

ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ ТА  
УПРАВЛІННЯ

МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ  
УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**МІХЕЄВ ВОЛОДИМИР СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 681.513:519

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ МОБІЛЬНИХ  
ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ НА СТАН ДОВКІЛЛЯ НА ПРИКЛАДІ  
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ**

Спеціальність 21.06.01 «екологічна безпека»

Галузь знань – 06 Техногенна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ В. С. Міхеєв

Науковий керівник: Присяжний Володимир Ілліч, кандидат технічних  
наук, старший науковий співробітник

Київ – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Михеев В.С.*. Оцінювання екологічного впливу мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля на прикладі газотурбінних двигунів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – Екологічна безпека (06 Техногенна безпека, технічні науки). – Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Міністерство енергетики та захисту довкілля, Київ, 2020.

У теперішній час максимально можливе забруднення навколишнього середовища можливо в моменти граничної силової напруженості повітряного судна, на початковому етапі старту і набору висоти. Тому проведені дослідження екологів свідчать, про те, що найбільш забрудненими ділянками є прилеглі території в районі аеродромів і зокрема злітно-посадкової смуги.

Дослідження режимів роботи ГТД на початкових етапах дає можливість визначити не тільки ефективні режими роботи силової установки, а й застосування їх з мінімальним впливом на навколишнє середовище щодо максимальної тяги ЛА. Тим не менш, у даний час, питанню застосування ГТД ЛА і режимів його роботи на початкових етапах за умови мінімальних викидів в навколишнє середовище шкідливих речовин не досить приділено уваги в літературі або є обмеження в отриманні знання.

Результати проведеного аналізу свідчать, що повітряні судна цивільної та військової авіації негативно впливають на екологічну обстановку аеродромних і приаеродромних територій. Результатом впливу авіації на навколишнє середовище є забруднення атмосфери продуктами згоряння авіаційного, автомобільного та інших видів палива, забруднення ґрунтів і підземних вод паливно-мастильними матеріалами (аварійні сливи палива з літаків, протоки під час заправки та ін.), шумове забруднення та інші чинники.

Викиди від авіації відбуваються через використання палива для реактивних двигунів (гасу) і авіаційного бензину (для поршневих двигунів), які використовуються в якості палива для повітряних суден. При цьому основними забруднюючими речовинами є ті, які виникають в результаті спалювання (СО, СО<sub>2</sub>, вуглеводні і оксиди азоту, а також викиди SO<sub>2</sub>, які залежать від рівня сірки в паливі). Іншими шкідливими речовинами, які виділяються у відносно невеликих концентраціях, є N<sub>2</sub>O і CH<sub>4</sub>.

У теперішній час розглядаються питання про техногенний вплив на навколишнє середовище і здоров'я людей авіаційної техніки (літальних апаратів, засобів наземного обслуговування та ін.) аеродромів, дислокованих на території України.

У працях таких вчених, як Азаров С.І., Аверін Г.В., Белявський Г.О., Бондар О.І., Бугор А.Н., Бусигін Б.С., Ващенко В.М., Ємець М.А., Лялько В.І., Мальований М.С., Машков О.А., Мокін В.Б., Петрук В.Г., Рудько Г.І., Соколов Ю.М., Тараріко О.Г., Треснюк В.Н., Фролов В.Ф., Чумаченко С.М., Шапар А.Г., Шмандій В.М., Шматков Г.Г., і інших сформульовані основні принципи побудови і функціонування систем екологічного моніторингу. Вирішенню питань забруднення атмосфери двигунами літальних апаратів присвячені роботи таких вчених, як Авдєєв Б.В., Аксєнов І.Я., Арутюнова А.К., Афанасьєв Ю.А., Безугла Е.Ю., Болбас М.М., Борисов Н.І., Голубєв І.Р., Голубєв Н.В., Гончар Л.Л., Дзюбенко О.Л., Єсенков В.Г., Жегалін О.І., Запорожець О.І., Ісаєнко В.М., Квитка В.Є., Колесов А.В., Кулік М.С., Лупачев П.Д., Малахов Л.П., Маслов В.А., Мельников Б.М., Новиков Ю.В., Ноздрін В.І., Павлов Е.І., Панін В.В., Спиридонов Е.Г., Терещенко Ю.М., Фомин С.А., Франчук Г.М. та інші. Однак в даний час ці системи не в повній мірі відповідають вимогам практики.

Проведений аналіз свідчить, що, ступінь розроблення тематики досліджень у відповідній предметній галузі знаходиться на недостатньо високому рівні. В першу чергу це пов'язано з відсутністю в більшості регіонів України ефективної технології моніторингу повітряного середовища,

орієнтованої лише на побудову мережі різних приладів та датчиків. Інформація від цих датчиків передається особі, що приймає рішення, яка, в рамках інтуїтивно-емпіричного підходу робить суб'єктивний висновок про вплив різних природно-господарських систем на екологічний стан досліджуваної території.

Саме тому, актуальним є наукове завдання, яке полягає в оцінюванні екологічного впливу мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля на прикладі газотурбінних двигунів та аналізуванні екологічних ризиків для підвищення обґрунтованості прийняття управлінських рішень.

Тема дисертаційної роботи та отримані результати відповідають тематиці наукових досліджень у відповідності з цілями і завданнями, що поставлені у Стратегії розвитку авіаційної промисловості на період до 2020 року (схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2008 р. №1656-р), Державній цільовій програмі розвитку аеропортів на період до 2023 року, (затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 24 лютого 2016 р. № 126). Виконання наукових досліджень проводились у відповідності до плану наукової роботи та науково-технічної діяльності Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління. Дисертаційні дослідження виконані у науково-дослідній роботі: «Розробка алгоритмів регулювання витрат палива» (номер держреєстрації 0102U003263), яка виконувалася у Харківському аерокосмічному університеті імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», в якій автор приймав участь як виконавець. Наведені результати стосуються розвитку нових науково-обґрунтованих рекомендацій щодо побудови алгоритмів регулювання палива в літальних апаратах при впорскуванні палива в ГТД, що дозволяє розширити можливості експлуатаційних характеристик повітряних суден та зменшити тиск на навколишнє середовище за умови оцінювання стану та вибору режимів роботи силових установок. Також робота виконувалась у рамках проведення

держбюджетних науково-дослідних робіт, що виконувалися у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління: «Дослідження антропогенних джерел електромагнітного випромінювання та їх впливу на екосистеми» (0118U006675); «Розробка методики застосування ортотрансформованих космічних знімків для оцінки стану навколишнього середовища» (0118U005460); «Розробка нормативно-методичного документа – рубрикатора завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою космічних систем ДЗЗ та ГС» (0118U005461); «Розробка проекту автоматизованої системи моніторингу довкілля Київської області» (0117U007076).

Метою дисертації є розроблення методів і алгоритмів оброблення даних в інформаційній системі моніторингу забруднення навколишнього середовища в районах аеродромів продуктами згоряння авіаційного палива від ГТД ЛА на основі вербально-числового аналізу ризику для підвищення обґрунтованості прийняття управлінських рішень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому.

Вперше:

запропоновано алгоритм побудови інтегрального екологічного оцінювання стану навколишнього середовища на приаеродромній території, який відрізняється тим, що оцінка в ньому є середньозваженою геометричною величиною і може застосовуватися для вербально-числового аналізу екологічного ризику та враховує вплив газотурбінних двигунів літальних апаратів;

отримана аналітична модель, яка характеризує закономірності впливу на стан довкілля в залежності від режимів роботи авіаційних ГТД на основі розрахунку викидів продуктів горіння авіаційного палива, що надає можливість проведення екологічного оцінювання для визначення рівня забруднення навколишнього середовища на приаеродромній території;

удосконалено науково-методичний апарат зниження викидів токсичних речовин шляхом незначної модифікації існуючих камер згоряння та їх перебудови камер згоряння;

отримав подальший розвиток метод оцінювання стану аеродромних комплексів при забрудненні продуктами горіння авіаційного палива від ГТД повітряних суден на території аеродромів, відмінною рисою, якого є можливість застосування інформаційної підсистеми моніторингу приаеродромної території для подальшого аналізу прогнозування екологічних ризиків в системі управління екологічною безпекою приаеродромних територій.

Практичне значення отриманих результатів дозволяє оцінювати стан навколишнього середовища та аналізувати дані викидів продуктів горіння авіаційного палива від ГТД повітряних суден, що дає можливість визначитися з ефективним режимом застосування силових установок ЛА.

Запропонований науково-методичний апарат дозволяє розрахувати та визначитися з природоохоронними заходами, що можуть позитивно впливати на стан довкілля в районі аеродрому для забезпечення екологічної безпеки. Також розроблений науково-методичний апарат може бути застосовано при проведенні екологічного оцінювання для визначення рівня забруднення навколишнього середовища на території аеродрому, що є підґрунтям для здійснення прогностичного аналізу та визначення рівня екологічних ризиків.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у Національному центрі управління та випробувань космічних засобів (акт від 04.12.2018 р.), Льотній академії Національного авіаційного університету, м. Кропивницький (акт від 22.01.2019 р.), Науково-виробничій впроваджувальній фірмі «Геотехнологія», м. Київ (акт від 20.12. 2018 р.), а також у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління Міністерства екології природних ресурсів України, м. Київ (акт від 26.12. 2018 р.).

Наукові результати досліджень є внеском в теорію розроблення наукових методів дослідження комплексної оцінки та прогнозування впливу техногенного забруднення на навколишнє середовище та людину.

Перспективним напрямком подальших досліджень є створення системи управління екологічною безпекою приаеродромних територій з прогнозуванням екологічних ризиків та підтримки прийняття управлінських рішень.

*Ключові слова:* авіаційна техніка, аеродром, авіаційний транспорт, викиди, газотурбінний двигун, емісія двигунів, екологічна безпека, екологічний ризик, екологічне забруднення, системний підхід, шум двигунів.

## ANNOTATION

Mikheev VS. Estimation of ecological impact of mobile technogenic objects on the state of the environment on the example of gas turbine engines Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for Candidate of Science Degree in Specialty 21.06.01 - Environmental Safety (06 Technogenic Safety, Engineering Sciences). - State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management, Ministry of Energy and Environmental Protection, Kyiv, 2020.

At present, the maximum possible environmental pollution is possible at the moments of the maximum power intensity of the aircraft, at the initial stage of start and climb. Therefore, environmental studies show that the most polluted areas are adjacent areas in the area of airfields and in particular the runway.

The study of the modes of operation of the GTD in the initial stages makes it possible to determine not only the effective modes of operation of the power plant, but also their application with minimal environmental impact with respect to the maximum thrust of the aircraft. However, at present, the issue of the use of GTD LA and its modes of operation in the initial stages, with minimal emissions of

harmful substances into the environment is not sufficiently paid attention to in the literature or there is a limitation in the knowledge gained.

The results of the analysis show that civil and military aircraft have a negative impact on the environmental situation of airfields and airfields. The effect of aviation on the environment is pollution of the atmosphere by combustion products of aviation, road and other fuels, contamination of soil and groundwater with fuel and lubricants (emergency drains of fuel from planes, ducts during refueling, etc.), noise pollution and a number of other pollutants.

Aviation emissions occur through the use of jet fuel (kerosene) and aviation gasoline (for piston engines), which are used as fuel for aircraft. The main pollutants are those that result from the combustion (CO, CO<sub>2</sub>, hydrocarbons and nitrogen oxides, as well as SO<sub>2</sub> emissions, which depend on the sulfur level in the fuel). Other harmful substances that are released in relatively small concentrations are N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub>.

At present, the issues of man-made impact on the environment and health of people of aviation equipment (aircrafts, groundhandling facilities, etc.) of aerodromes stationed on the territory of Ukraine are being considered.

The problems of air pollution by aircraft engines are devoted to solving the works of Borisov NI, Zhestovskaya Yu. M., Ivanova VI, Tsunko NI.

In the writings of such scientists as Azarov SI, Averin GV, Belyavsky GO, Bondar OI, Bugor AN, Busigin BS, Vashchenko VM, Yemets M VA, Doll VI, Mashkov OA, Mokin VB, Petruk VG, Popov MO, Rudko GI, Sokolov YM, Tarariko OG ., Fedorovsky OD, Frolov VF, Chumachenko SM, Shapar AG, Shmandy VM, Shmatkov GG, and others formulated the basic principles of construction and operation of environmentally dependent support systems decision-making. However, at present, these systems do not fully meet the requirements of practice.

The analysis shows that the degree of development of research topics in the relevant subject area is not sufficiently high. This is primarily due to the lack of effective air monitoring technology in most regions of Ukraine, focused only on



building a network of different devices and sensors. Information from these sensors is transmitted to the decision maker, who, within the framework of an intuitive-empirical approach, makes a subjective conclusion about the impact of different natural-economic systems on the ecological state of the studied territory.

For this reason, the scientific task that is to assess the environmental impact of mobile technogenic objects on the environment through the example of gas turbine engines is urgent.

The theme of the dissertation and the results obtained correspond to the subject of scientific research in the direction of the National Report on the State of the Environment of Ukraine, which were performed at the State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management in accordance with the plan of scientific and research works: environmental monitoring using space sensing systems and GIS ”(0118U005461). In this work the author proposes a method of conducting ecological monitoring of airfield territories of Ukraine.

The purpose of the dissertation is to develop methods and algorithms for data processing in the information system for monitoring of environmental pollution in the areas of aerodromes by the products of combustion of aviation fuel from the GTD LA on the basis of verbal-numerical risk analysis to increase the validity of management decisions.

The scientific novelty of the obtained results is as follows.

For the first time:

- an algorithm for constructing an integrated environmental assessment of the environmental status of an aerodrome territory is proposed, characterized in that it is a weighted average geometric value and can be used for verbal-numerical analysis of environmental risk and taking into account the impact of aircraft turbine engines;

- an analytical model was obtained, characterizing the patterns of environmental impact depending on the modes of operation of aviation GTD on the basis of calculation of emissions of combustion products of aviation fuel,

which provides the possibility of carrying out environmental assessment to determine the level of environmental pollution in the aerodrome territory.

The scientific and methodological apparatus for the reduction of toxic substances by a slight modification of the existing combustion chambers and the restructuring of the combustion chambers has been improved.

A method for assessing the status of aerodrome complexes in the contamination of aviation fuel combustion products from aircraft GTD in the territory of aerodromes has been further developed, a distinguishing feature of which is the possibility of using the information subsystem of monitoring at the aerodrome territory for the subsequent analysis of ecological risk management in the environmental risk management system.

The practical significance of the obtained results allows to estimate the state of the environment and to analyze the data of emissions of combustion products of aviation fuel from the GTD of aircraft, which makes it possible to determine the effective mode of use of power plants LA.

The proposed scientific and methodological apparatus allows to calculate and determine the nature conservation measures, which can have a positive effect on the environment in the area of the aerodrome for environmental safety. Also, the developed scientific and methodological apparatus can be used in environmental assessment to determine the level of environmental pollution at the aerodrome, which is the basis for carrying out prognostic analysis and determining the level of environmental risks.

The results of the dissertation were implemented at the National Center for Space Management and Testing (act dated 04.12.2018), Flight Academy of National Aviation University, Kropyvnytskyi (act dated 22.01.2019), Research and Production Implementation Company “Geotechnology”, Kyiv (act of December 20, 2018), as well as in the educational process of SE “State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management” during the creation and teaching of a course of lectures, as well as in the environmental assessment of aerodrome territories (act of 19.06.2017. №13 / a).

The scientific results of the researches are a contribution to the theory of development of scientific methods of research of the complex estimation and forecasting of influence of technogenic pollution on environment and man.

A promising direction for further research is the creation of a system of environmental safety management in the airfield territories with the prediction of environmental risks and the support of management decisions.

**Key words:** aviation engineering, airfield, aviation transport, emissions, gas turbine engine, engine emission, environmental safety, environmental risk, environmental pollution, systematic approach, engine noise.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В. Напрями удосконалення системи екологічного моніторингу з застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів / Екологічні науки: науково-практичний журнал. К.: ДЕА, 2018. № 2 (21). С.22–29.

1. Китайчук И.Е., **Михеев В.С.** Прибор оперативного контроля информационных потоков «ALEX» / Технологические системы: Научно-технический журнал. – К.: 2001. – №5(11), с.12–14.

2. Кулик А.С., Симонов В.Ф., Пасичник С.Н., Сидоренко Н.Ф., Панов В.М., **Михеев В.С.** Разработка алгоритмов регулирования расхода топлива электронного регулятора ГТД / Научно-технический журнал: Вестник двигателестроения, №2, 2004, с.193–196.

3. Применение принципа структурной избыточности при проектировании САУ ГТД / Ю.Ф. Басов, И.Е. Китайчук, **В.С. Михеев**, В. М. Панов, Н.Ф. Сидоренко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 10(26). – С. 163–165.

4. Программно-технический комплекс для испытаний газотурбинных двигателей / **Михеев В.С.**, Китайчук И.Е., Жеребкина Т.Ф., Авраменко И.Е. / Радиоэлектронні і комп'ютерні системи, – 2007, №6(25), с. 120–122.

5. Определение коэффициента ПД-закона управления дозатором топлива из состава САУ ГТД / Китайчук И.Е., **Михеев В.С.**, Модиевский Е.А., Шийка А.Н. / Х.: НАКУ «ХАІ», – 2008, Вип. 9(56), с.138–142.

6. Особенности стартовой раскрутки ГТД с помощью встроенной вентильной электрической машины / Китайчук И.Е., **Михеев В.С.**, Модиевский Е.А., Остроумов Б.В. / Х.: НАКУ «ХАІ», – 2009, Вип. 8(65), с.143–147.

7. Присяжний В.І., **Міхеєв В.С.** Аналіз екологічного стану та напрямків впливу газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля / К.: ДЕА, 2019. – № 4(27), с. 5–11.

8. Міхеєв В.С. Розвиток теорії функціональної стійкості екологічних систем, як стійкості функціонала екологічної безпеки /Машков О.А., Жукаускас С.В., Нігородова С.А., Міхеєв В.С. / Екологічні науки: науково-практичний журнал / К.: ДЕА, 2019. – № 4(27), с. 62–77.

9. Бондар О.І., Машков О.А., **Міхеєв В.С.** Системний підхід щодо оцінювання екологічного впливу авіаційної техніки на стан довкілля / Екологічні науки: науково-практичний журнал / К.: ДЕА, 2020. – № 1(28), 2020, с. 191–200.

10. Mashkov O.A., **Mikheev V.S.**, Nigorodova S.A., Zhukauskas S.V. System support of ecological security of the ecosystem by creating a system of tips for making informational ecological decisions / Екологічні науки: науково-практичний журнал / К., ДЕА, 2020. – № 2(29), 2020, с. 133–142.

11. Бондар О.І., Машков О.А., **Міхеєв В.С.** Системний підхід щодо створення системи підтримки екологічних рішень для забезпечення екологічної безпеки держави / Екологічні науки: науково-практичний журнал. К.: ДЕА, 2020. – № 3(30), 2020, с. 30–38.

12. Бондар О.І., Машков О.А., **Міхеєв В.С.**, Жукаускас С.В., Нігородова С.А. Технологія побудови автоматизованої системи екологічного моніторингу з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів / Екологічні науки: науково-практичний журнал / К.: ДЕА, 2020.-№ 4(31), 2020, с. 11-19.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

13. **Міхеєв В.С.** Повышение отказоустойчивости регуляторов САУ / Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2004 / Тези доповіді. – Х. НАКУ «ХАІ». – 2004, – с.157.

14. **Михеев В.С.** Алгоритмы регулирования расхода топлива САУ ГТД / Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2004 / Тези доповіді. – Х. НАКУ «ХАІ». – 2004, – с.159.

15. **Михеев В.С.** Применение системного подхода для обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД / Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2005 / Тези доповіді. – Х. НАКУ «ХАІ». – 2005, – с.165.

16. **Міхеєв С.В.** Застосування інформаційних технологій для оцінювання емісії забруднюючих речовин авіадвигунів / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.– Херсон: Вид. ХНТУ, 2016., с. 178.

17. **Міхеєв С.В.** Environmental protection technology by changing the geometric characteristics of the combustion chamber, the zone distribution of fuel and the transfer of air from the compressor to the atmosphere / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.– Херсон: Вид. ХНТУ, 2017., с. 256.

18. **Міхеєв В.С.** Рубрикатор завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою космічних систем ДЗЗ та ГІС (нормативно-методичний документ) / Пашков Д.П., Бондар О.І., Машков О.А., Шевченко Р.Ю., Міхеєв В.С., Патлашенко Ж.І., Тимошенко М.М./ Київ, вид ДЕА, 2018. 26 с.

19. Машков О.А., Мамчур Ю.В., **Міхеєв С.В.** Сучасні проблеми управління екологічною безпекою з використанням пілотованих літальних апаратів / “Проблеми екологічної безпеки” XVI міжнародна науково-технічна конференція: Матеріали конференції — Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2018 с.65.

20. Міхеєв С.В. Assessment of surface air pollution on the technical position of aircraft preparation for departure / Збірка наукових праць: Інтелектуальні

системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.– Херсон: Вид. ХНТУ, 2018., с. 95.

21. **Міхєєв С.В.** Проблеми оцінювання екологічного впливу мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля на прикладі газотурбінних двигунів / Матеріали науково-технічної конференції “Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу” м. Київ, ДЕА, 24–25 квітня 2018 р., с. 20.

22. Машков О.А., **Міхєєв С.В.** Проблеми математичного моделювання та застосування методів механіки для забезпечення екологічної безпеки складних об'єктів / Матеріали Міжнародної наукової конференції присвяченої 100-річчю Національної академії наук України: «Мікро- та нанонеоднорідні матеріали: моделі та експеримент», Львів, Україна, «Растр-7», 17–18 вересня 2018, с. 16–18.

23. Бондар О.І., Машков О.А., **Міхєєв С.В.** Актуальні проблеми удосконалення системи управління екологічною безпекою при транскордонних екологічних конфліктах / 5-й Міжнародний конгрес “Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування”: збірник матеріалів. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 1 електр. опт. диск (DVD). Львів, 26–29 вересня 2018, с.85.

24. **Міхєєв С.В.** Інформаційні технології оцінки екологічної безпеки навколишнього середовища в районах аеродромів України / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон: Вид. ХНТУ, 2019., с. 89.

25. **Міхєєв С.В.** Сучасні технології визначення забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів / Матеріали 3 Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації»,

Державний університет телекомунікацій МОН України, 11–12 квітня 2019 р., с.68;

26. **Міхєєв С.В.** Екологічна оцінка впливу аеродромних комплексів на природне середовище приаеродромній території / Матеріали науково-технічної конференції «Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу» м. Київ, ДЕА, 24–25 квітня 2019 р., с.49;

27. Бондар О.І., Машков О.А., **Міхєєв В.С.** Системний підхід до визначення та усунення екологічних загроз та ризиків України /Актуальні питання техногенної безпеки України: Матеріали II Всеукраїнської наукової конференції. Миколаїв: Видавець Торубара В.В., 2020. – с. 155–160.



**ЗМІСТ**

АНОТАЦІЯ	2
ANNOTATION	7
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА	12
ЗМІСТ	17
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	20
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ТА НАПРЯМКІВ ВПЛИВУ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ НА СТАН ДОВКІЛЛЯ	36
1.1. Визначення загроз впливу газотурбінних двигунів на стан навколишнього природного середовища в районі аеродрому	37
1.2. Аналіз властивостей газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів щодо оцінювання стану довкілля	43
1.3. Основні властивості токсичних речовин під час викидів відпрацьованого авіаційного палива	63
1.4. Постановка наукового завдання та шляхи його розв'язання	68
Висновки по розділу 1	71
РОЗДІЛ 2 РОЗВИТОК НАУКОВО-МЕТОДИЧНОГО АПАРАТУ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ	74
2.1. Особливості впливу забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля	74
2.2. Оцінка режимів роботи двигунів мобільних техногенних об'єктів та їх вплив на навколишнє природне середовище	90
Висновки по розділу 2	99
РОЗДІЛ 3 ЕКОЛОГІЧНІ НАПРЯМИ ЗМЕНШЕННЯ ВИХОДУ ТОКСИЧНИХ СПОЛУК ШЛЯХОМ ВНЕСЕННЯ ЗМІН ДО ЗАХОДІВ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ І ПАЛИВА	102

3.1. Екологічний напрям удосконалення камер згоряння в газотурбінних двигунах за рахунок вихрових потоків	103
3.2. Екологічний напрям удосконалення камери згоряння з вихровими модулями	110
3.3. Екологічний захід - використання в камерах згоряння вихрових пневматичних і акустичних	119
3.4. Технологія захисту довкілля шляхом змін геометричних характеристик камери згоряння, зонний розподіл палива і перепуск повітря з компресора в атмосферу	122
3.5. Технологія захисту довкілля при використанні каталітичної камери згоряння	124
3.6. Технологія захисту довкілля шляхом застосування присадок до палива	132
Висновки по розділу 3	138
РОЗДІЛ 4 ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ АЕРОДРОМНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ПРИАЕРОДРОМНОЇ ТЕРИТОРІЇ	142
4.1. Оцінювання забруднення приземного шару атмосфери на технічній позиції підготовки повітряних суден до вильоту	142
4.2. Алгоритм програми побудови інтегральної екологічної оцінки станів приаеродромних територій	168
4.3. Оцінка екологічної безпеки навколишнього середовища в районах аеродромів України	186
4.4. Науково-практичні рекомендації щодо побудови системи управління екологічною безпекою приаеродромних територій	194
Висновки по розділу 4	201
ВИСНОВКИ	207
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	210

ДОДАТОК А – СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ	225
ДОДАТОК Б – АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ	230
ДОДАТОК В – ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ТА РУЙНАЦІЯ ОЗОНОВОГО ШАРУ	236
ДОДАТОК Г – ІНФРАСТРУКТУРА АЕРОПОРТІВ ТА КАРТА ПОВІТРЯНИХ МАРШРУТІВ В УКРАЇНІ	238

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

- ВЗ – високе забруднення
- ГДК – гранично допустима концентрація
- ГТДУ – газотурбінна двигунова установка
- ГТД – газотурбінний двигун
- ЕОМ – електронно обчислювальна машина
- ЗПЦ – злітно-посадковий цикл
- ЗР - забруднюючі речовини
- ІЗА – індекс забруднення атмосфери
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- ЛА– літальний апарат
- ПАВ – поліциклічні ароматичні вуглеводні
- ППС – паливо-повітряна суміш
- ПП – пусковий пристрій
- ПС – повітряне судно
- ПРАТ– приаеродромна територія
- ЦА – цивільна авіація
- ЦЗП – централізована заправка паливом

## ВСТУП

### Обґрунтування вибору теми дослідження

Як свідчать дослідження у теперішній час найбільше забруднення навколишнього природного середовища відбувається в зоні аеропортів (аеродромів) під час посадки і зльоту літаків, а також прогріву їх двигунів. При роботі двигунів на зльоті і посадці в навколишнє середовище надходить найбільша кількість оксиду вуглецю і вуглеводневих сполук, а в процесі польоту – максимальна кількість оксидів азоту. Реактивному лайнеру, який робить трансатлантичний переліт, потрібно від 50 до 100 т цього газу [110, 111, 114].

На території аеродрому здійснюється запуск двигунів, рулювання, зліт і посадка літаків, при яких в атмосферу надходять шкідливі продукти вихлопів авіаційних двигунів, попереднього старту (місце очікування) і на злітно-посадковій смузі. Доріжки для руління вважаються ділянками помірного виділення газу внаслідок короткочасності перебування на них літаків. Концентрація шкідливих складових відпрацьованих газів авіадвигунів у повітрі і швидкість їх поширення на території аеродрому значною мірою залежать від метеорологічних умов [19, 25, 36, 52].

При цьому найбільш чітко простежується вплив напрямку і швидкості вітру. Інші фактори – температура і вологість повітря, сонячна радіація, яка хоча і впливає на концентрацію забруднювачів, проте цей вплив виражений менш яскраво і має більш складну залежність. Застосування газотурбінних двигунів в авіації та ракетобудуванні дійсно величезне. Вихлопні гази газотурбінних двигунових установок (ГТДУ) містять такі токсичні компоненти CO, NO<sub>x</sub>, вуглеводні, сажу, альдегіди тощо. Дослідження складу продуктів згоряння двигунів, що встановлені на літаках, показали, що вміст токсичних складових у продуктах згоряння істотно залежить від режиму роботи двигуна. Високі концентрації CO та СН характерні для ГТДУ на знижених режимах (холостий хід, рулювання, наближення до аеропорту,

захід на посадку), тоді як вміст оксидів азоту NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) суттєво зростає при роботі на режимах, які близькі до номінального (зліт, набір висоти, польотний режим) [37-39, 42, 49].

Авіаційна промисловість розвивається стрімко і невпинно, використовуючи всі останні досягнення науково-технічного прогресу, і разом з нею відповідно до зростаючих потреб економіки, бізнесу і населення розвивається міжнародний ринок авіаційних послуг. Розвиток технологій побудови газотурбінних двигунів (ГТД) дозволяє підвищувати експлуатаційні характеристики авіаційної техніки [2, 8, 51, 55]. Основою силових установок літальних апаратів (ЛА) є те, що рушійна сила створюється ними за рахунок безперервного відкидання або викидання в навколишнє середовище робочим тілом рушіїв в газоподібному стані [94, 97, 104]. Це визначає властивості протікання фізичних і енергетичних процесів, які відбуваються в двигунах і рушійних на основі їх конструктивних особливостей енергетичних установок. При цьому відбувається забруднення навколишнього середовища викидами токсичних сполук, основними з яких є: окису вуглецю, диму, незгорілих вуглеводнів і окислів азоту, що утворюються в камерах згоряння турбінних повітряно-реактивних двигунів [30, 31].

Аналіз літератури показав, що максимально можливе забруднення навколишнього середовища можливо в моменти граничної силової напруженості повітряного судна, на початковому етапі старту і набору висоти. Тому проведені дослідження екологів свідчать, про те, що найбільш забрудненими ділянками є прилеглі території в районі аеродрому і зокрема злітно-посадкової смуги [15, 16].

У зв'язку з цим на сьогоднішній день Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО) починаючи з 1977 року публікує Міжнародні стандарти щодо норм на емісію повітряно-реактивних двигунів, застосування і дотримання яких призводить до зменшення викидів токсичних сполук [71, 98, 103, 126, 127, 135].

Відпрацювання запуску ГТД і його експлуатація на ранніх етапах використання в міру розвитку процесів, що протікають під час роботи двигунів, вимагає формувати підходи до прогнозування пускових властивостей ГТД (в тому числі і закладці пускових властивостей на стадії проектування) і відповідного вибору режимів роботи пускової системи силових установок ЛА. Дослідження режимів роботи ГТД на початкових етапах дає можливість визначити не тільки ефективні режими роботи силової установки, а й застосування їх з мінімальним впливом на навколишнє середовище щодо максимальної тяги ЛА. Тим не менш, у даний час, питання застосування ГТД ЛА і режимів його роботи на початкових етапах за умови мінімальних викидів в навколишнє середовище шкідливих речовин не досить приділено уваги в літературі або є обмеження в отриманні знання [12, 33, 53].

У 2018 році перевезення пасажирів здійснювала 21 вітчизняна авіакомпанія, серед яких лідируюче положення займали авіакомпанії «Міжнародні Авіалінії України», «Роза вітрів», «Азур Ейр Україна», «ЯнЕйр» та «Браво». За підсумками року п'ятьма найбільшими пасажирськими авіакомпаніями перевезено 11620,6 тис. осіб, що на 20,2 % більше, ніж за 2017 рік, та складає майже 93 % від загальних обсягів пасажирських перевезень українських авіакомпаній [120, 126, 127, 135].

Більше половини (54,2 %) всіх пасажирських перевезень вітчизняних авіакомпаній складають міжнародні регулярні перевезення. В той же час мало місце розширення діяльності на українському ринку іноземних авіакомпаній, до України започаткували виконання регулярних польотів 5 нових іноземних авіакомпаній. 2018 рік відзначився також розвитком маршрутної мережі іноземних авіакомпаній, якими розпочато експлуатацію 27 міжнародних повітряних ліній. Загалом упродовж 2018 року до нашої країни виконували польоти 38 іноземних авіакомпаній з 37 країн світу. Їх послугами скористались 6857,3 тис. пасажирів, що на 37,8 % більше, ніж за 2017 рік та складає 50,2 % загального обсягу регулярних пасажирських перевезень між Україною та країнами світу [135].

У теперішній час продовжується активізація регулярних перевезень у межах України. Внутрішні пасажирські перевезення на регулярній основі виконували чотири вітчизняні авіакомпанії, які забезпечили повітряним сполученням десять міст України. За 2018 рік перевезено 1071,4 тис. авіапасажирів, що на 15,1 % більше, ніж за попередній 2017 рік. При цьому, середній коефіцієнт зайнятості пасажирських крісел на внутрішніх регулярних рейсах зріс з 73,5 % за 2017 рік до 79,3 % за 2018 рік [81, 99, 135].

Комерційні рейси вітчизняних та іноземних авіакомпаній обслуговували 20 українських аеропортів та аеродромів. За звітний період загальна кількість відправлених та прибулих повітряних суден склала 182,8 тисяч одиниць, що на 14,3 % перевищує показник за 2018 рік.

При цьому пасажиропотоки через аеропорти України, перевищивши 20-мільонний рубіж, досягли 20545,4 тис. чоловік, що забезпечило зростання на 24,5 %. Поштовантажопотоки збільшились на 7,8 % та становили 56,4 тис. тонн. За статистичними даними за підсумками 2018 року мало місце суттєве зростання кількості обслугованих пасажирів в усіх основних аеропортах: Київ (Жуляни) (на 51,9 %), Львів ( на 47,9 %), Бориспіль (на 19,4 %), Харків (на 19,3 %), Одеса (на 17,8 %), Запоріжжя (на 14,9 %) та Дніпропетровськ (на 8,1 %). Також значний приріст пасажиропотоків було зафіксовано в аеропортах міст Чернівці (на 53 %) та Херсон (на 41,8 %) [135].

Слід зауважити, що на сьогодні майже 98 % загальних пасажиропотоків та 99 % поштовантажопотоків сконцентровані в 7 аеропортах країни – Бориспіль, Київ (Жуляни), Львів, Одеса, Харків, Запоріжжя та Дніпропетровськ. Але разом з розвитком авіаційної галузі посилюється її вплив на навколишнє середовище.

За даними Державної авіаційної служби України рухомий склад парку літаків і вертольотів на кінець 2018 року налічував 205 одиниць. При цьому вплив на довкілля авіаційного транспорту характеризується наступними особливостями:



- збільшення інтенсивності польотів; зменшення максимальних рівнів шуму від прольоту літаків цивільної авіації за рахунок поліпшення акустичних характеристик двигунів і планера;

- збільшилась наближеність житлової забудови до території аеропортів; збільшилася кількість скарг населення на шум авіаційного транспорту;

- здійснюється неконтрольована забудова прилеглих до аеропортів територій.

Основними проблемами негативного впливу авіаційного транспорту на навколишнє середовище є:

- забруднення атмосферного повітря, ґрунтів, водних об'єктів через викиди шкідливих речовин з авіадвигунів та стаціонарних джерел;

- шумове забруднення;

- електромагнітне випромінювання;

- шкідливий вплив на навколишнє середовище при будівництві об'єктів транспортної інфраструктури;

- негативний вплив на довкілля при перевезенні небезпечних і радіоактивних речовин, у т.ч. аварійні забруднення через використання неякісної, застарілої техніки.

З метою зменшення негативного впливу діяльності авіації на атмосферне повітря, а саме викидів парникового газу CO<sub>2</sub> Україна приєдналася до Системи компенсації та зменшення викидів CO<sub>2</sub> для міжнародної авіації (CORSIA) відповідно 39-ї Асамблеї Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) [71, 72, 98].

Пункт 5 резолюції 39-3 Асамблеї постановляє запровадити глобальну схему Ринкових заходів у вигляді Схеми вуглецевих компенсацій і скорочення міжнародної авіації (CORSIA) для розгляду будь-якого щорічного збільшення загальних викидів CO<sub>2</sub> від міжнародної цивільної авіації (тобто польотів цивільної авіації, які відправляються від одної країни і прибувають в іншу країну) вище рівня 2020 року з урахуванням особливих обставин і відповідних можливостей.

Відповідно до Резолюції Асамблеї ІКАО, середній рівень викидів CO<sub>2</sub> від міжнародної авіації, охоплений схемою в період з 2019 по 2020 рік, є основою для вуглецево-нейтрального зростання з 2020 року, в порівнянні з яким порівнюються викиди в майбутньому. У будь-який рік з 2021 року, коли викиди CO<sub>2</sub> від міжнародної авіації, охоплені схемою, перевищують середні базові викиди 2019 і 2020 років, ця різниця є компенсуючими потребами сектора в цьому році.

Виходячи з того, що Україна як держава-учасниця ІКАО бере добровільну участь у експериментальному (2021-2023 рр.) та першому (2024-2026 рр.) етапах програми CORSIA, це призводить до необхідності розпочати моніторинг емісії від міжнародних польотів українських експлуатантів з січня 2019 року.

Наразі забезпечується базовий підготовчий етап реалізації програми CORSI, в тому числі впровадження системи моніторингу, звітності та верифікації (MRV) для українських експлуатантів (авіакомпаній).

Метою забезпечення екологічної безпеки цивільної авіації по суті є мінімізація шкідливих наслідків її діяльності шляхом дотримання рівноваги між нанесеною природному середовищу шкодою внаслідок здійснення авіаційної діяльності та можливостями природного середовища у самовідновленні.

Перед експлуатантами аеродромів стоять вимоги, щодо забезпечення безпеки польотів та охорони навколишнього середовища, а саме впровадження системи екологічного менеджменту (СЕМ) у відповідності до міжнародного стандарту ДСТУ ISO 14001:2015.

Дана програма має містити інформацію, щодо: впливу на атмосферне повітря; впливу на ґрунти; впливу на водні об'єкти; поводження з відходами; параметричне забруднення (шум, вібрація).

У теперішній час розглядаються питання про техногенний вплив на навколишнє середовище і здоров'я людей авіаційної техніки (літальних

апаратів, засобів наземного обслуговування та ін.) аеродромів, дислокованих на території України.

У працях таких вчених, як Азаров С.І., Аверін Г.В., Белявський Г.О., Бондар О.І., Бугор А.Н., Бусигін Б.С., Ващенко В.М., Ємець М.А., Лялько В.І., Мальований М.С., Машков О.А., Мокін В.Б., Петрук В.Г., Рудько Г.І., Соколов Ю.М., Тараріко О.Г., Треснюк В.Н., Фролов В.Ф., Чумаченко С.М., Шапар А.Г., Шмандій В.М., Шматков Г.Г., і інших сформульовані основні принципи побудови і функціонування систем екологічного моніторингу.

Вирішенню питань забруднення атмосфери двигунами літальних апаратів присвячені роботи таких вчених, як Авдєєв Б.В., Аксєнов І.Я., Арутюнова А.К., Афанасьєв Ю.А., Безугла Е.Ю., Болбас М.М., Борисов Н.І., Голубєв І.Р., Голубєв Н.В., Гончар Л.Л., Дзюбенко О.Л., Єненков В.Г., Жегалін О.І., Запорожець О.І., Ісаєнко В.М., Квитка В.Є., Колесов А.В., Кулік М.С., Лупачев П.Д., Малахов Л.П., Маслов В.А., Мельников Б.М., Новиков Ю.В., Ноздрін В.І., Павлов Е.І., Панін В.В., Спиридонов Е.Г., Терещенко Ю.М., Фомин С.А., Франчук Г.М. та інші. Однак в даний час ці системи не в повній мірі відповідають вимогам практики.

Питання просторового формування рівнів забруднення навколишнього повітряного середовища в районі аеродромів газоподібними викидами літальних апаратів розглядалися в роботах Єненкова А. Г., Квітки В. Є., Мельникова Б. Н., Барретга М., Сміта, Іванова В. І. та ін. Проведений аналіз свідчить, що завдання прогнозування забруднення навколишнього повітряного середовища приаеродромної території шкідливими викидами і шумами від повітряних суден не вирішені остаточно. Тому математичні моделі оцінювання екологічного впливу мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля на прикладі газотурбінних двигунів потребують корекції і розвитку.

У науковій літературі питанню запуску ГТД присвячено досить багато робіт [1, 57, 58], в яких розкриваються особливості побудови і експлуатації силових установок і їх елементів в різних режимах авторотації. Питанням

ефективної роботи авіаційних ГТД, в тому числі і визначення їх пускових властивостей присвячені роботи [14, 24, 62, 63, 139], в яких розглядаються експлуатаційні обмеження характеристик і параметрів авіаційних силових установок з ГТД, а також основні закони їх керування.

Причини утворення шкідливих газоподібних речовин на різних режимах роботи в двигунах внутрішнього згорання пов'язані з особливостями конструкції двигунів з іскровим запалюванням і дизельних двигунів. В даний час аналіз і класифікація методів оцінки негативного впливу літакових і автомобільних двигунів на навколишнє середовище здійснюються за трьома основними групами: лабораторно-інструментальними, органолептичними і розрахунковими.

Аналіз стану вивченості впливу аеродромних комплексів на навколишнє середовище та розглянуті питання вивченості ступеня забруднення навколишнього середовища повітряним транспортом, засвідчив, що викиди від авіадвигунів представляють один з аспектів впливу повітряного транспорту на екологічну ситуацію. Авіація має ряд відмінних рис у порівнянні з іншими видами транспорту: підвищене споживання кисню, шумове забруднення тощо. Це зумовило науковий і практичний інтерес до вирішення даної проблеми. У роботах Є.І. Павлова, І.Р. Голубєва і Ю.В. Новикова, В.Г. Єсенкова, В.Е. Квітки, Б.Н. Мельникова розглядаються питання забруднення земель аеропортів [52, 89, 110, 111, 114]. Із зарубіжних авторів слід виділити роботи Баррета, Ж. Крайстона та інших. Хоча сумарний викид забруднюючих речовин двигунами літаків відносно невеликий (для міста, країни), в районі аеродромного комплексу ці викиди вносять певний внесок у забруднення середовища. Авіаційні двигуни при посадці і зльоті викидають добре помітний на око шлейф диму. Значна кількість домішок в аеродромних комплексах викидають і наземні пересувні засоби такі, як автомобілі-заправники, що періодично під'їжджають і від'їжджають, частка яких становить за СО – 88%;  $H_nC_m$  – 5-10%;  $NO_x$  – 30%; а за аерозолями – 2–3% від загального обсягу викидів. Дослідження останніх років показали,

що забруднення повітря в районах великих аеродромних комплексів, що виникають в результаті викиду шкідливих речовин, що утворюються при роботі авіадвигунів, можна порівняти з забрудненням, що спостерігається в центрі міст з високим ступенем розвитку промисловості і транспорту. З продуктів неповного згоряння найбільш токсичними і значними в кількісному відношенні є чадний газ і незгорілі вуглеводні. Крім цих речовин, в атмосферу аеродромного комплексу надходять значні кількості оксидів азоту – продуктів окислення азоту повітря в камері згоряння двигуна. Для мінімізації впливу автотранспорту на прилеглі землі при проектуванні аеродромних комплексів використовують кліматичний потенціал забруднення, який визначається, в основному, умовами стратифікації атмосфери.

Забезпечення екологічної безпеки або дотримання екологічних норм в районах аеродромів в літературі також розгляд обмежений, що ускладнює провести оцінку характеру впливу на екосистему. Це пов'язано з тим, що на сьогоднішній день недостатньо проводяться дослідження і приділяється увага в області екології в районі аеродромів, що також призводить до необхідності вивчення даного напрямку [83-88, 99]. Тому дослідження пов'язані з можливою оцінкою стану навколишнього середовища в районі аеродромів, є актуальним напрямком пов'язаним з пошуком шляхів зменшення шкідливих виділень з відпрацьованими газами, що стало невідкладним завданням сьогодення. При цьому, особливо необхідно приділити увагу питанню оцінки виділення шкідливих речовин ГТД ЛА в екосистему. Таким чином, виникає актуальне наукове завдання, яке пов'язане з розвитком науково-методичного апарату для проведення екологічного оцінювання впливу ГТД ЛА на навколишнє середовище, що пов'язане з забрудненням атмосфери продуктами згоряння авіаційного палива.

