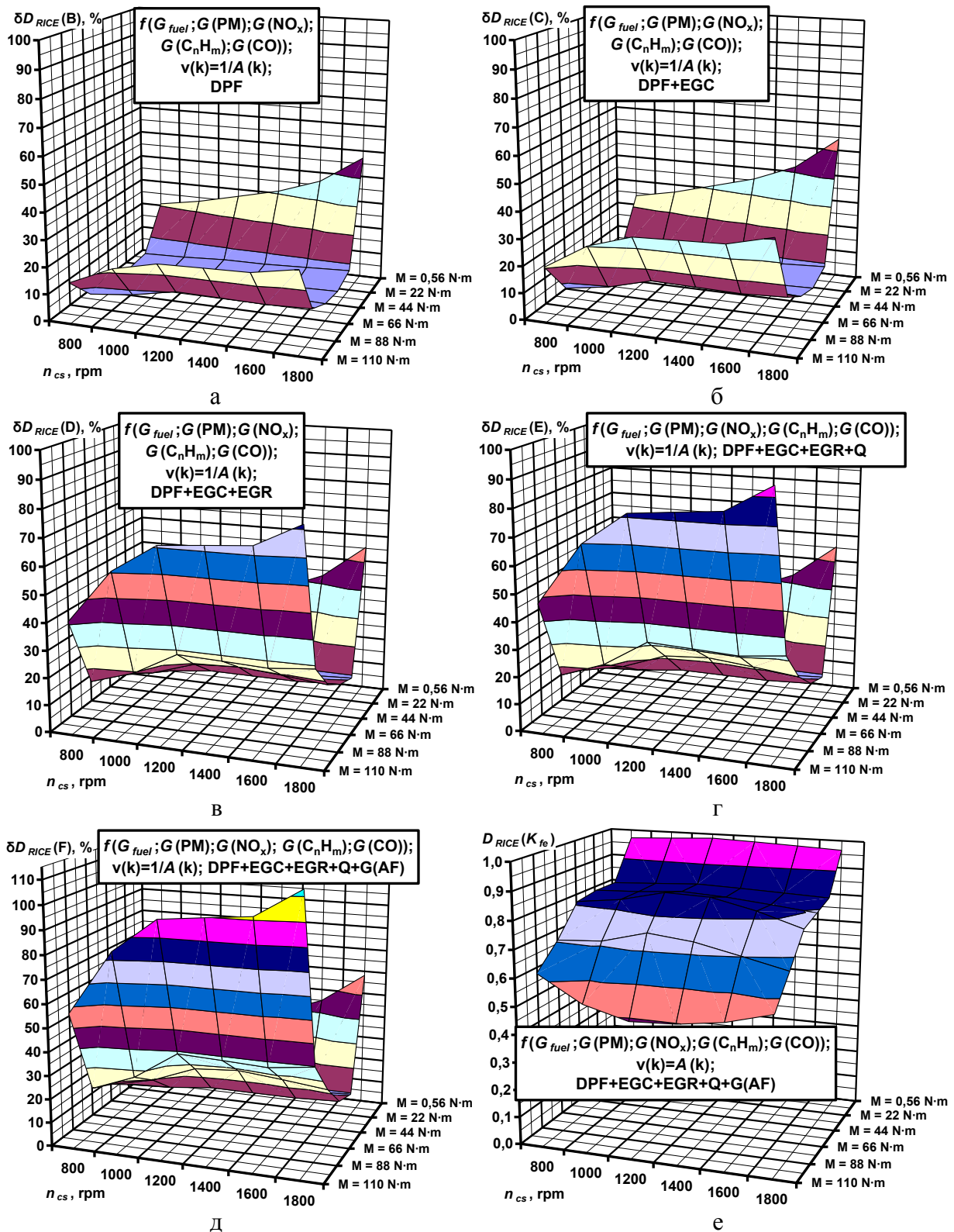


RICE – ПДВЗ, IM – впускний колектор, EM – випускний колектор, TFT – резервуар з традиційним дизпаливом, AFT – резервуар з альтернативним дизпаливом, FM – змішувач моторного палива, FSS – система паливоподачі двигуна, FH – нагрівач моторного палива, RBV – дихальний клапан резервуару, CGV – клапан системи суфлювання картерних газів, EACS – 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 18 – Розроблена технологія захисту для енергоустановок з поршнеvim ДВЗ зі значним ступенем фізичного і морального зносу, що не мають чи позбулись виконавчих пристроїв технології захисту

Таким чином, ефективність функціонування розробленої ТЗНС для ПДВЗ зі значним ступенем фізичного зносу суттєво підвищується за рахунок реалізації синергетичних ланок, а чисельно оцінюється за допомогою розробленого інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} (формула (2)).