**Ідея дисертаційної роботи** полягає в розкритті особливостей удосконалення системи управління екологічною безпекою при оцінюванні

екологічного впливу мобільних техногенних об'єктів на стан приаеродромних територій на прикладі газотурбінних двигунів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертації є розроблення методів і алгоритмів оброблення даних в інформаційній системі моніторингу забруднення навколишнього середовища в районах аеродромів продуктами згорання авіаційного палива від ГТД ЛА на основі вербально-числового аналізу ризику для підвищення обґрунтованості прийняття управлінських рішень.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні *часткові завдання* дослідження:

– проаналізувати стан екологічної безпеки аеродромів та визначити основні продукти згорання авіаційного палива від ГТД ЛА, що впливають на стан довкілля;

– дослідити сучасні режими роботи та перспективні напрямки удосконалення ГТД ЛА для зменшення викидів продуктів згорання авіаційного палива;

– розробити науково-методичний апарат оцінки забруднюючих речовин і просторового розподілу його концентрації в приземному шарі повітря в умовах атмосферного перенесення продуктів згорання від ГТД повітряних суден;

– експериментально дослідити та оцінити рівень забруднення атмосфери продуктами згорання авіаційного палива на території аеродромів;

– розробити науково-практичні рекомендації щодо використання природоохоронних заходів і пропозиції спрямовані на підвищення якості екологічного моніторингу забруднення атмосфери на території аеродрому.

*Об'єкт дослідження* – процес викидів продуктів згорання в ГТД повітряних суден.

*Предмет дослідження* – моделі та методи оцінювання викидів продуктів згорання від ГТД повітряних суден.

**Методи дослідження.** Проведені теоретичні дослідження базуються на сучасних теоріях: системний підхід з аналітичними методами дослідження; теорії автоматичного керування, оптимального управління та прийняття оптимальних рішень. На етапі проведення експериментальних досліджень використовувались методи: експертних оцінок, статистичного оброблення даних та математичного модулювання.

Тематика роботи відповідає наступним пунктам паспорту спеціальності 21.06.01 – екологічна безпека: п. 2. «Розробка наукових методів дослідження комплексної оцінки та прогнозування впливу техногенного забруднення на навколишнє середовище та людину», п. 5. «Розробка систем екологічного моніторингу й техногенно-екологічної безпеки регіонів, окремих екосистем. Заходи стабілізації та поліпшення стану довкілля».

**Достовірність наукового результату** підтверджується застосуванням сучасних розрахунково-експериментальних методів, дослідом практичного впровадження розробок автора та можливістю проведення аналізу отриманих за результатами впровадження даних. Отримані в роботі результати є логічними та відповідають міжнародній практиці забезпечення екологічної безпеки при використанні газотурбінних двигунів у відповідності до Основних засад (стратегії) державної екологічної політики України на період до 2030 року.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в розкритті особливостей та закономірностей розроблення методів і алгоритмів оброблення даних в інформаційній системі моніторингу забруднення навколишнього середовища в районах аеродромів продуктами згорання авіаційного палива від ГТД ЛА на основі вербально-числового аналізу ризику для підвищення обґрунтованості прийняття управлінських рішень. При цьому:

– запропоновано алгоритм побудови інтегрального екологічного оцінювання стану навколишнього середовища ПРАТ, який відрізняється тим, що в ньому екологічна оцінка є середньозваженою геометричною величиною

і може застосовуватися для вербально-числового аналізування екологічного ризику та враховує вплив газотурбінних двигунів літальних апаратів;

– отримано аналітичну модель, яка характеризує закономірності впливу на стан довкілля в залежності від режимів роботи авіаційних ГТД на основі розрахунку викидів продуктів горіння авіаційного палива, що надає можливість проведення екологічного оцінювання для визначення рівня забруднення навколишнього середовища на ПРАТ;

– удосконалено науково-методичний апарат зниження викидів токсичних речовин шляхом незначної модифікації існуючих камер згоряння та їх перебудови;

– отримав подальший розвиток метод оцінювання стану аеродромних комплексів при забрудненні продуктами горіння авіаційного палива від ГТД повітряних суден на території аеродромів, відмінною рисою, якого є можливість застосування інформаційної підсистеми моніторингу ПРАТ для подальшого аналізу прогнозування екологічних ризиків в системі управління екологічною безпекою ПРАТ.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що в роботі запропоновано методи, моделі, алгоритми, що дозволяють оцінювати стан навколишнього середовища та аналізувати дані викидів продуктів горіння авіаційного палива від ГТД повітряних суден, що дає можливість визначитися з ефективним режимом застосування силових установок ЛА. Запропонований науково-методичний апарат дозволяє розрахувати та визначитися з природоохоронними заходами, що може позитивно впливати на стан довкілля в районі аеродрому для забезпечення екологічної безпеки. Також розроблений науково-методичний апарат може бути застосовано при проведенні екологічного оцінювання для визначення рівня забруднення навколишнього середовища на території аеродрому, що є підґрунтям для здійснення прогностичного аналізу та визначення рівня екологічних ризиків.

Впровадження отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи впроваджені у Національному центрі управління та випробувань космічних



засобів (акт від 04.12.2018 р.), Льотній академії Національного авіаційного університету, м. Кропивницький (акт від 22.01.2019 р.), Науково-виробничій впроваджувальній фірмі «Геотехнологія», м. Київ (акт від 20.12. 2018 р.), а також у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління Міністерства екології природних ресурсів України, м. Київ (акт від 26.12. 2018 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Головні результати теоретичних та експериментальних досліджень, представлених у дисертаційній роботі, наведені у наукових працях, поданих у списку робіт [1–27], з них [12–16] одноосібно. З наукових праць, опублікованих у співавторстві використано лише ті ідеї і положення, що є результатом особистого дослідження. Особисто автором у роботах, опублікованих за співавторства було: проаналізовано стан екологічної безпеки аеродромів та визначено основні продукти згоряння авіаційного палива від ГТД ЛА, що впливають на стан довкілля [4, 7, 24, 25]; досліджено сучасні режими роботи та перспективні напрямки удосконалення ГТД ЛА для зменшення викидів продуктів згоряння авіаційного палива [1–3, 6]; розроблено науково-методичний апарат оцінювання забруднюючих речовин і просторового розподілу їх концентрації в приземному шарі повітря в умовах атмосферного перенесення продуктів згоряння від ГТД повітряних суден [11, 17, 19, 20, 22, 26]; експериментально досліджено та оцінено рівень забруднення атмосфери продуктами згорання авіаційного палива на території аеродромів [5, 10]; розроблено науково-практичні рекомендації щодо використання природоохоронних заходів і пропозиції спрямовані на підвищення якості екологічного моніторингу забруднення атмосфери на території аеродрому [8, 9, 18, 21, 23, 27].

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 15 наукових конференціях та семінарах: Міжнародній науково-технічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2004, ІКТМ 2005, Х. НАКУ «ХАІ». – 2004, 2005 рр; Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми

обчислювального інтелекту», (ХНТУ), Залізний Порт Херсонська обл., 2016–2019 рр.; III Міжнародній науково-практичній конференції «Стандартизація, сертифікація, метрологія та менеджмент»: тези доповідей, К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017р.; Круглому столі «Екологічні проблеми військового сектору України та шляхи їх вирішення в умовах Євроатлантичної інтеграції» в Інформаційно-просвітницькому Орхуському центрі ДЕА «Системне вирішення проблем екобезпеки Збройних Сил у розрізі євроатлантичної інтеграції», м. Київ, 22.02.2018 р., X Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації», м. Київ, 12-13 квітня 2018 р., Державний університет телекомунікацій; Науково-технічній конференції «Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу» м. Київ, ДЕА, 24-25 квітня 2018 р.; II Міжнародній науково-практичній конференції «Інфраструктура якості і: перспективи та тенденції розвитку», 6 червня 2018, м Київ, (ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості»); Науково-практичному семінарі «Сучасні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу», м. Київ, ДЕА, 27 листопада 2017 р.; XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки», Кременчук, 4–7 жовтня 2018р.; Науково-практичному семінарі «моніторинг еколого-небезпечних явищ та процесів», 9 квітня 2019, м. Київ, ДЕА; 3 Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації», Державний університет телекомунікацій МОН України, 11–12 квітня 2019 р.; Науково-технічної конференції «Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу» м. Київ, ДЕА, 24–25 квітня 2019 р.; II Всеукраїнській науковій конференції «Актуальні питання техногенної безпеки України», Миколаїв, 18–19 вересня 2020 р., а також на постійно діючому науковому семінарі Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління за період 2015–2020 рр.

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 27 наукових праць. Основні наукові положення викладено в 12 наукових статтях [1–12], які опубліковані у спеціалізованих фахових виданнях. За матеріалами

виступів на науково-технічних конференціях опубліковано 16 тез доповідей [13–27].

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи 244 сторінок, у тому числі: 175 сторінок друкованого тексту (145 сторінок основного тексту, 30 окремих сторінок з рисунками і таблицями), анотація на 10 сторінках, список використаних джерел на 15 сторінках (144 найменувань), додатки на 20 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ТА НАПРЯМКІВ ВПЛИВУ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ НА СТАН ДОВКІЛЛЯ

Незалежно від системи запалювання паливо-повітряної суміші в камері згоряння ГТД (якщо це електричні іскрові системи, або електричні плазмові або лазерні системи) від неї залежить особливості режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння, а також викидів продуктів згоряння авіаційного палива [3, 13, 105].

На сьогодні вже в достатній мірі вивчені принципи їх роботи, вплив на високу питому потужність і можливість ефективного використання силової тяги за рахунок об'єднання декількох функцій таких як джерела обертаючого моменту в процесі запуску і бортового джерела живлення в процесі польоту при режимній роботі ГТД. При цьому, основними напрямками досліджень запуску ГТД ЛА є вивчення режимів роботи і моделювання газотурбінних двигунів в умовах наземного і польотного запусків, запуску з авторотації, а також дослідження характеристик вузлів ГТД в області запуску [58, 139].

Крім цього, на сучасному етапі розвитку суспільства цікавлять питання пов'язані з викидом продуктів згоряння авіаційного палива і їх вплив на навколишнє середовище. В даному випадку залишається пріоритетним напрямком вивчення ступеня впливу продуктів згоряння авіаційного палива при викиді з ГТД ЛА і можливість визначення складових продуктів згорання. Тому в розділі проводиться аналіз екологічної обстановки в районі аеродромів, а також визначаються напрямки досліджень ступеня впливу газотурбінних двигунів на навколишнє середовище [82–88].

## **1.1. Визначення загроз впливу газотурбінних двигунів на стан навколишнього природного середовища в районі аеродрому**

Основним елементом аеропорту є аеродром, призначений для зльоту і посадки літальних апаратів і обладнаний рядом споруд призначених для рулювання, а також розміщення і обслуговування повітряних суден (ПС) [52, 65]. Аеродром є складним наземним об'єктом і крім періоду його експлуатації на ньому в разі потреби можуть проводитися різні види робіт, включаючи: будівельні, авто- і авіаремонтні з повним циклом життєзабезпечення. Паралельно з виконанням даних робіт на території аеродромів здійснюється максимальне навантаження антропогенного впливу на навколишнє середовище [110, 111, 114].

Таким чином, на етапі функціонування і експлуатації даних об'єктів має місце забруднення повітряного середовища на всій території аеродрому, порушення балансу ґрунтових вод, забруднення ґрунтових та поверхневих вод стоками, нафтопродуктами і хімічними реагентами, знищення родючого шару ґрунту, вплив на окремі види рослинного і тваринного світу [11, 15, 16].

Забруднення навколишнього середовища на території аеродрому може здійснюватися різними джерелами. Найбільше забруднення отримує атмосфера повітря в результаті викиду шкідливих речовин [17, 18]:

в енергетичних установках, котельнях, при надходженні паливно-мастильних матеріалів на засоби заправки і склади, дренажному викиді палива з паливних систем ПС;

при експлуатації житлово-побутових комплексів і службово-технічної забудови, систем тепло- і водопостачання, підсобних господарств;

в результаті діяльності авіаційно- і авторемонтних частин, автопарків, складів постачальних служб, зон розосередження авіаційної техніки;

при експлуатації всередині під'їзних шляхів, пункту розвантаження та складування майна і сипучих матеріалів, трубопроводів;

при згорянні палива в авіаційних двигунах ПС, двигунах спеціального автотранспорту.

Вплив розглянутих вище джерел забруднення носить періодичний характер і досягає найбільших параметрів в період інтенсивних польотів ПС. Найбільш інтенсивно в атмосферу аеродрому надходять продукти неповного згорання палива в авіаційних двигунах ПС в результаті наземних операцій на різних режимах [64, 79].

Встановлено що емісія забруднюючих речовин (ЗР) авіадвигунів може досягати більше 70% від загального обсягу забруднення в районі аеродрому. Авіаційний двигун, що працює в режимі максимальних обертів, є потужним джерелом забруднення для дихання людей. При цьому, особливостями його є сильно перегрітий по відношенню до навколишнього повітря і спрямований горизонтально реактивний струмінь. В результаті високої швидкості витікання продуктів згорання з сопла авіаційного двигуна і температурному перегріву, в результаті якого відбувається підйом реактивного струменя, ЗР переносяться на великі відстані [60, 107].

Поряд з продуктами згорання авіаційні двигуни ПС, в процесі наземної підготовки до польотів, є джерелами інтенсивного пилоутворення. Аеродромні покриття, крім навантажень від злітної маси літаків і впливу природнокліматичних факторів, піддаються додатковим впливам тиску газових струменів, високотемпературного нагрівання і агресивного хімічного впливу незгорілого палива.

Процес струменевої ерозії є спільна дія швидкісного і температурного потоків на поверхню покриття. Підвищені температури послаблюють структурні зв'язки в матеріалі, а швидкісний напір збільшує тиск в порах, знижує зчеплення між частинками і забирає їх. Критична швидкість потоку повітряного струменя здатна зрушити з місця дрібні частинки ґрунту, визначеного діаметру, які представлені в таблиці 1.1 [10, 80].

Ступінь впливу газового струменя на покриття залежить в основному від температури і швидкості газу на зрізі сопла двигуна літака і його

конструктивних особливостей. Найбільш високі температури газовий струмінь має на продовженні осі двигуна. Найбільш сильний ерозійний вплив на покриття виникає при роботі двигунів на номінальному і максимальному режимах роботи при апробації двигунів на місцях стоянок. Найменші температури і потоки відповідають режиму рулювання.

Таблиця 1.1

## Критична швидкість потоку для частинок різного діаметра

Критична швидкість потоку, м/с	4-9	9-13	13-15	15-17	17-21	21-25	25-30
Діаметр частинок, мм	0,25-1,0	1,0-2,0	2,0-3,0	3,0-3,5	3,5-5,0	5,0-6,0	6,0-8,0

У цьому режимі через короткочасність впливу і малих оборотів двигунів газові струмені не еродують покриття з інших матеріалів, але можуть викликати ерозію ґрунту. Крім того, інтенсивність пилоутворення залежить від гранулометричного і мінерального складу матеріалу покриття, вологості цього матеріалу, метеорологічних умов, інтенсивності, складу і швидкості руху автомобілів і літаків [105, 123]. Пил на території аеродрому являє собою типову дисперсну систему, в якій частинки дисперсної фази в спокійному повітрі осідають з різною швидкістю в залежності від розміру часток, в основному підкоряючись закону Стокса. Такий пил має низку властивостей, характерних для будь-яких аерозольних систем: підвищену хімічну активність (внаслідок великої питомої поверхні), здатність адсорбувати гази і пари з навколишнього середовища, високу адгезію і інші. Властивості пилу залежать від умов його створення. В першу чергу ця залежність проявляється в дисперсному складі [10, 47].

Крім засмічення пил проявляє абразивну дію на поршневу групу двигунів. Помічено, що чим тонше пил, тим більше його абразивність. В результаті зношування основних деталей, що труться у двигунів відбувається різке зниження їх моторесурсу. Так, знос поршневих двигунів навіть при

роботі з фільтрами відбувався в 3 ÷ 4 рази швидше, ніж в нормальних умовах, а на одному з аеродромів Середньої Азії мотори змінювалися через 20 ÷ 130 ч. замість 180 ÷ 200 ч. за нормою [28, 50, 59].

Потрапляючи через дренажні отвори в паливну та гідравлічну системи, пил викликає відмови в командних системах. Нерідко, потрапляючи через канал трубки забору повітря з дифузора, пил осідає на сітці фільтру автомата запуску і ускладнює пуск двигуна. Частинки пилу, що потрапляють через повітрязбірники, при роботі двигунів, як на режимі малого газу, так і максимальному режимі викликають значні пошкодження вихідних кромek робочих лопаток першого і другого ступенів компресора. Забоїни, являючись концентраторами напружень, значно знижують міцність від втоми лопаток, внаслідок чого двигун в певних умовах виходить в режим зриву [105, 129].

На території аеродрому обладнаною ґрунтовою злітно-посадковою смугою пил перешкоджає нормальній роботі авіації: зменшує оглядовість пілота при посадці і зльоті, ускладнює точність приземлення літака, знижує надійність роботи двигунів, погіршує гігієнічні умови роботи обслуговуючого персоналу та побутові умови жителів населених пунктів розташованих поблизу аеродрому. Через наявність пилової хмари на заповоршених аеродромах доводиться збільшувати дистанції між літаками, які кермують і інтервали часу між подальшими зльотами і посадками [5, 9].

Останнє призводить до зменшення загального польотного часу літаків і до нераціональної витрати палива. Пилове забруднення небезпечно ще й тим, що, поширюючись на великі відстані, частинки пилу накопичуються на поверхневому шарі землі, створюючи з часом фонове забруднення, негативну дію якого виявляють постійно [93, 96].

На час і місце осідання пилу найбільший вплив роблять сила і напрямок вітру (при інших рівних умовах). Залежно від розмірів частинки пилу можуть переноситися вітром до десятків метрів – крупнодисперсна, на відстань кількох кілометрів – середньодисперсні, на кілька десятків кілометрів – тонкодисперсна. Дрібний пил до вимивання опадами дуже довго «живе» в



атмосфері. Модель розсіювання і осадження аерозольних часток пилу приведена в роботі [66].

Таким чином, пил, що утворюється на території аеродрому під час проведення технологічних процесів підготовки ПС до польотів, поряд з продуктами згоряння, робить негативний вплив на прилеглі урбанізовані території. Зважаючи на це, боротьба з пиловим забрудненням необхідна з точки зору своєчасного виконання всіх захисних заходів, забезпечення здорової екологічної обстановки в авіаційному гарнізоні, поліпшення санітарно-гігієнічних умов служби і відпочинку особового складу, життя членів сімей військовослужбовців та створення умов для безаварійної роботи авіаційної техніки.

Основним критерієм оцінки екологічного районування території аеродрому є приведена маса річного викиду забруднюючих речовин (ЗР). На території аеродрому фахівцями умовно виділяються чотири основних типи зон екологічного стану навколишнього середовища. До них відносять зони максимально інтенсивного, інтенсивного, помірного і незначного впливу [9, 90].

До зони максимально інтенсивного впливу територіально належать централізована заправка техніки, видатковий склад паливно-мастильних матеріалів, технічна позиція підготовки повітряного судна (ПС), стоянка спеціальної техніки (засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів), котельні, кисневодобувна і акумуляторні станції, засоби радіолокації забезпечення та зв'язку. Для даних об'єктів характерні процеси заправки спеціальними рідинами, передпольотної підготовки і технічного обслуговування ПС, зарядка і технічне обслуговування акумуляторів, процеси видобутку і закачування спеціальних газів, процеси інтенсивного згоряння палива.

У зоні інтенсивного впливу знаходяться злітно-посадкова смуга, на якій відбувається зліт і посадка ПС. Вплив на навколишнє середовище в цій зоні носить періодичний характер. До зони помірного впливу територіально

належать базовий склад паливно-мастильних матеріалів, пункти заправки спеціальної техніки, автопарки, техніко-експлуатаційні частини. До зони незначного впливу територіально належать склади, насосні станції, дизельні електростанції, зони розосередження, підсобне господарство.

Залежно від розташування джерел забруднення на території аеродрому, схема його районування, при різній інтенсивності впливу на навколишнє середовище, матиме свої особливості.

Територіальний поділ території аеродрому, яка виступає в якості критерію оцінки екологічного районування, не зовсім коректний з огляду на те, що екологічне навантаження залежить від частоти та інтенсивності польотів ПС, а також роботи всіх допоміжних структур і носить періодичний характер.

Крім того, при наявності вітру відбувається перенесення ЗР від джерел на прилеглі території, що не можна не враховувати в силу значного переважання вітряних днів над безвітряними. Фактичний розподіл ЗР на території аеродрому відбувається під дією цілого ряду факторів, оцінка впливу окремих з них на рівень забруднення навколишнього середовища є складним завданням. Умовно дані фактори можна об'єднати в дві групи [20, 54]:

1. Метеорологічні чинники: напрямок і швидкість вітру, температура і вологість повітря, кліматична характеристика місцевості, частота і тривалість випадання опадів і ін.

2. Експлуатаційні умови, що включають в себе склад, кількість ПС, засоби аеродромно-технічного забезпечення польотів, інтенсивність їх роботи, параметри злітно-посадкової смуги.

Залежно від цих факторів зони інтенсивно максимального і максимального впливів можуть дещо змінювати кордони. Зважаючи на це, з метою забезпечення екологічної безпеки доцільно проведення екологічної оцінки забруднення на території аеродрому в період максимального екологічного навантаження на екосистему.

## **1.2. Аналіз властивостей газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів щодо оцінювання стану довкілля**

Одним з важливих експлуатаційних режимів ГТД є його запуск, який багато в чому визначає безпеку експлуатації і надійність роботи силової установки ЛА в цілому. Оцінюючи фізичний процес запуску можна констатувати, що запуск двигуна переводить його з неробочого стану в усталений режим малого газу з мінімальним навантаженням його роботи. Даний режим є досить тривалий і перехідний, в процесі якого елементи двигуна піддаються значним температурним і механічним навантаженням (рис. 1.1) [117, 137].

Розрізняють декілька типів запуску: «запуск на землі» (з нерухомого стану роторів до режиму земного малого газу) і «запуск гарячого (холодного)» двигуна в польоті. Аналіз літератури показує необхідність розгляду більш конкретно режиму «запуск на землі», так як відбуваються постійні (в територіальному розумінні) викиди в навколишнє середовище. Тому розглянемо це питання більш докладно.

Особливістю запуску ГТД на земній поверхні є те, що вихідним станом двигуна є нульова частота обертання його ротора (роторів) і вихідний тепловий стан, близький до параметрів навколишнього середовища (холодний двигун). При цьому умови в камері згоряння практично відповідають умовам навколишнього середовища, тобто не дозволяють здійснити якісне розпилення палива, утворення дрібнодисперсної паливо-повітряної суміші (ППС), турбулізації потоку, стабільного розпалу й горіння. У разі запуску ГТД в камері згоряння виникають не нульова частота обертання ротора, що призводить до займання ППС [1, 105].

Тому для забезпечення необхідних умов для ефективного розпалу й горіння ППС в камері згоряння потрібно здійснити розкрутку ротора ГТД від зовнішнього джерела енергії, до стану при якому можливе виконання

швидкого розпалювання і стабілізації полум'я, який називається пусковим пристроєм (етап 1, на рис. 1.1).

З досвіду традиційного проектування, при оціночному аналізі процесу запуску приймають такі припущення [105]:

потужність, споживана приводними агрегатами, дорівнює 3...5% від потужності, що витрачається на обертання компресора;

потужність турбіни приймають рівною нулю до частоти обертання розпалювання (внаслідок несталої аеродинаміки, малих витрат і температур робочого тіла).

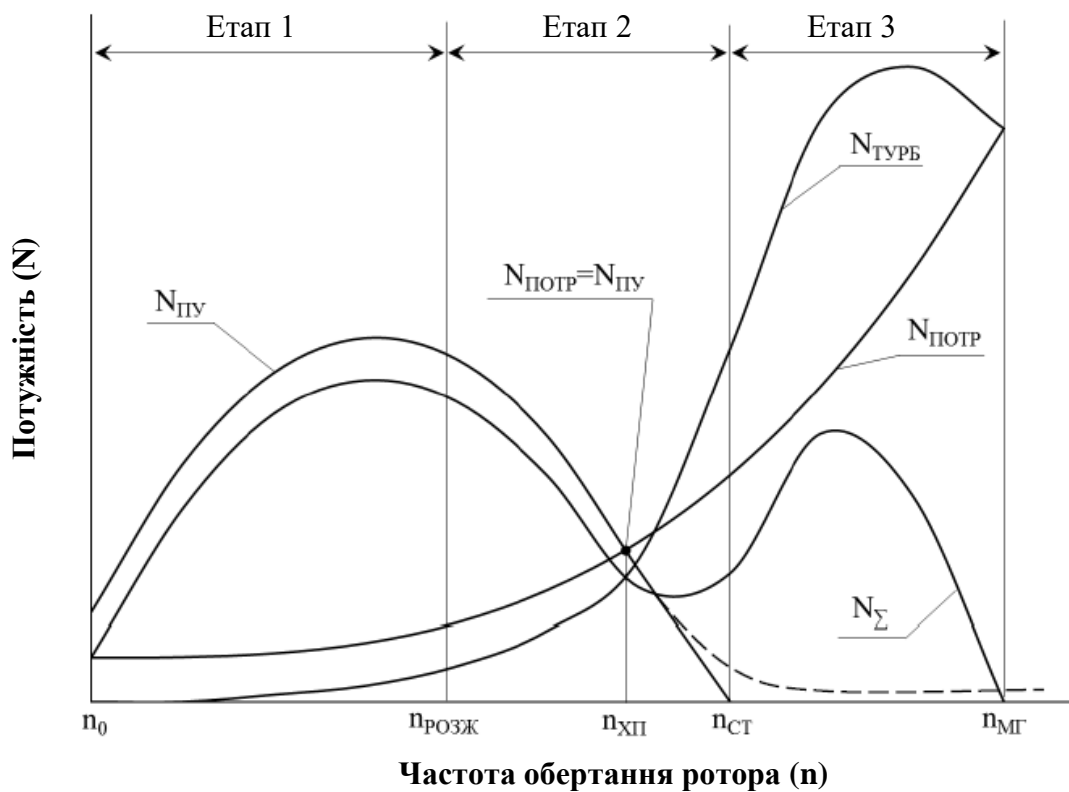


Рис. 1.1. Основні етапи запуску авіаційного ГТД

З урахуванням цих припущень, спрощене рівняння балансу потужностей набуває вигляду

$$N_{\Sigma} = N_{ПГУ} \eta_{ПР} - 1,05 N_{КОМП}, \quad (1.1)$$

де  $N_{III}$  – потужність, що розвивається пусковим пристроєм;  $\eta_{II}$  – механічний ККД приводу;  $N_{КОМП}$  – потужність споживана на стиснення повітря в компресорі.

Як правило, умови в камері згоряння, при яких забезпечується стабільний розпал ППС досягаються при частоті обертання ротора турбокомпресора ( $n_{розж}$ ), що становить 15...30% від частоти обертання на максимальному режимі.

Максимальна частота обертання ротора турбокомпресора, яка може бути досягнута при розкручуванні пусковим пристроєм, називається частотою обертання холодної прокрутки ( $n_{хп}$ ). Величина частоти обертання  $n_{хп}$  характеризує відношення потужності пускового пристрою до потужності, споживаної двигуном, і зазвичай становить 17...35% від максимальної частоти обертання ротора [53, 105].

Початком другого етапу (рис. 1.1), є момент розпау ППС в камері згоряння, після чого розкрутка ротора здійснюється спільно пусковим пристроєм і турбіною, надлишкова потужність якої починає зростати при виникненні теплоперепаду. Цей етап характеризується значними температурними навантаженнями на деталі турбіни, які викликані тим, що для забезпечення необхідної для розкрутки ротора надлишкової потужності, при малій частоті обертання ротора (а значить і при малій витраті повітря) необхідно реалізовувати значні надлишки палива. Крім того, в процесі другого етапу камера згоряння працює в умовах несталої газодинаміки, наслідком чого є значні рівні окружної та радіальної нерівномірності температури газу, що також негативно впливає на елементи конструкції гарячої частини [53].

При досягненні частоти обертання ( $n_{викл\_пу}$ ), при якій турбіна розвиває достатню для забезпечення розкрутки з заданим темпом надлишкову потужність, відбувається відключення пускового пристрою (ПП) або перехід в генераторний режим роботи. Як правило, супровід запуску пусковим

пристроєм здійснюється до частоти обертання, при якій потужність ПП стає значно менше потужності, що розвивається турбіною. При подальшому підвищенні частоти обертання пусковий пристрій перестає бути джерелом надлишкової потужності, а в разі суміщення в пристрої функції генератора – є споживачем (тобто зтягує запуск), в зв'язку з цим і здійснюється його відключення аж до виходу на робочий режим. Тому на третьому етапі запуску (рис. 1.1), рівняння балансу потужностей набуває вигляду [53]

$$N_{\Sigma} = N_T \eta_{MECH} - N_{ПОТР} , \quad (1.2)$$

де  $N_T$  – потужність, що розвивається турбіною;  $\eta_{MECH}$  – механічний коефіцієнт корисної дії (ККД) ротора;  $N_{ПОТР}$  – потужність споживана на стиснення повітря в компресорі, подоланні інерційності ротора, тертя в опорах турбокомпресора, привід агрегатів і ін.

Закінченням запуску на землі вважається момент виходу двигуна на сталий режим земного малого газу, який визначається при досягненні заданої частоти обертання ротора ( $n_{ЗМГ}$ ). Режим земного малого газу двигуна відповідає мінімальному тиску потоку, необхідного для руління об'єкта на аеродромі. Вибір режиму малого газу, в загальному випадку, є компромісним, з одного боку підвищення режиму забезпечує стійкість роботи ГТД, з іншого боку, при роботі на режимі земного малого газу необхідно забезпечити нерухомість літального апарату без застосування спеціальних утримуючих засобів. Відомо, що необхідна при рулінні тяга практично лінійно зростає за швидкістю, в зв'язку з чим, тягу на режимі малого газу бажано мати близькою до мінімально необхідної, в іншому випадку експлуатація літака буде менш зручною і буде пов'язана з підвищеним використанням гальмівних пристроїв шасі [74, 75]. З іншого боку, режим земного малого газу повинен вибиратися таким чином, щоб забезпечити виконання вимог за перехідними режимами (а саме забезпечити необхідні часи прийомистості і скидання).

### *Особливості робочого процесу в камері згоряння ГТД.*

Аналіз літератури [53, 105] показав, що процес функціонування в камері згоряння умовно можна представити у вигляді впорядкованих взаємопов'язаних етапів, таких як: подача і розподіл повітря в ділянках камери; розпорошення та його випари; самозаймання суміші та стабілізація полум'я. При цьому, від ступеня досконалості організації кожного етапу залежать повнота згоряння палива і рівень емісії токсичних сполук.

Розглянемо основні принципи організації окремих стадій робочого процесу функціонування ГТД ЛА.

#### *Подача і розподіл повітря.*

На рис. 1.2. показана типова схема основної камери згоряння [53]. Розглянемо особливості роботи камери згоряння. У вхідній частині камери розташований дифузор, в якому знижується швидкість повітря. Головну ділянку жарової труби – фронтний пристрій – розділяє повітря, що надходить в камеру згоряння на первинне (проходить через фронтний пристрій) і вторинне (що протікає в зазорах між кожухом і жаровою трубою і потім впадає в середину жарової труби через систему отворів в її стінках).

Фронтний пристрій призначений для організації процесів підготовки паливо-повітряної суміші і стабілізації факела полум'я. Для цього на початковій ділянці жарової труби формуються певні структури потоку – зони рециркуляції, в області яких кількість що надходить через фронтний пристрій повітря зазвичай складає близько  $20 \div 30\%$  від загальної витрати. Ефективне вигорання суміші, що починається безпосередньо за фронтним пристроєм, завершується в області впадання струменів вторинного повітря через перші ряди великих отворів в жаровій трубі [105].

Саме тут відбувається вигорання основної маси палива. Наступні ряди більш дрібних отворів призначені для охолодження стінок жарової труби і зниження середньомасової температури продуктів згоряння до допустимого рівня. Розташування отворів і їх розміри повинні забезпечувати формування необхідного поля температури на виході з камери [60].

Дослідженнями останніх років встановлено, що традиційна схема організації робочого процесу не задовольняє зростаючим вимогам щодо зниження викидів токсичних сполук. Тому в даний час вишукуються різні методи удосконалення існуючих конструкцій камер і розробляються принципово нові схеми організації горіння.

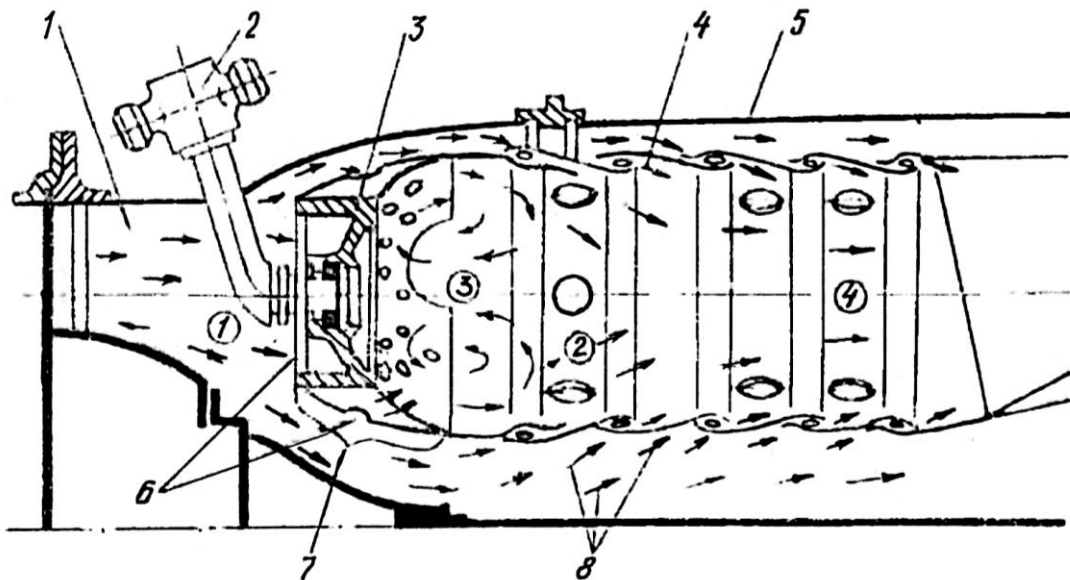


Рис. 1.2. Схема камери згоряння ГТД, де:  
 1 – дифузор; 2 – форсунка; 3 – плечовий завихритель; 4 – жарова труба;  
 5 – зовнішній кожух; 6 – первинне повітря; 7 – фронтний пристрій;  
 8 – вторинне повітря

На рис. 1.3 зображена можлива схема камери згоряння, в якій передбачається спалювання попередньо випарюваної і перемішаної бідної гомогенної паливо-повітряної суміші при точному регулюванні температури її горіння. Така камера містить зону підготовки суміші, розташовану вище за потоком навколо первинної зони стабілізації полум'я, а також зону змішування [60].

В даному випадку все повітря, що йде в первинну зону, спочатку змішується з розпоросеним паливом (зона підготовки суміші простягається до первинної зони стабілізації полум'я і забезпечує час її перебування, достатню для повного випаровування крапель палива).



Готова суміш направляється через калібровані отвори, які запобігають проскоку полум'я із зони стабілізації, фізично обмеженою стінками первинної зони камери згоряння.

Для перемішування вторинного повітря з продуктами згоряння служить зона змішування звичайного типу. Ця камера названа «камерою з зовнішнім випаровуванням палива» (КЗВ).

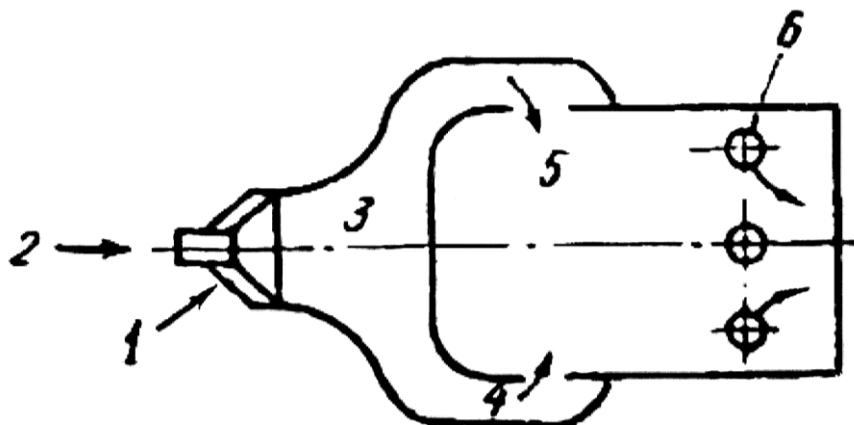


Рис. 1.3. Принципова схема камери згоряння з попередніми випаровуванням палива, де: 1 – повний потік повітря в первинній зоні; 2 – подача палива; 3 – зона попереднього перемішування (підготовки суміші); 4 – паливо-повітряна суміш; 5 – первинна зона стабілізації горіння; 6 – подача змішаного повітря

#### *Розпилення палива.*

Процес розпилення палива супроводжується значним збільшенням площі поверхні на одиницю маси палива, що подається. Наприклад, площа поверхні рідкої сферичної краплі діаметром 1 см збільшується в тисячу разів, якщо її розпоршити в монодисперсний струмінь, що складається з однакових крапель діаметром 10 мкм.

Внаслідок розпилення палива швидкість випаровування може збільшитися принаймні на три порядки через збільшення поверхні тепловіддачі. Крім того, зменшення розміру крапель призводить до збільшення коефіцієнтів тепло-і масопереносу.

Застосовується кілька типів пристроїв, що розпилюють (форсунок). У відцентрових (механічних) форсунках для створення високошвидкісного

турбулентного струменя палива використовується високий тиск подачі – до  $(40 \div 50) 105$  Па. Цей тип форсунок знайшов широке застосування в камерах авіаційних ГТД. Головним недоліком таких форсунок є грубий розпил, особливо при низькому тиску (середній діаметр краплі перевищує  $50 \div 100$  мкм), тому для систем попереднього випаровування ці форсунки непридатні. Крім того, при механічному розпорощенні практично неможливо організувати попереднє перемішування палива з повітрям.

Пневматичні форсунки мають ряд переваг перед відцентровими. Перш за все, вони здатні давати більш дрібні краплі із середнім діаметром  $10 \div 20$  мкм.

Такий високий ступінь розпилення є наслідком високих напруг зсуву між рідиною, що впорскується і повітрям, яке може подаватися у внутрішню частину сопла форсунки (внутрішнє змішання) або в зовнішню частину форсунки (зовнішнє змішання). Процес розпилення в них практично не залежить від  $\Delta P_\phi$ , тобто розмір крапель, кут паливного факела, розподіл крапель в потоці залишаються постійними в широкому діапазоні витрат палива.

Дослідження середніх розмірів крапель, отриманих за допомогою пневматичних форсунок, проведено Нікаямой і Таназавой. Ними отримано формулу, за якою з урахуванням щільності, в'язкості і поверхневого натягу може бути визначений середній діаметр краплі [123, 139]

$$d_{cp} = \frac{585\sqrt{\sigma}}{v\sqrt{\rho_{ж}}} + 597 \left( \frac{\mu_{ж}}{\sqrt{\sigma\rho_{ж}}} \right)^{0,45} \left( 1000 \frac{Q_{ж}}{Q_v} \right), \quad (1.3)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу;  $v$  – швидкість потоку повітря;  $\rho_{ж}$  – щільність рідини;  $\mu_{ж}$  – в'язкість рідини;  $Q_v$  – об'єм витрати повітря;  $Q_{ж}$  – об'єм витрати рідини.

У разі, коли об'ємна витрата повітря значно перевищує витрату палива, початковий розмір крапель можна визначити за спрощеною формулою

$$d_{cp} = \frac{585\sqrt{\sigma}}{v\sqrt{\rho_{ж}}} . \quad (1.4)$$

Особливий клас пневматичних форсунок представляють так звані «акустичні» форсунки, розпорошення палива в яких здійснюється високошвидкісним пульсуючим з великою частотою потоком повітря. За способом збудження коливань в повітряному потоці акустичні форсунки підрозділяються на газоструйні і вихрові. Докладно з конструкціями і характеристиками пневматичних форсунок, побудованих на основі газоструйного випромінювача, можна ознайомитися в роботі [24]. Ми обмежимося розглядом типової конструктивної схеми акустичної форсунки і деякими результатами її випробувань.

На рис. 1.4 зображена акустична форсунка зі стрижневим газоструйним випромінювачем Гартмана. Рідина під невеликим тиском подається в циліндричну порожнину 4, розташовану зовні випромінювача, і потім витікає через щілинний канал 3. Плівка рідини, яка випливає з каналу 3 піддається впливу коливань швидкості і тиску, що генеруються пульсуючим стрибком ущільнення. Осцилюючий стрибок ущільнення виникає поблизу повітряного сопла 2 при натіканні надзвукового струменя на резонатор 1.

В результаті плівка дробиться на дрібні краплі, які разом з повітряним струменем утворюють факел розпилу. Слід також зазначити, що механізм розпилення рідини при впливі пульсацій газоподібного струменя вивчений недостатньо. Однак відомо, що пульсації в потоці повітря роблять значний вплив на процес розпилення. Як видно з рис. 1.5, при наявності пульсацій діаметр крапель зменшується приблизно в 2 рази (з 60 до 27 мкм).

У газоструйних генераторах необхідно створювати зверхкритичний перепад тиску на повітряному соплі. В авіаційних ГТД такі умови роботи (при відсутності стороннього джерела стисненого повітря) можуть бути реалізовані тільки в форсажному контурі. Ця обставина стала основною причиною, яка стримує застосування газоструйних акустичних форсунок в основних камерах ГТД.

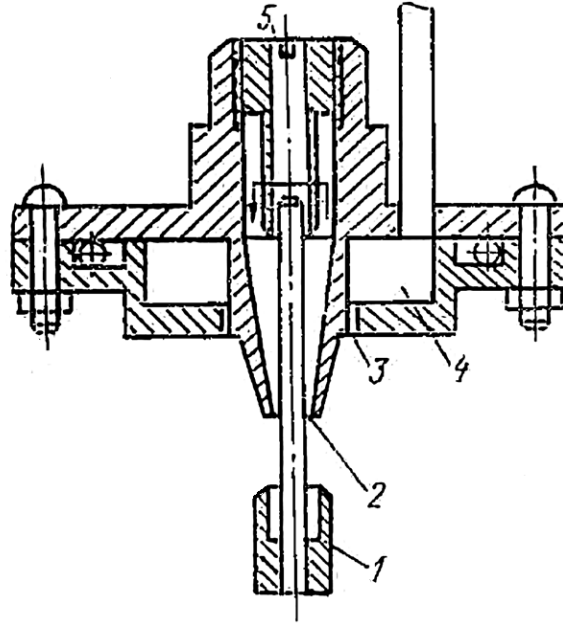


Рис. 1.4. Конструктивна схема акустичної форсунки, де:  
1 – резонатор; 2 – сопло для повітря; 3 – щілинний канал; 4 – порожнина для рідини; 5 – вхід повітря

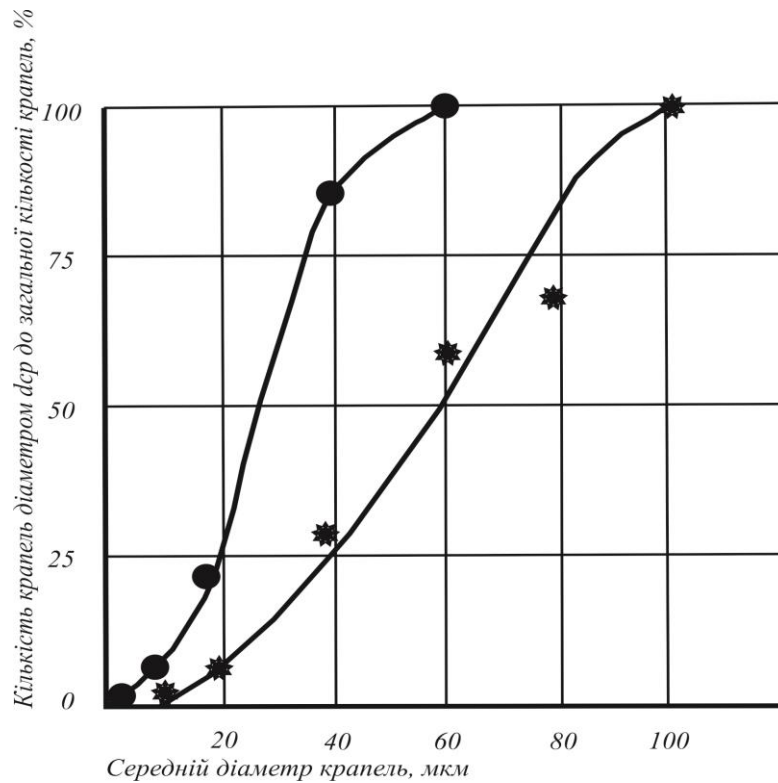


Рис. 1.5. Криві розподілу крапель за розмірами, де: • – при наявності пульсацій; \* – без пульсацій;  $\Delta P_B = 100 \text{ кПа}$  (1 атм);  $G_B = 1,2 \text{ г/с}$ ;  $\Delta P_{жс} = 20 \text{ кПа}$  (0,2 атм);  $G_{жс} = 1,86 \text{ г/с}$

Зазначених недоліків позбавлена вихрова акустична форсунка [48], яка застосовується для розпилення палив в камерах авіаційних ГТД. Побудована на основі вихрового генератора звуку, ця форсунка здатна генерувати інтенсивні звукові коливання і розпорошувати паливо при порівняно малих перепадах тиску.

Схема вихрової акустичної форсунки показана на рис. 1.6.

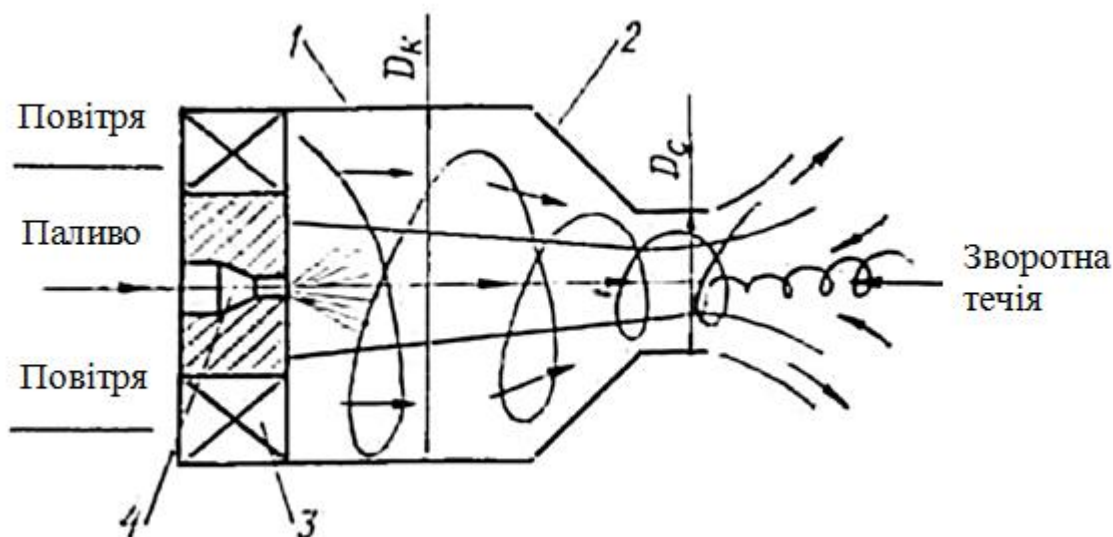


Рис. 1.6. Схема вихрової акустичної форсунки, де: 1 – вихрова камера; 2 – сопло; 3 – плечовий завихрювач; 4 – розпилювач палива

Потік повітря, проходячи через завихрювач, набуває в вихровій камері обертальний рух, інтенсивність якого залежить від кута нахилу лопаток завихрювача і ступеня підгорнутого сопла  $D_k / D_c$ . Завдяки закрутці повітря в центрі форсунки утворюється область поворотної течії.

Взаємодія прямої і зворотної течій носить явно виражений автоколивальний характер і призводить до порушення в вихровому потоці повітря інтенсивних пульсацій швидкості і тиску [24]. При цьому частота пульсацій пропорційна об'ємній витраті повітря (рис. 1.7) і може досягати 10 кГц і більше, а інтенсивність коливань поблизу сопла форсунки може становити  $140 \div 145$  Дб при швидкостях потоку, характерних для камер ГТД (рис. 1.8).

Паливо впорскується звичайним відцентровим розпилювачем в область максимальних зсувних напружень між прямою і зворотною течією. Пульсації швидкості надають інтенсифікуючий вплив на процес дроблення крапель, діаметр яких досягає  $20 \div 40$  мкм при швидкості повітря перед форсункою  $120 \div 130$  м/с.

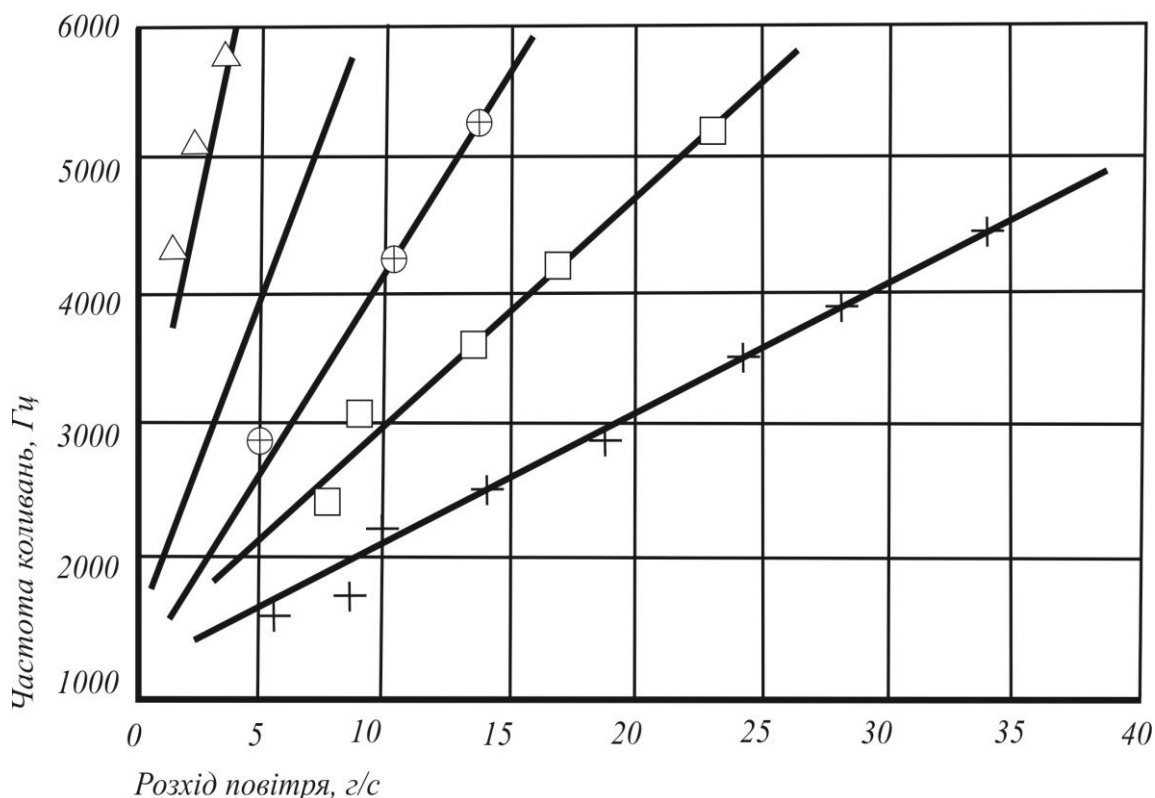


Рис. 1.7. Залежність частоти дискретного тону від витрати повітря через форсунку для різних ступенів підгорнутого сопла ( $C = D_c / D_{KB}$ ) при  $\varphi = 45^\circ$ ;  
 $\Delta - C = 2,14$ ;  $- - C = 2$ ;  $\oplus - C = 1,7$ ;  $\diamond - C = 1,52$ ;  $+ - C = 1$

### Випаровування палива

Випаровування розпоршеного палива є другою важливою сходинкою підготовки суміші. Кількість парів палива в потоці гарячого повітря в кінцевому рахунку лімітується фазовою рівновагою суміші. Після того як концентрація парів досягне насичення, паливо випаровуватися не буде, незалежно від часу протікання процесу.

Згідно із законом Дальтона відношення маси парів палива до маси повітря виражається рівнянням [1, 105]

$$\frac{G_{\Pi}}{G_B} = \frac{M_{\Pi} P_{\Pi}}{29(P_{CM} - P_{\Pi})}, \quad (1.5)$$

де  $\frac{G_{\Pi}}{G_B}$  – відношення маси пара до маси повітря;  $M_{\Pi}$  – молекулярна вага парів палива при заданій температурі;  $P_{CM}$  – повний тиск в суміші.

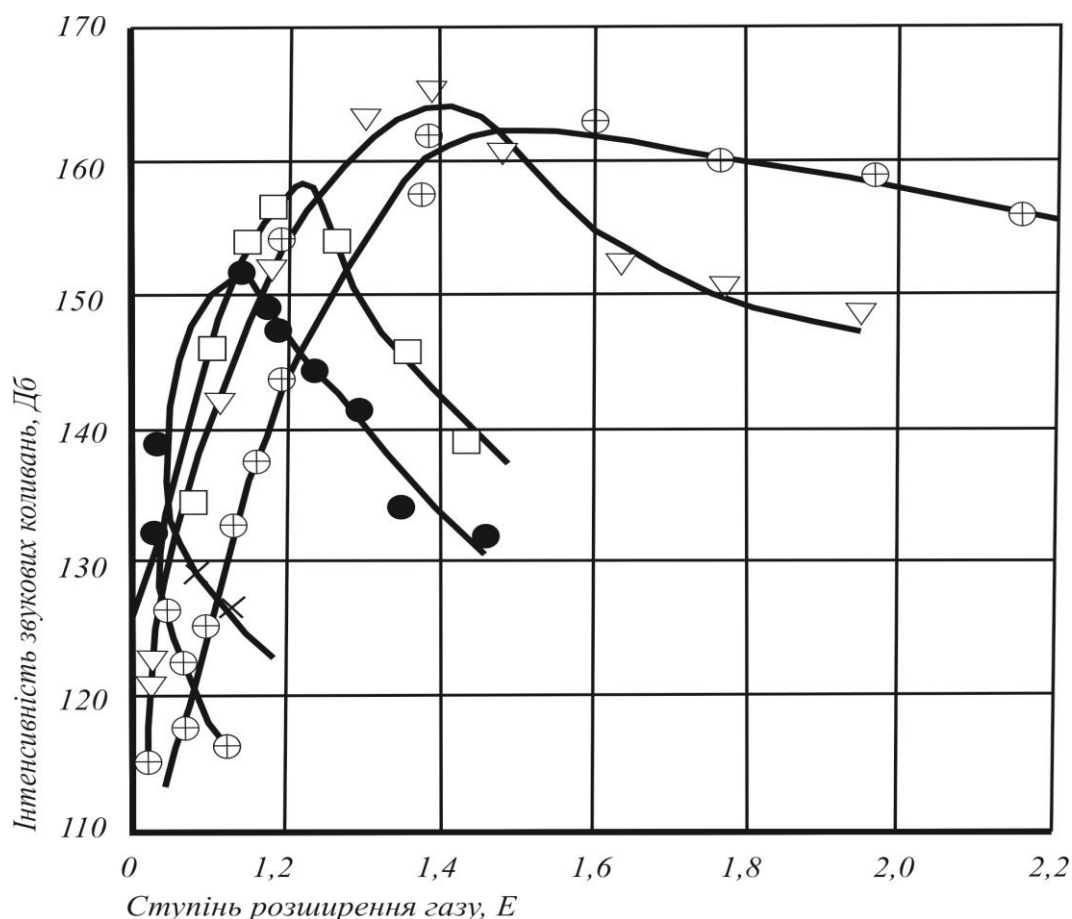


Рис. 1.8. Залежність рівня звукового тиску від ступеня розширення сопла при різних підгорнутостях сопла при  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\oplus$  –  $C = 1$ ;  $\nabla$  –  $C = 1,3$ ;  $\Delta$  –  $C = 2,14$ ;  $\diamond$  –  $C = 1,5$ ;  $\bullet$  –  $C = 1,7$ ;  $\circ$  –  $C = 2,4$

Для однокомпонентного палива рівноважне відношення маси пара до маси повітря в залежності від температури можна розрахувати за рівнянням (1.5). Для таких палив, як бензин, який є сумішшю різних хімічних речовин, рівноважний стан пароповітряної суміші має визначатися експериментально. Однак аналіз рівноважного стану не дає відомостей про швидкість випаровування палива.

Випаровування є кінетичний процес, при якому молекули залишають поверхню – рідкої краплі і – дифундують в навколишнє повітря. Процес цей визначається тепловим станом системи. При низьких температурах повітря основним є процес дифузії, при високих – швидкість передачі тепла від повітря до рідини.

Діаметр одиночної сферичної краплі, що випаровується в повітрі, в функції часу можна розрахувати за законом квадрата діаметра [129]:

$$d^2 = d_0^2 - \lambda t, \quad (1.6)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт випаровування,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $d_0^2$ ,  $d$  – початковий і поточний діаметр краплі;  $t$  – час, с.

Залежність коефіцієнта випаровування краплі в нерухомому повітрі від температури визначається виразом

$$\lambda_0 = (8k/\rho_{\text{ж}}C_p)\ln(1+B), \quad (1.7)$$

де  $\lambda_0$  – коефіцієнт випаровування в нерухомому повітрі;  $k$  – теплопровідність повітря;  $C_p$  – питома теплоємність;

$B = C_p(T_B - T_{\text{ж}})/L$  – коефіцієнт тепловіддачі при випаровуванні;

$T_B$ ,  $T_{\text{ж}}$  – температура повітря і рідини;  $L$  – прихована теплота випаровування.

При наявності відносного руху повітря і краплі застосовується такий вираз, що враховує вплив вимушеної конвекції:

$$\lambda = \lambda_0 \left( 1 + 0,276 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Sc}^{\frac{1}{3}} \right) \ln(1+B), \quad (1.8)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт випаровування при вимушеній конвекції;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\text{Sc}$  – критерій Шмідта.

У цій формулі число  $\text{Re}$  для краплі розраховується за відносною швидкістю краплі і повітря.



Повний час випаровування краплі є важливим параметром для розрахунку зони підготовки суміші. Встановлено, що для краплі і повітря, що рухаються в зоні підготовки камери, не обов'язкова однакова швидкість.

Вимушена конвекція зменшує загальний час випаровування, необхідний для краплі даного діаметра. При оцінці випаровування з запасом часу в зоні підготовки для розрахунку можна використовувати коефіцієнт випаровування в нерухомому повітрі (в припущенні, що крапля і повітря рухаються з однаковою швидкістю).

#### *Самозаймання.*

При попередньому перемішуванні паливо-повітряної суміші в умовах високих температур виникає проблема запобігання самовільного займання суміші до введення її в первинну зону камери. Самозаймання в зоні підготовки камери зовнішнього випаровування (КЗВ) неприпустимо, оскільки полум'я буде стабілізуватися біля форсунки, викликаючи перегрів і руйнування цієї зони. Горіння крапель призведе також до підвищення рівня освіти окислів азоту.

Тому конструювати камеру слід з урахуванням того, що час перебування паливо-повітряної суміші і її температура повинні мати значення, що виключають самозаймання.

Прийнято вважати, що повний час затримки займання паливо-повітряної суміші підрозділяється на час фізичної затримки запалення – від моменту потрапляння краплі палива в потік повітря до моменту утворення горючої паливо-повітряної суміші і її нагрівання до температури самозаймання – яке головним чином визначається процесами випаровування палива і теплообміну, і час хімічної затримки запалення, що визначається як час від початку помітної хімічної реакції до моменту самозаймання.

Час фізичної затримки запалення в загальному вигляді порівняно з часом хімічної затримки, який для вуглеводнів-повітряних сумішей можна виразити рівнянням

$$\tau = \frac{(CH)_n^{1/x}}{O_2} K \exp\left(\frac{E}{RT}\right). \quad (1.9)$$

Це рівняння показує, що час хімічної затримки є експоненціальною функцією зміни температури суміші. Така залежність ґрунтується на законі Арреніуса, що описує вплив температури на швидкість реакції. У адіабатичній системі тепло, що виділяється в передполум'яній реакції окислення, збільшує температуру системи, що в свою чергу призводить до збільшення швидкості окислення. Цей процес триває до виникнення горіння.

Рівняння (1.9) показує також, що час хімічної затримки залежить від вихідних концентрацій пального і окислювача.

Час затримки, виміряний для ізооктана  $C_8H_{18}$ , ізододекана  $C_{12}H_{26}$  і гасу, показано на рис. 1.9. З малюнка видно, що значне зменшення часу затримки займання спостерігається при збільшенні початкової температури.

Збільшення тиску, вплив якого на малюнку не показано, призводить до зменшення часу затримки. Встановлено, що час затримки займання для гасу незначно залежить від складу суміші в діапазоні величин  $a$  від 5 до 13 і від розміру крапель в діапазоні  $1 \div 140$  мкм.

Відомо, що час затримки запальника залежить від експериментального обладнання та умов проведення дослідів.

При оціночних розрахунках зони підготовки суміші можна користуватися даними, наведеними на рис. 1.9. Початкові розміри крапель палива, які розпилюються форсункою в зоні підготовки, повинні бути такими, щоб час їх випаровування був менше часу затримки займання. Зона перемішування повинна бути сконструйована таким чином, щоб час перебування суміші в ній перевищував час випаровування, але був б менше часу затримки займання.

Розрахунок зони підготовки суміші за середнім часу перебування, який менше часу затримки займання, не гарантує відсутності займання.

Гальмування потоку паливо-повітряної суміші у поверхней більш гарячих, ніж газ, може викликати самозапалювання через збільшення локальної температури газу або локального часу перебування. Якщо газ в прикордонному шарі біля стінки нагрівається внаслідок тепловіддачі до температури вище середньомасової, то час затримки (див. рис. 1.9) займання, який визначається за підвищеною температурою прикордонного шару, зменшується. Збільшення часу перебування в прикордонному шарі також може привести до самозаймання.

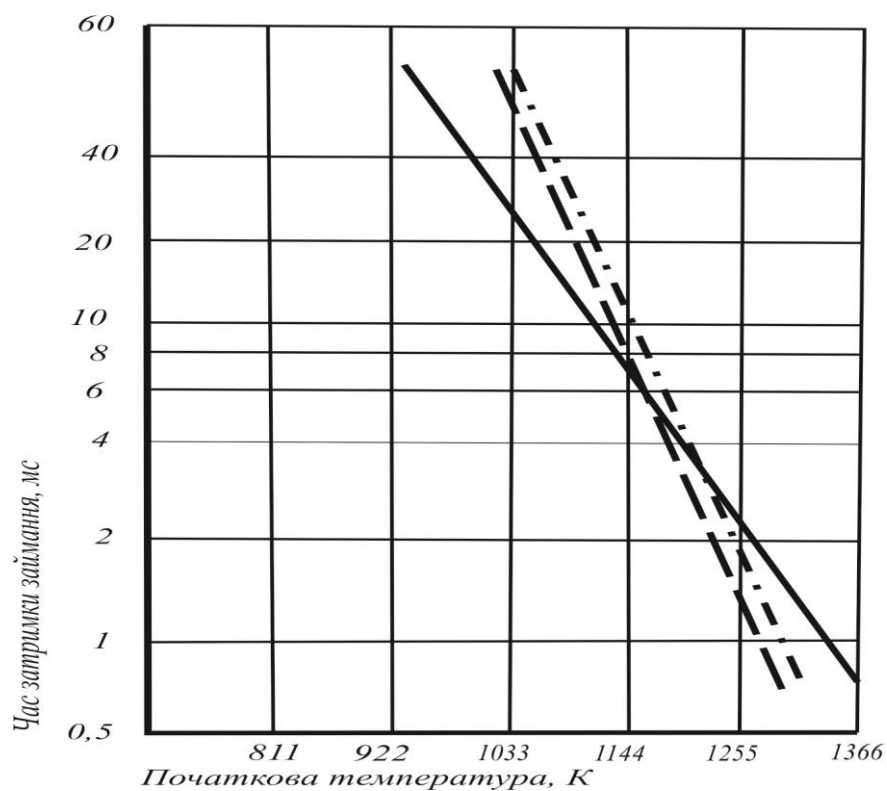


Рис. 1.9. Залежність часу затримки займання від початкової температури, де:---- - гас; — -ізодекан C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>; — ізооктан C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>

### Стабілізація полум'я

Процеси стабілізації полум'я в первинній зоні мають важливе значення з точки зору досягнення високої повноти згоряння палива, необхідної для низького рівня викидів шкідливих домішок.

Розглянемо найбільш загальні проблеми, пов'язані зі стабілізацією високотемпературного полум'я в паливо-повітряній суміші. При типовому

режимі роботи ГТД швидкість повітря на вході в камеру становить  $60\div 120$  м/с, що принаймні на порядок вище швидкості поширення турбулентного фронту полум'я. Для стабілізації полум'я в таких умовах необхідно виконання двох вимог:

а) за складом паливо-повітряна суміш повинна перебувати в межах стійкого горіння;

б) для підтримки горіння потрібно організувати циркуляційний протяг, необхідний для змішування гарячих продуктів згорання, що містять хімічно активні компоненти, з реагентами, що поступають.

Процес горіння повинен бути стабільним в прийнятному діапазоні складів суміші і температур та забезпечувати високу повноту згорання. Стабілізація полум'я в гомогенної суміші пов'язана з додатковими труднощами через відсутність багатьох областей або крапель, які можуть поліпшити стабілізацію.

Схеми пристроїв для стабілізації полум'я можна розділити на дві основні групи: фізичні стабілізатори полум'я і чисто аеродинамічні пристрої. Суттєві особливості цих схем показані на рис. 1.10. Використовуються також комбінації перерахованих пристроїв.

Кожна схема стабілізації полум'я має дві характерні зони течії: циркуляційну і зону поширення полум'я. У циркуляційній зоні містяться частково або повністю прореаговані речовини, що мають високу температуру. Свіжі горючі компоненти підпалюються поблизу верхнього потоку кінця циркуляційної зони гарячими циркулюючими продуктами згорання, що містять хімічно активні речовини. Поблизу циркуляційної зони підпалюється тільки невелика частина паливо-повітряної суміші. В іншому об'ємі відбувається поширення фронту полум'я від точки підпалювання вниз за потоком. Для отримання високої повноти згорання речовини необхідно швидке поширення полум'я по всьому перетину потоку і завершення горіння до зони змішання, в якій відбувається охолодження газів, Отже, стабілізація полум'я визначається характеристиками зони циркуляції, в той час як на

повноту згоряння впливає, швидкість поширення фронту полум'я від циркуляційної зони до решти потоку.

Вибір схеми стабілізації проводиться на основі заданого діапазону стійкої роботи за складом суміші, за повнотою згоряння і втрат тиску, в камері.

Розглянемо схеми фізичної стабілізації полум'я.

Найбільш вивчена стабілізація з використанням погано обтікаемого тіла (рис. 1.10 а). Стабілізатор являє собою конус, уголок або циліндр, поміщені в потік з метою забезпечення умов виникнення вихрової циркуляційної течії в сліді. Діапазон стабілізації полум'я залежить від ступеня захаращення потоку і розширюється при збільшенні захаращення потоку стабілізаторами.

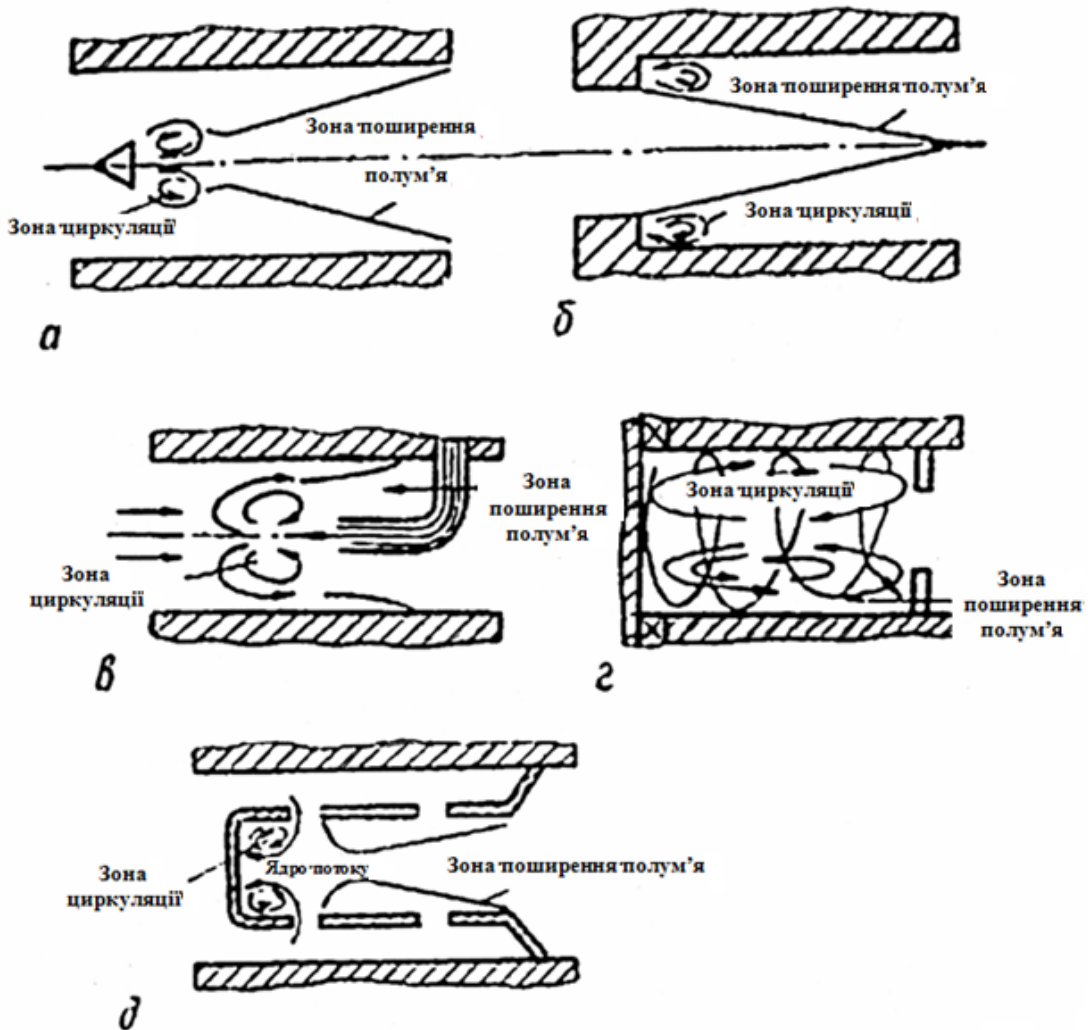


Рис. 1.10. Схеми пристроїв для стабілізації горіння, де а – тіло, що погано обтікається; б – стінка з уступами; в – зустрічний струмінь; г – завихрювач повітря; д – зіткнення струменів

Для окремого стабілізатора кута під яким полум'я поширюється в потоці, визначається швидкість поширення полум'я і швидкість потоку.

Цей кут може бути дуже малий при швидкостях, типових для ГТД, тому для отримання високої повноти згоряння потрібно довга камера. Зменшити обсяг зони горіння можна шляхом установки в камері системи стабілізаторів. Однак це призводить до збільшення втрат тиску в камері.

Стабілізатор з уступами на стінках (рис. 1.10 б) багато в чому подібний до погано обтікаємого тіла, оскільки обидві схеми засновані на поділі потоку і відриві його від кромки для створення циркуляційної течії в сліді. Ступінь циркуляції визначається глибиною уступу. Тут так само, як і в разі тіла, що погано обтікається, потрібний дуже довгий канал для поширення полум'я до його осьової лінії.

Для високотемпературних камер ГТД, де потрібно при невеликих обсягах забезпечити високу повноту згоряння, краще аеродинамічна стабілізація полум'я.

Схема стабілізації на зустрічних струменях (рис. 1.10 в) побудована за принципом гальмування основного потоку високошвидкісним зустрічним струменем і виникнення за ним циркуляційної течії [24]. Ця схема має ряд суттєвих переваг, особливо при використанні в форсажних камерах згоряння: низький гідравлічний опір камери у безфорсажному режимі, простота регулювання складу суміші.

Закручування потоку повітря є, мабуть, найбільш поширеним способом стабілізації полум'я в камерах авіаційних ГТД. У такому пристрої (рис. 1.10 г) потік має тангенціальну складову швидкості, завдяки чому в первинній зоні створюється область зниженого тиску.

Під впливом позитивного осьового градієнта тиску в цю область спрямовуються високотемпературні продукти згоряння з вторинної зони, і таким чином формується центральна зона циркуляції. Її протяжність залежить від інтенсивності потоку, що крутиться і яка визначається як

відношення кількості руху в тангенціальному і осьовому напрямках. Завихрювачі здатні забезпечити хорошу стабілізацію полум'я в дуже бідних сумішах ( $\alpha > 40 \div 50$ ) при задовільній повноті згоряння.

Стабілізація за допомогою струменів, що зіштовхуються показана на рис. 1.10 д.

Повітряні потоки, що вдуваються перпендикулярно осі потоку, стикаються у центральній лінії. При цьому частина потоку тече в зворотному напрямку, і при повороті у передній стінці камери виникає зона циркуляції. Інша частина потоку рухається в прямому напрямку і утворює центральне ядро течії. Стабілізація горіння визначається циркуляційною течією. Дана схема характеризується хорошою стабілізацією полум'я, високою повнотою згоряння і, на думку авторів роботи, найкраще підходить для невеликих камер з попереднім випаровуванням палива [58].

### **1.3. Основні властивості токсичних речовин під час викидів відпрацьованого авіаційного палива**

Основними продуктами забруднення, що містяться у вихлопі реактивних двигунів, є оксиди азоту  $\text{NO}_x$ , окис вуглецю  $\text{CO}$ , незгорілі вуглеводні  $\text{HC}$  і частки (дим). Крім них у вихлопі містяться і інші забруднювачі атмосфери: оксиди сірки, альдегіди, аерозолі, одоранти, а також ароматичні поліциклічні вуглеводні, наприклад, безнапірен [5, 56]. Якщо розглядати кількість утворених шкідливих продуктів у вигляді масової частки від згорілого палива, то для більшості режимів роботи двигуна вихід цих продуктів зазвичай становить  $0,1 \div 1 \%$ .

Концентрація викидів в значній мірі залежить від режиму роботи двигуна. Камери згоряння розраховуються на отримання, максимальних ККД на зльоті і крейсерському режимі. При дроселюванні двигуна повнота згоряння зменшується і, як наслідок цього, збільшується кількість викидів забруднюючих речовин. Так, на режимі малого газу повнота згоряння

становить  $88 \div 96 \%$  і залежить від розмірів двигуна, його потужності, ресурсу, кількості повітря, що пропускається з компресора і ін.

Головними викидами на малому газі є окис вуглецю (до  $50 \div 60$  г/кг палив) і вуглеводи (до  $10 \div 20$  г/кг палив) як у вигляді палива (фізичне недопалення), так і у вигляді частково окислених компонентів палива (хімічне недопалення). Останні речовини і обумовлюють характерний запах, властивий всім аеропортам, що використовуються літаки з ГТД.

Невисока повнота згоряння пояснюється низькими значеннями температури ( $360 \div 450$  К) і тиску (близько  $2 \div 4$ )  $\times 10^5$  Па на вході в камеру []. Крім того, при бідних складах суміші в режимі малого газу паливні форсунки працюють на малих перепадах тиску ( $2 \div 4$ )  $\times 10^5$  Па, що призводить до значного погіршення дисперсності розпилення і нерівномірного розподілу палива в зоні горіння.

Ще більше погіршує проблему погана летючість авіаційного палива.

У міру збільшення потужності двигуна тиск і температура на вході в камеру згоряння зростають. На режимах повної потужності повнота згоряння наближається до  $100 \%$ , а вміст СО і НС в вихлопних газах дуже малий. Однак високі температури і тиску в камері призводять до утворення оксидів азоту і диму. На зльоті викиди  $\text{NO}_x$  досягають  $40 \div 50$  г / кг палива і диму – до  $10 \div 15$  одиниць (SAE). В якості ілюстрації на рис. 1.11 показано зміну змісту токсичних компонентів в залежності від навантаження двигунів ТЗД; Т8Д і Т9Д [91, 109].

Оксиди сірки утворюються при окисленні сірки, що міститься в паливі. Рівні викиду безпосередньо пов'язані з вмістом сірки в паливі і не залежать в помітному ступені від типу двигуна. Оскільки в реактивному двигуні видалення окислів з вихлопних газів утруднене, регулювання викиду здійснюється зменшенням вмісту сірки в паливі.

Викид альдегідів з ГТД, мабуть, можна порівняти з викидом їх з поршневих двигунів: в обох випадках показник викиду становить  $1$  г/кг палива [95, 134]. Порівняно висока концентрація альдегідів відносно



низького викиду незгорілих вуглеводнів пов'язана з горінням бідної паливної суміші. Рівень викиду залежить від пристрою камери згорання, особливо від зміни в часі температури продуктів згорання.

Аерозольні викиди з газових турбінах досить високі. Показник аерозольного викиду для турбореактивних двигунів становить 9 г/кг, тоді як для поршневих авіаційних двигунів він дорівнює 2 г/кг. Аерозолі включають в себе агломерати і конденсати малого розміру і можуть служити адсорбентами для активних викидів. На теперішній час роль аерозолів в забрудненні атмосфери, якщо не брати до уваги погіршення видимості, ще не встановлена.

За результатами систематичного дослідження характеристик запаху вихлопу реактивних двигунів публікацій немає.

Механізм утворення поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) в процесі горіння авіаційних палив зрозумілий тільки в загальних рисах, в даний час немає жодної публікації про систематичні виміри ПАВ в вихлопних газах ГТД. Проте, склалася думка, що авіація є одним з можливих джерел широкого поширення канцерогенів в атмосфері. Дослідження закономірностей виникнення бензапирена в вихлопних газах авіадвигунів відображені в роботах [131, 132].

Вимірювання концентрацій токсичних компонентів в даний час регламентується в інструктивних матеріалах ІКАО (Міжнародна організація цивільної авіації), виданих в 2014 р [5, 70-72, 126, 127, 135]. У цьому документі містяться методики проведення вимірювань, оброблення отриманих результатів, рекомендуються прилади. Зокрема, дим вимірюється в так званих «числах димності» (SN) шляхом фільтрації продуктів згорання через контрольний білий фільтр. За ступенем затемнення поверхні фільтра обложеними частинками оцінюється рівень задимленості.

Газоподібні продукти вимірюються в «частинах на мільйон (ррт)», тобто в одиницях об'ємної концентрації газу на мільйонну частину обсягу газової суміші, до складу якої входить цей газ. Концентрацію вуглеводнів (НС)

рекомендується визначати за допомогою полум'я іонізаційного детектора, CO і CO<sub>2</sub> – за допомогою нерозсіюваних інфрачервоних аналізаторів, NO<sub>x</sub> – за методом хемілюменісценції [20-22].

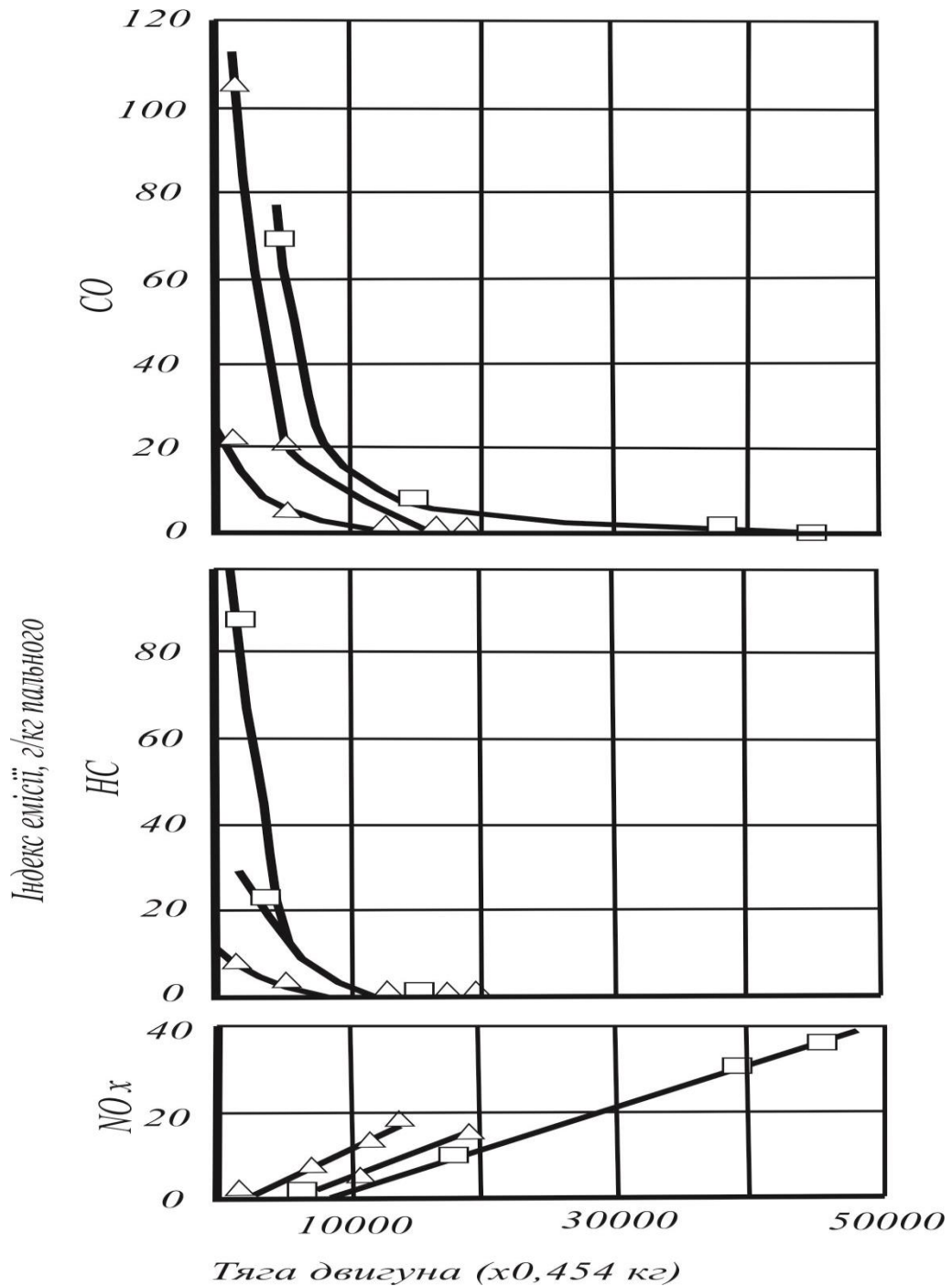


Рис. 1.11. Зміна вмісту токсичних компонентів у вихлопних газах двигунів в залежності від навантаження: □ – JT9Д; Δ – JT8Д; о – JT3Д

Більш зручною одиницею виміру цієї величини є «інтенсивність емісії» – в грамах токсичної речовини, що виділяється в секунду, або в

«індексах емісії (EI)» – в грамах речовини, віднесеної до кілограму згорілого палива.

Для загальної оцінки емісії забруднюючих речовин авіадвигунами протягом злітно-посадкового циклу Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA) введений параметр EPA, який виражається масою речовини, яка виділилася за цикл, віднесеної до тяги в 1000 кгс, який обчислюється як

$$EPA_{P_i} = \frac{\sum_i \left( \frac{\tau_i}{60} \right) G \tau_i EI_{ij}}{\sum_{ji} \left( \frac{\tau_j}{60} \right) R_j} \quad (1.10)$$

де  $\tau_i$  – час роботи двигуна, хв;  $R_j$  – тяга, кгс;  $i$  – вид токсичної речовини ( $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ );  $j$  – режим роботи двигуна (малий газ, зниження, набір висоти, зліт на рівні моря).

Стандартами США передбачена наступна тривалість режимів злітно-посадкового циклу (в хвиликах): малий газ – 26; зліт – 0,7; набір висоти – 2,2; зниження – 4,0.

За результатами випробувань звичайних (однозонних) камер згорання можуть бути визначені емісійні характеристики двигуна за наступними наближеними формулами

$$\begin{aligned} (EI_{NO_x})_{ДВ} &= (EI_{NO_x})_{КАМ} \left( \frac{P_{2ДВ}}{P_{2КАМ}} \right)^{0,5} \frac{T_{3ДВ}}{T_{3КАМ}} \frac{v_{ДВ}}{v_{КАМ}} \exp 0,0188 \times \\ &\times (H_{ДВ} - H_{КАМ}) \exp \left( \frac{T_{2ДВ} - T_{2КАМ}}{288} \right), \end{aligned} \quad (1.11)$$

де  $P_2$  и  $T_2$  – повні тиску і температура на вході в камеру згорання;  $v$  – характерна швидкість в камері згорання;  $H$  – питома вологість повітря на вході в камеру, г / води / кг повітря (на рівні моря стандартна вологість  $H = 6,29$ );  $T_3$  – температура перед турбіною (індексами «КАМ» і «ДВ» позначені

величини, вимірювані при випробуваннях камери згоряння і двигуна відповідно),

$$(EI_{CO})_{ДВ} = (EI_{CO})_{КАМ} \frac{P_{2КАМ}}{P_{2ДВ}}, \quad (1.12)$$

$$(EI_{НС})_{ДВ} = (EI_{НС})_{КАМ} \frac{P_{2КАМ}}{P_{2ДВ}}. \quad (1.13)$$

Як приклад в табл. 1.2 представлені емісійні характеристики двигуна JT8D-17 і норми ЕРА [142].

Таблиця 1.2

Порівняння емісійних характеристик двигуна JT8D-17  
(вихідний рівень) з нормами ЕРА

Режим роботи	Емісія						Число димності	
	CO		НС		NO <sub>x</sub>			
	Норма ЕРА	Початковий рівень	Норма ЕРА	Початковий рівень	Норма ЕРА	Початковий рівень	Норма ЕРА	Початковий рівень
Індекси емісії								
Малий газ	12,2	44,5	2,1	12,8	3,2	3,7		
Зниження тяги (30%)	1,1	7,5	0,4	0,67	4,2	8,5		
Набір висоти (85%)	0,2	0,89	0,13	0,04	5,1	20,0		
Зліт (85%)	0,16	0,55	0,11	0,03	5,2	24,4		
Параметри ЕРА								
Всі режими	4,3	11,1	0,8	4,4	3,0	8,2	25	25-30

#### 1.4. Постановка наукового завдання та шляхи його розв'язання

Відповідно до Міжнародних авіаційних правил об'єктів повітряної інфраструктури рівень забруднення атмосферного повітря шкідливими викидами на території аеродромів (аеропортів) визначається відповідно до встановлених нормативів. Суть існуючої методики прогнозування забруднення атмосфери двигунами ПС цивільної авіації (ЦА) зводиться, в основному, до оцінювання максимального рівня забруднення атмосфери розрахованим за відповідними виразами за індексом емісії забруднюючих

речовин. Індекси емісії забруднюючих речовин визначаються підприємством-розробником в процесі стендових випробувань і є характеристикою двигуна.