На рисунку 19 наведено результати визначення інтегративного показника екологічної безпеки експлуатації ПДВЗ в ЕУ D_{RICE} та ефекту δD_{RICE} від застосування розробленої ТЗНС для різних варіантів врахування синергетичного ефекту для усіх режимів роботи ПДВЗ.

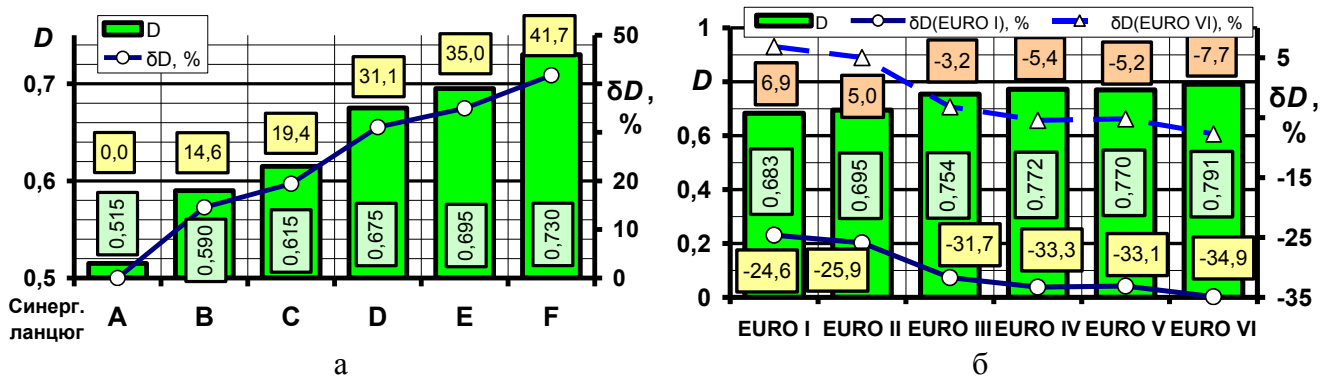


а – варіант В – ПДВЗ з некерованим ФТЧ; б – варіант С – ПДВЗ з керованим за температурою ВГ ФТЧ; в – варіант D – варіант «С» з рециркуляцією ВГ; г – варіант Е – варіант «D» з рекуперацією теплової енергії; д – варіант F – варіант «E» з переведенням на споживання альтернативного палива; е – інтегративний показник D_{RICE} з критерієм K_{fe} у якості самостійного чинника та усіма введеними чинниками для поршневого ДВЗ з технологією захисту навколишнього середовища

Рисунок 19 – Розподіл значень інтегративного показника ефекту від застосування фільтра твердих частинок та розробленої технології захисту навколишнього середовища за робочим режимом дизеля 2Ч10,5/12 для різних варіантів врахування синергетичного ефекту

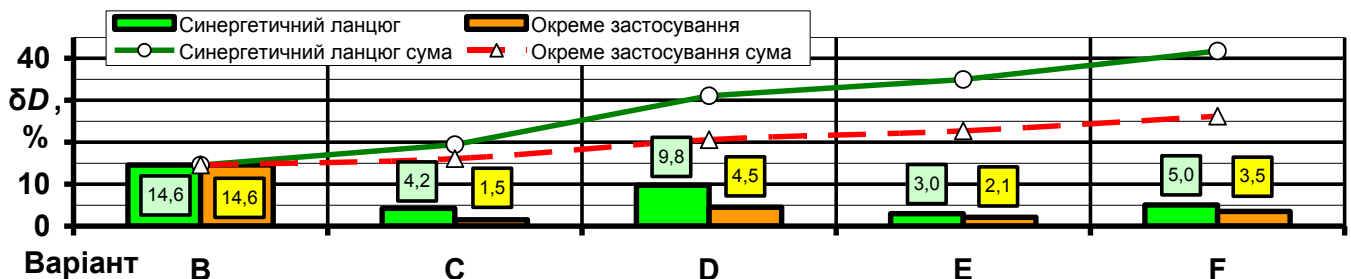
На рисунку 20 проілюстровано усереднені за полем робочих режимів двигуна результати дослідження ефективності функціонування ТЗНС для різних варіантів синергетичного ланцюга та відносно нормативних вимог EURO. При застосуванні такого синергетичного ланцюга ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, що не відповідав вимогам екологічної безпеки рівня EURO I, відбувається підвищення показників екологічної безпеки до вимог рівня EURO III.