З метою створення єдиної методичної основи щодо визначення кількості ЗР у всіх умовах експлуатації маршових газотурбінних двигунів ПС цивільної авіації розроблена «Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин двигунами повітряних суден цивільної авіації». Вона визначає порядок розрахунку викидів ЗР на основі питомих показників емісії (таких як індекси емісії, рівні емісії) авіадвигунів і їх експлуатаційних характеристик з урахуванням зовнішніх атмосферних умов. Значення відносної тяги двигунів на етапах злітно-посадкового циклу (ЗПЦ) (режимах роботи) є середньостатистичними для світового парку ПС ЦА, а значення тривалості етапів ЗПЦ зорієнтовані на великі міжнародні аеропорти. Оцінка рівня забруднення атмосфери двигунами в стаціонарних наземних умовах є обов'язковою технічною процедурою після виконання ремонтних або регламентних робіт. Якщо нормативними документами дозволена скорочена процедура випробування двигуна, то для розрахунку викидів ЗР використовується фактичний час напрацювання за режимами.

Знаючи індекс емісії і час роботи одного двигуна, можна обчислити масу викидів ЗР даного типу.

Розраховані індекси емісії в подальшому коригуються відповідно до поправочних коефіцієнтів, які враховують вплив на їх величину якості авіаційного палива.

Для підвищення точності екологічного оцінювання рівня забруднення навколишнього середовища в районах аеродромів продуктами згорання авіаційного палива від ГТД ЛА потрібно розробити науково-методичний апарат визначення викидів забруднюючих речовин газотурбінними двигунами мобільних техногенних об'єктів.

При розробці цього науково-методичного апарату необхідно враховувати особливості впливу забруднюючих речовин газотурбінних

двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля. Необхідно створити модель взаємодії та визначення властивостей екологічних режимів роботи двигунів мобільних техногенних об'єктів на навколишнє природне середовище. Такий підхід дозволить удосконалити моделі впливу на стан довкілля забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів

Врахування особливостей оцінювання властивостей забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля повинно здійснюватися на основі науково-практичного підходу до визначення закономірностей впливу газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля.

При розробці науково-методичного апарату визначення індексу забруднення довкілля та оцінювання ризиків впливу газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на навколишнє середовище необхідно використовувати особливості розрахунків екологічних ризиків для оцінювання впливу забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля.

Необхідне прогнозування стану та оцінювання параметрів навколишнього середовища при впливі газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів та розроблення науково-практичних рекомендацій щодо їх застосування. Врахування моделі розповсюдження забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів дозволить прогнозувати екологічні впливи на стан довкілля газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів, а також надавати науково-практичні рекомендації щодо застосування екологічних режимів роботи газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів.

Таким чином, вирішення завдання удосконалення системи управління екологічною безпекою приаеродромних територій може бути математично формалізовано у вигляді композицій з наступних кортежів:

$$\{X, T, F, S, E\} \rightarrow \{A, G, N(G_1), N(G_2)\} \rightarrow \\ \rightarrow \{C, Z, A, Q, U\} \rightarrow \{P, F, \gamma, \rho, V, M_{np}, M_c, Y_{np}, Y_c, Y_{проз}\} \rightarrow \{A^*\},$$

де вихідні дані:  $X = \{x\}$  – модель зовнішнього середовища;  $T = \{t\}$  – технології прийняття рішень при управлінні ДПЛА;  $F = \{Fl\}$  – множина факторів, що впливають на прийняття рішення;  $S = \{s\}$  – ситуація, в якій проводяться екологічні спостереження за допомогою інформаційних систем;  $E\{e\}$  – умови наявності апаратури спостереження на ПРАТ;  $A$  – коефіцієнт випарювання;  $G$  – витрати палива (1 – на землі, 2 – у повітрі);  $N$  – потужність, що розвивається пусковим пристроєм;  $C$  – питома теплоємність;  $Z$  – число димності;  $A$  – коефіцієнт тепловіддачі при випаровуванні;  $Q$  – об'єм витрат повітря;  $U$  – режими роботи двигуна;  $P$  – повний тиск в суміші;  $F$  – прихована теплота випаровування;  $\gamma$  – в'язкість рідини;  $\rho$  – щільність рідини;  $V$  – коефіцієнт випаровування при вимушеній конвекції;  $M_{np}$  – молекулярна вага парів при заданій температурі;  $M_c$  – повний тиск у суміші;  $Y_{np}$  – емісія CO;  $Y_c$  – емісія NC;  $Y_{проз}$  – емісія NO<sub>x</sub>;  $A^*$  – управлінські рішення.

### Висновки по розділу 1

1. На сьогоднішній день екологи та екологічні організації відзначають високий рівень забруднення навколишнього середовища в районі аеропортів і аеродромів. При цьому, основним джерелом забруднення атмосфери повітря є повітряно-реактивні двигуни літальних апаратів. Вирішальне значення на поширення і акумуляцію ЗР має характер міської забудови. Виходячи з цього, виділяють напрямок вітру, при якому концентрації, що створюються викидами сукупності підприємств, є максимальними.

2. Складність створення систем запуску обумовлюється значною кількістю наступних факторів: власних пускових властивостей ГТД, їх зміни в залежності від зовнішніх умов, флуктуації пускових властивостей в рамках

парку двигунів, роботи основних вузлів ГТД в умовах несталої аеродинаміки та інших.

3. Визначено основні тенденції розвитку апаратної частини систем запуску. Перехід від гідравлічних і пневматичних інтегрованих систем, що приводяться від ротора двигуна, на інтелектуальні диференційовані системи, побудовані на базі електропривідних агрегатів з високою питомою потужністю, виглядає вельми ефективно в рамках таких програм як «більш електричний літак» («more electric aircraft», Safran group ), «Ultra efficient engine technology» («UEET», NASA) і інших.

4. Розташовані поблизу населених пунктів місця базування авіації, в процесі свого функціонування, чинять негативний вплив на стан біосфери як поблизу, так і на значній відстані від місць скупчення авіаційної техніки, знижуючи при цьому швидкість природного кругообігу речовин.

5. Серед широкого спектру ЗР, що викидаються в атмосферу аеродрому авіаційними двигунами ПС, найбільш інтенсивно надходять продукти неповного згоряння палива, які надають найбільш несприятливий вплив на навколишнє природне середовище в районі аеродрому.

6. Пил, що утворюється на території аеродрому під час проведення технологічних процесів підготовки ПС до польотів, поряд з продуктами згоряння, робить негативний вплив на прилеглі урбанізовані території, в тому числі і населений пункт.

7. Більшість існуючих моделей дозволяють описати процес формування полів концентрації лише поблизу джерела, в умовах штилю і інверсії температури. Геоекологічна оцінка забруднення атмосфери на території аеродрому при метеорологічних умовах сприятливих переносу ЗР, в основному, обмежується лише теоретичним описом процесів формування забруднення а районі аеродромів і механізмів переміщення і розсіювання ЗР в повітрі.

8. В результаті проведеного аналізу системи методичного забезпечення геоекологічної оцінки забруднення атмосфери аеродромів авіаційними



двигунами встановлено, що, незважаючи на велику кількість розроблених моделей для різних джерел, на сьогоднішній день відсутня універсальна загальноприйнята методика оцінки забруднення приземного шару атмосфери на території аеродрому.

9. Для дослідження процесу забруднення на території аеродрому авіаційними двигунами і уточнення метеорологічних умов, сприятливих переносу ЗР, доцільно проведення експериментальних досліджень в період проведення польотів.

Наступним етапом досліджень є розвиток науково-методичного апарату визначення забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗВИТОК НАУКОВО-МЕТОДИЧНОГО АПАРАТУ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ

В розділі розглядаються особливості впливу забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля. Запропонована модель взаємодії та визначення властивостей екологічних режимів роботи двигунів мобільних техногенних об'єктів на навколишнє природне середовище. Обґрунтовані рекомендації щодо удосконалення моделі впливу на стан довкілля забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів.

#### 2.1. Особливості впливу забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля

Шкідливі і токсичні речовини, що містяться у відпрацьованих газах двигунів залежно від механізму їх утворення поділяються на групи: – містять вуглець речовини – продукти повного і неповного згоряння палива ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , вуглеводні, в тому числі поліциклічні ароматичні); – речовини, механізм утворення яких безпосередньо не пов'язаний з процесом згоряння палива (оксиди азоту – за термічним механізмом); – речовини, викид яких пов'язаний з домішками, що містяться в паливі (сполуки сірки, свинцю, інших важких металів), а також утворюються в процесі зносу деталей (оксиди металів). Сумарний викид токсичних речовин літаками з ГТДУ безперервно зростає, що зумовлено підвищенням витрат палива до 20–30 т/год і неухильним зростанням кількості експлуатованих літаків. Викиди ГТД у навколишнє середовище в аеропортах і зонах, що прилягають до

випробувальних станцій, спричиняють негативний вплив на умови безпеки життєдіяльності. Порівняльні дані щодо викидів шкідливих речовин в аеропортах свідчать, що надходження від ГТДУ в приземний шар атмосфери складають: оксиди вуглецю – 55 %; оксиди азоту – 77 %; вуглеводні – 93 %; аерозолі – 97 %. Інші викиди виділяють наземні транспортні засоби з двигунами внутрішнього згорання [6, 11, 95].

Таким чином, екологічна небезпека забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів визначається наступними факторами: виникнення оксидів азоту, виникнення і окислення частинок твердого вуглецю, виникнення окису вуглецю і вуглеводнів. Розглянемо екологічні особливості цих факторів.

#### *Виникнення оксидів азоту.*

Оксиди азоту  $\text{NO}_x$  утворюються при всіх процесах згорання з використанням повітря в якості окислювача. Виникнення  $\text{NO}$  відбувається внаслідок контакту атмосферного кисню та азоту при високій температурі полум'я [38, 39].

Механізм утворення  $\text{NO}$  з азоту і кисню визначається ланцюговою реакцією, що вперше розглянуто Зельдовичем для реагуючої системи  $\text{N}_2\text{--O}_2\text{--N}_2$ . Швидкість виникнення (і розпаду  $\text{NO}$ ) в значній мірі залежить від температури і розраховується зазвичай за рівняннями реакцій [134]



Швидкість виникнення  $\text{NO}$  можна визначити за рівнянням [134]

$$\frac{d(\text{NO})}{dt} = K_1f(\text{O})(\text{N}_2) - K_1f(\text{NO})(\text{N}) + K_2f(\text{N})(\text{O}_2) + K_2b(\text{NO})(\text{O}), \quad (2.3)$$

де константи швидкостей реакції, що вимірюються в  $\text{см}^3 / (\text{моль}\cdot\text{с})$ , рівні:

$$K_{1f} = 6,19 \cdot 10^{13} T^{0,1} \exp\left(-\frac{75241}{RT}\right);$$

$$K_{1b} = 3,1 \cdot 10^{13} T \exp\left(-\frac{334}{RT}\right);$$

$$K_{2f} = 6,43 \cdot 10^9 T \exp\left(-\frac{6250}{RT}\right);$$

$$K_{2b} = 3,66 \cdot 10^8 T^{1,16} \exp\left(-\frac{37,847}{RT}\right);$$

де  $T$  – температура реакції в градусах Кельвіна.

Внаслідок експоненційної залежності констант швидкостей реакцій від температури швидкості утворення NO за рівнянням (2.1) буде змінюватися експоненціально зі зміною температури. На рис. 2.1 показані розраховані за рівнянням (2.3) значення концентрації NO за функцією часу для декількох температур полум'я (або складів суміші) при початковій температурі 811 К.

З рис. 2.1 видно, що час перебування суміші в первинній зоні камери згоряння становить близько 5 мс. За цим часом і даними (рис. 2.2) можна оцінити кінетичну межу концентрації NO, в основному для первинної зони камери. Слід зазначити, що для однорідної суміші за 5 мс утворюється мізерно мала кількість NO, якщо температура полум'я менше 1922 К, тобто низькі концентрації NO можна забезпечити при горінні бідної гомогенної суміші з рівномірною низькою температурою полум'я.

Температура полум'я гомогенної паливо-повітряної суміші знаходиться в прямій залежності від початкової температури  $T_{\text{нач}}$  і складу суміші  $a$ .

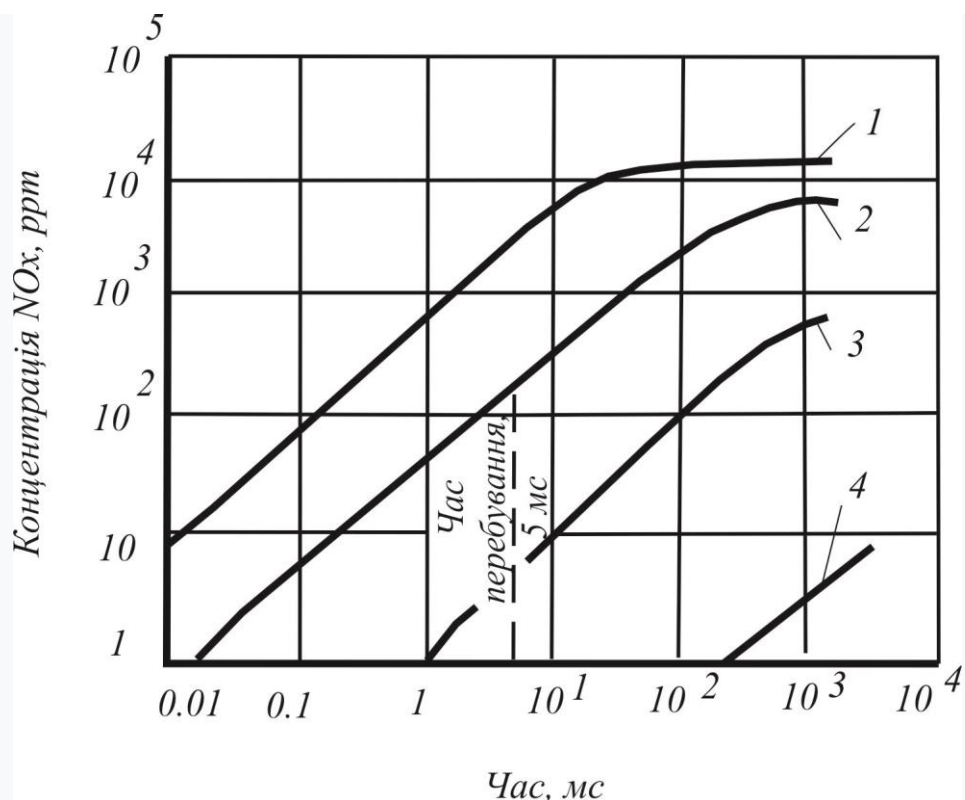


Рис. 2.1. Залежність концентрації утворення  $\text{NO}_x$  від часу при різних температурах полум'я, і складу суміші ( $T_{\text{нач}} = 811 \text{ K}$ ):  
 $T_k$  дорівнює відповідно 1 –  $2470 \text{ K}$  ( $a=1,36$ ); 2 –  $2200 \text{ K}$  ( $a=1,63$ ); 3 –  $1922 \text{ K}$  ( $a=2$ ); 4 –  $1644 \text{ K}$  ( $a=2,7$ ).

Післяполум'яна концентрація азоту і кисню безпосередньо залежить також від  $a$ . Отже, рівноважна концентрація  $\text{NO}$  є функцією  $T_{\text{нач}}$  і  $a$ . Розрахувати рівноважну концентрацію  $\text{NO}$  можна за формулою [97]

$$(\text{NO})_{\text{равн}} = \sqrt{K(\text{O}_2)(\text{N}_2)}, \quad (2.4)$$

де  $(\text{NO})_{\text{равн}}$  – рівноважна концентрація окису азоту (молярна частка);

$K = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$  – константа швидкості рівноважної реакції;  $A$  – коефіцієнт;

$(\text{O}_2)$  – післяполум'яна концентрація кисню (молярна частка);  $(\text{N}_2)$  – післяполум'яна концентрація азоту (молярна частка).

«Бідна» гілка кривої рівноважної концентрації  $\text{NO}$  з відповідною температурою полум'я, розрахована за формулою (2.4), представлена на рис. 2.2. Зі збільшенням початкової температури при даному значенні  $a$

концентрація NO експоненціально зростає. Однак при заданій початковій температурі бідним складам суміші відповідають нижчі рівноважні концентрації NO. Наприклад, рівноважна концентрація NO при  $a=1,36$  і початковій температурі 311 К така ж, як і при  $a=2,04$  та початковій температурі 811 К.

Обумовлено це тим, що при зазначених умовах температура полум'я однакова, хоча для бідніших сумішей концентрація кисню вище. З рис. 2.2 видно, що низька концентрація NO можлива і при високих початкових температурах, якщо камера працює на бідній, попередньо змішаній суміші повітря і палива, яка забезпечує низьку температуру полум'я.

Іншим шляхом досягнення низької концентрації NO є організація горіння при складі суміші багатшої стехіометричної. На «багатій» гілці кривої рівноважної концентрації NO спостерігається ще більш значне зменшення концентрації NO в міру збагачення суміші (рис. 2.3). На рис. 2.3 показано зміну рівноважної концентрації  $\text{NO}_x$  від  $a$  і  $T$  при спалюванні палива *IetA*. Пунктиром нанесена кінетична крива, отримана розрахунковим шляхом за часом перебування 2 мс. Дані з рівноваги і кінетики тут перетворені в одиниці показника викиду з розмірністю г/кг палива, що дозволяє представити величини в формі, яка виключає їх залежність від ступеня розведення повітрям [131].

Використовуючи показник, викиду, можна дати оцінку конструкції, з різними типами енергетичних двигунів з різної схемою рециркуляції. Відзначимо, що максимальна рівноважна величина  $\text{NO}_x$  відповідає значенню  $a=1,25$  і в 20 разів перевищує величину, розраховану на основі кінетичних обмежень. При  $a=1$  максимальна кінетична величина  $\text{NO}_x$  становить приблизно 7,9 г/кг палива. Оскільки при режимах повного навантаження камери працюють при  $a \cong 3,5$ ,  $\text{NO}_x$ , що утворюється в первинній зоні при стехіометричних умовах, розбавляється приблизно в три рази. При

використанні одиниць показника викиду відпадає необхідність в коректуванні щодо розведення.

Слід зазначити, що реалізація можливості зниження концентрації NO шляхом Perezбагачення суміші пов'язана з рядом труднощів практичного характеру. Продукти згорання Perezбагаченої суміші перед розведенням повинні бути охолоджені повітрям: за відсутності охолодження температура при догоранні суміші буде, зростати, в результаті може утворитися велика кількість NO. При згорянні Perezбагаченої суміші в реальній камері іноді виникає необхідність попереднього перемішування палива і повітря, щоб уникнути горіння крапель при стехіометричному складі, яке супроводжується утворенням великої кількості NO<sub>x</sub>. Крім того, для забезпечення необхідної віддачі тепла від Perezбагачених продуктів згорання перед введенням в камеру змішувача повітря буде потрібно мати надмірно довгу камеру.

У процесі горіння крім атмосферного азоту джерелом виникнення NO є азот, що входить до складу органічних компонентів палива. Експериментами доведено, що роль азоту палива змінюється від основної при низьких температурах згорання до незначної при високих. У загальному випадку при роботі авіаційного двигуна це джерело NO несуттєве, оскільки в паливах для реактивних двигунів міститься менше 50 млн-1 (вага) азоту, що менше 0,16 кг NO (в розрахунку на NO<sub>2</sub>) на 1000 кг палива.

Основну проблему захисту навколишнього середовища, пов'язану з викидом NO<sub>x</sub> фактично створюють NO<sub>2</sub>. Наведені рівняння виникнення NO важливі, тому, що саме NO в основному передує утворенню NO<sub>2</sub>. Двоокис азоту, що реагує на світлі з вуглеводнями і озоном, призводить до забруднення повітря. Крім того, NO<sub>2</sub> реагує з водою, утворюючи кислоту, яка викликає корозію, і поглинає світло, що знижує видимість, контрастність і яскравість віддалених об'єктів.

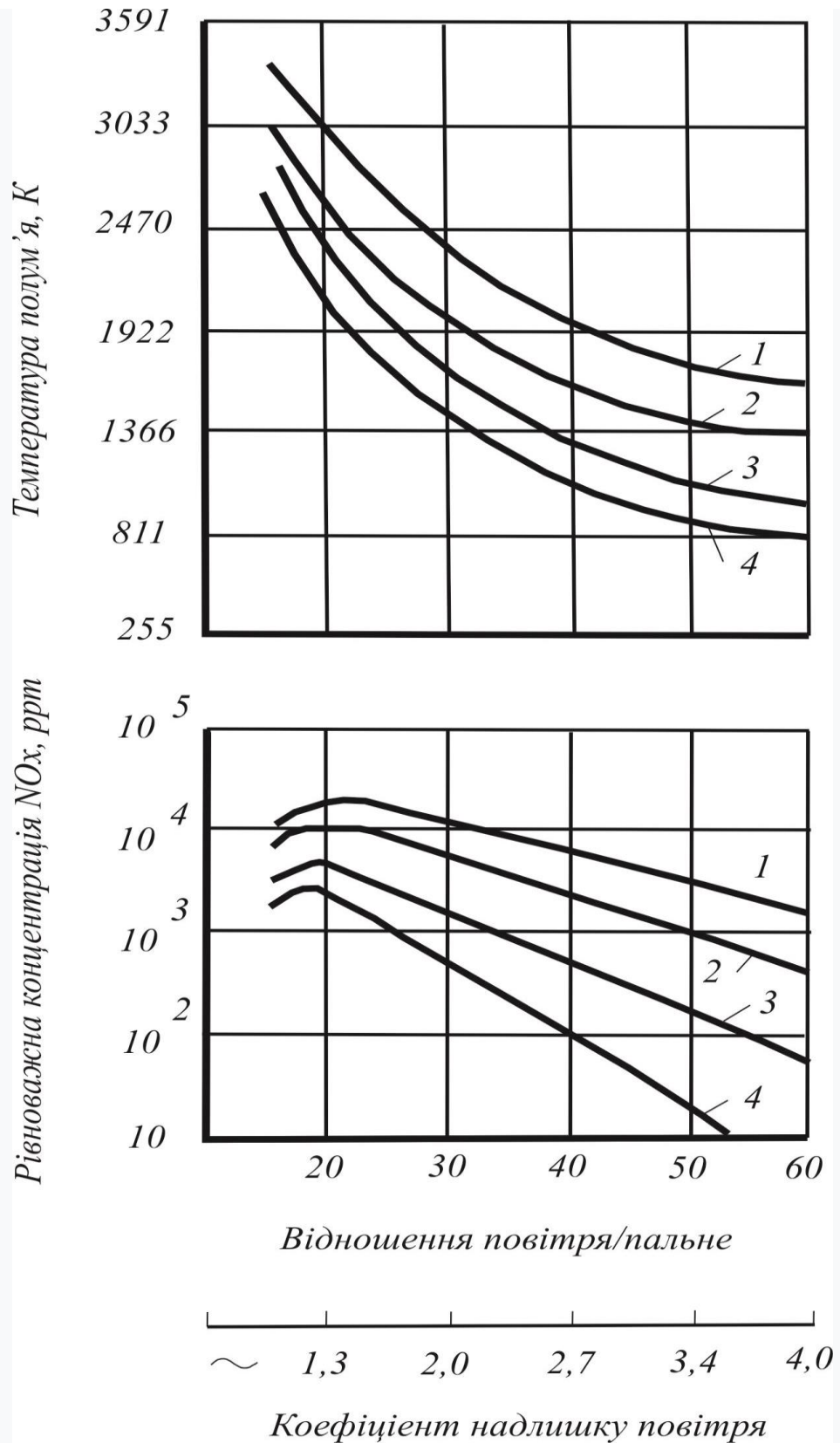


Рис. 2.2. Залежність температури полум'я і рівноважної концентрації NO від складу суміші при різних початкових температурах:

$T_{\text{нач}}$  дорівнює відповідно 1 – 1089 K; 2 – 811 K; 3 – 533 K; 4 – 311 K.



## Відношення повітря/пальне

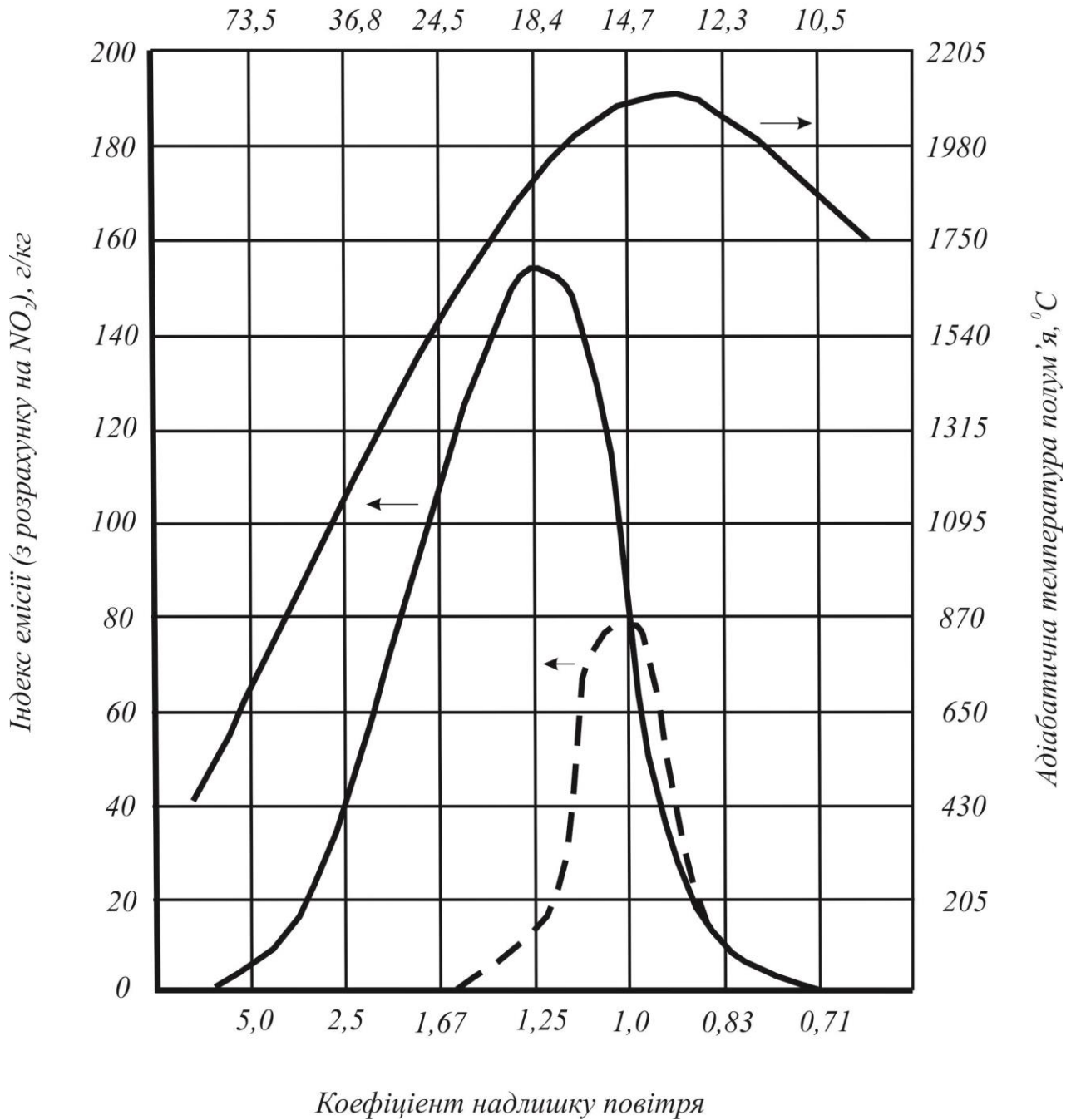


Рис. 2.3. Рівноважні значення  $\text{NO}_x$  при спалюванні палива IetA (підігрів повітря до  $205^{\circ}\text{C}$ , тиск  $4 \cdot 10^5$  Па):

— — рівновага; — кінетика при 2 мс (значення збільшені в 10 раз)

На основі аналізу процесів утворення окислів азоту можна відзначити наступне. Оскільки утворенню  $\text{NO}_x$  з термодинамічної точки зору сприяють високі температури, а реакція утворення  $\text{NO}$  має велику енергію активації

(~115 ккал / моль), виникнення NO має відбуватися в основному в високотемпературній первинній зоні згоряння. Перш за все – це область зворотної течії. Незважаючи на те що суміш в загальному випадку тут збагачена паливом, час перебування її в цій області, порівняно великий. Другим осередком виникнення окису азоту є ділянка на стику первинної і вторинної зон, де локальні умови в суміші змінюються від збагачення паливом (первинна зона) до збіднення паливом в зоні розведення. При цьому вважається, що вплив тиску і концентрації кисню мають другорядне значення. Кількість утворення окису азоту пропорційна часу перебування при типових температурних умовах і різко скорочується, якщо температура газу падає нижче 2000 – 2100 К. Далі концентрація NO зменшується тільки за рахунок розведення повітрям. У процесі охолодження гарячих продуктів згоряння NO замерзає при кінетично граничній концентрації. Швидкість дисоціації NO настільки мала, що в звичайних камерах згоряння її можна не враховувати.

Отже, щоб досить точно розраховувати швидкість утворення окису азоту в продуктах згоряння газотурбінних двигунів, необхідно враховувати основні фізичні і хімічні механізми, що діють в процесі її утворення.

#### *Виникнення і окислення частинок твердого вуглецю.*

До теперішнього часу кінетика виникнення вуглецю вивчена недостатньо, тому розглянемо якісну картину найбільш важливих процесів, що відбуваються в первинній зоні і призводять до утворення вуглецю. Цей аналіз отриманий за даними з вивчення полум'я пояснює результати вимірювань в вихлопних газах, що витікають з камери згоряння.

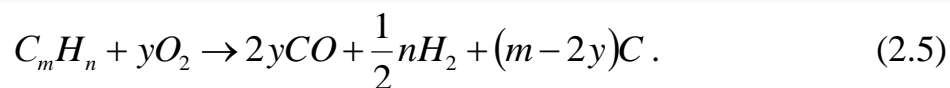
Частинки сажі, що утворюються в камері згоряння, є продуктом неповного згоряння або термічного розщеплення вуглеводневого палива. До її складу входять речовини, що містять вуглець і водень. Власне вуглець (нагар), що утворюється на гарячих або холодних поверхнях, має відмінні від сажі властивості і в цій роботі не розглядається.

Сажа, що виникає в світлому полум'ї, – м'яка і складається в основному з конгломератів сферичних частинок, що мають розміри, достатні для надання видимості димності вихлопних газів. У полум'ї з меншою температурою (наприклад, при спалюванні газового палива) сажі утворюється менше. Рідкі вуглеводневі палива мають більш високе співвідношення С/Н, і при спалюванні стехіометричних сумішей ймовірність утворення сажі вище, ніж в газовому полум'ї.

Проміжні продукти реакції горіння містять велику кількість різних вуглеводнів. Однак для ГТД характерно значно менший вміст різних вуглеводнів (ніж, наприклад, в поршневих двигунах), так як процес згоряння протікає більш тривалий час і при достатній кількості кисню, необхідного для доведення реакції до рівноважного стану.

Зростання частинок вуглецю з вуглеводневих молекул супроводжується утворенням конгломератів. Конгломерати під електронним мікроскопом виглядають як мережа пересічних ланцюжків, що складаються з майже сферичних частинок. Структурним матеріалом для конгломератів є поліацетілени, які спочатку утворюються з вільного вуглецю як невеликі радикали і в міру приєднання вуглецю виступають як важкі молекули.

Спрощену модель виникнення вільного вуглецю в процесі окислення вуглеводнів  $C_mH_n$  при температурі понад 1400 К можна представити у вигляді рівняння [117, 137]



При  $m > 2y$ , (тобто, коли атомарне співвідношення вуглець кисень вище 1) виділяється твердий вуглець, якщо  $m < 2y$ , то спостерігається бідне полум'я, і вільний вуглець не утворюється.

Процес утворення сажі з молекул вуглеводню – комплексний. Лабораторні дослідження проведені [141] показали, що сажа спочатку утворюється у формі дуже тонких частинок, що ростуть з великою швидкістю. Коли частинки виростають до діаметра близько  $10^{-6}$  см,

подальше виникнення сажі гальмується внаслідок окислення її під дією радикалів ОН, що утворюються при горінні.

Концентрація радикалів ОН залежить від температури. Малі концентрації ОН, особливо при згорянні багатих сумішей, компенсуються їх великою реакційною здатністю. Таким чином, для усунення димлення необхідно утворення великої кількості радикалів ОН. Якщо утворюється велика кількість первинних частинок, то агрегування (коагуляція) цих частинок відбувається швидше, ніж їх окислення радикалами ОН, і тоді спостерігається димний вихлоп.

При лабораторних дослідженнях з попереднім змішуванням встановлено, що при тисках до  $196 \text{ н/см}^2$  ( $20 \text{ кгс/см}^2$ ) і коефіцієнті надлишку окислювача вуглецю утворюється мало. Його кількість значно зростає зі збільшенням тиску. Дані за обмеженим вуглеводневим дифузійним полум'ям вказують також на те, що вихід вуглецю збільшується з ростом надлишку пального і тиску. У загальному випадку вуглець можна розглядати як проміжний продукт реакції, витрата якого надзвичайно мала у порівнянні з основними реакціями в газовій фазі. Так, якщо вуглеводневе полум'я гаситься безпосередньо після завершення основних газофазних реакцій, як у випадку необмеженого дифузійного полум'я або полум'я попередньо перемішаної суміші типу бунзеновського пальника, реакції окислення вуглецю часто не закінчуються.

У процесі горіння в ГТД реакція витрачання вуглецю може «заморозитися» чи «не заморозитися» до завершення реакції в залежності від того, як швидко продукти згорання перемішуватимуться з охолоджуючим повітрям. Отже, в загальному випадку процеси, які контролюють концентрацію твердого вуглецю і  $\text{NO}_x$ , подібні. Досягнуть ці компоненти свого рівноважного значення чи ні, залежить від кінетики, надзвичайно сповільненій в порівнянні з іншими реакціями горіння.

Виникнення твердого вуглецю відбувається в основному в області, що безпосередньо примикає до струменя палива поблизу форсунок. За браком

повітря суміш тут сильно збагачена паливом, і велика частина палива згоряє при малих значеннях коефіцієнта  $a$ . З підвищенням рівня тиску в камері згоряння кут конуса розпорошеного палива зменшується, ступінь перезбагачення суміші в обмеженій конусом порожнині збільшується, і ймовірність утворення вуглецю зростає. Ефективним засобом зменшення виходу частинок диму є так звана аерація паливного факела, яка здійснюється шляхом подачі значної кількості повітря безпосередньо в паливний конус. Таким чином, досягається збільшення коефіцієнта надлишку повітря і поліпшується процес підготовки суміші.

Важливим процесом, що визначає кількість диму в вихлопі ГТД, є горіння частинок сажі в гарячих продуктах згоряння. У загальному випадку горіння твердих частинок – надзвичайно складний процес. Тут важливу роль відіграє дифузія реагентів до поверхні, десорбція продуктів з поверхні і дифузія продуктів від поверхні. Крім того, якщо концентрація частинок досить висока, може виникнути коагуляція, малих частинок з утворенням великих за розміром. Яке з цих явищ буде переважати, залежить від температури, тиску і складу навколишньої частки середовища, а також від розмірів частинок і їх концентрації. Розміри частинок у вихлопі ГТД складають від 0,01 до 0,1 мкм. Форма частинок може бути як правильної сферичної, так і неправильної, згустки неправильної форми можуть досягати 1 мкм. Аналіз складу частинок показує, що вони більш ніж на 96 % за вагою складаються з вуглецю.

Досліджень з вигорання частинок вуглецю, розміри яких характерні для вихлопу ГТД, проведено дуже мало. Однак, згідно з наявними даними, процеси дифузії незначно впливають на швидкість горіння сажі з діаметром частинок менше 25 мкм. При проведенні експериментів зазначалося, що вплив коагуляції невеликий також в тих зонах полум'я, де відбувається інтенсивне окислення частинок. Роль коагуляції помітно проявляється лише на етапі виникнення вуглецю. Вивчення процесів окислення сажі в газоподібних продуктах згоряння при різних коефіцієнтах надлишку повітря,

тиску і температурах [117] дозволило знайти розрахункові залежності, що дозволяють оцінити швидкість реакції «дожигання» вуглецю. Так, зміну питомої швидкості реакції в залежності від парціального тиску можна записати у вигляді

$$\omega = 1,085 \cdot 10^4 \left( \frac{P_{O_2}}{T^{\frac{1}{2}}} \right) \exp\left( -\frac{39300}{RT} \right), \quad (2.6)$$

де  $\omega$  – питома швидкість реакції, гсм/с;  $P$  – парціальний тиск кисню,  $N/\text{см}^2$  9,8.

Виходячи з припущення, що радикал ОН надає більш суттєвий (ніж  $P_{O_2}$ ) вплив на реакцію окислення і деяка частка ( $n$ ) зіткнень радикалів ОН з поверхнею частинок призводить до вибивання атома вуглецю, була отримана інша залежність для питомої швидкості реакції

$$\omega = 1,27 \cdot 10^2 n \frac{P_{OH}}{T^{\frac{1}{2}}}, \quad (2.7)$$

де  $P_{OH}$  – парціальний тиск радикалів ОН,  $n \cong 0,1$ .

Передбачається також, що питома швидкість реакції повинна лінійно залежати від парціального тиску  $\text{CO}_2$  при температурах 1800 – 1940 К. Незважаючи на те, що вирази (2.6) і (2.7) справедливі для більш низьких температур і парціального тиску кисню, ніж це має місце в камері ГТД, вони дозволяють оцінити хоча б у першому наближенні здатність камери згорання допалювати утворений в ній вуглець.

На рис. 2.4 представлені розрахункові швидкості горіння частинок сажі в продуктах згорання  $C_nH_{2n}$  в повітрі при умовах, типових для ГТД (початкова температура повітря – 700 К, тиску – 147 н / см<sup>2</sup>) в залежності від коефіцієнта надлишку повітря в суміші газоподібних продуктів. Дані представлені у вигляді швидкості вигорання поверхні:

$$\frac{dr}{dt} = -10^4 \frac{\omega}{P_s}, \quad (2.8)$$

де  $\frac{dr}{dt}$  – швидкість вигорання поверхні, мкм/с;  $P_s$  – щільність сажі, г/см<sup>3</sup> ( $P_s \sim 2,25$  г/см<sup>3</sup>).

Для сферичної частинки  $\frac{dr}{dt}$  – швидкість зміни радіуса.

Незважаючи на те, що розрахунки дають значне розходження якраз в найбільш важливій для ГТД області  $0,9 < a < 1,4$ , вони все-таки мають порівняльний порядок величини.

Отримані швидкості горіння показують, що значна кількість сажі, що утворюється в багатих паливом областях первинної зони, може витратитися в інших областях цієї зони і у вторинній зоні. Наприклад, радіус сферичної частинки, яка перебуває 3 мс в продуктах майже стехіометричного складу в первинній зоні, змінюється приблизно на 0,1 мкм. Розміри частинок несферичної форми можуть змінюватися більш значно.

Порівняння розрахункових змін радіусів з розмірами частинок, за якими спостерігають вказує на те, що окислення вуглецю грає важливу роль при визначенні рівня задимленості вихлопу. Щоб досягти вихідного перетину двигуна і не бути витраченою, частка сажі повинна більшу частину часу знаходитися у відносно холодних зонах камери згоряння поблизу жарової труби.

Присутність в продуктах згоряння незгорілих оксидів вуглецю та вуглеводнів свідчить про незавершеність процесу горіння в камері. Складний процес окислення вуглеводнів може бути умовно поділений на три стадії. Спочатку утворюються легкі, в повному обсязі окислені вуглеводні типу формальдегіду, ацетальдегіду, формула (НСО), органічних перекисів і т.д. Потім протікають реакції з утворенням великих кількостей Н<sub>2</sub>О і СО.

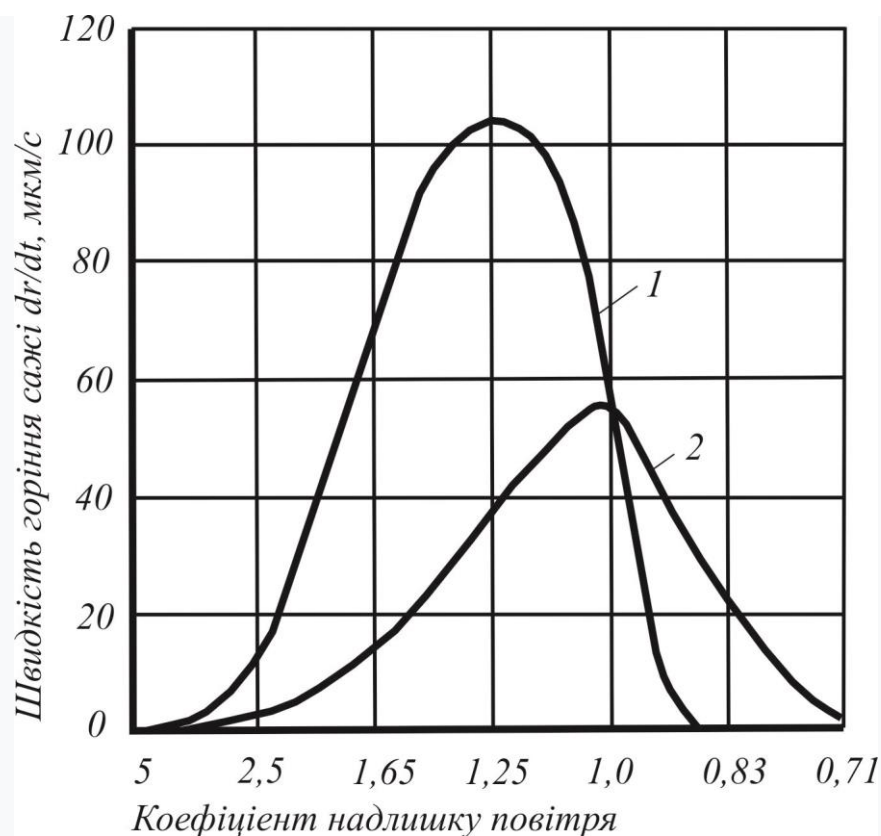
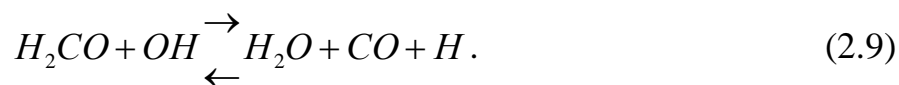


Рис. 2.4. Швидкість горіння частинок сажі в продуктах адіабатичного процесу горіння гасу  $C_nH_{2n}$  і повітря при  $700\text{ K}$  і  $147\text{ н/см}^2$  ( $15\text{ кгс/см}^2$ : 1, 2 – розраховані відповідно за рівняннями (2.6) и (2.7))

*Особливості виникнення окису вуглецю і вуглеводнів.*

Найбільш важливою реакцією, яка призводить до утворення CO, є реакція



Кінцева стадія, особливо для горіння з нестачею палива, характеризується в основному перетворенням CO в  $CO_2$ , головну роль в окисленні CO відіграє реакція  $CO + OH \begin{matrix} \rightarrow \\ \leftarrow \end{matrix} CO_2 + H$ .

Первинне окислення палива з утворенням окису вуглецю і вуглеводнів відбувається поблизу головки камери згорання в області зворотних течій. Доокислення до кінцевих продуктів здійснюється або в первинній зоні (при



збіднених сумішах), або у вторинній зоні, куди додатково підводиться повітря (для багатих сумішей).

При горінні багатьох паливних сумішей окис вуглецю є одним з основних компонентів кінцевих продуктів згоряння, для бідних сумішей вона є проміжним з'єднанням. Тому концентрація CO в післяполум'яній зоні повинна бути близька до термодинамічно рівноважного значення. Дійсно, зіставлення залежностей вмісту CO від складу суміші для ламінарного і турбулентного полум'я з термодинамічно рівноважними значеннями (див. рис.2.5) підтверджує зазначену особливість [47, 117].

На процесі утворення CO і HC великий вплив робить ступінь попереднього випаровування і перемішування палива з повітрям. Встановлено, що найменших концентрацій CO можна досягти при горінні рідкого палива у вигляді відносно великих крапель при малих швидкостях випаровування і перемішування в умовах бідного складу суміші. Концентрації незгорілих вуглеводнів зменшуються при горінні з попередніми перемішуванням або при горінні бідних сумішей з краплями невеликих розмірів.

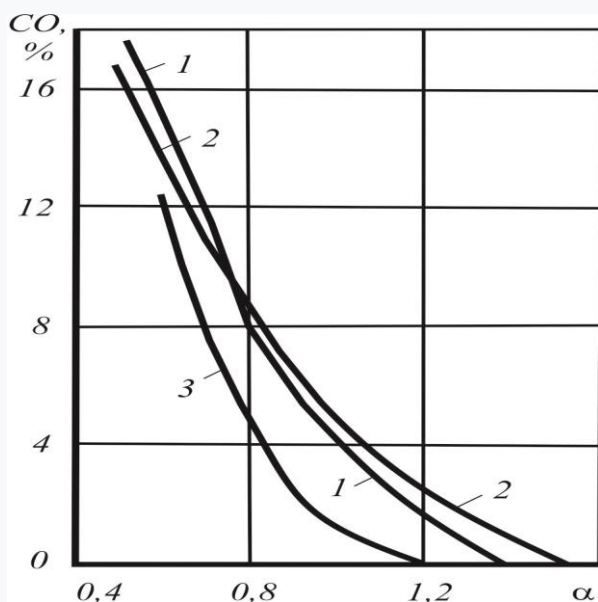


Рис. 2.5. Зміст окису вуглецю в продуктах горіння з різними типами полум'я:  
1— рівноважний склад; 2 – турбулентне полум'я; 3 – ламінарне полум'я.

## 2.2. Оцінка режимів роботи двигунів мобільних техногенних об'єктів та їх вплив на навколишнє природне середовище

Проведений аналіз свідчить, що найбільший вплив на виникнення і викид токсичних сполук здійснюють: склад суміші в первинній зоні, температура і тиск на вході в камеру, час перебування і ступінь перемішування паливо-повітряної суміші в первинній зоні камери згоряння.

Розглянемо вплив кожного фактору окремо.

*Склад суміші в первинній зоні.* Регулювання складу суміші в первинній зоні можна здійснити перерозподілом повітря шляхом зміни геометрії елементів жарової труби.

Експерименти в дослідній камері згоряння, схема якої показана на рис. 2.6, показали, що від величини коефіцієнта надлишку повітря суттєво залежить вихід  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  і  $\text{HC}$ .

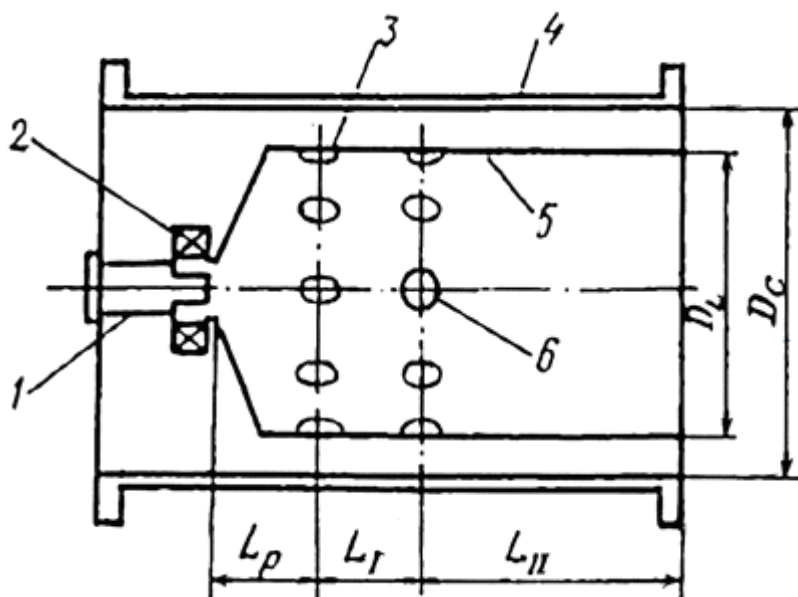


Рис. 2.6. Схема камери згоряння, де: 1 – пневматична форсунка; 2 – радіальний завихритель з регульованою площею сопла; 3 – отвори з регульованою площею для входу вторинного повітря; 4 – корпус; 5 – жарова труба; 6 – отвори змішувальної зони

У табл. 2.1 вказані основні геометричні розміри двох модифікацій камери згоряння. Приклад подібних залежностей для двох варіантів камери

представлено на рис. 2.7. Тут коефіцієнт надлишку повітря розрахований за середньою величиною витрати, яка визначалася як сума витрат повітря через форсунку, завихритель і частина (40%) витрати, що надходить в жарову трубу через отвори вторинної зони.

Максимальні значення  $\alpha$  в даному випадку відповідають моменту безпосередньо перед бідним зривом. Як впливає з рис. 2.7, викиди  $\text{NO}_x$  максимальні для суміші, склад якої близький до стехіометричної, і поступово зменшуються з збільшенням  $\alpha$ . Викиди  $\text{CO}$  і  $\text{HC}$ , навпаки, залишаються приблизно постійними і відносно низькими в широкому діапазоні зміни  $\alpha$  й потім різко збільшуються з наближенням до межі бідного зриву. Порівняння кривих для  $\text{CO}$  та  $\text{HC}$  показує, що зростання викидів  $\text{CO}$  починається при більш низькому значенні  $\alpha$  й менш різко, ніж викидів  $\text{HC}$ . Це пояснюється відмінністю швидкостей реакцій окислення  $\text{CO}$  і вуглеводнів і різної відносної чутливості цих реакцій до зменшення температури полум'я при збільшенні  $\alpha$ .

Таблиця 2.1

Розміри, мм	Камера А	Камера Б
$D_C$	211	112
$D_L$	173	89
$L_P$	86	16
$L_L$	86	46
$L_D$	198	112

*Температура і тиск на вході в камеру.* Рівні тиску і температури на вході в камері в першу чергу впливають на кінетичну і хімічну рівновагу реакцій, що відбуваються в зоні горіння. Вплив цих, параметрів на викиди  $\text{NO}_x$  і  $\text{CO}$  показано на рис. 2.8. Як і слід було очікувати, збільшення  $P_k$  і  $T_k$  при збереженні постійного значення  $\alpha$  в первинній зоні призводить до збільшення показника викидів  $\text{NO}_x$  і до зменшення викидів  $\text{CO}$  в цілому [13, 14].

Очевидно, що при більш високих значеннях  $P_k$  і  $T_k$  суттєво розширюються межі стабілізації полум'я за  $\alpha$ , тому мінімально досяжні викиди  $\text{NO}_x$  при високих значеннях  $P_k$  і  $T_k$  трохи нижче.

Звідси випливає, що параметри на вході в камеру сильніше впливають на межі стабілізації полум'я, ніж на виникнення  $\text{NO}_x$ . Для способу подачі палива за допомогою пневматичної форсунки таке явище обумовлено не тільки впливом реакції горіння на кінетику, але і поліпшенням розпилення і випаровування крапель палива при високій температурі і тиску. Збільшення швидкості випаровування крапель в первинній зоні сприяє збільшенню відносного часу перебування суміші і поліпшенню стабільності горіння палива [30, 31].

*Час перебування в первинній зоні.* Для заданих параметрів потоку ступінь завершення різних реакцій в камері залежить від часу перебування  $\tau_n$  гарячих газів в первинній зоні. З точки зору зниження емісій – це найважливіший фактор. Внаслідок складності структури течії первинна зона характеризується спектром значень часу перебування. Однак при вивченні сумарного впливу часу перебування на вихід токсичних компонентів корисно визначити номінальне значення  $\tau_n$ , яке розраховується за параметрами на вході в камеру і повної витрати повітря в первинній зоні. Ця величина і служить мірою загального рівня часу перебування [58].

Вплив часу перебування на викиди  $\text{NO}_x$  і  $\text{CO}$  показано на рис. 2.9. Різні значення  $\tau_n$ , що відповідають двом кривим, отримані шляхом зміни відносної витрати повітря в первинній зоні.

Вплив  $\tau_n$  на викиди  $\text{NO}_x$  практично при всіх значеннях  $\alpha$  дещо слабше лінійного. З іншого боку, відмінність викидів  $\text{CO}$ , що відповідають різним значенням  $\text{NO}_x$ , відносно мала при малих  $\alpha$  й значно збільшується для бідних сумішей [24].

Таким чином, якщо розглядати бідні суміші, то на викиди  $\text{CO}$  початкова швидкість розведення газу повітрям впливає сильніше, ніж  $\tau_n$ . У всякому разі, дані, наведені на рис. 2.9 свідчать про те, що вплив  $\tau_n$  на викиди  $\text{CO}$  значно сильніше, ніж на викиди  $\text{NO}_x$ . Звідси випливає, що регулювання розрахункового значення  $\tau_n$  – можливий ефективний шлях компромісу між викидами  $\text{NO}_x$  і  $\text{CO}$  [117, 137].

## Коефіцієнт надлишку повітря

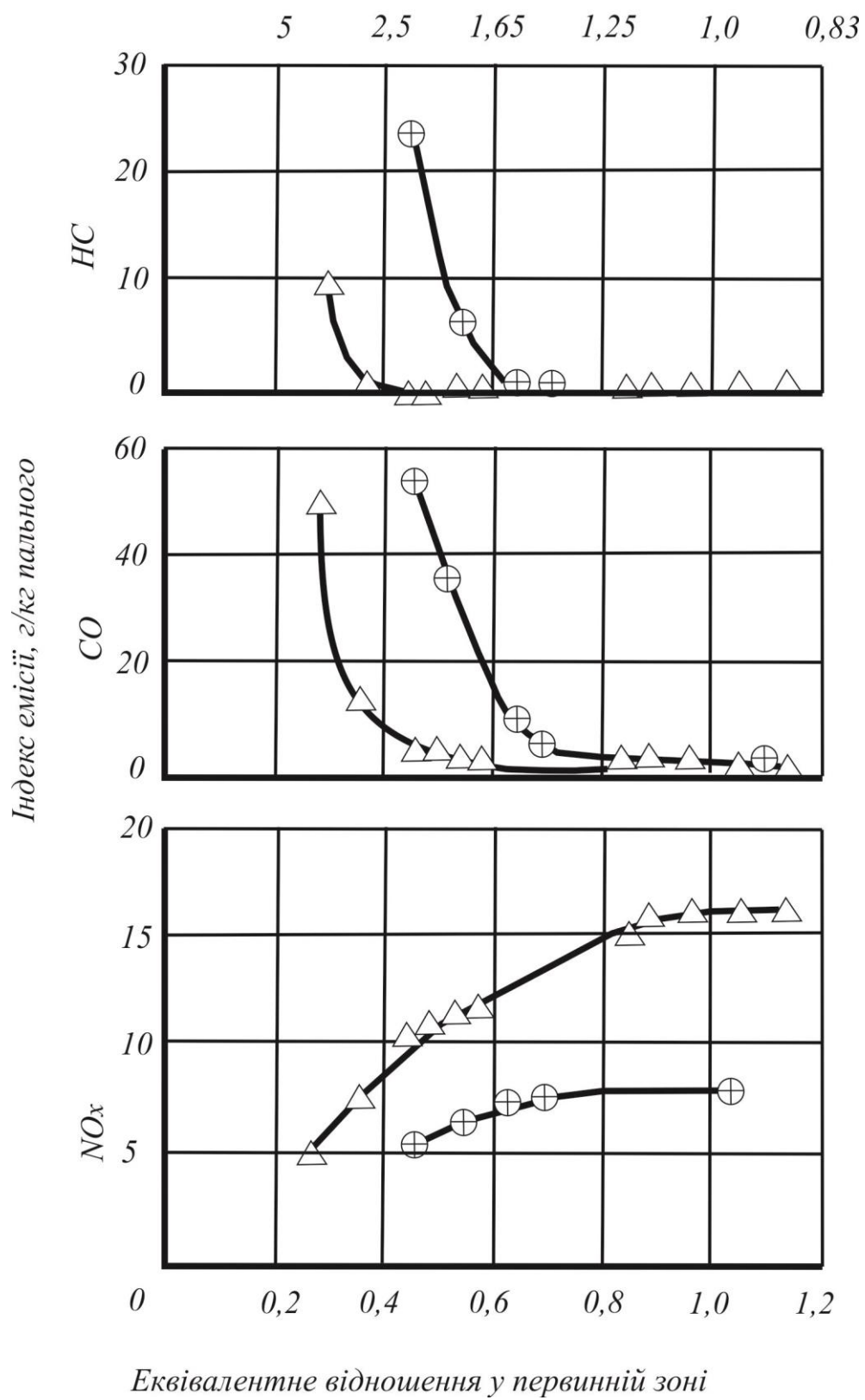
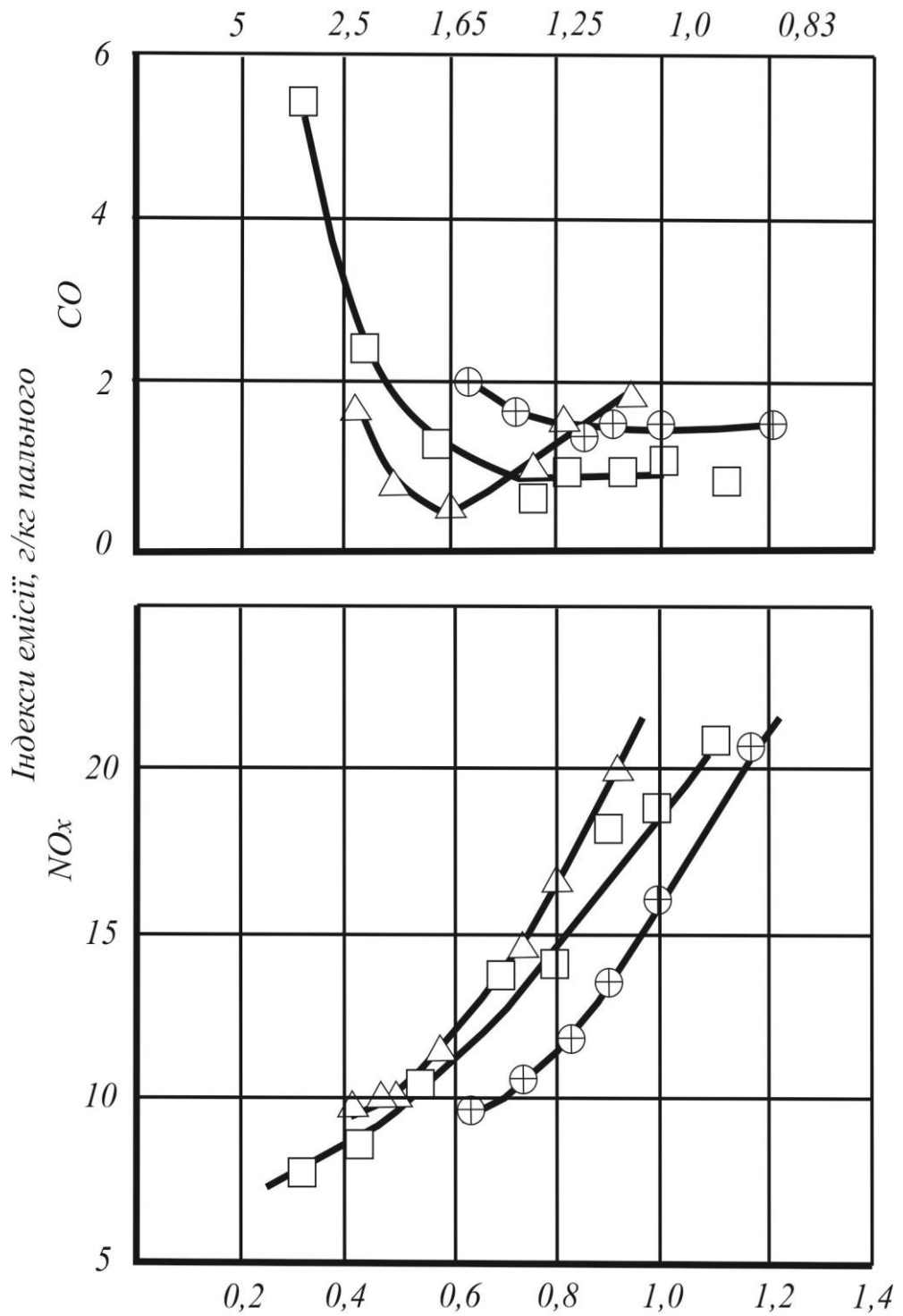


Рис. 2.7. Типова залежність викидів камери згорання від складу суміші в первинній зоні

## Коефіцієнт надлишку повітря



## Середнє еквівалентне відношення у первинній зоні

Рис. 2.8. Вплив параметрів на вході в камеру на викиди  $\text{NO}_x$  і CO

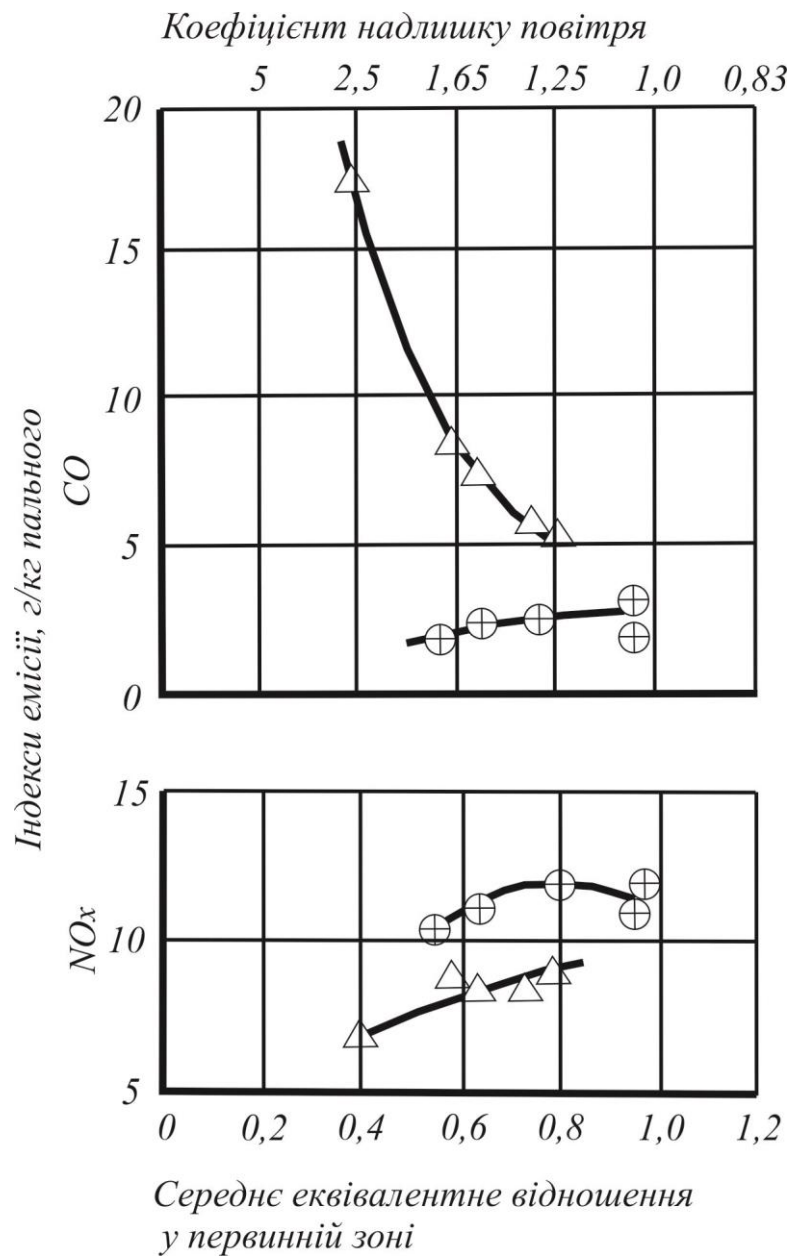


Рис. 2.9. Вплив часу перебування в первинній зоні на викиди  $\text{NO}_x$  і  $\text{CO}$

Проведений аналіз свідчить, що збільшення часу перебування в первинній зоні призведе до збільшення значення  $\alpha$ , при якому відбувається зрив полум'я. Рис. 2.9 не підтверджує цього, так як випробування при більш високих значеннях  $\tau_n$  не передбачали докладного дослідження робочого режиму, близького до зриву полум'я. Проте, відомі результати, які свідчать про те, що збільшення  $\tau_n$  призводить, як і передбачалося, до розширення діапазону роботи камери за бідним зривом [117, 141].

Необхідність спалювання палива при бідному складі суміші ускладнює проблему зриву полум'я і пов'язане з цим завдання досягнення низького рівня викидів CO і HC. Оскільки час перебування на зрив полум'я і на викиди CO і HC впливає сильніше, ніж на викиди  $\text{NO}_x$ , то для отримання стабільного горіння і загального низького рівня викидів камеру згорання слід проектувати з відносно високим  $\tau_n$ . Збільшення  $\tau_n$  може бути досягнуто шляхом збільшення розмірів первинної зони або ступеня рециркуляції, або обома способами одночасно. Досягти рівень викидів, який задовольняє нормам при роботі камери близько межі бідного зриву полум'я можливо, тільки застосовуючи комплекс заходів, до яких відносяться: збільшення  $\tau_n$ , регулювання параметрів первинної зони, зміна геометрії камери і відповідна організація системи упорскування і змішання палива.

*Ступінь перемішування паливо-повітряної суміші.* В якості міри однорідності паливо-повітряної суміші в первинній зоні приймається параметр  $S$ , який названо ступенем незмішаності. Параметр  $S$  визначається як відношення середньоквадратичного відхилення функції розподілу величини  $a$  до середнього значення величини  $a_{\text{ср}}$ . Відповідно до цього зменшення  $S$  відповідає поліпшенню рівномірності розподілу паливо-повітряної суміші, а значення  $S = 0$  відповідає повністю перемішаній суміші [31, 121].

Очевидно, що ідеальним випадком стало б попереднє випаровування палива і повне перемішування його з необхідним для горіння кількістю повітря перед подачею в первинну зону. Однак цей метод підготовки палива ускладнює завдання запобігання проскакування полум'я і забезпечення шляху змішування, достатнього для повного випаровування палива при одночасному забезпеченні гарантії відсутності самозаймання паливо-повітряної суміші. Іншим способом, протилежним попередньому перемішуванню, є уприскування палива безпосередньо в камеру і перемішування в первинній зоні перед початком горіння. В цьому випадку форсунка, що подає паливо повинна забезпечувати тонке розпилювання палива і швидкий його розподіл в потоці повітря. Крім того, особлива увага



повинна приділятися аеродинаміці течії в первинній зоні, що гарантує інтенсивне перемішування [58, 61].

Отже, ступінь рівномірності перемішування суміші залежить від способу уприскування палива і ступеня аеродинамічного перемішування. Вплив цих двох факторів на змішувальність можна оцінити таким виразом [58]

$$S = K_1 S_\phi + K_2 e^{-K_3 \sqrt{\frac{\Delta P_L}{F_{KC}}}}, \quad (2.10)$$

де  $S_\phi$  – величина, що залежить від системи уприскування палива;  $K_1$ ,  $K_2$  та  $K_3$  – константи;  $\Delta P_L$  – втрати тиску в камері;  $F_{KC}$  – характерна площа камери.

Ступінь впливу системи уприскування палива на загальний рівень перемішування залежить від того, як швидко паливо розподіляється в потоці повітря, що протікає поблизу паливного струменя, і яку частину первинного потоку становить це повітря. З рівняння (2.10) випливає, що вплив аеродинамічного перемішування визначається головним чином втратами тиску в жаровій трубі.

Якби головним джерелом неоднорідності суміші в первинній зоні було аеродинамічне перемішування, то можна було б очікувати, що збільшення перепаду тисків в жаровій трубі впливає на викиди  $\text{NO}_x$ . Насправді експериментальні дані показують певний вплив, але цей вплив виражений в слабкому ступені. Так, збільшення перепаду тиску майже в три рази призводить до зменшення викидів  $\text{NO}_x$  всього на  $\sim 10\%$  [117, 121].

Значного поліпшення перемішування можна досягти шляхом збільшення витрати повітря і перепаду тиску на форсунці при збереженні незмінним перепаду тиску в жаровій трубі. Збільшення витрати повітря перетворює пневматичну форсунку (в якій зазвичай використовується наявний перепад тиску в жаровій трубі) в форсунку з аерацією паливного факела, в якій перепад тиску вище, ніж в жаровій трубі.

## Коефіцієнт надлишку повітря

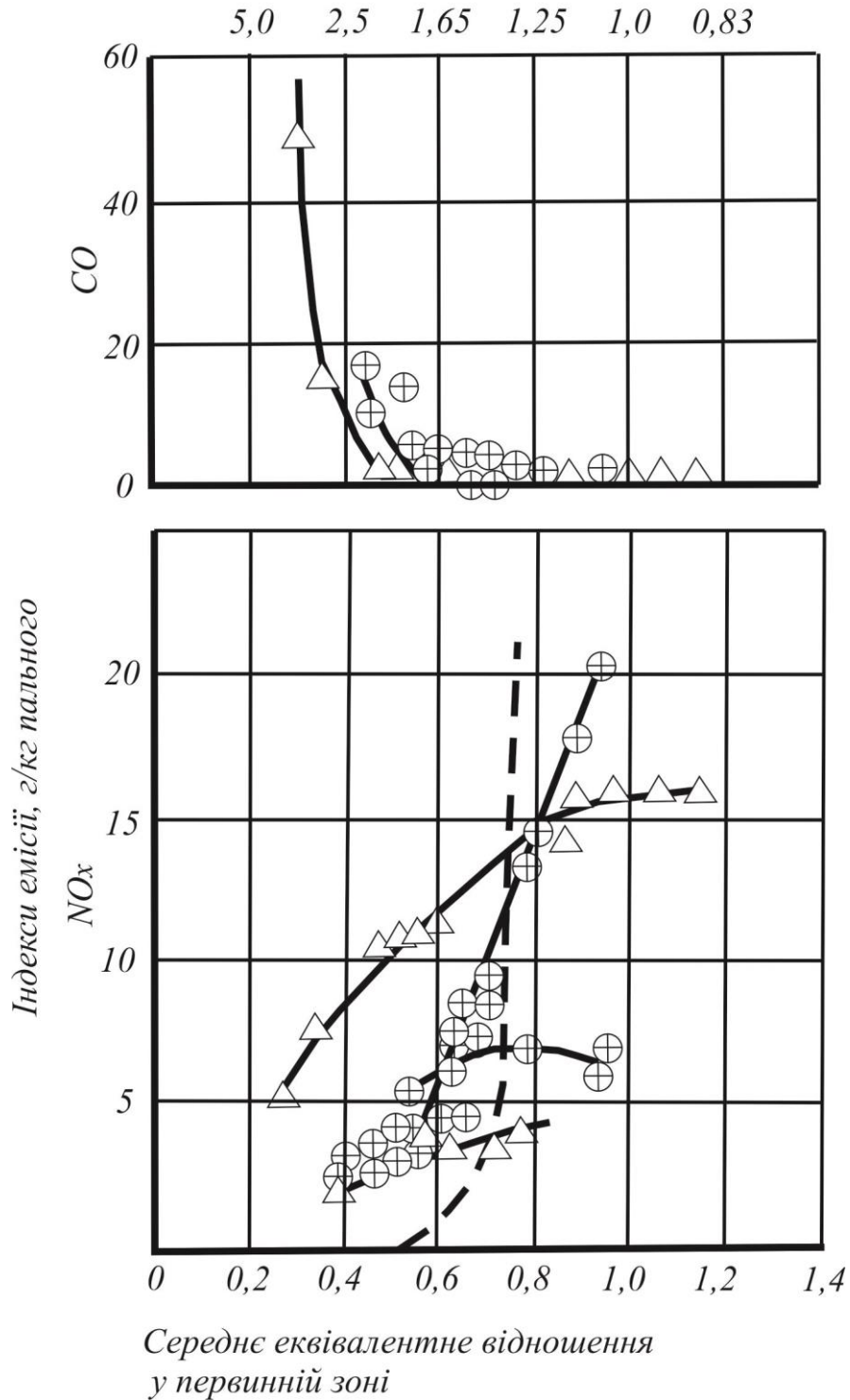


Рис. 2.10. Вплив ступеня перемішування в первинній зоні на викиди  $\text{NO}_x$  і  $\text{CO}$

Вплив ступеня перемішування палива на викиди показано на рис. 2.10. Для порівняння на рис. 2.10 приведені результати випробувань вихідної камери, а також результати аналітичної оцінки викидів  $\text{NO}_x$  для випадку

ідеального перемішування. З рис. 2.10 видно, що форма кривої, що характеризує викиди  $\text{NO}_x$  для модифікованої камери, наближається до кривої, що відповідає однорідній перемішаній суміші в первинній зоні.

Поліпшення перемішування характеризує більш крута крива залежності викидів  $\text{NO}_x$  от  $a$ . Викиди збільшуються при низьких значеннях  $a$  і значно (майже в 4 рази) зменшуються в області – бідних сумішей. Криві на рис. 2.10 пояснюють компроміс між викидами  $\text{CO}$  і  $\text{NO}_x$ . Дійсно, екстраполяція отриманих кривих показує, що поєднання інтенсифікації перемішування з поліпшенням стабілізації полум'я при більш високих  $a$  призводить до подальшого зниження загального рівня викидів. У всякому разі, очевидно, що якість перемішування системи подачі палива робить основний вплив на викиди.

Таким чином, підвищення однорідності паливо-повітряної суміші в первинній зоні є найважливішою умовою отримання низького рівня викидів, а вдосконалення конструкції системи подачі палива може розглядатися як одне з найбільш ефективних засобів досягнення цієї мети.

## Висновки по розділу 2

1. В розділі визначено особливості впливу забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля та встановлено, що екологічна небезпека забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів визначається наступними факторами: виникнення оксидів азоту, виникнення і окислення частинок твердого вуглецю, виникнення окису вуглецю і вуглеводнів.

2. Для оцінки виникнення оксидів азоту в наслідок роботи газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів необхідно враховувати залежність концентрації утворення  $\text{NO}_x$  від часу при різних температурах полум'я, і складу суміші.

3. У процесі горіння крім атмосферного азоту джерелом виникнення NO є азот, що входить до складу органічних компонентів палива. Експериментами доведено, що роль азоту палива змінюється від основної при низьких температурах згорання до незначної при високих. У загальному випадку при роботі авіаційного двигуна це джерело NO несуттєве, оскільки в паливах для реактивних двигунів міститься менше 50 млн-1 (вага) азоту, що менше 0,16 кг NO (в розрахунку на NO<sub>2</sub>) на 1000 кг палива.

4. Реалізація можливості зниження концентрації NO шляхом перезбагачення суміші пов'язана з рядом труднощів практичного характеру. Продукти згорання перезбагаченої суміші перед розведенням повинні бути охолоджені повітрям: за відсутності охолодження температура при догоранні суміші буде, зростати, в результаті може утворитися велика кількість NO. При згоранні перезбагаченої суміші в реальній камері іноді виникає необхідність попереднього перемішування палива і повітря, щоб уникнути горіння крапель при стехіометричному складі, яке супроводжується утворенням великої кількості NO<sub>x</sub>.

5. Основну проблему захисту навколишнього середовища, пов'язану з викидом NO<sub>x</sub> фактично створюють NO<sub>2</sub>. Наведені рівняння виникнення NO важливі, тому, що саме NO в основному передує утворенню NO<sub>2</sub>. Двоокис азоту, що реагує на світлі з вуглеводнями і озоном, призводить до забруднення повітря. Крім того, NO<sub>2</sub> реагує з водою, утворюючи кислоту, яка викликає корозію, і поглинає світло, що знижує видимість, контрастність и яскравість віддалених об'єктів.

6. Для того, щоб досить точно розраховувати швидкість утворення окису азоту в продуктах згорання газотурбінних двигунів, необхідно враховувати основні фізичні і хімічні механізми виникнення і окислення частинок твердого вуглецю, виникнення окису вуглецю і вуглеводнів.

7. На процесі утворення CO і HC великий вплив робить ступінь попереднього випаровування і перемішування палива з повітрям. Встановлено, що найменших концентрацій CO можна досягти при горінні

рідкого палива у вигляді відносно великих крапель при малих швидкостях випаровування і перемішування в умовах бідного складу суміші. Концентрації незгорілих вуглеводнів зменшуються при горінні з попередніми перемішуванням або при горінні бідних сумішей з краплями невеликих розмірів.

8. Оцінка екологічних режимів роботи двигунів мобільних техногенних об'єктів на навколишнє природне середовище визначила, що найбільший вплив на виникнення і викид токсичних сполук здійснюють: склад суміші в первинній зоні, температура і тиск на вході в камеру, час перебування і ступінь перемішування паливо-повітряної суміші в первинній зоні камери згоряння. При цьому регулювання складу суміші в первинній зоні можна здійснити перерозподілом повітря шляхом зміни геометрії елементів жарової труби.

9. Визначено що викиди  $\text{NO}_x$  і  $\text{CO}$  формуються внаслідок впливу рівня тиску і температури на вході в камеру на кінетичну і хімічну рівновагу реакцій, що відбуваються в зоні горіння. Досягти рівень викидів, який задовольняє нормам при роботі камери близько межі зриву полум'я можливо, тільки застосовуючи комплекс заходів, до яких відносяться: збільшення  $\tau_n$ , регулювання параметрів первинної зони, зміна геометрії камери і відповідна організація системи впорскування і змішання палива.

10. Підвищення однорідності паливо-повітряної суміші в первинній зоні є найважливішою умовою отримання низького рівня викидів, а вдосконалення конструкції системи подачі палива доцільно розглядати як одне з найбільш ефективних засобів досягнення цієї мети.

Наступним етапом досліджень щодо оцінювання екологічного впливу мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля є визначення напрямів зменшення виходу токсичних сполук шляхом внесення змін до заходів відпрацьованих газів і палива.

### РОЗДІЛ 3

## ЕКОЛОГІЧНІ НАПРЯМИ ЗМЕНШЕННЯ ВИХОДУ ТОКСИЧНИХ СПОЛУК ШЛЯХОМ ВНЕСЕННЯ ЗМІН ДО ЗАХОДІВ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ І ПАЛИВА

Проведений аналіз свідчить, що у теперішній час розробка заходів щодо зниження викидів токсичних сполук ведеться в двох напрямках: шляхом незначних модифікацій існуючих камер згоряння (перерозподіл потоків повітря, використання нових систем розпилення палива, інтенсифікація процесів перемішування турбулізацією потоку, впорскування води в камеру або застосування паливних присадок); корінною перебудовою камер згоряння (застосування систем попереднього підігріву, випаровування і змішування палива, багатозонна подача палива, камери із змінною геометрією і каталітичні камери згоряння) [58, 105].

Оптимальна, з екологічної точки зору, камера згоряння повинна забезпечувати попереднє випаровування рідкого палива, повне перемішування парів з повітрям і стійке згоряння при мінімальному часу перебування бідної гомогенної суміші. Задовольнити в повній мірі всім цим вимогам одночасно неможливо.

В даний час здійснюється широкий пошук конструктивних форм камер згоряння, які відповідали б нормам з забруднення навколишнього середовища [47, 51]. Підходи до вирішення цього завдання відрізняються широким розмаїттям. Тому в цьому розділі представлені напрямки для зниження викидів токсичних речовин в камерах згоряння, призначених для авіаційних ГТД.

### **3.1. Екологічний напрям удосконалення камер згорання в газотурбінних двигунах за рахунок вихрових потоків**

У будь-якій камері згорання процес перемішування умовно може бути поділений на три етапи:

- грубе перемішування локальним вдювом повітря через стінки жарової труби і шляхом організації циркуляційної течії за стабілізатором полум'я;

- перемішування в дещо меншому масштабі турбулентності, що генерується в зонах високих дотичних напружень, обумовлених відносним переміщенням потоків газу;

- перемішування на молекулярному рівні в процесі дисипації кінетичної енергії турбулентного руху.

Таким чином, перемішування у всьому діапазоні масштабів має здійснюватися каскадним розсіюванням енергії, з самого початку знаходиться в високошвидкісних струменях повітря. Ця енергія пропорційна перепаду тиску на стінках жарової труби. Тимчасовий масштаб процесу каскадної дисипації енергії залежить від розмірного масштабу потоку і кінетичної енергії турбулентності [58].

Оцінки Марковські, Ломан, Рейлі свідчать про те, що для камери авіаційного ГТД має місце тимчасовий масштаб каскадного розсіювання турбулентної енергії до повної дисипації або перемішування на молекулярному рівні становить  $\sim 10$  мс. Це значно більше характеристичного часу реакції горіння, і, отже, процес аеродинамічного перемішування обмежує ступінь наближення реакції до межі ідеального горіння [105].

Значно зменшити час перемішування аж до рівня, порівнянного з кінетичним тимчасовим масштабом, вдалося в вихровій камері згорання Vorbix (в перекладі означає «вихрове спалювання і перемішування»), схема якої представлена на рис. 3.1. В даному випадку камера являє собою пристрій з допоміжним пальником (форкамерою) і двоступеневою системою подачі палива [55].

Невелика частина повітря, що бере участь в горінні, підводиться до допоміжного пальника, що забезпечує підігрів робочого тіла у режимах малого газу. У режимах високої потужності додаткове паливо через другу паливну систему підводиться в продукти згорання допоміжного пальника, а залишки повітря вводяться в основну зону горіння у вигляді високошвидкісних закручених струменів.

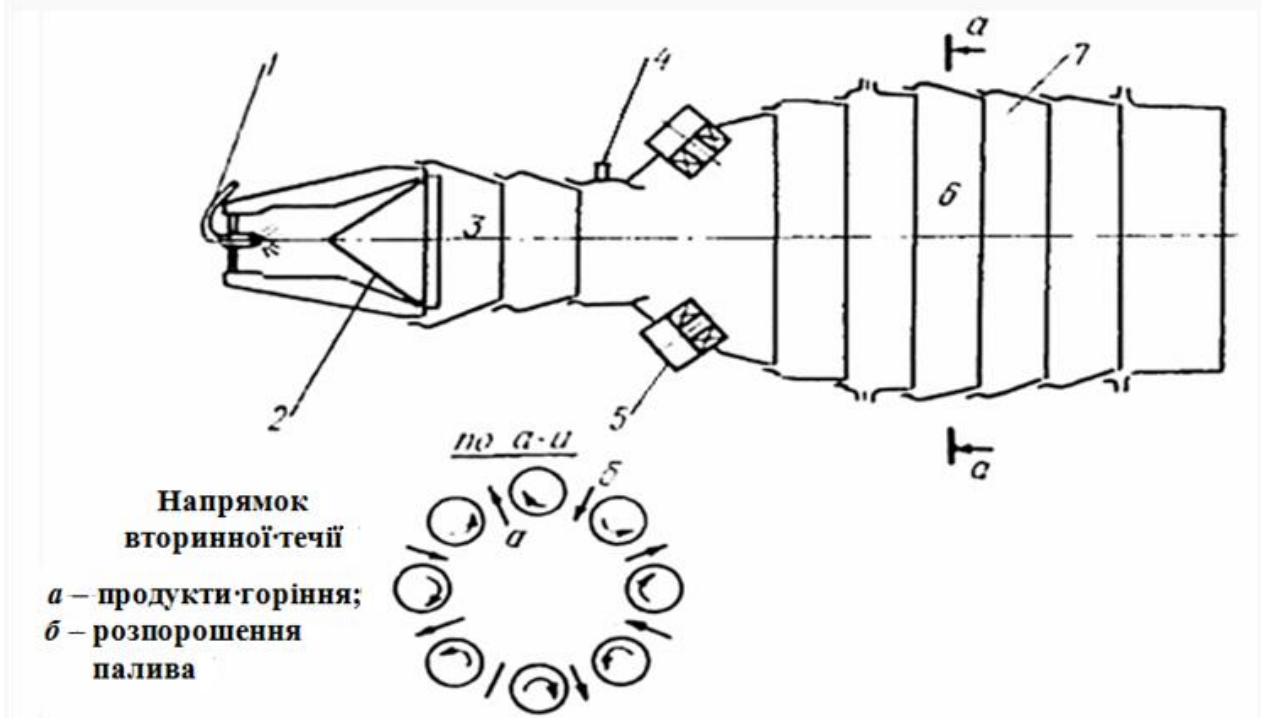


Рис. 3.1. Схема трубчастої вихрової камери згорання JT8D:

1 – допоміжна форсунка; 2 – стабілізатор полум'я; 3 – допоміжна зона горіння; 4 – форсунки для вторинного палива; 5 – вихрові трубки; 6 – основна зона горіння; 7 – змішувальник повітря

Поєднання швидкого випаровування основної частини палива високої швидкості перемішування за допомогою закручених струменів повітря, що подаються в зону горіння, а також контрольоване займання отриманої суміші за допомогою допоміжного пальника забезпечують досить хороші характеристики вихрової камери.

Подача в зону горіння повітря у вигляді закручених струменів створює, завдяки властивим закрученим потокам нестійкості, умови для високої швидкості перемішування не тільки в зоні попереднього перемішування, але й в усій зоні горіння. При взаємодії холодних закручених струменів з



гарячими продуктами згоряння під впливом відцентрових сил відбувається втрата стійкості поверхні розділу потоків. Більш щільне повітря, що має великий момент кількості руху, впроваджується в радіальному напрямку в менш щільний гарячий газ, що має слабку або нульову кількість руху. Таким чином, в даному випадку швидкість перемішування обумовлена не тільки силами зсуву при відносному русі потоків, але, головним чином, поверхневою нестійкістю течії, завдяки якій молі повітря впроваджуються в навколишнє середовище під впливом відцентрових сил [64].

На додаток до такого макроперемішування використання закрученої течії в зоні горіння збільшує швидкості перемішування і на рівні більш дрібних масштабів через посилення генерації турбулентності за рахунок енергії основної течії. Дослідження динаміки турбулентних закручених потоків показують, що енергія турбулентності в закрученому потоці має більш високий рівень і генерується з більш високою швидкістю. Подібне збільшення швидкості генерування енергії турбулентності за рахунок зменшення енергії основного руху теоретично означає, що процес каскадної дисипації енергії відбувається швидше, а характеристичний час перемішування зменшується до рівня, близького до кінетичного тимчасового масштабу [139].

З метою управління інтенсивністю перемішування в конструкції вихрової камери передбачено використання напрямку обертання струменів повітря в вихрових трубках.

Безпосереднє впорскування палива в продукти згоряння допоміжного пальника, здавалося б, повинно приводити до згоряння окремих крапель, розкладанню палива і утворення великої кількості сажі і часток вуглецю за схемою, наведеною в першому розділі. Однак в вихровій камері цього не відбувається тому, що повітря, що виходить з допоміжного пальника, забруднено продуктами згоряння, концентрація кисню в яких зменшена. Як показують експерименти, навіть невелике забруднення повітря може перешкоджати горінню крапель і збільшувати час затримки займання. Коли

краплі палива в зоні горіння стикаються з закрученими струменями повітря і потрапляють в область підвищеної концентрації кисню, вони можуть горіти [47].

Експериментально визначено, що при високих швидкостях перемішування в цих зонах пари палива будуть здуватися з крапель і вони не займуться. Насправді, процес здування пари в поєднанні з високим рівнем температури попереднього підігріву відпрацьованих газів повинен привести до виключно високої швидкості випаровування крапель палива. Також встановлено, що час процесу попереднього перемішування обмежений, і після досягнення певної міри перемішування (і після закінчення певного часу затримки запалення) суміш в локальних зонах буде займатися [48].

Попередні оцінки показують, що самозаймання при високому рівні температури повинно відбуватися приблизно через 1 мс після безпосереднього контакту палива з повітрям. Отже, відносна осьова відстань від місця уприскування палива до закручених струменів, аеродинамічні характеристики цих струменів і температура газів, що виходять з допоміжного пальника, – це параметри, які регулюються з метою отримання оптимальних часу затримки запалення і ступеня попереднього перемішування. Високошвидкісні процеси випаровування і перемішування речовин практично на молекулярному рівні дозволяють досягти необхідного протікання процесу горіння з кінцевими концентраціями, що наближаються до таких як для ідеально перемішаної бідної суміші.