Встановлено, що ефективність функціонування розробленої ТЗНС для ПДВЗ зі значним ступенем фізичного зносу суттєво підвищується за рахунок реалізації синергетичних ланок, а саме на 60 % (рис. 21).



а – для різних варіантів синергетичного ланцюга; б – відносно нормативних вимог EURO

Рисунок 20 – Результати досягнення максимальної ефективності функціонування технології захисту навколишнього середовища (синергетичний ефект техніко-технологічних рішень)



варіант В – ПДВЗ з некерованим ФТЧ, варіант С – ПДВЗ з керованим ФТЧ, варіант D – варіант «С» з рециркуляцією ВГ, варіант E – варіант «D» з рекуперацією теплової енергії, варіант F – варіант «E» з переведенням на споживання альтернативного палива

Рисунок 21 – Порівняння випадків окремого застосування компонентів технології захисту навколишнього середовища та побудови з них синергетичного ланцюга

Таким чином, отримали практичну реалізацію нові науково-методологічні основи комплексної оцінки екологічної ефективності запропонованих техніко-технологічних рішень з підвищення екологічної безпеки при експлуатації ЕУ з ПДВЗ з високим ступенем фізичного зносу, що підтверджує достовірність і відтворюваність отриманих теоретичних результатів.

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 поршнеvim 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 поршнеvim 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 поршнеvim 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 поршнеvim 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 принцип побудови системи оцінювання екологічної якості експлуатації енергоустановок з поршнеvim 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 поршнеvim 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 поршнеvim ДВЗ з високим рівнем фізи-

чного зносу на етапі їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація». Надана система управління дозволяє врахувати пріоритетність екологічних показників роботи енергоустановки з поршнеvim 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 поршнеvim 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 поршнеvim 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 поршнеvim 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 поршнеvim ДВЗ, мотор-компресорів газотранспортної системи і газовидобувних станцій на ТОВ «Армко-Інжиніринг» (м. Київ) та транспортних і електрогенеруючих енергоустановок з поршнеvim ДВЗ на ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «Харківський насосний завод» (м. Харків). Розроблені науково-методологічні основи підвищення рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршнеvim 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ 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.

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.

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).

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).

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).

9. **Kondratenko O.**, Koloskov V., Kovalenko S., Derkach Y., Stokov 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).

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

21. **Кондратенко О.М.,** Строков О.П., Вамболь С.О. Регенерация фильтров твердых 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.

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.

23. **Кондратенко О.М.,** Строков О.П., Вамболь С.О. Регенерация фильтров твердых 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.

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.

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.

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.

27. Вамболь С.О., **Кондратенко О.М.,** Метельов 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.

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.

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.

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.

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.

32. **Kondratenko O.M.** Taking into account the emissions of CO₂ 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.

33. **Kondratenko O.M.** Assessment of ecological and chemical efficiency of exploitation process of reciprocating ICE of vehicle with consideration 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.

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.

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.

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

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.

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.

39. **Кондратенко О.М.**, Коваленко С.А. Оцінювання паливно-екологічної еф-

ективності 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.

40. **Кондратенко О.М.**, Боцмановська О.С., Подоляко Н.М., Капінос Е.В. Врахування емісії пари моторного палива та аерозолю картерних газів як поллютантів 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.

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-ЕКОНОМІКА»*. Харків, 2019. № 1(3)/2019. С. 114–118. URL: <http://e-economics.hpi.kh.ua/index.php/e-economics/article/view/86/70>.

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 симпозиуму SDEV'2020 «Сталий розвиток – стан та перспективи»* (19–22 лютого 2020 р., НУ «Львівська політехніка», Львів). – 2020. – С. 177–180.

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.

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 разработки 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).

45. Vambol' S.O., **Kondratenko O.M.**, Dejneko N.V. Engine test bench as a source 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).

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).

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.

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.

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.

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 toxicity 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.

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.

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.

53. **Кондратенко О.М.,** Вамболь С.О., Авраменко А.М. Математична модель ефективності роботи фільтра твердих частинок ПМаш 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.

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.

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.

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.

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.

58. **Кондратенко О.М.,** Метельов 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.

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.

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.

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.

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.

63. Stokov 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.

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.

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 «ХП»). Харків, 2019. С. 188–190.

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.

67. **Kondratenko O.M.** Determination of CO₂ 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 адъюнктов (аспирантов, соискателей), в 2-х томах, Т. 1. (08–09 апреля 2020 г., УГЗ МЧС Беларуси). Минск, 2020. С. 296–298.

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.

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.

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.