Оскільки процес горіння в основній зоні виникає самостійно, стабілізатор полум'я з рециркуляцією потоку не потрібний. За відсутності спеціально організованої рециркуляційної течії потік заповнює всю зону горіння, тому ефективний час перебування можна регулювати вибором відповідних середніх швидкостей і довжини зони горіння до місця введення змішувального повітря [58, 139].

Результати випробувань двох модифікацій вихрових камер – трубчастої камери типу JT8Д, схема якої представлена на рис. 3.1, і кільцевої камери

типу JT4 (рис. 3.2), наведені при злітних витратах повітря, температурі на вході 666 K і тиску  $\sim 1,3 \cdot 10^5$  Па, представлені на рис. 3.3.

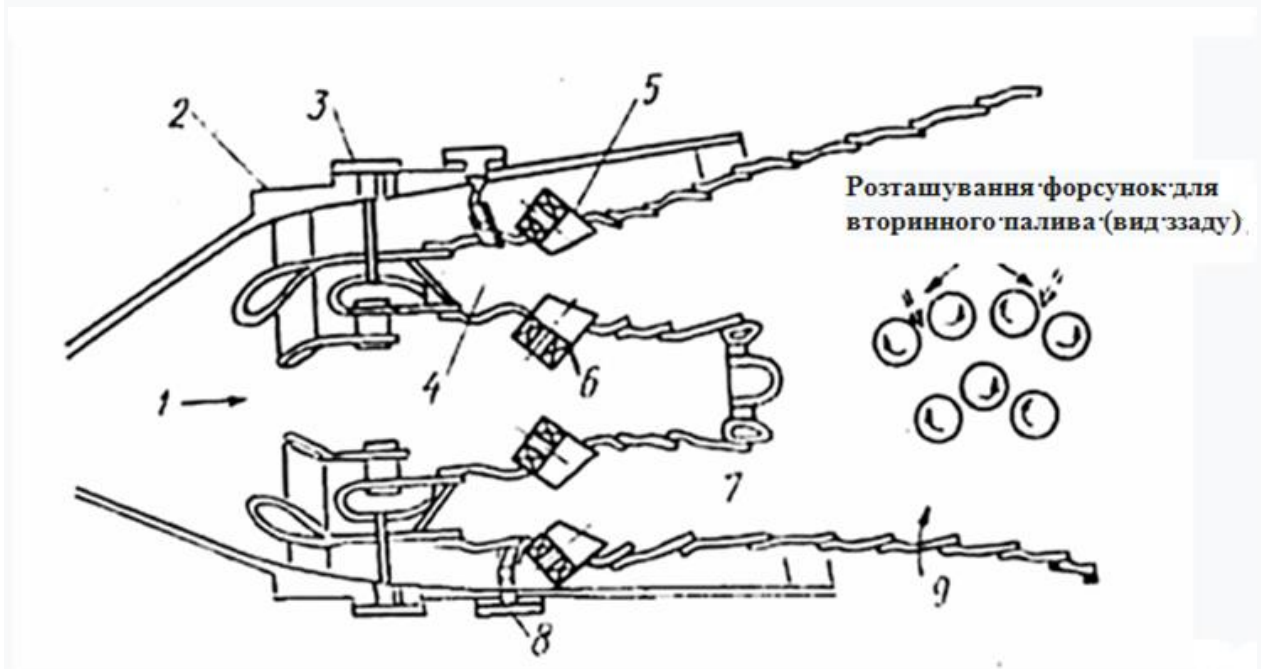


Рис. 3.2. Схема кільцевої вихрової камери згоряння JT4, де:  
 1 – потік повітря; 2 – корпус дифузора; 3 – допоміжна форсунка;  
 4 – допоміжна зона горіння; 5 – десять пар вихрових трубок; 6 – п'ять пар вихрових трубок; 7 – основна зона горіння; 8 – форсунки для вторинного палива; 9 – змішувальне повітря

З наведених даних видно, що на режимах високої потужності допустимих концентрацій окислів азоту в продуктах згоряння трубчастої вихрової камери JT8Д і кільцевої камери JT4 становлять близько третини концентрації для звичайних камер. У той же час концентрації окису вуглецю і незгорілих вуглеводнів для вихрових камер вищі, ніж для звичайних. Таке співвідношення між концентраціями окису вуглецю і оксидів азоту можна пояснити недостатнім для повного згоряння палива часом перебування в зоні реакції. Проте, концентрація незгорілих вуглеводнів досить низька в широкому діапазоні складу суміші.

Цей факт відображає ефективність високих швидкостей випаровування і розподілу палива, що досягаються при використанні допоміжного пальника, а також інтенсивному перемішуванні на початку основної зони горіння. При

злітному режимі в обох камерах, згоряння число димності за Брандтом склало 5.

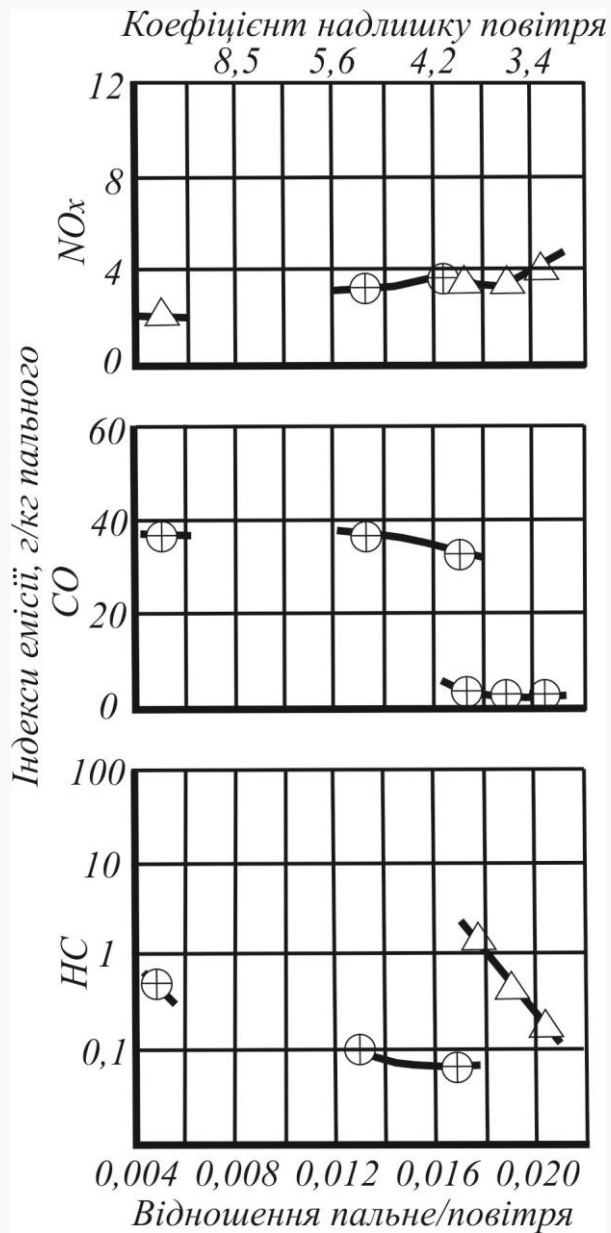


Рис. 3.3. Характеристики викидів вихрових камер при низькому тиску за умов  $P = 1,3 - 105$  Па,  $T = 393$  °С, де: о – вихрова камера JT8Д; в – вихрова камера JT4; с – робота з допоміжним пальником; □ – звичайна камера JT8Д

В роботах [123, 128] наведені також дані з випробувань звичайної і вихрової камер типу JT8Д при температурі і тиску на вході, що відповідають умовам роботи повнорозмірного реального двигуна. Ці випробування проводилися з метою експериментального визначення впливу тиску на виникнення викидів в вихровій камері. З метою збільшення діапазону стійкої

роботи допоміжний пальник був замінений пальником зі звичайним вихровим стабілізатором.

Результати цих дослідів показані на рис. 3.4. Як видно з малюнка, обидві камери мають однаковий рівень викидів CO і HC при режимі високої потужності, однак, викиди оксидів азоту вихровою камерою складають 47% від значення для звичайної камери (при загальному  $a \sim 6$ ). Графіки свідчать про високу стійкість горіння в вихровій камері. При  $a \sim 6$  повнота згоряння перевищує 99%, незважаючи на те, що концентрація CO в цій точці в 10 разів перевищує вміст окису вуглецю при режимах високої потужності. Горіння з попереднім підігрівом суміші до температури самозаймання є, мабуть, дуже стійким, тому зриву полум'я не спостерігається. Отже, стабілізація полум'я в основній зоні горіння залежить тільки від здатності допоміжного пальника забезпечувати енергію, достатню для самозапалювання. Зрив полум'я в такій камері при збідненій суміші повністю визначається умовами стабілізації полум'я в допоміжному пальнику [24, 64].

Порівняння даних, наведених на рис. 3.3 і 3.4, показує, що з підвищенням тиску характеристики камери дещо змінюються: зменшуються викиди окису вуглецю та збільшуються викиди оксидів азоту. Цей результат повністю узгоджується з теоретичними залежностями виникнення зазначених компонентів від тиску, як це було зазначено у другому розділі.

Таким чином, попередній підігрів і закрутка потоку дозволили в розглянутій конструкції камери вирішити проблему підвищення інтенсивності перемішування реагуючої суміші, максимально наблизитися до процесу горіння, обмеженому кінетикою хімічної реакції, і в кінцевому підсумку істотно зменшити вихід токсичних сполук.

### 3.2. Екологічний напрям удосконалення камери згоряння з вихровими модулями

Ідея побудови камери згоряння з вихровими модульними пальниками (або форсунками) є, мабуть, найбільш перспективною для створення малотоксичного двигуна. Вперше вихрові модулі були розроблені і застосовані в двигуні НК-8 [129]. Пізніше в США за програмою NASA були розроблені аналогічні камери згоряння з вихровими модулями дещо іншої конструкції [123]. Оскільки основні характеристики вихрових модулів щодо викидів забруднюючих речовин в зарубіжній літературі висвітлені більш детально. Екологічні особливості вихрових модулів розглянемо на прикладі камер NASA.

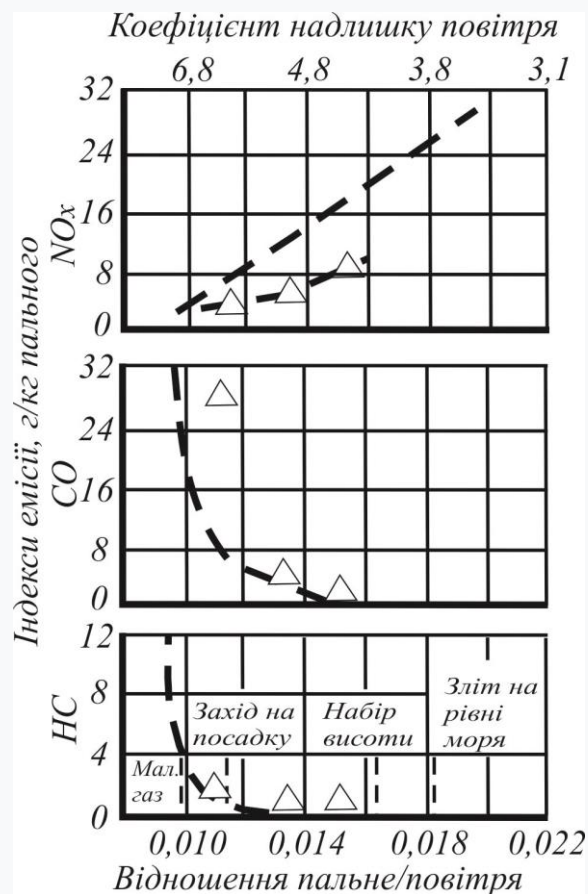


Рис. 3.4. характеристики викидів з вихрової камери згоряння JT8Д при високому тиску (температура і тиск на вході відповідають робочим умовам двигуна): ----звичайна камера згоряння JT8Д;  $\diamond$  – трубчаста вихрова камера згоряння JT8Д

Камера згоряння кільцевого типу (рис. 3.5) містить 120 вихрових модульних пальників, рівномірно розташованих по периметру трьох концентричних кіл (контурів). Витрата палива в кожному контурі регулюється незалежно один від одного.

Основна частина повітря (93–96%) подається через фронтний пристрій, решта витрата йде на охолодження стінок жарової труби. Схема типового модульного пальника показана на рис. 3.6. Кожний модуль складається з трьох частин: карбюратора, завихрителя і стабілізатора полум'я. Стабілізатор може бути або плоским, або з закрутою. При цьому напрямок закрутки може збігатися або бути протилежним закрутки основного завихрителя.

Під час роботи в модульному пальнику одночасно протікає кілька процесів: розпорошення і попереднє перемішування палива з повітрям в карбюраторі; закрутка потоку суміші і стабілізація полум'я в сліді за пальником. Крім того, кожний пальник забезпечує перемішування повітря, що проходить через фронтний пристрій між модульними пальниками, з високотемпературними продуктами згоряння в сліді за пальниками [139].

З метою інтенсифікації перемішування і зменшення часу перебування газів в найбільш гарячій частині зони циркуляції було випробувано кілька типів стабілізаторів (рис. 3.6). Найкращі результати зі зниження викидів  $\text{NO}_x$  показали стабілізатори з закрутою повітря, протилежної закрутки потоку суміші.

Вплив вхідних параметрів – температури повітря і складу суміші на виникнення  $\text{NO}_x$  в вихровій камері при тиску  $5 \cdot 10^5 \div 6 \cdot 10^5 \text{Па}$  ( $5 \div 6 \text{ кгс/см}^2$ ), витраті повітря  $38,7 \div 50 \text{ кг/с}$  показано на рис. 3.7 [33]. З малюнка видно, що при температурі повітря 589К індекс емісії збільшується від 3 при  $a \sim 3,8$  до максимального значення  $\sim 6,5$  при  $a \sim 1,41$  і потім зменшується до  $\sim 4,6$  при  $a \sim 0,98$ .

Як зазначалося, зміна форми кривої освіти  $\text{NO}_x$  характеризує вплив багатьох факторів, таких як швидкості реакції, наявність вільного кисню і температура в зоні реакції. Візуальні спостереження і аналіз даних про

процес горіння дозволили сформулювати спрощену модель виникнення  $\text{NO}_x$ , в камері з вихровими модулями [64, 129].

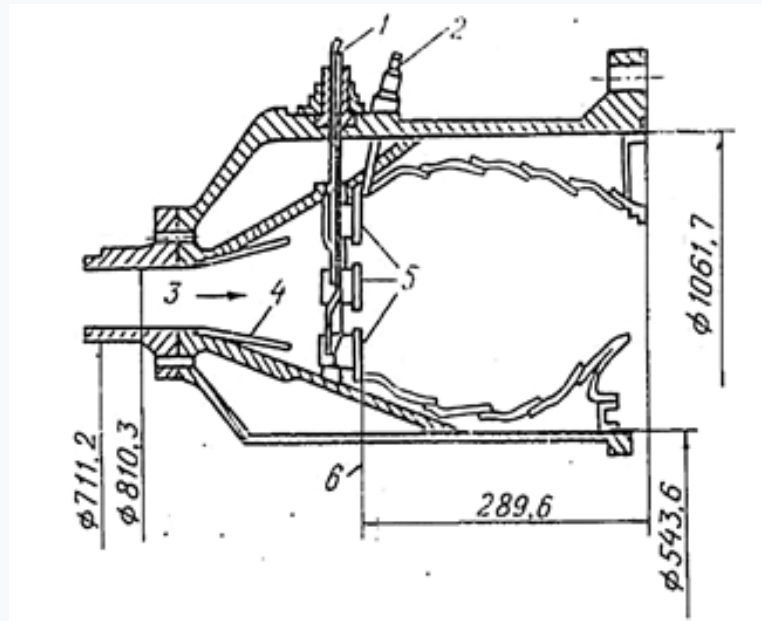


Рис. 3.5. Кільцева камера згоряння з вихровими модулями (розміри дані в мм): 1 – підведення палива; 2 – свічка запалювання; 3 – підведення повітря; 4 – дифузрна вставка; 5 – набір з 120 модульних пальників; 6 – площина уприскування палива

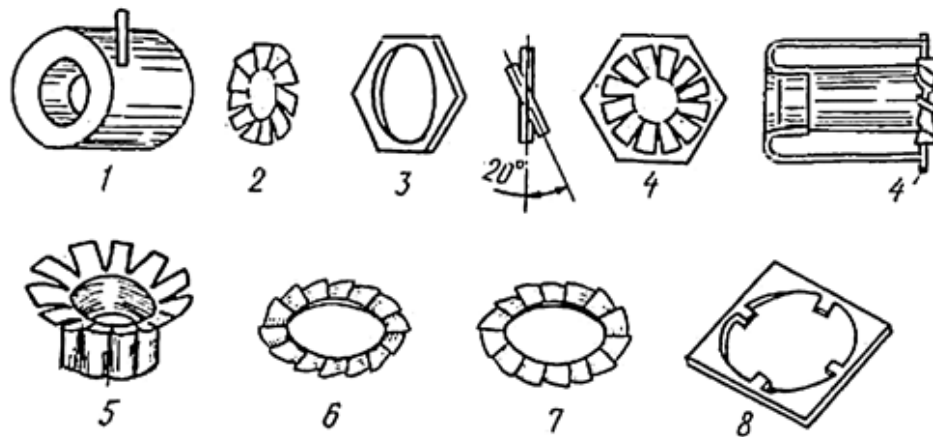


Рис. 3.6. Деталі модульного пальника з різними стабілізаторами полум'я: 1 – карбюратор; 2 – завихритель; 3 – стабілізатор полум'я; 4 – плоский стабілізатор полум'я; 5 – конічний завихритель з протилежно спрямованою закруткою; 6 – плоский завихритель з протилежно спрямованою закруткою; 7 – плоский завихритель з закруткою, що збігається з закруткою стабілізатора; 8 – пластина з кільцевим вирізом.



При горінні бідних сумішей реакція відбувається швидко і завершується на малій відстані від модульного фронтального пристрою, так як основна частина, що бере участь в горінні повітря проходить через модулі. Зона горіння обмежена областю циркуляційного сліду за модулями. Повітря, що проходить через решітку модулів, циркулює в сліді за ними, перемішується з продуктами згорання, в результаті зменшується температура полум'я і швидкість виникнення  $\text{NO}_x$ .

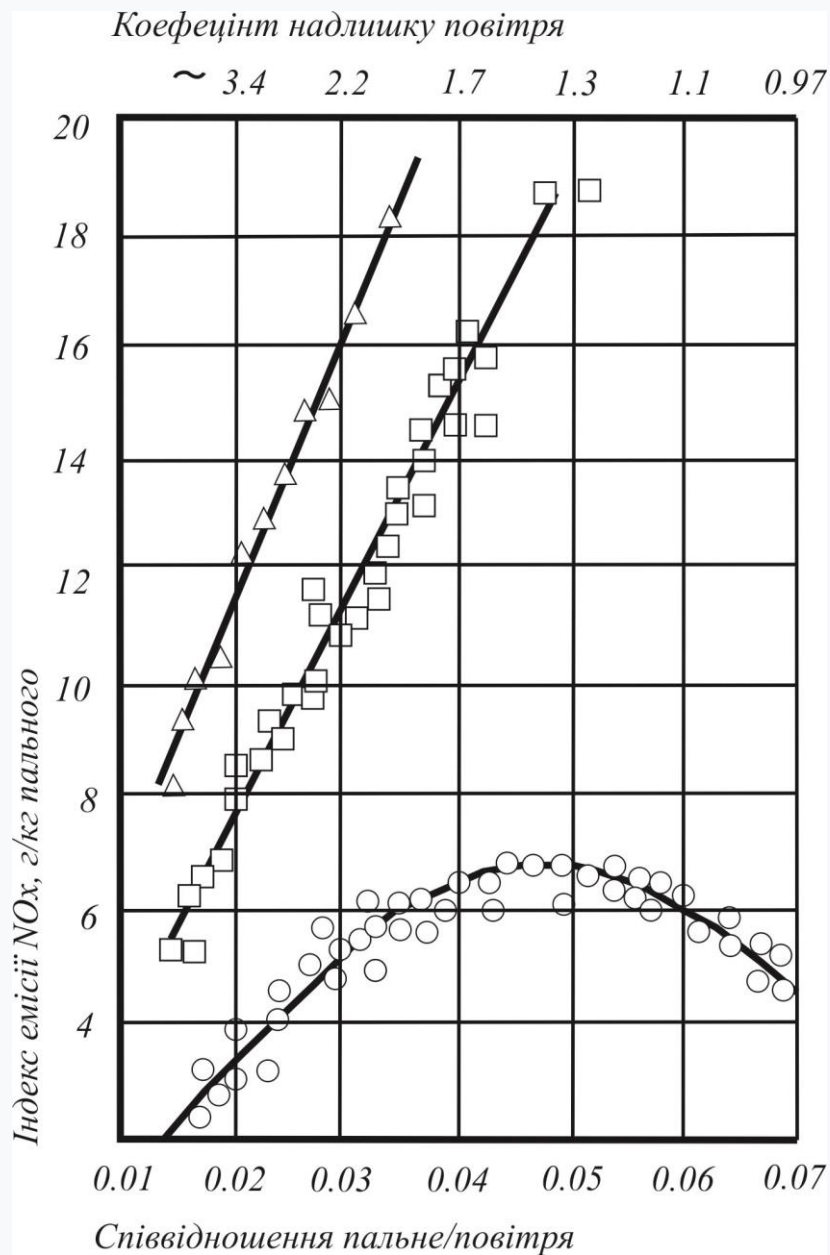


Рис. 3.7. Вплив температури на вході в камеру і складу суміші на утворення оксидів азоту при температурі на вході, де:  
 о – 589; □ – 755; Δ– 839К

У процесі збагачення суміші тепловиділення збільшується, і фронт полум'я вже не обмежується областю сліду за модулями, а поширюється на весь фронтний пристрій. При цьому в локальних зонах реакції розвиваються максимальні температури, і швидкість виникнення  $\text{NO}_x$  збільшується. Подальше збагачення суміші обумовлює появу додаткових ефектів, які зменшують швидкість виникнення  $\text{NO}_x$ .

При горінні багатой суміші витрачається більше кисню, а це означає, що в виникненні  $\text{NO}_x$  бере участь менше кисню. Крім того, додавання палива призводить до надмірного збагачення зони поблизу модулів. При цьому, як температура в зоні горіння і швидкість виникнення  $\text{NO}_x$  повинні зменшуватися.

Зниження інтенсивності горіння в зоні реакції супроводжується наближенням цієї зони до виходу з камери. Таким чином, шлях, по якому гарячі гази проходять через камеру, і час перебування зменшуються. Подібні умови в камері мають місце при  $a = 1,41 \div 1,02$ . У цьому діапазоні температура на виході з камери безперервно зростає до максимального значення 2324 К, в той час як індекс  $\text{NO}_x$  падає. При значеннях  $a$  менших 1,02 додатковий кисень вже відсутній і температура на виході зменшується.

Проведені дослідження свідчать, що збільшення тиску і температури на вході призводить до збільшення швидкості утворення  $\text{NO}_x$ . Зі збільшенням температури до 755 і 839 К швидкість утворення  $\text{NO}_x$  зростає в 3  $\div$  4 рази (рис. 3.7) [105, 130].

При збільшенні середньої швидкості потоку газу в камері утворення  $\text{NO}_x$  сповільнюється через зменшення часу перебування. Вплив складу суміші і температури на вході на утворення незгорілих вуглеводнів і окису вуглецю в вихровій камері (при тиску на вході в камеру  $5 \cdot 10^5 \div 6 \cdot 10^5$  Па  $5 \cdot 10^5 \div 10 \cdot 10^5$  і витраті повітря  $38,7 \div 50$  кг/с ) показано відповідно на рис. 3.8 і 3.9. Високі концентрації цих забруднюючих речовин, що відповідають

температурі на вході 589 К, при найвищих  $a$  характеризують неповноту згоряння, що становить близько 3%.

При збагаченні суміші паливом концентрації цих речовин зменшуються. При подальшому збагаченні суміші концентрації знову зростають через нестачу кисню. При  $a=0,98$  кількість незгорілих вуглеводнів відповідає неповноті згоряння близько 1%. Для СО це відповідає неповноті згоряння близько 7%. Концентрації обох речовин істотно зменшуються зі зростанням температури на в ході в камеру [139].

Зі збільшенням швидкості потоку концентрації НС і СО збільшуються (на противагу аналогічній залежності для  $\text{NO}_x$ ). Отже, такі способи зменшення часу перебування, як скорочення довжини камери і забезпечення швидкого перемішування з точки зору зменшення викидів  $\text{NO}_x$  є найкращими.

Дуже важливим для модульної камери є вибір числа пальників одночасно працюючих на малому газі, коли боротьба з викидами особливо необхідна. У режимі малого газу камера випробовувалася при подачі палива в усі модульні пальники, а також при подачі всієї витрати палива окремо в кожний з трьох рядів. Результати вимірювання повноти згоряння палива наведені при температурі повітря на вході 478 К, тиску на вході  $4 \cdot 10^5 \text{Па}$  ( $\sim 4 \text{ кг/см}^2$ ) і характерної швидкості 26 м/с (рис. 3.10).

Коли паливо подавалося в усі пальники, повнота згоряння була низькою, а зрив полум'я відбувався при загальному для камери згоряння  $a \approx 7,5$ . Подача всього палива тільки в середній ряд пальників трохи збільшила повноту згоряння, яка при  $a=8,5$  досягла 50%. Подача всього палива в зовнішній ряд пальників призводить до суттєвого підвищення повноти згоряння. Коли ж паливо подавалося у внутрішній ряд пальників, повнота згоряння склала майже 100% [117].

Ефективність подачі палива через внутрішнє кільце модульних пальників була найбільшою, так як цей ряд мав найменшу кількість пальників, і, отже, при даному складі суміші в кожному конфорку подавалося

пропорційно більша кількість палива. Причина незадовільної роботи середнього ряду, можливо, полягає в охолодженні газу, що відбувається через зменшення ступеня захарачення перерізу стабілізаторами полум'я цього ряду модульних пальників [137].

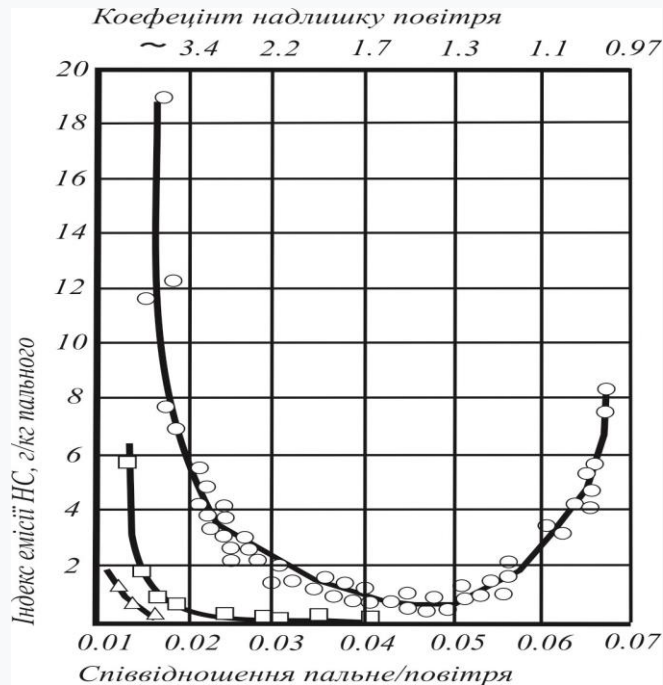


Рис. 3.8. Вплив температури повітря на вході в камеру і складу суміші на виділення незгорілих вуглеводнів при температурі на вході, де:  
 о – 589; □ – 755; Δ– 839.

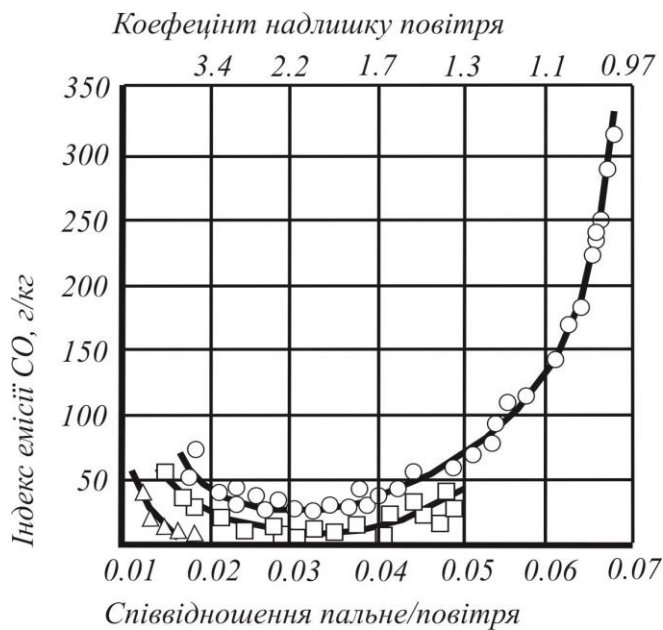


Рис. 3.9. Вплив температури повітря на вході в камеру і складу суміші на утворення окису вуглецю при температурі на вході, де:  
 о–589; □ –755; Δ–839К

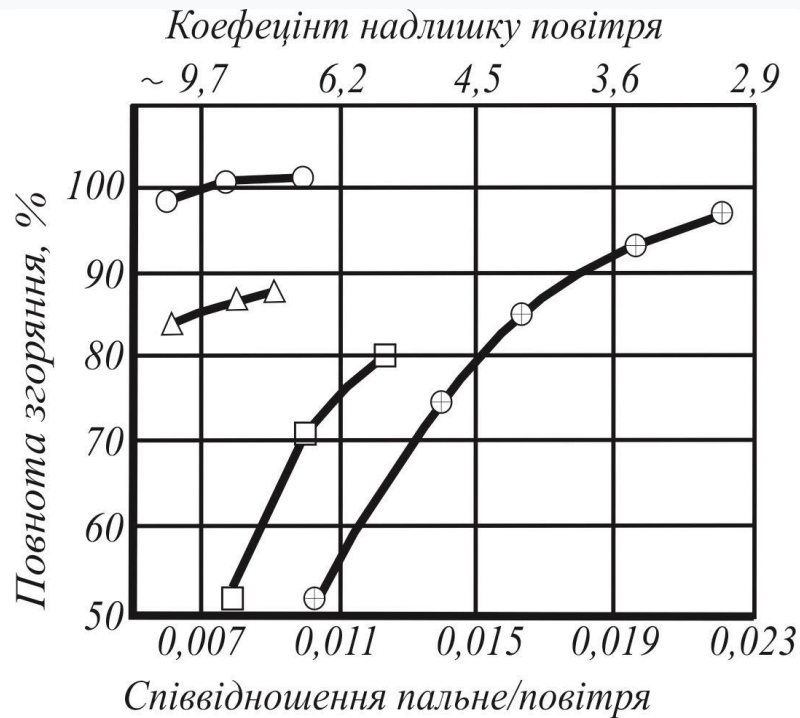


Рис. 3.10. Повнота згоряння у режимі малого газу, де:  
 о – внутрішній ряд модулів; + – всі модулі; Δ – зовнішній ряд модулів;  
 □ – середній ряд модулів

Зменшена ступінь захарачення є також причиною пропорційного збільшення витрати повітря, що йде через середню частину фронтального пристрою.

Криві, що характеризують процес утворення незгорілих вуглеводнів і окису вуглецю при тиску на вході  $4 \cdot 10^5$  Па і характерною швидкості 26 м/с, показані відповідно на рис. 3.11, 3.12. При цьому концентрації забруднюючих речовин змінюються протилежно повноті згоряння.

Додаткові ознаки охолодження газів в середньому ряду модульних пальників видно на рис. 3.12, де показано, що рівень виходу окису вуглецю для середнього ряду пальників вище, ніж при подачі палива в усі модульні пальники. Найменші значення викидів отримані при подачі палива тільки у внутрішній ряд модульних пальників. При  $a=8,5$  показник НС дорівнює  $\sim 10$ , а СО – біля 40. Показник  $\text{NO}_x$  був найбільшим, але не перевищував 1 [137].

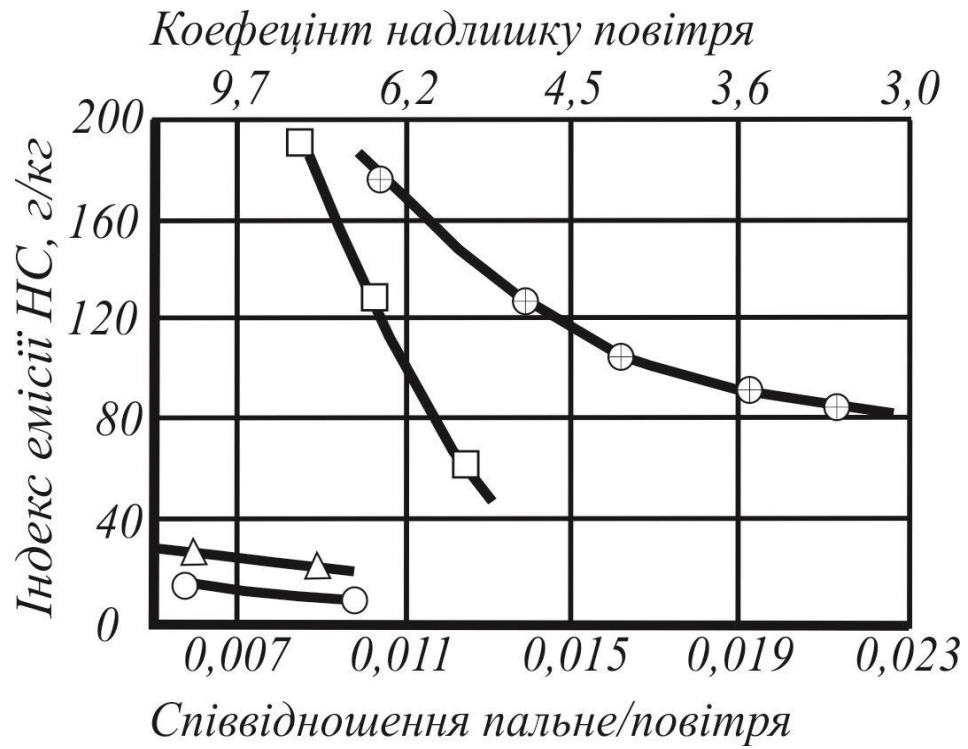


Рис. 3.11. Виділення незгорілих вуглеводнів у режимі малого газу (позначення див. на рис. 3.10)

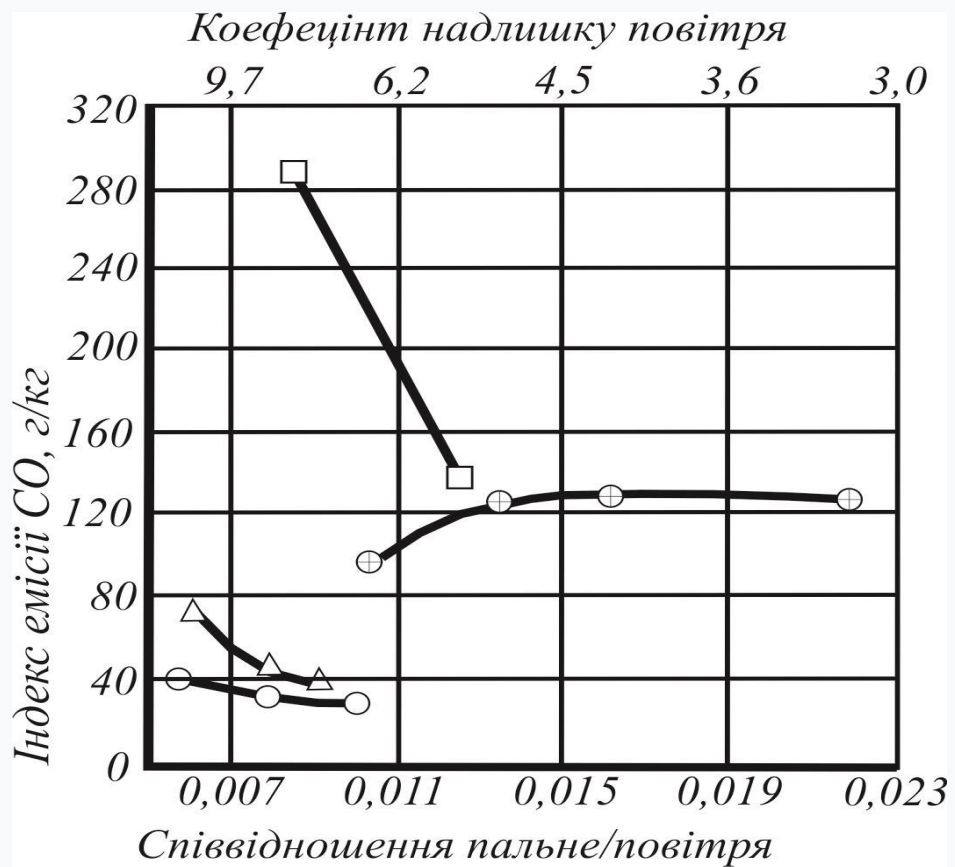


Рис. 3.12. Виділення окису вуглецю у режимі малого газу (позначення див. на рис. 3.11)

З наведених даних випливає, що рівень викидів розглянутої камери згоряння значно нижче, ніж камери звичайної конструкції. Обумовлено це меншим часом перебування через малу довжину камери, швидким перемішуванням продуктів згоряння зі змішувальним повітрям і рівномірним розподілом палива у фронтівому пристрої завдяки застосуванню вихрових модулів. Можливість радіального перерозподілу палива забезпечує високу повноту згоряння і низький рівень викидів забруднюючих речовин також і у режимі малого газу.

### **3.3. Екологічний захід - використання в камерах згоряння вихрових пневматичних і акустичних форсунок**

У камерах згоряння з форсунками механічного розпилення низький тиск подачі рідкого палива у режимі малого газу призводять до погіршення процесів розпилення і підготовки суміші. Як наслідок цього збільшуються викиди CO і HC.

Найбільш простим в той же час досить ефективним способом поліпшення горіння є застосування пневматичного розпилення [53, 64].

Для цього у режимі малого газу в другий контур двохсоплової форсунки подається стиснене повітря. Випробування ефективності цього способу на камері JT8Д показали (рис.3.13), що при витраті 0,00318 кг/с допоміжного повітря, що становить  $\sim 0,25\%$  всієї витрати повітря, викиди CO зменшилися в 3,5 рази, а викиди вуглеводнів в 8 разів. Як і передбачалося, викиди NO<sub>x</sub> дещо збільшилися через збільшення температури полум'я при більшій повноті згоряння.

Застосування вихрових акустичних форсунок при спалюванні природного газу в двигуні НК-12СТ дало можливість підвищити повноту згоряння і знизити утворення NO<sub>2</sub> при деякому збільшенні CO. На рис. 3.14 показані результати випробувань повнорозмірного двигуна. Наведені дані вказують на дуже низький вихід оксидів азоту при роботі двигуна на

природному газі і на помітно підвищений вихід CO і  $\text{CH}_4$ . Причиною цього є низька температура горіння через сильне збіднення суміші.

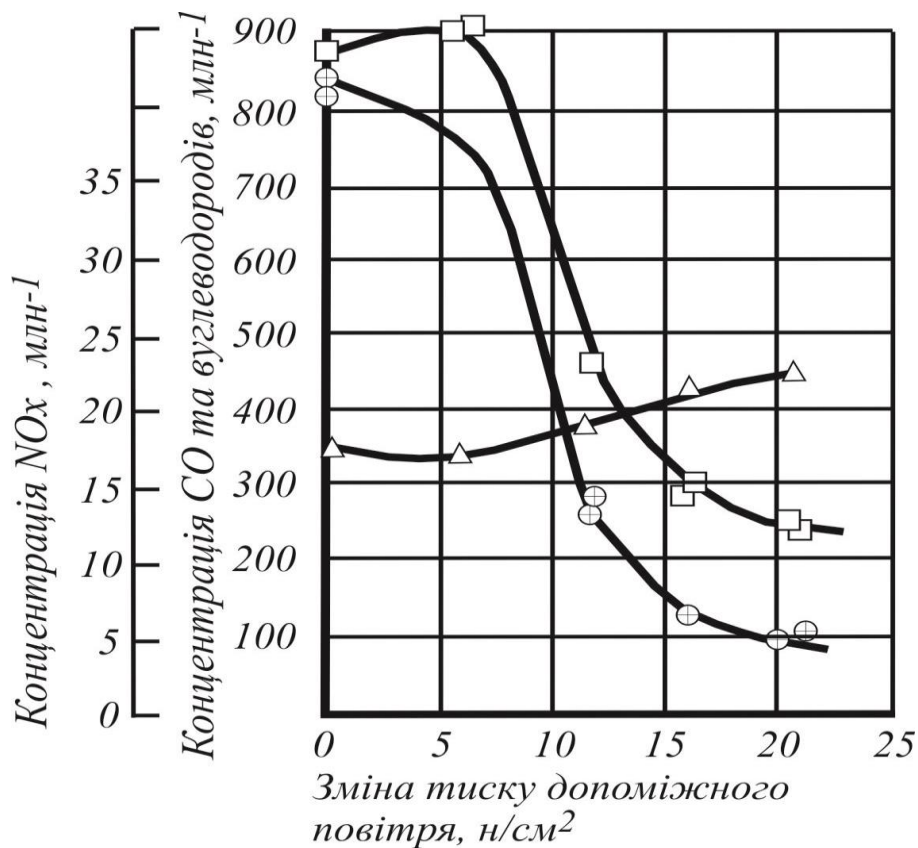


Рис. 3.13. Характеристики викидів з камери з пневматичними форсунками у режимі малого газу (двигун JT8Д) при  $P_3=24,1 \text{ н/см}^2$ ;  $T_3=380 \text{ К}$ ;  $G_B=1,36 \text{ кг/с}$ ;  $a \sim 6$ ;  $\oplus$ —HC;  $\square$ —CO;  $\diamond$ — $\text{NO}_x$

Це несуттєва перешкода при використанні пневматичного розпилювання в форсажних камерах згоряння, коли необхідне для форсунок стиснене повітря може відбиратися безпосередньо від компресора двигуна. Для основних камер згоряння розробляються схеми, так званих, низьконапірних вихрових розпилювачів, які працюють від швидкісного напору, набігаючого потоку повітря. Зокрема, розглянуті в 3.1 та 3.2 вихрові модулі є один з варіантів пневматичного розпилювача низького напору. Відповідна оптимізація конструкції вихрової форсунки з метою отримання акустичних коливань відкриває можливості подальшого вдосконалення їх характеристик з розпилення і змішання.