АНОТАЦІЯ

Кондратенко О.М. Науково-методологічні основи захисту атмосферного повітря від техногенного впливу енергоустановок з поршневыми двигунами внутрішнього згорання. – 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.

Дослідження присвячене розробці 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.

Вдосконалено систему класифікацій способів роботи і конструкції фільтрів твердих частинок та систему класифікацій засобів реалізації процесу їх регенерації як складових технології захисту навколишнього середовища від негативного впливу енергоустановок з поршневим ДВЗ з високим ступенем фізичного зносу.

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.

Науково обґрунтовано структуру інтегративного показника рівня екологічної

безпеки процесу експлуатації енергоустановок з поршнеvim ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу.

Розроблено наукові основи системи управління екологічною безпекою процесу експлуатації енергоустановок з поршнеvim ДВЗ з високим рівнем фізичного зносу на етапі їх життєвого циклу «безаварійна експлуатація».

Науково обґрунтовано методологію побудови та використання індексу ефективності функціонування фільтра твердих частинок, що є частиною технології захисту навколишнього середовища в енергоустановці з поршнеvim ДВЗ.

Отримано результати щодо підвищення рівня екологічної безпеки при застосуванні комплексу технологічних і технічних рішень у разі сумісної роботи ПДВЗ 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.

Практичне значення роботи підтверджено актами впровадження у виробничу, господарчу і науково-дослідну діяльність підприємств і організацій та навчальний процес.

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

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.

The research is devoted to the development of scientific and methodological bases of the system of complex assessment of the level of ecological safety of atmospheric air protection technology at accident-free exploitation process of power plants with reciprocating internal combustion engines with a high degree of physical wear and its implementation in environmental protection technology management.

In the research as the main new scientific result the scientific and applied substantiation of methodological bases of system of complex assessment of level of ecological safety of technology of protection of atmospheric air at exploitation of power plants with reciprocating internal combustion engine with high degree of physical wear at a stage of «accident-free exploitation» and ecological safety management system.

The system of classifications of methods of operation and design of particulate matter filters and the system of classifications of means of realization of the process of their regeneration as components of environmental protection technology from the negative impact of power plants with reciprocating internal combustion engines with a high degree of physical wear.

The methodological principles of development of environmental protection technologies in the operation of power plants with reciprocating internal combustion engines

with a high level of physical wear, which do not meet the current requirements of ecological safety and cannot be decommissioned, have been further developed.

The structure of the integrative indicator of the level of ecological safety of the process of exploitation of power plants with reciprocating internal combustion engines with a high level of physical wear is scientifically substantiated.

The scientific bases of the environmental safety management system for the exploitation of power plants with reciprocating internal combustion engines with a high level of physical wear at the stage of their life cycle «accident-free exploitation» have been developed.

The methodology of development and use of the index of efficiency of functioning of the particulate matter filter which is a part of environmental protection technology in power plant with the reciprocating internal combustion engine is scientifically substantiated.

The results of increasing the level of ecological safety in the application of a set of technological and technical solutions in the case of joint operation of long-term reciprocating internal combustion engines and environmental protection technology. This allowed to obtain a synergistic effect in ensuring the environmentally safe exploitation process of the reciprocating internal combustion engine and environmental protection technology as part of the power plant, the value of which reached 60 %. This is based on the organization of the principle of mutually coordinated work of environmental protection technology components as a set of environmental protection technological measures – cooling, purification and recirculation of exhaust gases, utilization of their thermal energy, conversion of the engine to alternative motor fuel consumption and rationalization of its exploitation model. This allowed to reduce the technogenic load on the atmosphere by 42 % and to bring the performance of the power plant with a reciprocating internal combustion engine with a high degree of physical wear to meet the requirements of environmental standards of level of EURO III.

The developed environmental safety management system and environmental protection technology have been implemented to ensure the normatively established level of a set of ecological safety indicators for accident-free exploitation of transport and electric generating units with reciprocating internal combustion engines, motor-compressors of the gas transmission system and gas production stations at «Armko-Engineering» LLC (Kyiv) and transport and electric generating power plants with reciprocating internal combustion engines at «Production and commercial enterprise «Kharkiv pumping plant» (Kharkiv).

The practical significance of the work is confirmed by acts of implementation in production, economic and research activities of enterprises and organizations and 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.

Підписано до друку 22.03.2021 р. Формат 60x84/16.
Папір 80 г/м². Друк цифровий. Ум. друк. арк. 2,4
Наклад 120 прим. Зам. № 12/21
Сектор редакційно-видавничої діяльності
Національний університету цивільного захисту України
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94