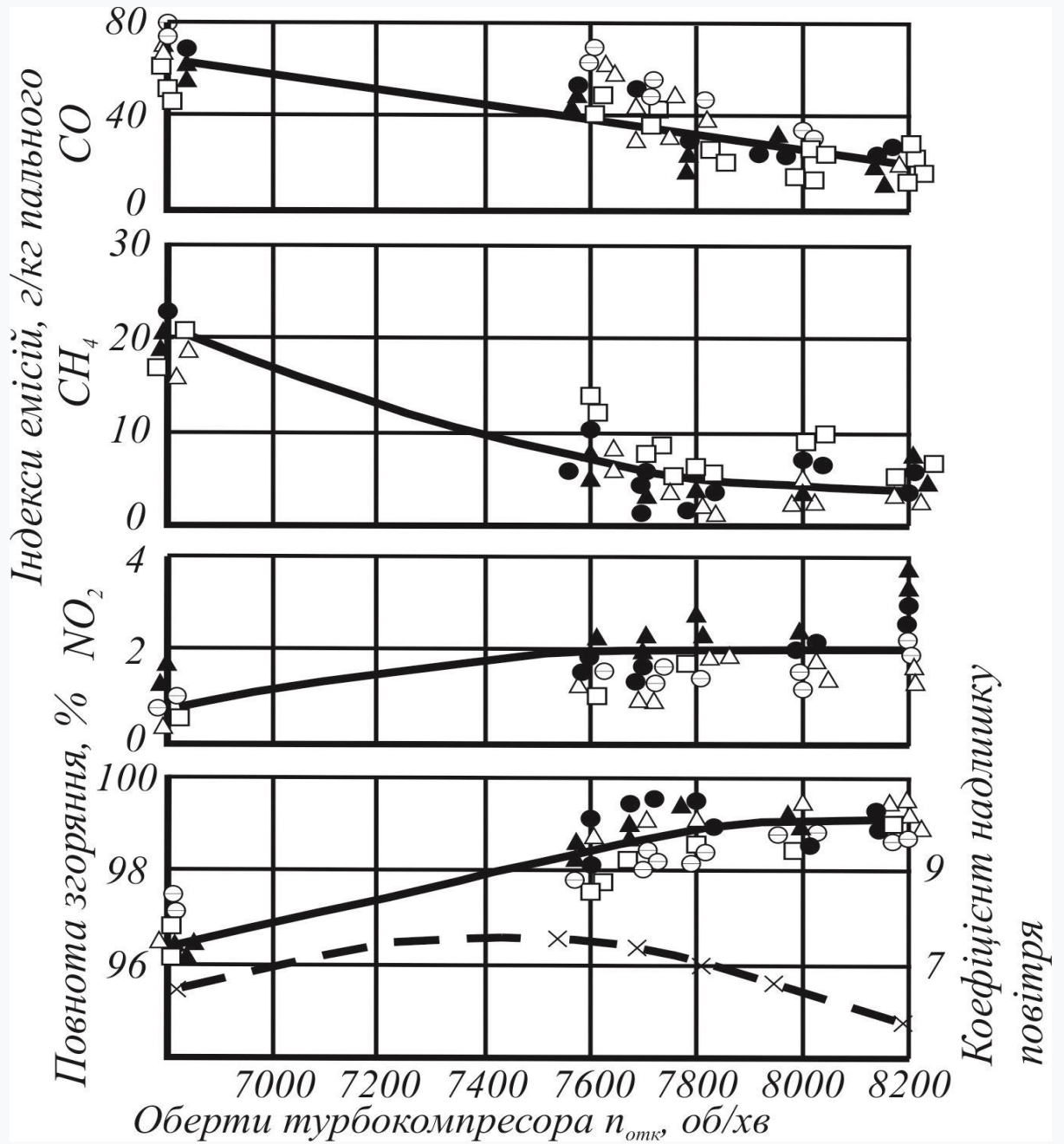


Рис. 3.14. Залежність повноти згоряння, виходу токсичних сполук і коефіцієнта надлишку повітря від оборотів двигуна НК-12СТ, де: О,  $\Delta$ ,  $\square$  –вихрова (акустична) форсунка, відповідно 1, 2 і – день випробувань

Пневматичні форсунки знаходять все більше застосування в авіаційних двигунах. Мабуть, єдиним їх недоліком є ускладнення системи подачі палива і відсутність на борту стисненого повітря підвищеного тиску.

### 3.4. Технологія захисту довкілля шляхом змін геометричних характеристик камери згоряння, зонний розподіл палива і перепуск повітря з компресора в атмосферу

На режимах малої потужності через низьку температуру повітря на вході в камеру згоряння, перезбіднення суміші і незадовільне розпилення і змішання палива зменшується повнота згоряння і збільшується утворення СО і НС. Перепуск повітря в атмосферу дозволяє зменшити коефіцієнт надлишку повітря без відповідного підвищення тяги двигуна на малому газі. Вплив ефективності перепуску повітря визначався, наприклад, при випробуваннях двигуна JT3С-7 (США, фірма Пратт-Уїтні) на режимах малого газу при незмінній тязі. Виявилося, що зі збільшенням кількості перепуску повітря до 11% від загальної витрати через двигун концентрація НС зменшувалася на 40%.

Зміна геометрії камери і зонний розподіл палива дозволяє зменшити місцеве значення  $a$  і тим самим підвищити повноту згоряння. У камері зі змінною геометрією це досягається зміною її аеродинаміки так, щоб в первинній зоні можна було підтримувати, оптимальну величину  $a$ . Зонна подача палива дає можливість створювати локальні області з сприятливим складом суміші, підвищувати повноту згоряння і знижувати рівень емісій.

Вплив змінної геометрії і зонного розподілу палива на викиди СО, НС і повноту згоряння детально вивчалися на камері згоряння, схематично представлений на рис. 3.15. Двох'ярусна кільцева камера згоряння має два регульованих прохідних перетинів: фронтний повітрязабірник 1, прикріплений до лобової плити жарової труби, і частина зовнішньої стінки жарової труби 6.

Площа повітрязабірника змінюється шляхом установки на ньому перфорованих пластин з отворами різного діаметру. Таким шляхом регулюється кількість повітря, що подається через завихрителі в первинну зону камери. З метою підтримки на прийнятному рівні втрат тиску і

забезпечення необхідного розподілу повітря розкривається частина стінки жарової труби. Через розкриту щілину в жарову трубу поступає повітря крім повітрозабірника.

Результати випробувань цієї камери показали, що перерозподілом повітря можна в два рази і більше зменшити вихід СО і НС.

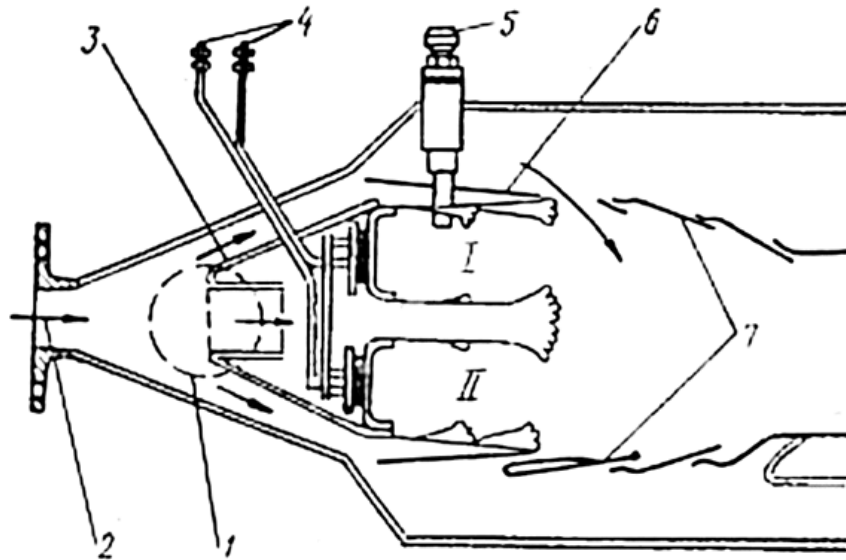


Рис. 3.15. Схема регульованої двох'ярусної кільцевої камери згорання, де; 1 – регульований перетин повітрозабірника; 2 – потік повітря; 3 – повітрозабірник; 4 – подача палива; 5 – свічка запалювання; 6 – відкрита (регульована) стінка жарової труби; 7 – стінки газозбірника; I, II - зовнішня і внутрішня кільцеві порожнини

Двох'ярусна кільцева конструкція камери дозволила також дослідити різні режими зонної подачі палива:

- а) – нормальну – подачу палива в обидві кільцеві порожнини;
- б) – подачу тільки в одну з порожнин;
- в) – комбіновану подачу, в декількох точках по колу камери зі зміщенням форсунок в зовнішньому і внутрішньому кільцях в шаховому порядку.

Найкращі результати показав режим з подачею палива тільки у внутрішній кільцевий простір. При  $a=9,7$  рівень емісії НС був в п'ять разів менше, ніж при звичайному розподілі палива. При комбінованій подачі він

знизився незначно через сильне зниження температури горіння внаслідок дуже великої відстані між форсунками. Кожне ядро горіння виявилось оточеним передчасно охолодженими і непрореагованими газами.

Вплив зонної подачі палива на викиди CO був зовсім іншим, при  $a=9,7$ , в разі подачі палива усіма форсунками, емісія CO була найменшою; при зменшенні  $a$  рівень емісії підвищився до максимального при величині  $a=6,8$ , після чого знову зменшився. Подача палива тільки у внутрішній контур показала найкращі результати в широкому діапазоні  $a$ .

Аналіз залежності повноти згоряння від складу суміші показує, що при нормальній подачі палива і  $a=9,7$  повнота згоряння настільки низька (35%), що основна маса палива не згорає і CO утворюється мало. Зі зменшенням  $a$  повнота згоряння підвищується і кількість CO збільшується. При подальшому зменшенні  $a$  кількість CO, що окислюється в CO<sub>2</sub>, збільшується, а емісія CO знову зменшується. Застосування зонної подачі палива дозволяє підвищити повноту згоряння при високих  $a$ .

Таким чином, зонна подача палива за допомогою зміни умов теплообміну в області горіння дозволяє значно знизити HC і в меншій мірі CO на режимах малого газу.

### **3.5. Технологія захисту довкілля при використанні каталітичної камери згоряння**

Робочий процес в каталітичній камері згоряння відрізняється тим, що хімічна реакція вивільнення енергії палива ініціюється головним чином гетерогенним каталізатором (каталітичною поверхнею). При цьому ефективність горіння визначається в першу чергу величиною активованої поверхні, що припадає на одиницю об'єму камери. Виходячи з вимоги забезпечення максимальної активованої поверхні при заданому рівні гідравлічних втрат каталітична камера згоряння конструктивно виконується у вигляді монолітного корпусу, заповненого керамічними сотами [58, 105].

Стільникова камера діє як пучок трубчастих реакторів, в яких енергія вивільняється в міру просування суміші уздовж трубки. Отже, температура в такому реакторі підвищується монотонно, досягаючи максимуму в кінці. Масоперенос між трубками відсутній, і тепло передається лише шляхом конвекції. Основна кількість енергії виділяється всередині кожного трубчастого реактора в результаті горіння.

Тому в першому наближенні можна вважати, що процес в кожному реакторі розвивається незалежно. Оскільки реактори ідентичні як по формі, так і за робочим процесом, енергія розподіляється в кожному поперечному перерізі камери рівномірно. Це означає: якщо температура, склад суміші і швидкість потоку на вході в камеру розподілені рівномірно по її перетину, то на виході ці параметри будуть розподілені також рівномірно. Отже, і будь-яка нерівномірність параметрів потоку на вході може бути визначена за нерівномірністю на виході.

У каталітичній камері протікає кілька процесів.

Реагенти дифундують до каталізатора і адсорбуються. Відбуваються поверхневі хімічні реакції, що супроводжуються виділенням і дифузійною продуктів в основний потік. Одночасно йдуть гомогенні реакції в газовій фазі.

На рис. 3.16 представлена схема розподілу зон зазначених процесів в трубці реактора. На вході температура газу занадто низька для виникнення реакцій в газовій фазі, тут переважають хімічні реакції на поверхні. У міру просування газу в трубі і зростання температури швидкість гетерогенних реакцій збільшується до такого ступеня, що на якийсь довжині труби визначальним фактором швидкості реакцій стає дифузійний масоперенос.

В кінці реактора температура зростає приблизно до  $\sim 1260$  К, і переважаючими стають реакції в газовій фазі. В більшості випадків в перехід від зони реакцій на поверхні до зони дифузійного масопереносу здійснюється на довжині одного діаметра труби. Оскільки в кінці камери згорання температура в авіаційних ГТД може досягати 1640 К і переважаючими є

реакції в газовій фазі, наносити каталізатор на поверхню вихідної частини камери не потрібно.

Каталізатор грає важливу роль в хімічних процесах, тому його слід розглядати як самостійний елемент. Історично склалося так, що каталізатори застосовувалися лише в хімічній технології синтезу, дегідратації, риформінгу, ізомеризації. У теперішній час каталізатори для окислення вуглеводневих палив в газотурбінних камерах згоряння тільки починають застосовуватися. Розглянемо основні види каталізаторів, застосування яких екологічне доцільне для ГТД.

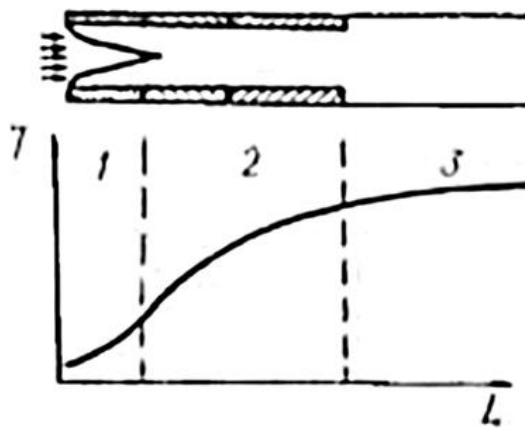


Рис. 3.16. Типовий розподіл зон в трубчастому реакторі, де:  
1 – зона поверхневих реакцій; 2 – зона масопереносу;  
3 – зона реакцій в газовій фазі

Камера виготовляється у вигляді сот або керамічних сплавів з високим вмістом нікелю. При виборі матеріалу необхідно враховувати ряд факторів: площа поверхні, пористість, інертність, стабільність, міцність, коефіцієнт термічного розширення і ін.

Перші два фактори важливі для отримання максимальної сумарної активної площі.

Для забезпечення надійного зчеплення під час дії теплових ударів важливе значення має правильний підбір коефіцієнтів термічного розширення. Матеріал ложі не повинен взаємодіяти з каталізатором і відчувати фазові перетворення в робочому діапазоні температур.

*Благородні метали (платина)* мають найменшу робочу температуру, але не витримують високих температур на виході з камери. Ці метали дорогі. Проблема зниження вартості може бути вирішена повторним використанням камер згоряння. З огляду на те, що вартість звичайної камери відносно мала в порівнянні з вартістю всього двигуна, застосування каталізатора завдяки перевагам в характеристиках (більш низьку витрату палива) може дати позитивний ефект з точки зору оптимального співвідношення вартість – ефективність.

Оксиди хрому та кобальту вважаються хорошими каталізаторами при температурі вище 640 К. Вони знайшли застосування при виготовленні активованих поверхонь основних і форсажних камер згоряння.

Оксиди рідкоземельних елементів, наприклад, лантану або цезію, мають хороші характеристики в більш високому діапазоні температур (вище 1090 К). Їх застосування доцільне в форсажному контурі двигуна.

Зміна хімічної активності цих трьох груп каталізаторів в залежності від температури є критерієм при виборі конструкції ложі каталізатора.

Найкращими матеріалами є кордієрит и карбід кремнію. Кордієрит – це алюмомагнієва кварцова кераміка, яка широко застосовується для автомобільних каталітичних допалювачів. Він термічно стабільний і має високий опір удару. З цього матеріалу зазвичай методом видавлювання отримують структури з сотами круглого, шестикутного, квадратного, прямокутного або трикутного перетинів. Типова щільність розподілу сот – 40 чарунк на 1 см<sup>2</sup>, що відповідає площі 23 см<sup>2</sup> на 1 см<sup>3</sup> об'єму. Так само можна отримати щільність 64 чарунки на 1 см<sup>2</sup>. Однак кордієрит не витримує дуже високих температур, що зазвичай виникають в камерах згоряння. Для нього максимально допустима температура при тривалій дії становить близько 1470 К.

Високоміцним вогнетривким матеріалом є карбід кремнію. Він використовується для виготовлення турбінних лопаток. Карбід кремнію має також високий опір тепловим ударам і високу жароміцність, але коштує він

приблизно в 5 разів дорожче керамічних матеріалів. Зміна термічних властивостей цих двох матеріалів відповідає вимогам шаруватої конструкції ложі каталізатора.

Система сумішоутворення призначена для попередньої підготовки (випаровування і змішування) паливо-повітряної суміші перед подачею в камеру згоряння. Рекомендується в готовій суміші мати  $5 \div 10\%$  палива в рідкій фазі. Система сумішоутворення повинна забезпечувати рівномірне поле температур, швидкостей і концентрацій компонентів. За висунутими вимогами вона мало чим відрізняється від розглянутих систем сумішоутворення для модульних і вихрових камер згоряння.

#### *Основні каталітичні камери згоряння.*

Застосування каталізаторів в основних камерах згоряння показало їх переваги у порівнянні з камерами звичайного типу. З міркувань міцності турбіни температура на виході з камери згоряння не повинна перевищувати  $\sim 1640$  К. Стехіометричний склад суміші відповідає температурі вище  $2470$  К.

Отже, через обмеження з температури, камера згоряння повинна працювати на дуже бідних сумішах, при  $a \geq 2,5$ , але такий склад суміші для вуглеводневих палив знаходиться за межами займання і горіння. У звичайних тризонних камерах проблема займання вирішується спалюванням суміші при різних  $a$  в кожній зоні.

Горіння в первинній зоні відбувається при  $a \approx 1,0$ , що призводить до підвищення температури газу до  $2470$  К і більше. В таких умовах окислів азоту утворюється в 100 разів більше, ніж при температурі  $1640$  К. Характерний розподіл температури за довжиною звичайної камери згоряння показано на рис. 3.17а. Нерівномірне виділення тепла призводить до флуктуацій у часі температури, швидкості і концентрації компонентів в будь-якій точці потоку, що негативно позначається на роботі лопаток турбіни. З міркувань надійності роботи турбіни середньомасову температуру газів декілька знижують, збільшуючи тим самим витрату палива.



Для камер із ступінчастим підведенням тепла (наприклад, «Vorbiх») характерний більш рівномірний розподіл температури за довжиною (рис. 3.17 б) і працювати вони можуть на збіднених сумішах. Однак при певних перевагах (зменшення токсичних сполук), такі камери мають досить складну конструкцію.



Рис. 3.17. Зміна температури за довжиною камери, де а – звичайна камера; б – камера зі ступеневим підведенням тепла; в – каталітична камера

Застосування каталізаторів дозволяє отримати ряд нових позитивних властивостей у порівнянні зі звичайним процесом горіння:

1. Виділення енергії в трубчастому реакторі відбувається безперервно при повільному збільшенні температури продуктів згоряння (рис. 3.17, в), завдяки чому поля температур, швидкостей і концентрацій компонентів мають мінімальну нерівномірність за вихідним перетином і в часі. З'являється можливість планомірного профілювання поля температур за висотою лопатки. Каталітична камера дозволяє підвищити середньомасову температуру потоку на вході в турбіну, а отже, отримати більш низьку питому витрату палива і більш високу питому тягу.

2. Підвищення стабільності робочого процесу пояснюється двома причинами: по-перше, притаманна каталізатору висока хімічна активність забезпечує високий коефіцієнт повноти згоряння в широкому діапазоні  $a$  й

стійкість щодо зриву полум'я, перехід від звичайного механізму окислення до каталітичного збільшує швидкість реакції в  $104 \div 107$  разів; по-друге, завдяки наявності ложі каталізатора, збільшення теплової інерції зони горіння зменшує можливість небажаного впливу зміни витрати палива або повітря на робочий процес. Розрахунки в першому наближенні показують, що здатність акумулювати тепло у каталітичній камері в 400 разів більше, чим у звичайній, тому в ній згладжуються значні коливання температури.

3. Максимальна температура в камері на виході відповідає  $a = 2,5$ . Випромінювання тепла при температурі 1640 К в 5 разів менше, ніж при 2470 К, тому елементи конструкції, зокрема лопатки турбіни, працюватимуть в більш легких умовах.

4. Наявність гомогенної паливо-повітряної суміші зменшує виділення твердого вуглецю, що знижує випромінювання, світність полум'я, а отже, і ймовірність виявлення літака.

5. Стале горіння при низьких  $a$  (доведена можливість горіння при  $a=10$ ) дозволяє знизити до мінімуму утворення оксидів азоту в продуктах згорання. У той же час повнота згорання, як показано в роботі [64], навіть при  $a=3,4$  досягає 100%. Сумарні втрати тиску на каталізаторі і системі сумішоутворення становлять  $8 \div 9\%$  (приблизно як в звичайних камерах).

#### *Каталітичні форсажні камери.*

Каталітичні матеріали можуть застосовуватися в форсажних камерах для займання і стабілізації полум'я. Каталітичні запалювачі застосовуються в форсажних камерах двигуна УІ-93. Проблема займання при зниженому тиску на великій висоті вирішується відповідним вибором положення запалювача вниз по потоку за форсункою. Суміші, близькі до стехіометричному складу, легко спалахують з виділенням великої кількості тепла, що гарантує надійність роботи камери на великій висоті.

Зазвичай коефіцієнт повноти згорання  $\eta_f$  в форсажних камерах становить  $85 \div 95\%$ , в той час як в основних камерах він досягає 99%. Це пояснюється великою швидкістю потоку ( $v \approx 250$  м/с), що при довжині

існуючих камер відповідає малому часу перебування в ній продуктів згоряння. Підвищення повноти згоряння дозволило б або досягти більш високих характеристик двигуна, або зменшити його довжину. Стосовно двигуна J85 при  $M_{\text{п}}=0,5$  збільшення  $\eta$  з 85 до 95% підвищило б тягу і відповідно знизило питому витрату палива на 3%. При  $\eta_{\text{r}} = 90\%$  застосування каталізаторів дозволило б знизити довжину форсажної камери на 23%.

Використання хонейкомба як каталітичного стабілізатора дозволяє отримати більш стійкі характеристики форсажної камери зі зриву полум'я.

Такий стабілізатор не викликає збільшення опору, оскільки потік, що проходить через нього, турбулізується незначно.

Є кілька методів використання каталізатора в форсажних камерах згоряння. Перший з них полягає в тому, що використовується стандартний стабілізатор (двигун J85) з сорочкою з каталітичного матеріалу. При цьому виникає проблема створення міцного і надійного зв'язку між каталізатором і матеріалом стабілізатора.

На двигуні J85 був встановлений V-подібний стабілізатор з листового матеріалу. На рис. 3.18 представлений його загальний вигляд. Через вхідні канали, розташовані з чотирьох сторін кільцевого стабілізатора, робоча суміш заданого складу надходить у внутрішню порожнину стабілізатора. Обидві поверхні стабілізатора покриті шаром каталізатора. Запальна свічка встановлена у внутрішній порожнині. При такому використанні каталітичних покриттів виникає небезпека того, що вплив каталізатора поширюється тільки на прикордонний шар над каталітичної поверхнею і не досягає основного потоку.

Іншим варіантом стабілізуючого пристрою є так званий кільцевий хонейкомб з керамічного матеріалу, покритого, каталізатором. У такому пристрої втрати повного тиску менше, ніж в звичайному стабілізаторі, що має таку ж площу захарачення каналу. Це пристрій можна назвати «стабілізатором поверхневого горіння». З його допомогою можна отримати максимальну повноту згоряння на мінімальній довжині. Склад суміші у

цьому випадку забезпечується набором форсунок, що пов'язані зі стабілізатором полум'я.

Таким чином, сам принцип організації робочого процесу в каталітичній камері згоряння (високі швидкості хімічних реакцій, низька температура, висока стійкість полум'я і ін.) виключає можливість утворення токсичних сполук і дозволяє досягти 100% повноти згоряння палива при помірному підвищенні гідравлічного опору. Подолання технічних труднощів при використанні каталізаторів дозволить створити практично ідеальну камеру згоряння для газотурбінного двигуна.

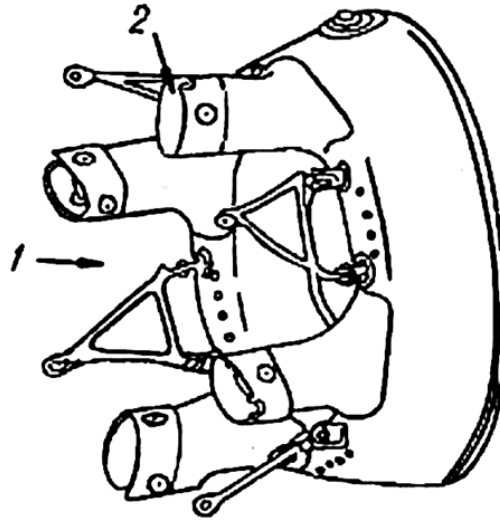


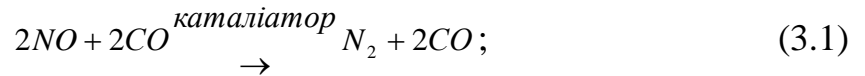
Рис. 3.18. Стабілізатор форсажної камери двигуна J85, де:  
1 – потік повітря; 2 – напрямні камери з пальниками

### 3.6. Технологія захисту довкілля шляхом застосування присадок до палива

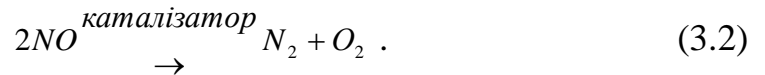
Найбільш повний огляд питань застосування присадок до палива з метою зниження викидів  $\text{NO}_x$  представлений в літературі [109]. Проаналізуємо дані про результати дослідження близько 70 варіантів модифікацій палива JetA в камері згоряння ГТД. З метою отримання загальної оцінки способів зменшення викидів присадок визначимо 7 наступних груп:

1. Розчинні присадки (наприклад, Co, Na, Fe, Ni, Sb і ін.), які є гетерогенними каталізаторами:

відновлення

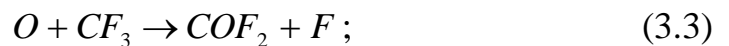


розкладання

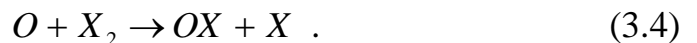


2. Присадки, які поглинають або рекомбінують атоми кисню ( $CCl_4$  ( $CF_3$ )<sub>2</sub> СНОН):

поглинання



рекомбінація



3. Присадки, що знижують максимальні температури:

а – шляхом тепловіддачі випромінюванням твердих частинок (наприклад, діхлорпентідієн дає сажу, органометали дають оксиди);

б – шляхом ендотермічних фізичних перетворень (прикладом можуть служити емульсії води, спирту, мурашиного кислого амонію, нітрату амонію, ацетату гідразину).

4. Присадки, які уповільнюють займання і, отже, скорочують час перебування при максимальних температурах (наприклад, анілін, діетиловий ефір).

5. Присадки, що змінюють гідродинаміку розпилу (наприклад, поліізобутилен, розчинені полімери).

6. Присадки, що руйнують NO (наприклад, анілін, мурашиний кислий амоній, ацетат гідразину):



7. Поєднання зазначених присадок для синергічного впливу (наприклад, Sb +  $CCl_4$ ; 0,7 Ni + 0,3 Си (монель)).

В цілому було випробувано близько 70 присадок.

Серед них 12 нефтенатов металів, 6 ацетилацетонатів металів, 5 солей металів неокислот, 6 змішаних сполук металів, 4 суспензії карбонатів лужних і лужно земельних металів, 17 присадок, які містять метали і 21 емульсія.

З перерахованих семи груп присадок ефективною виявилася тільки перша. Результати зі зниження окислів азоту, отримані з перехідними металами, представлені на рис. 3.19. Для чотирьох найбільш ефективних металів досліджувався вплив кількості додаваного металу. Добавки кобальту і міді в кількості 0,2 ÷ 0,3% за вагою зменшують вихід  $NO_x$  на 28 і 16% відповідно.

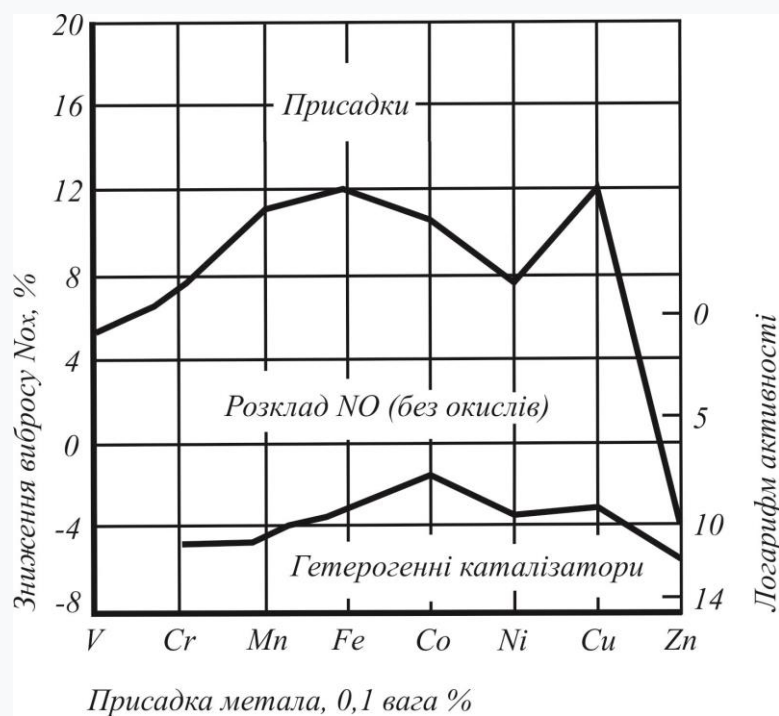


Рис. 3.19. Результати зі зниження окислів азоту шляхом присадок металів до палива

Приріст ефективності майже для всіх металів зменшувався в області великих кількостей, що додавались. Інші органометалеві сполуки, що містять

кальцій, церій, свинець, алюміній, цирконій, літій і сурму, при додаванні 0,1 ваги % металу зменшують кількість  $\text{NO}_x$  незначно. Було випробувано чотири суспензії карбонатів металів при додаванні їх в кількості 0,1 ваги %. Карбонат натрію зменшував викид  $\text{NO}_x$  приблизно на 20 %, карбонат літію – на 10 %. Карбонати барію і кальцію виявилися неефективними.

Власне метали і (або) їх оксиди, які є активними в процесі конверсії  $\text{NO}$ , нерозчинні в паливі для реактивних двигунів. Органометалеві сполуки додавалися до палива як розчинні компоненти, а для нерозчинних використовувалися органічні речовини, що переводять їх в розчинний стан.

Передбачалося, що в момент надходження в зону згоряння ці сполуки утворюють сильно диспергований каталізатор. І дійсно, в ряді дослідів зі сполуками заліза в жаровій трубі камери згоряння був виявлений вкрай бурий порошок, який був мабуть оксидом заліза. Інші метали також залишали на жаровій трубі сліди своїх окислів.

При введенні компонентів, що містять метал в камеру згоряння ГТД можуть виникнути серйозні проблеми: утворюються відкладення, які призводять до виникнення місцевого перегріву і, як наслідок, – до ерозії і корозії жарової труби і лопаток турбіни. Крім того, відомо, що органометалеві з'єднання прискорюють утворення осаду в авіаційних паливах. Осад може забити вузькі канали і забруднити поверхні, що передають тепло, що робить літак непридатним до експлуатації. Ці несприятливі фактори не бралися до уваги при виборі модифікацій палива, щоб не упустити при розгляді перспективні присадки.

Отже, присадки до палива або зміна складу, здатні впливати на зазначені фактори, можуть помітно впливати на викиди  $\text{NO}$  з реактивних двигунів. За інших рівних умов зменшення концентрації атомарного кисню знижує швидкість утворення  $\text{NO}$  і, отже, його викидів. Зниження кількості вільного атомарного кисню можна досягти за допомогою речовин, здатних вступати в реакцію з атомами кисню або бути каталізаторами для їх рекомбінації. Відомі

речовини, що мають такі властивості, були випробувані і використані з метою інгібування полум'я.

Випробовувалися чотирьоххлористий вуглець і перфторпропіловий спирт при добавці 2,5 об. %, Але обидва вони виявилися неефективними для зниження викиду  $\text{NO}_x$ .

Карбонати металів діють шляхом утворення перекисів металів за допомогою реакції, в якій бере участь атомарний кисень. З чотирьох випробуваних суспензій карбонатів ефективними виявилися тільки карбонати лужних металів: карбонат натрію знижував викид на 20%, а карбонат літію – на 10%.

Іншим способом зменшення  $\text{NO}_x$  є використання присадок, що знижують температуру горіння. Навіть невелика зміна максимальних температур може істотно вплинути на виникнення  $\text{NO}$ . Найбільший ефект може дати зниження температури в первинній зоні горіння, де утворюється основна частка. Максимальні температури горіння можуть бути зменшені зі збільшенням тепловіддачі випромінювання в первинній зоні. Будь-які частинки, що містяться в полум'ї, в тому числі сажа, збільшують променисту тепловіддачу факела. Підвищення вмісту  $\text{CO}_2$  в газах збільшує їх тепловіддачу випромінюванням. Ця група не дала результатів, так як деякі металоорганічні речовини ефективно знижували рівень  $\text{NO}_x$ , а інші ні.

Іншим способом зниження максимальних температур горіння в реактивному двигуні може бути добавка до палива речовин, здатних зазнавати ендотермічні фізичні або хімічні перетворення в межах первинної зони камери. Мається на увазі, що тепло, поглинене ендотермічними реакціями в первинній зоні, віддається в процесі повного згорання в більш холодній вторинній зоні і ККД згорання не зменшується.

В якості головної присадки, що зазнає фізичне ендотермічне перетворення, зазвичай розглядається вода. Так як при випаровуванні води поглинається приблизно 556 ккал/кг у порівнянні з теплотою згорання



палива – 10200 ккал/кг, добавка води до палива дає тільки невелику зміну максимальної температури. Але навіть невелика зміна максимальної температури в реактивному двигуні може виявитися достатнім для суттєвого зміни викидів  $\text{NO}_x$ . Експерименти показують, що вплив води залежить від її маси по відношенню до маси повітря, і при відношенні води до повітря меншому 0,01 ефект порівняно невеликий.

Аналогічні дані отримані також при випробуванні відсіку камери згоряння. Уприскуванням води в кількості 50÷100% від витрати палива можна на 20÷50% знизити викиди  $\text{NO}_x$ . Такого ж ефекту щодо зниження  $\text{NO}_x$  можна досягти і при меншому (в 10 разів) витраті води, якщо її вводити у вигляді однорідної емульсії з паливом. Для отримання водно-паливної емульсії можна використовувати спеціальний гідродинамічний вихровий ультразвуковий емульгатор.

Одним з найбільш важливих параметрів, що визначають рівень викидів  $\text{NO}_x$ , є час перебування компонентів при максимальних температурах. Кращим способом зменшення часу перебування є уповільнення займання.

Деякі антидетонатори, використовувані для бензину, були випробувані як сповільнювачі займання газотурбінного палива. Були випробувані металоорганічні сполуки; тетраетил і тетраметил свинцю, анілін, деякі кетони та ефіри. Однак виявилось, що жодна з цих присадок для реактивних палив не є ефективним сповільнювачем займання.

Таким чином можливо визначити, що найбільш ефективні модифікації палива дозволяють знизити рівень  $\text{NO}_x$  на 30%. Оскільки ці модифікації пов'язані з використанням металів, які самі можуть бути забруднювачами, один тип забруднення змінюється іншим. Крім того, досягнутий рівень зменшення викиду  $\text{NO}_x$  не виправдовує додаткову вартість палива. Присадки можна використовувати для зниження викиду  $\text{NO}_x$  під час зльоту літака, так як при цьому режимі виділення диму і  $\text{NO}_x$  максимальне.

### Висновки по розділу 3

1. Запропоновано та обґрунтовано екологічні напрями зменшення виходу токсичних сполук шляхом внесення змін до заходів відпрацьованих газів і палива

2. Розробка заходів щодо зниження викидів токсичних речовин можлива за двома напрямками:

а) незначна модифікація існуючих камер згоряння (перерозподіл потоків повітря, використання нових систем розпилення палива, інтенсифікація процесів перемішування турбулізацією потоку, впорскування води в камеру або застосування паливних присадок);

б) корінна перебудова камер згоряння (застосування систем попереднього підігріву, випаровування і змішування палива, багатозонна подача палива, камери із змінною геометрією і каталітичні камери згоряння).

3. Визначено особливості екологічного напрямку удосконалення камер згоряння в газотурбінних двигунах за рахунок вихрових потоків. Екологічно обґрунтована ефективність високих швидкостей випаровування і розподілу палива, що досягаються при використанні допоміжного пальника, а також інтенсивному перемішуванні на початку основної зони горіння, так при злітному режимі в обох камерах, згоряння число димності за Брандтом склало 5.

4. У процесі збагачення суміші тепловиділення збільшується, і фронт полум'я вже не обмежується областю сліду за модулями, а поширюється на весь фронтний пристрій. При цьому в локальних зонах реакції розвиваються максимальні температури, і швидкість виникнення  $\text{NO}_x$  збільшується. Подальше збагачення суміші обумовлює появу додаткових ефектів, які зменшують швидкість виникнення  $\text{NO}_x$ . При горінні багатій суміші витрачається більше кисню, а це означає, що в виникненні  $\text{NO}_x$  бере участь менше кисню. Крім того, додавання палива призводить до надмірного

збагачення зони поблизу модулів. При цьому, як температура в зоні горіння і швидкість виникнення  $\text{NO}_x$  повинні зменшуватися.

5. Зі збільшенням швидкості потоку концентрації  $\text{HC}$  і  $\text{CO}$  збільшуються (на противагу аналогічній залежності для  $\text{NO}_x$ ). Отже, такі способи зменшення часу перебування, як скорочення довжини камери і забезпечення швидкого перемішування з точки зору зменшення викидів  $\text{NO}_x$  є найкращими.

6. У камерах згоряння з форсунками механічного розпилення низький тиск подачі рідкого палива у режимі малого газу призводять до погіршення процесів розпилення і підготовки суміші. Як наслідок цього збільшуються викиди  $\text{CO}$  і  $\text{HC}$ .

7. Зміна геометрії камери і зонний розподіл палива дозволяє підвищити повноту згоряння. У камері зі змінною геометрією це досягається зміною її аеродинаміки що дає можливість створювати локальні області з сприятливим складом суміші, підвищувати повноту згоряння і знижувати рівень емісій.

8. Аналіз залежності повноти згоряння від складу суміші показує, що при нормальній подачі палива повнота згоряння настільки низька (35%), що основна маса палива не згорає і  $\text{CO}$  утворюється мало. Зі зменшенням подачі палива повнота згоряння підвищується і кількість  $\text{CO}$  збільшується. При подальшому зменшенні подачі палива кількість  $\text{CO}$ , що окислюється в  $\text{CO}_2$ , збільшується, а емісія  $\text{CO}$  знову зменшується. Застосування зонної подачі палива дозволяє підвищити повноту згоряння палива.

9. Запропонована технологія захисту довкілля при використанні каталітичної камери згоряння передбачає застосування каталізаторів, застосування яких екологічно доцільне для ГТД. При цьому принцип організації робочого процесу в каталітичній камері згоряння (високі швидкості хімічних реакцій, низька температура, висока стійкість полум'я і ін.) виключає можливість утворення токсичних сполук і дозволяє досягти 100% повноти згоряння палива при помірному підвищенні гідравлічного

опору. Запропонована технологія з використанням каталізаторів дозволить створити практично ідеальну камеру згоряння для газотурбінного двигуна.

10. Запропонована технологія захисту довкілля шляхом застосування присадок до палива доцільно застосовувати з метою зниження викидів  $\text{NO}_x$ . В розділі проаналізовані дані про результати зі зниження окислів азоту, отримані для різних груп присадок (дослідження 70 варіантів модифікацій палива JetA в камері згоряння ГТД):

- розчинні присадки (наприклад, Co, Na, Fe, Ni, Sb і ін.), які є гетерогенними каталізаторами;
- присадки, які поглинають або рекомбінують атоми кисню ( $\text{CCl}_4$  ( $\text{CF}_3$ )<sub>2</sub> СНОН);
- присадки, що знижують максимальні температури;
- присадки, що змінюють гідродинаміку розпилу (наприклад, поліізобутилен, розчинені полімери);
- присадки, що руйнують NO (наприклад, анілін, мурашиний кислий амоній, ацетат гідразину);
- поєднання зазначених присадок для синергічного впливу (наприклад, Sb +  $\text{CCl}_4$ ; 0,7 Ni + 0,3 Си (монель)).

11. Встановлено, що присадки до палива або зміна складу, здатні впливати на зазначені фактори, можуть помітно впливати на викиди NO з реактивних двигунів. Зменшення концентрації атомарного кисню знижує швидкість утворення NO і, отже, його викидів. Зниження кількості вільного атомарного кисню можна досягти за допомогою речовин, здатних вступати в реакцію з атомами кисню або бути каталізаторами для їх рекомбінації.

12. Карбонати металів діють шляхом утворення перекисів металів за допомогою реакції, в якій бере участь атомарний кисень. З чотирьох випробуваних суспензій карбонатів ефективними виявилися тільки карбонати лужних металів: карбонат натрію знижував викид на 20%, а карбонат літію – на 10%.

13. Добавка води до палива дає тільки невелику зміну максимальної температури. Але навіть невелика зміна максимальної температури в реактивному двигуні може виявитися достатнім для суттєвої зміни викидів  $\text{NO}_x$ . Експерименти показують, що вплив води залежить від її маси по відношенню до маси повітря, і при відношенні води до повітря меншому 0,01 ефект порівняно невеликий

14. Уприскуванням води у відсік камери згоряння в кількості 50÷100% від витрати палива можна на 20÷50% знизити викиди  $\text{NO}_x$ . Такого ж ефекту щодо зниження  $\text{NO}_x$  можна досягти і при меншому (в 10 разів) витрат води, якщо її вводити у вигляді однорідної емульсії з паливом. Для отримання водно-паливної емульсії доцільно використовувати спеціальний гідродинамічний вихровий ультразвуковий емульгатор.

15. Технології модифікації палива дозволяють знизити рівень  $\text{NO}_x$  на 30%. Оскільки ці модифікації пов'язані з використанням металів, які самі можуть бути забруднювачами, один тип забруднення змінюється іншим. Тому досягнутий рівень зменшення викиду  $\text{NO}_x$  не виправдовує додаткову вартість палива. Присадки можна використовувати для зниження викиду  $\text{NO}_x$  під час зльоту літака, так як при цьому режимі виділення диму і  $\text{NO}_x$  максимальне.

Наступним етапом досліджень є екологічна оцінка впливу аеродромних комплексів на природне середовище приаеродромної території.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ АЕРОДРОМНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ПРИАЕРОДРОМНОЇ ТЕРИТОРІЇ

#### 4.1. Оцінювання забруднення приземного шару атмосфери на технічній позиції підготовки повітряних суден до вильоту

За даними Державної авіаційної служби України у 2015 р. на ринку авіаційних пасажирських та вантажних перевезень працювали 33 вітчизняні авіакомпанії. За статистичними даними упродовж року виконано 66,3 тис. комерційних рейсів (за 2014 рік - 74,8 тис.). Кількість перевезених пасажирів скоротилась порівняно з попереднім роком на 2,6 % та склала 6302,7 тис. чол. Обсяги перевезень вантажів та пошти склали 69,1 тис т (за 2014 р. - 78,6 тис. тонн). Пасажирські перевезення з 2015 року виконує 21 вітчизняна авіакомпанія. Доля 4-х провідних авіаперевізників («Міжнародні авіалінії України», «Ютейр Україна», «Роза вітрів» та «Дніпроавіа») в загальних обсягах пасажирських перевезень склала майже 93 %. При цьому зростання обсягів перевезень мало місце лише у авіакомпанії «Міжнародні авіалінії України» (на 28,2 %). Пасажирські перевезення авіакомпанії «Ютейр Україна» скоротились порівняно з 2014 р. на 12,2 %, «Дніпроавіа» - 13,5 %, «Роза вітрів » - на 54,9 %. Регулярні польоти між Україною та країнами світу здійснювали .9 вітчизняних авіакомпаній до 39 країн світу та 35 іноземних авіакомпаній з 29 країн світу. Українськими авіакомпаніями перевезено 4018,3 тис. чол. (зростання - на 2,4 %), іноземними - 3769,3 тис. чол. (скорочення - на 1,1 %). Упродовж 2015 року розпочато експлуатацію на регулярній основі 5-ти нових міжнародних авіаліній: авіакомпанією «Дніпроавіа» з м. Дніпропетровська до м. Бургаса та з м. Одеси до м. Батумі, авіакомпанією «Міжнародні авіалінії України» з м. Одеси до м. Вільнюса та зі м. Львова до м. Болоньї, авіакомпанією «Атласджет Україна» з м. Запоріжжя до м. Стамбула. На внутрішніх регулярних лініях пасажирські

перевезення між 9 містами України здійснювали 5 українських авіакомпаній, перевезено 611,5 тис. чол. (за 2014 рік - 629,2 тис. чол.) [142, 143].

Перевезення вантажів та пошти у звітному періоді виконували 19 вітчизняних авіакомпаній, 76 % від загальних обсягів перевезень виконано АНТК «Антонов», авіакомпаніями «Міжнародні авіалінії України», «Максимум Ейрлайнс», «ЗетАвіа» та «Урга». Більша частина перевезень - це перевезення чартерними рейсами в інших державах в рамках гуманітарних та миротворчих програм ООН, а також згідно контрактів та угод з іншими замовниками. Комерційні рейси вітчизняних та іноземних авіакомпаній у 2015 р. обслуговували 20 українських аеропортів. За статистичними даними кількість відправлених та прибулих упродовж року повітряних суден склала 120,7 тис., (проти 142,4 тисяч за попередній рік). Пасажиропотоки через аеропорти України зменшились на 1,0 % та становили 10695,2 тис. чол., поштовантажпотоки - на 7,0 % та склали 34,4 тис. т.

При цьому 68 % всіх обслугованих пасажирів та майже 88 % пошто-вантажопотоків припадає на Міжнародний аеропорт «Бориспіль». За підсумками 2015 р. пасажиропотоки через головний аеропорт країни Бориспіль зросли порівняно з 2014 роком на 5,6 %. Мало місце також зростання пасажирських перевезень в аеропортах м. Одеса (на 9,8 %), м. Запоріжжя (на 69,9 %), м. Херсон (у 7,8 разів). Пасажиропотоки через аеропорт «Дніпропетровськ» скоротились на 22,5 %, «Харків» - на 14,6 %, Київ (Жуляни) - на 13,6 %, Львів - на 2,5 %. Малою авіацією за звітний 2015 рік оброблено 401,1 тис. гектарів сільськогосподарських площ, наліт годин становив 22,6 тисяч (за 2014 рік - 626,2 тис. гектарів та 13,1 тис. годин відповідно). ДП ОПР «Украерорух» упродовж року обслуговано 234,9 тис. польотів проти 347,6 тисяч за 2014 рік. Кількість обслуговуваних польотів, виконаних літаками та вертольотами авіакомпаній України зменшилась на 10,8%, іноземними авіакомпаніями - на 38,7 %.

За 2014 р. в атмосферу викинуто 162,1 млн. т. діоксиду вуглецю, що впливають на зміну клімату, тобто на 16,7% нижче аналогічного показника

2014 р. (табл.2.1). За даними Державної служби статистики, в 2015 р. викиди забруднюючих речовин в атмосферу від стаціонарних та пересувних джерел склали 74521,3 тис. т. Зокрема, викиди метану, які належать до парникових газів, зменшилися на 67,1 тис. т (11,%), а викиди оксиду азоту збільшилися на 0,2 тис. т (12,5%).

Від стаціонарних джерел забруднення в атмосферу надійшло 2857,4 тис. т або на 492,6 тис. т (на 14,7%) менше ніж у минулому році, що складає 63,2% від загального обсягу забруднюючих речовин. Загалом викиди забруднюючих речовин в атмосферу від стаціонарних та пересувних джерел забруднення в 2018 році склали 3866,7 тис. т, з них від стаціонарних - 64,9%, від пересувних – 35,1% [144].

Від пересувних джерел забруднення (автомобільного транспорту) в 2018 р. атмосферу надійшло 1358,4 тис. т забруднюючих речовин або на 30,8 тис. т (на 2,2%) менше ніж у минулому році. Динаміку викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря України від стаціонарних та пересувних джерел за 1990 – 2018 роки представлено у табл.4.1. Від пересувних джерел у 2015 р. надійшло в атмосферне повітря 1663,9 тис. т забруднюючих речовин, що на 332,3 тис. т або 16,6% менше ніж у 2014 р.

Найбільше викинуто забруднюючих речовин автомобільним транспортом 1475,2 тис. т (88,7% від загального обсягу), у тому числі автотранспортом населення 1075,0 тис. т. (64,7%). Викиди від виробничої техніки склали 144,7 тис. т. (8,7%), залізничного – 29,7 тис. т. (1,8%), авіаційного – 8,5 тис. т. (0,5%), водного – 5,8 тис.т (0,3%) (рис. 4.1).

Для проведення екологічної оцінки впливу аеродромних комплексів на природне середовище приаеродромної території застосовуємо алгоритмічне и програмне забезпечення інтегральної екологічної оцінки стану об'єктів моніторингу.

Побудова інтегральної оцінки стану об'єктів моніторингу передбачає виконання двох процедур.



1. Створення та застосування семантичної моделі інтегральної оцінки стану приаеродромній території:

- формування списку станів приаеродромної території;
- побудова ієрархічної структури показників стану приаеродромної території;
- визначення списку показників стану приаеродромної території;
- вибір шкал вимірювання показників стану приаеродромної території;

2. Проведення інтегральної екологічної оцінки стану об'єкту моніторингу:

- побудова матриці початкових даних;
- визначення для кожного показника стану інтервалу змін, порогового значення, вагового коефіцієнта;
- перетворення значень показників стану в часткові (окремі) оцінки;
- визначення часткових (окремих) відносних оцінок;
- обчислення інтегральної оцінки стану об'єктів моніторингу.

Кожний етап процесу побудови інтегральної екологічної оцінки стану об'єктів моніторингу є багатокритеріальним. В залежності від специфіки та особливостей конкретного показника стану доцільне застосовувати свій вид часткової та інтегральної екологічних оцінок. При цьому враховуються нижні та верхня границі інтервалу змін кожного показника стану приаеродромної території та вагові коефіцієнти відповідних показників стану.

Таким чином, величина інтегральної оцінки стану об'єктів моніторингу приаеродромній території залежить від інтервалів змін показників стану та їх гранично допустимих значень.

Для порівняння станів об'єкту моніторингу в загальному випадку потрібне корегування оцінок з урахуванням нової нормативно-експертної інформації.

Серед населених пунктів найбільшого антропогенного навантаження (понад 100 тис. т забруднюючих речовин) зазнали 5 міст України, наведених

у таблиці 2.2. Загальний обсяг викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря цих міст складає 40,2 % всіх викидів по країні.

На кожного жителя України в 2018 році припадало 59,3 кг викидів забруднюючих речовин атмосферу. У територіальному розрізі на кожен квадратний кілометр території країни припадало 4,4 т. забруднюючих повітря речовин. Однак, у деяких регіонах ці показники значно перевищили середній рівень по країні. Так, у Донецькій області обсяги викидів у розрахунку на 1 км<sup>2</sup> були більшими у 6,9 разів, а на 1 особу в 3,2 рази, у Дніпропетровській – відповідно у 4,4 та 3,2 рази, Івано-Франківській – у 3,7 та 2,7 відповідно, Запорізькій – 1,5 та 1,7 разів більше. Підприємствами м. Києва у розрахунку на 1 км<sup>2</sup> території викинуто 35 тонн забруднюючих речовин, що перевищило середній показник по країні у 8 разів [144].

Основними хімічними компонентами, які надійшли в атмосферне повітря від стаціонарних джерел є оксид вуглецю – 744,3 тис. т (29,6% від загального обсягу забруднюючих речовин), діоксид та інші сполуки сірки – 701,2 тис.т (27,9 %), метан – 451,1 тис. т (18,0%), речовини у вигляді суспендованих твердих часток – 317,5 тис. т (12,6%) та сполуки азоту – 241,5 тис. т (9,6%). На всі інші забруднюючі речовини припадає 62,1 тис. т або 2,1% від загального обсягу викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря по країні. (таблиця 4.3)

Основними токсичними інгредієнтами, якими забруднювалось повітря під час експлуатації пересувних джерел забруднення, були: оксид вуглецю (74,9 % або 1016,9 тис.т), діоксид азоту (11,6% або 156,9 тис.т), неметанові леткі органічні сполуки (10,1% або 137,6 тис.т), сажа (1,7% або 24,1 тис.т), діоксид сірки (1,3%, або 27,6 тис.т). (таблиця 4.4.)

Більша кількість міст з дуже високим та високим рівнем забруднення атмосферного повітря знаходиться у Дніпропетровській області – 3 міста, у Донецькій області – 3, у Луганській області – 2 міста та одне місто – у Полтавській області. Інші міста – це шість обласних центрів та столиця України.

Таблиця 4.1.

Динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря України від стаціонарних та пересувних джерел за 1990 – 2018 роки

Рік	Обсяги викидів забруднюючих речовин, тис. т			Викиди діоксиду вуглецю, млн.т		
	Усього	у тому числі		Усього	у тому числі	
		стаціонарними джерелами	пересувними джерелами		стаціонарними джерелами	пересувними джерелами
1990	15549,4	9439,1	6110,3	...	...	...
1991	14315,4	8774,6	5540,8	...	...	...
1992	12269,7	8632,9	3636,8	...	...	...
1993	10015,0	7308,3	2706,7	...	...	...
1994	8347,4	6201,4	2146,0	...	...	...
1995	7483,5	5687,0	1796,5	...	...	...
1996	6342,3	4763,8	1578,5	...	...	...
1997	5966,2	4533,2	1433,0	...	...	...
1998	6040,8	4156,3	1884,5	...	...	...
1999	5853,4	4106,4	1747,0	...	...	...
2000	5908,6	3959,4	1949,2	...	...	...
2001	6049,5	4054,8	1994,7	...	...	...
2002	6101,9	4075,0	2026,9	...	...	...
2003	6191,3	4087,8	2103,5	...	...	...
2004	6325,9	4151,9	2174,0	126,9	126,9	...
2005	6615,6	4464,1	2151,5	152,0	152,0	...
2006	7027,6	4822,2	2205,4	178,8	178,8	...
2007	7380,0	4813,3	2566,7	218,1	184,0	34,1
2008	7210,3	4524,9	2685,4	209,4	174,2	35,2
2009	6442,9	3928,1	2514,8	185,2	152,8	32,4
2010	6678,0	4131,6	2546,4	198,2	165,0	33,2
2011	6877,3	4374,6	2502,7	236,0	202,2	33,8
2012	6821,1	4335,3	2454,1	232,0	198,2	33,8
2013	6719,8	4295,1	2424,7	230,7	197,6	33,1
2014	5346,2	3350,0	1996,2	194,7	166,9	27,8
2015	4521,3	2857,4	1663,9	162,1	138,9	23,2
2016	4498,1	3078,1	1420,0	150,6	150,6	...
2017	3974,1	2584,9	1389,2	124,2	124,2	...
2018	3866,7	2508,3	1358,4	126,4	126,4	...

<sup>1</sup> За 1990-2002 роки відображено дані стосовно викидів від автомобільного транспорту; з 2003 року – стосовно автомобільного, залізничного, авіаційного, водного транспорту; з 2007 року – стосовно автомобільного, залізничного, авіаційного, водного транспорту та виробничої техніки. За 2016-2018 роки відображено дані стосовно викидів від автомобільного транспорту.

<sup>2</sup> З 2014 року без урахування тимчасово окупованої території Автономної Республіки Крим, м. Севастополя та частини тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях.

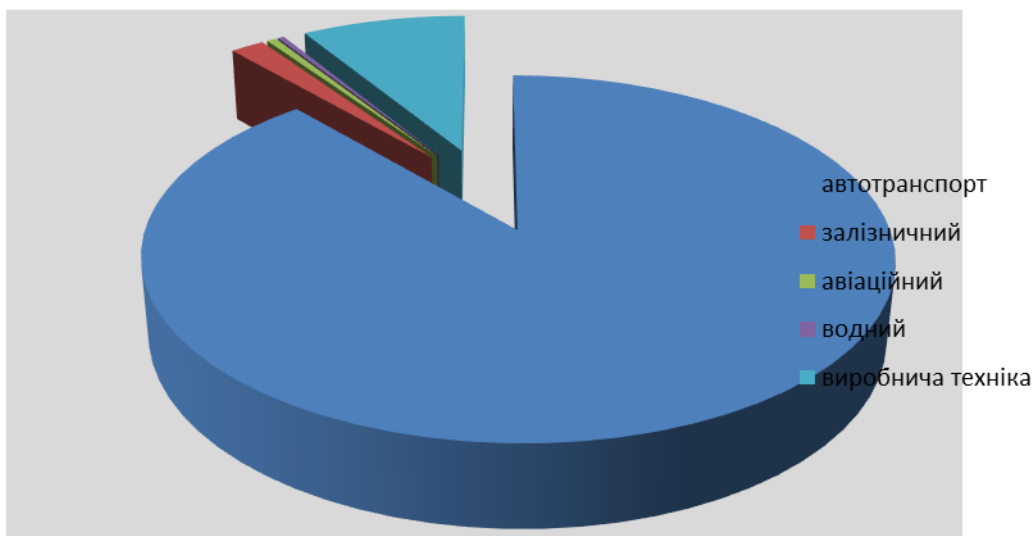


Рис. 4.1. Розподіл викидів забруднюючих речовин від пересувних джерел забруднення, у відсотках до загального обсягу викидів

За індексом забруднення атмосфери (ІЗА), який враховує ступінь забруднення атмосферного повітря по п'яти пріоритетних забруднювальних домішках, дуже високий рівень забруднення, як і у попередньому році, спостерігався у Маріуполі та Дніпрі, високий – у Одесі, Кам'янському, Києві, Кривому Розі, Луцьку, Миколаєві, Слов'янську, Краматорську, Рубіжному, Львові, Запоріжжі, Лисичанську, Херсоні, Кременчуці. Високий рівень забруднення атмосферного повітря вказаних міст був обумовлений здебільшого підвищеним вмістом специфічних шкідливих речовин – формальдегіду, фенолу, фтористого водню, аміаку, з основних домішок – завислих речовин, діоксиду азоту, оксиду вуглецю (рис. 2.2).

У 2018 р. було зафіксовано три випадки високого забруднення (ВЗ) атмосферного повітря оксидом вуглецю у м. Обухів (Київська область) у лютому з максимальною концентрацією 8,8 ГДК м.р. (для порівняння - у 2017 р. було зафіксовано один випадок ВЗ діоксидом азоту у Вінниці). Під високим забрудненням атмосферного повітря (ВЗ) прийнято вміст забруднювальної домішки, який перевищує максимально разову гранично допустиму концентрацію (ГДК м.р.) у 5 разів і більше [144].

Найбільші рівні середньорічних та максимальних концентрацій в атмосферному повітрі міст України надаються у таблиці 2.7. Загальний рівень забруднення атмосферного повітря в Україні за ІЗА становив у 2018 р. 7,6 і оцінювався, як високий.

Порівняно з попереднім роком він дещо підвищився (було – 7,2) за рахунок зростання середньорічного вмісту фенолу. В таблиці 4.5 приведено перелік забруднювальних речовин, вміст яких в атмосферному повітрі міст зумовив найбільше забруднення за середньорічними і максимальними концентраціями (у кратності відповідних ГДК) в 2018 р.

В Україні налічується 20 цивільних аеропортів, які рівномірно розташовані по всій території країни. Статистичні дані про діяльність за 2018 рік свідчать про стабільний розвиток не лише аеропортів, а галузі цивільної авіації в цілому. Так, упродовж звітного року перевезення пасажирів, вантажів та пошти здійснювали 34 вітчизняні авіакомпанії, якими виконано 100,3 тис. комерційних рейсів (за 2017 рік - 93 тис. рейсів) [142, 143].

При цьому, кількість перевезених пасажирів збільшилась порівняно з 2017 роком на 18,7 % та склала 12529 тис. чоловік. Також збільшилися обсяги перевезень вантажів та пошти авіаційним транспортом України на 19,7 % та становили 99,1 тис. тонн. Але разом з розвитком авіаційної галузі посилюється її вплив на навколишнє середовище.

В процесі функціонування на землях аеродромних комплексів накопичуються тверді і рідкі відходи. У більшості випадків ці відходи безпечні в санітарно-гігієнічному відношенні. Обсяги накопичення твердих відходів в 2018 році в середньому в Україні склали: виробничі - 43 тис. Т; побутові - 79,9 тис. т; відходи, що видаляються з літаків міжнародних авіаліній, - 2,1 тис. т. Відходами аеродромного комплексу зайняті спеціальні приміщення і відкриті сховища (звалища), з них тільки 18% спеціально підготовлені для їх зберігання і накопичення.

Таблиця 4.2

Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення

№ з/п	Назва населеного пункту	2010	2014	2015	2016	2017	2018	% від загальної кількості по країні у 2018 році
1	Бурштин	146,8	199,8	198,0	168,5	160,1	182,9	7,3
2	Кам'янське	108,5	105,0	101,0	90,5	57,8	103,3	4,1
3	Курахово	123,9	125,0	112,7	126,4	154,7	139,2	5,5
4	Кривий Ріг	395,0	327,4	327,0	342,9	323,9	267,4	10,7
5	Маріуполь	364,3	289,4	249,6	257,3	288,2	316,6	12,6
	Загалом	1138,5	1046,6	988,3	987,7	984,7	1009,4	40,2

Таблиця 4.3.

Обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел у 2018 році

Забруднююча речовина	Обсяги викидів		
	тис.т	у % до 2017 року	розподіл, %
Разом забруднюючих речовин	2508,3	97,0	100,0
Метали та їхні сполуки	7,8	95,5	0,3
Речовини у вигляді суспендованих твердих часток (мікрочастинки та волокна)	317,5	99,4	12,6
Сполуки азоту	241,5	98,5	9,6
Діоксид та інші сполуки сірки	701,2	96,0	27,9
Оксид вуглецю	744,3	102,2	29,6
Озон	0,0	107,2	0,0
Неметанові леткі органічні сполуки (НМЛОС)	43,7	82,3	1,7
Метан	451,1	90,4	18,0
Стойкі органічні забруднювачі (СОЗ)	0,1	78,4	0,0
Фтор та його сполуки (у перерахунку та фтор)	0,1	100,2	0,0
Ціаніди	0,0	74,8	0,0
Фреони	0,0	116,5	0,0

Таблиця 4.4

Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення у 2018 році

Забруднююча речовина	Обсяги викидів		
	тис.т	у % до 2017р.	розподіл, %
Всього забруднюючих речовин	1358,4	97,8	100,0
Неметанові леткі органічні сполуки (НМЛОС)	137,6	94,8	10,1
Сажа	24,1	105,9	1,7
Діоксид азоту (NO <sub>2</sub> )	156,9	102,0	11,6
Оксид азоту	0,8	98,0	0,09
Діоксид сірки	17,6	104,2	1,3
Оксид вуглецю	1016,9	97,3	74,9
Аміак	0,007	88,3	0,01
Метан	4,5	97,8	0,3

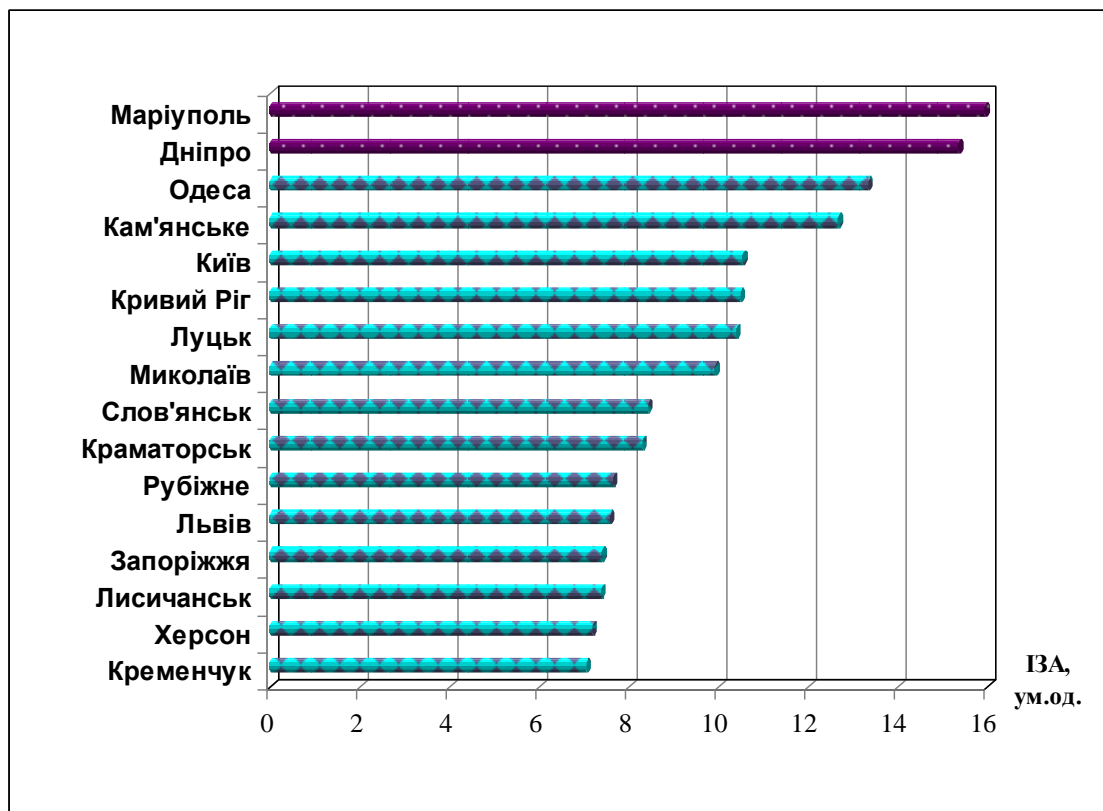


Рис.4.2. Значення індексу забруднення атмосфери (ІЗА) в найбільш забруднених містах України у 2018 році

Таблиця 4.5

Перелік забруднювальних речовин, вміст яких в атмосферному повітрі міст зумовив найбільше забруднення за середньорічними і максимальними концентраціями (у кратності відповідних ГДК) в 2018 р.

Речовина	За середньорічним вмістом		За максимально разовим	
	Місто	Перевищення	Місто	Перевищення
1	2	3	4	5
Завислі речовини	Кривий Ріг Кам'янське Дніпро	3,0 2,5 2,3	Горішні Плавні Кривий Ріг Кам'янське	4,0 4,0 3,4
Оксид вуглецю	Рубіжне Одеса Лисичанськ Кам'янське	1,8 1,5 1,3 1,0	Обухів Слов'янськ Одеса Кривий Ріг	8,8 4,6 3,2 2,8
Діоксид азоту	Київ Дніпро Херсон Біла Церква Житомир Луцьк Чернігів	3,3 3,0 2,8 2,3 2,3 2,3 2,3	Київ Черкаси Житомир Вінниця Херсон Кременчук Луцьк	3,3 3,3 2,9 2,6 2,4 2,3 2,2
Оксид азоту	Київ Херсон	1,3 1,2	Луцьк	1,5
Сірководень	Кам'янське Дніпро Запоріжжя Одеса	0,006 мг/м <sup>3</sup> 0,003 мг/м <sup>3</sup> 0,003 мг/м <sup>3</sup> 0,003 мг/м <sup>3</sup>	Дніпро Рівне Кам'янське Маріуполь	4,9 2,3 1,8 1,1
Фенол	Кам'янське Краматорськ Слов'янськ	2,3 2,3 2,3	Слов'янськ Херсон Краматорськ	4,1 4,0 3,4
Сажа	Одеса Олександрія	1,2 1,0	Одеса Харків	2,0 2,0
Фтористий водень	Рівне Одеса	1,6 1,4	Вінниця Краматорськ	2,4 2,3
Хлористий водень	Перевищення ГДК	не зафіксовано	Чернівці Київ	2,7 2,0
Аміак	Кам'янське	1,3	Черкаси	2,2
Формальдегід	Маріуполь Дніпро Миколаїв Одеса Кривий Ріг	6,0 5,0 4,7 4,7 3,7	Ужгород Кривий Ріг Маріуполь Луцьк Краматорськ	4,9 2,5 2,2 2,1 1,9



Водойми, струмки і ріки поблизу територій аеродромних комплексів містять підвищені концентрації нітратів, амонію, сірчаної та соляної кислот. Концентрація свинцю, хрому, кадмію, берилію, марганцю в 5-20 разів перевищує фонову природну концентрацію. Для аеродромних служб виникають труднощі з визначенням забрудненості від літальних апаратів, так як в статиці (перед зльотом повітряного судна) при вимірах будуть великі похибки в вимірах концентрацій, а в динаміці літального апарату завмер концентрацій практично неможливий. Тому методика прогнозних оцінок забруднення від аеродромних комплексів базується на визначенні індексу емісії, тобто граничних викидів, віднесених до 1 кг спаленого палива, отриманого при стендових випробуваннях двигунів. В даний час немає загальноприйнятої методики оцінки можливого забруднення повітряного басейну аеродромних комплексів. Це пов'язано з труднощами точного кількісного визначення величин викидів забруднюючих речовин від переміщаються джерел забруднення, якими є повітряні судні, і умов поширення викидів забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери з урахуванням численних взаємно впливають чинників (швидкості і напрямку вітру, рельєфу місцевості, температури і тиску повітря) . Для оцінки впливу викидів шкідливих речовин від повітряних суден і автотранспорту в навколишнє середовище приаеродромній території застосовуються різні методи. Їх можна умовно класифікувати як лабораторно-дослідні, інструментальні, органолептичні, розрахункові. В роботі дана характеристика кожному з цих методів. Накопичення забруднюючих речовин в приземному атмосферному шарів районі аеродромного комплексу розраховується в умовах штилю і інверсії, тобто найвищому потенціалі забруднення. Розрахунок проводиться за офіційною методикою, яка враховує визначення параметрів повітря на вході в камеру згоряння для кожного з експлуатаційних режимів роботи двигуна, і параметр форсування камери згоряння. Індокси емісії знаходяться з табличних даних, наведених в методичних вказівках. Слід зазначити емпіричний характер методики

розрахунків індексу емісії та валових викидів. Більшість параметрів задається табличне. Отже, необхідна регіональна коригування існуючої методики оцінки забруднення навколишнього середовища приаеродромної території.

Поршневі, газотурбінні і ракетні двигуни повітряних суден викидають в атмосферу токсичні компоненти, що розсіюється в атмосфері: оксиди вуглецю та азоту, вуглеводні, сажу, альдегіди, а при спалюванні ракетного палива - оксид вуглецю, пари соляної кислоти, хлор, двоокис вуглецю і азоту, трьохокис алюмінію. Забруднення навколишнього середовища від двигунів повітряних суден істотніше в порівнянні з наземним автомобільним транспортом: на 55% більше викидається оксидів вуглецю; на 77% – оксидів азоту; на 93% – вуглеводнів; на 97% – аерозолів. Оцінка ступеня забруднення приземного шару атмосфери приаеродромній території проводиться шляхом порівняння вмісту в ній речовин з діючими гігієнічними нормативами. В даний час встановлено ГДК понад 520 різних речовин, перевищення вмісту яких негативно впливає на здоров'я людини. Для характеристики якості повітря прийнято використовувати стандартний індекс (СІ). СІ – відношення найбільшої концентрації речовини, яка вимірюється за короткий період (в межах 20 хвилин) до ГДК. При  $СІ < 1$  забруднення повітря не робить помітного впливу на здоров'я людини і навколишнє середовище. При  $СІ > 10$  забруднення повітря характеризується як високий. Поряд з безпосереднім впливом окремих джерел викидів на концентрації домішок в приземному шарі повітря велике значення має формування фонового забруднення повітря за рахунок накладення і взаємного перемішування викидів безлічі найрізноманітніших джерел. Одним з найбільш простих інтегральних показників є нормована (безрозмірна) концентрація домішок ( $q$ ), усереднена по всій території і за різними термінами спостережень:

$$q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{q_{cp.сез.}}, \quad (4.1)$$

де  $q_i$  – середньодобова концентрація,  $q_{cp.сез.}$  – середньо сезонна концентрація

на  $i$ -тому пункті спостереження,  $N$  – число стаціонарних наземних пунктів спостереження в місті. Для оцінки якості повітря і виявлення речовин, що вносять найбільший внесок у забруднення атмосфери, застосовується комплексний індекс забруднення атмосфери (КІЗА). Величина КІЗА дозволяє виявити, у скільки разів сумарний рівень забруднення повітря декількома домішками перевищує його допустиме значення. Для цього рівні забруднення різними речовинами порівнюють з рівнем забруднення одним яким-небудь речовиною (зазвичай діоксидом сірки), що здійснюється за допомогою показника ступеня  $C_i$ . Індекс забруднення атмосфери для  $i$ -речовини (ІЗА) розраховується за формулою:

$$I_i = \left( \frac{q_{cp.i}}{ПДК_{c.c.i}} \right)^{C_i}, \quad (4.2)$$

де  $q_{cp.i}$  – середня за місяць, сезон або рік концентрація окремої домішки;  $ПДК_{c.c.i}$  – середньодобова гранично допустима концентрація цієї речовини. Комплексний індекс забруднення атмосфери (КІЗА) розраховується для  $n=5$ , тобто з п'яти найбільших значень концентрації речовин, що визначають основний внесок в сумарне забруднення повітря.

$$I(n) = n \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_{cp.i}}{ПДК_{c.c.i}} \right)^{C_i} \quad (4.3)$$

Прогнозування забруднення, отримання достовірної інформації про стан середовища можливо тільки за умови наявності великої кількості даних, що визначає завдання організації екологічного моніторингу рівнів забруднення атмосфери за допомогою автоматичних систем. Впровадження автоматичних безперервно діючих газоаналізаторів переводить систему контролю забруднення атмосфери на якісно нову основу. Істотно збільшується обсяг інформації, підвищується обґрунтованість висновків про закономірності зміни концентрацій забруднюючих речовин та ефективності заходів щодо зменшення забруднення атмосфери. Завдання контролю якості повітря при різкому збільшенні номенклатури підлягають контролю шкідливих

компонентів і розширення діапазонів вимірювання їх вимагає переходу від використання окремих автономних автоматичних газоаналізаторів до систем багатопараметричного екологічного контролю, коли він здійснюється значною кількістю датчиків, об'єднаних в єдину інформаційну систему екологічного моніторингу приаеродромної території.

Необхідність здійснення контролю за станом земель і повітряного середовища вимагає організації спеціальних моніторингових спостережень в приаеродромній території. Моніторинг проводиться для якісної і кількісної оцінки забруднення атмосферного повітря, поверхневих вод, ґрунтового і рослинного покриву, тваринного світу, акустичного стану навколишнього середовища.

Основними завданнями моніторингу приаеродромних територій є:

- спостереження за станом навколишнього середовища в районах аеропортів з використанням атестованих або затверджених спеціально уповноваженими природоохоронними службами методів і обладнання;
- аналітична обробка отриманої інформації за спеціальними програмами, що входять до складу інформаційно-аналітичних підсистем органів обробки інформації;
- складання короткострокових і довгострокових прогнозів змін стану навколишнього середовища в районах аеропортів;
- здійснення контролю за виконанням діяльності з регулювання якості навколишнього середовища в районах аеропортів.

За результатами виконання цих завдань для моніторингу приаеродромній території можна сформулювати дві вимоги:

- оптимізація роботи злітної смуги і всіх допоміжних служб аеродромного комплексу;
- підтримання в оптимальному стані навколишнього середовища в зоні впливу аеродромних комплексів, проведення природоохоронних заходів на підставі даних моніторингу.

Безпека злітно-посадкових циклів і трасових польотів залежить від належного функціонування системи забезпечення безпеки, яка, в свою чергу, включає контроль за технічним станом повітряних суден, моніторингом злітної смуги і метеорологічним забезпеченням. Контроль забруднення середовища ґрунтується не тільки на інструментальних вимірах параметрів повітря, але і на аналітичних оцінках їх, зіставленні розрахункових даних з експериментальними для розробки заходів щодо зниження рівнів забруднення, перевірки ефективності природоохоронних заходів, а при необхідності їх доопрацювання та коригування. Крім того, на основі отриманих експериментальних вимірів і розрахунків проводиться оцінка джерел викидів по інтенсивності забруднення. Якщо при відсутності деяких параметрів категорію небезпечності забруднюючої речовини визначити важко, то використовують показник орієнтовно безпечного максимального разового рівня забруднення повітря. Крім ГДК шкідливих речовин, в залежності від токсичності речовини виділяються чотири класи безпеки: 1 – надзвичайно небезпечні, 2 – високонебезпечні, 3 – помірно небезпечні, 4 – малонебезпечні [144].

До шкідливих речовин, що мають властивість накопичування, відносяться, як правило, близькі за хімічною структурою і характером впливу на організм людини діоксид сірки і сірководень, діоксид сірки і діоксид азоту, діоксид сірки і триоксид сірки, аміак, оксиди азоту, діоксид сірки і фенол і т.п.

Проведені дослідження дозволяють розширити відомі концепції моніторингу атмосферного повітря на аеродромних комплексах не тільки за рахунок інструментальних замірів параметрів забруднюючих речовин, але і вести активний аналіз із застосуванням ЕОМ для визначення полів концентрацій і коефіцієнта екологічної безпеки. Відзначимо, що при адекватності та надійності математичних моделей дорогі інструментальні заміри скорочуються до мінімуму.

Натурні виміри проводилися пересувними постами на аеродромному комплексі із середнім числом 200 ... 300 циклів «зліт-посадка» реактивних літаків на місяць. Пересувні пости переміщалися по напрямку вітру. Експериментальна перевірка отриманих теоретичних залежностей проводилася на майданчику централізованої заправки паливом (ЦЗП). Визначалися концентрації оксиду вуглецю та оксиду азоту на різній відстані від ЦЗП повітряного судна. Час запуску двох двигунів і рулювання становить близько 10 хвилин. Повітряні судна рулять уздовж технічних позицій підготовки до вильоту кожні 15 хвилин зі швидкістю 20-30 км / год. Питомий викид оксиду вуглецю одним судном залежить в основному від режиму роботи двигуна, якісного складу авіаційного палива, ступеня зносу авіаційного двигуна.

Важливе місце в моніторингу земель приаеродромних територій займає постановка спостережень за шумовими забрудненнями. Натурні вимірювання рівня шуму із застосуванням інструментальних методів дослідження проводилися на аеродромному комплексі і територіях для забудови зон населених місць або окремих об'єктах лікувального, оздоровчого та рекреаційного призначення, та інших територіях з метою виявлення найбільш точної і об'єктивної характеристики шумового режиму, необхідної для розробки відповідних вимог щодо зменшення акустичного навантаження, або оцінки ефективності вже впроваджених заходів [4, 40, 92, 110-112, 114].

До завдань акустичного моніторингу відносяться:

- інвентаризація джерел шуму і їх акустична характеристика;
- визначення сумарного рівня шуму від злітної смуги і допоміжних служб аеродромних комплексів і допустимого акустичного навантаження на кордоні житлової забудови;
- оцінка ефективності заходів і пропонованих шумозахисних споруд.

Як гігієнічні нормативи приймаються диференційовані максимальні рівні шуму на територіях в залежності від їх функціонального використання. На територіях населених місць з високою щільністю забудови і заселення, в

нічний час на територіях санаторно-курортних зон і зон масового відпочинку і туризму, дачних селищах і спальних районах приймаються найбільш жорсткі показники еквівалентного рівня звуку.

Еквівалентний рівень звуку визначається за допомогою інтегруючих шумомірів або іншої спеціальної акустичної апаратури. Категорії джерел викидів визначаються відповідно до рекомендацій з основних питань повітря охоронної діяльності з метою раціональної організації робіт з контролю дотримання нормативів викидів з урахуванням впливу викидів забруднюючих речовин на забруднення атмосферного повітря.

Категорії джерел викидів визначені за наступними параметрами ( $\Phi$ ,  $Q$ )

$$\Phi = \frac{M}{H \cdot C_{ГДК}}; \quad (4.4)$$

$$Q = \tilde{C}_{MAX}, \quad (4.5)$$

де:  $M$  – максимальна величина викиду забруднюючої речовини, що міститься в відпрацьованих газах, г/с;

$\tilde{C}_{MAX} = \frac{C_{iMAX}}{C_{iГДК}} = \frac{E_i \cdot G_m \cdot 10^3}{C_{нов} \cdot C_{iГДК}}$  – максимальна розрахункова концентрація  $i$ -ої

забруднюючої речовини в частках ГДК;  $H$  – висота викиду, м. Визначення ступеня енергетичного впливу об'єкта на навколишнє середовище проводиться згідно [73, 98]. Ступінь впливу визначається за значенням критерію оцінки зміни якості навколишнього середовища

$$\Pi = \sum_{j=1}^m \cdot \sum_{i=1}^n T \cdot P \cdot B_{ji} \cdot R_{ji}, \quad (4.6)$$

де  $V_{нов} = T \cdot P \cdot B_{ji} = 10^3 \cdot \frac{M_{ji}}{C_{ГДК i}}$  – потрібне споживання повітря, м<sup>3</sup>;

$R_{ji} = \frac{D_j}{H_j + D_j} \cdot \frac{C_{iMAX}}{C_{iГДК}}$  – геометричний параметр;  $m$  – кількість циклів "зліт-

посадка" повітряних суден з викидом однотипних забруднюючих речовин;

$n$  – номер забруднюючої речовини, що міститься в відпрацьованих газах;

$C_{i\text{MAX}}$  – максимальна концентрації  $i$ -ої забруднюючої речовини в гирлі джерела,  $C_{i\text{ГДК}}$  – гранично допустима концентрація, мг/м<sup>3</sup>;  $D_j$  – діаметр гирла джерела, м;  $H_j$  – висота зльоту  $j$ -ого повітряного судна, м.

Формування і розрахунок забруднення навколишнього середовища приаеродромній території забруднюючими речовинами від двигунів повітряних суден необхідно проводити з урахуванням аеродинаміки струменів газоподібних викидів авіаційних двигунів. При розрахунку полів концентрації і щільності потоку домішок, викинутих в атмосферу надзвуковим струменем і випадають на поверхню землі, виникає необхідність моделювання струменя як джерела домішки. У якості математичної моделі розглядається система диференціальних рівнянь руху і нерозривності для надзвукових струменів, деформованих навколишнім простором і вітровим потоком.

При цьому екологічна оцінка впливу аеродромних комплексів на природне середовище приаеродромній території передбачає вирішення питань оцінки впливу повітряних суден і засобів наземного забезпечення польотів на навколишнє середовище. У літакових двигунах відбувається утворення шкідливих газоподібних речовин і сажі. Перш за все, це оксиди азоту, емісія оксидів вуглецю і незгорілих вуглеводнів масою відпрацьованих газів, сажа та інші складові палива. Результати дослідів по визначенню забруднення приземного шару атмосфери на технічній позиції підготовки повітряних суден до вильоту показують, що найбільшу кількість що викидаються оксидів вуглецю спостерігається при 56% номінальних оборотів –  $q=87,9$  г/кг витраченого палива; при 83% номінальних оборотів питомий викид дорівнює  $q=2,2$  г/кг, а при номінальних оборотах двигуна викиди СО практично відсутні.

Питомі викиди оксидів азоту зростають при збільшенні числа обертів двигуна, а викиди вуглеводнів, як і оксиду вуглецю, зі збільшенням числа обертів зменшуються. Таким чином, при рулюванні повітряних суден



одночасно спостерігаються викиди оксидів азоту і вуглецю, відзначається наявність вуглеводнів.

В результаті аналізу рівня фонових концентрацій на технічній позиції під час проведення польотів встановлено, що кількість оксиду вуглецю в теплий період становить  $0,56 \text{ мг/м}^3$  і  $0,47 \text{ мг/м}^3$  - взимку, діоксиду азоту- $0,039 \text{ мг/м}^3$  - в теплий період і  $0,032 \text{ мг/м}^3$ -в холодний. Представлені результати натурних експериментів виконані при оцінці впливу засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів, так як дана техніка безпосередню участь у підготовці та обслуговуванні повітряних суден.

Аналіз результатів експерименту показав, що на відстані 40...50 м від двигунів літака спостерігаються концентрації оксиду вуглецю нижче гранично допустимих (ГДК). Для діоксиду азоту ГДК досягаються вже на відстані 10...15 м. В ході оціночних вимірів концентрацій при зміні вертикальної координати на відстані 20 м від літака встановлено, що вже на висоті понад 5...8 м спостерігаються перевищення ГДК.

При русі літака шлейф забруднюючих речовин буде переміщатися за ним зі збереженням відносних концентрацій в конусі відпрацьованих газів. Розсіювання по висоті конуса відпрацьованих газів за рахунок високої турбулентності струменя закінчується на відстані близько 20 м від сопла двигуна.

Оцінка забруднення приаеродромній території твердими частинками проводилася за нормативними методиками і державним стандартам. Результати проведених експериментів визначили, що маса забруднення на  $1 \text{ м}^2$  поверхні в центрі льотного поля в 4-6 разів нижче кінцевих ділянок злітної смуги. На поверхні льотного поля були виявлені 8 хімічних елементів в різних з'єднаннях з киснем. Це магній, алюміній, кремній, сірка, калій, кальцій, титан і залізо.

Шкідливі речовини, що виділяються газотурбінними двигунами під час роботи, створюють «кільце» навколо ПС. при цьому поле з концентрацією, що перевищує значення ГДК, досягає 5...7 м, таким чином, створюється

майже суцільна зона покриття технічної позиції продуктами згоряння авіаційного палива. В результаті геохімічного круговороту речовин повітряне забруднення за рахунок масо енергообміну безпосередньо передається потім іншим компонентам ландшафту, викликаючи забруднення природних вод, хімічний токсикоз ґрунтів, пригніченість рослин.

Оцінка забрудненості ландшафтів приаеродромній території була проведена на основі екологічного аналізу точок, розташованих в районах досліджуваних об'єктів в районах аеродромів України. Контроль за станом земель приаеродромній території, що знаходиться в зоні впливу повітряного транспорту і технічних засобів забезпечення польотів, визначає необхідність сучасного інформаційного забезпечення. Визначальною умовою отримання комплексних відомостей про територію є матеріали аерокосмічної зйомки.

Дистанційне зондування є ефективним методом екологічного моніторингу території, що дозволяє провести аналіз її екологічного облаштування і виконати основну вимогу до отримуваної інформації - точність і своєчасність фіксування меж об'єктів дослідження. Матеріали дистанційного зондування дозволяють зробити природно-господарську оцінку планувальної структури розташованих в сусідстві з аеродромними територіями природно-господарських об'єктів, визначити їх місце розташування в плані і забрудненість території та рослинного покриву [25-27, 68].

Безпосередній аналіз стану природних вод за даними проведеного моніторингу, в районах прилеглих до приаеродромній території, не показав значного збільшення в них вмісту шкідливих речовин. Їх зміст в поверхневому стоці, що надходить з аеродромних комплексів, на 25-30% нижче ГДК. У районах приаеродромній території відзначається певне забруднення ґрунтів токсичними сполуками (до 1 ГДК і трохи більше). Серйозну небезпеку становлять домішки важких металів. В ролі основних забруднювачів ґрунтів виступають метали і їх сполуки, радіоактивні елементи. Одним з результатів техногенної міграції елементів є поступове

"озалізнення" земель. Аналіз результатів екологічного картування станів забрудненості приаеродромній території показав, що в радіусі до 3 км від центру злітної смуги дана зона є слабо забрудненою до (1 ГДК); в радіусі від 3 км до 6 км близько до фонові (1 ГДК і нижче); радіусом понад 6 км - відповідає фонові оцінці місцевості.

Рекомендації щодо охорони та раціонального використання земель приаеродромній території стосуються вирішення проблеми зменшення екологічного впливу на навколишнє середовище відпрацьованих газів. Їх необхідно розглядати в двох аспектах:

- 1) економія паливно-енергетичних ресурсів;
- 2) зниження негативного впливу на навколишнє середовище за рахунок утилізації та нейтралізації шкідливих речовин, проведення заходів з регулювання газових викидів в циклі "зліт-посадка" при несприятливих метеорологічних умовах.

Дані щодо дотримання контролю за гранично допустимими викидами представлені в таблиці 4.6.

Інші забруднюючі речовини дають тільки сліди при використанні якісного, що задовольняє вимогам державних стандартів, палива, тому контролю не підлягають. Слід враховувати, що діоксид азоту, що міститься в продуктах згоряння, відноситься по шкідливості до 2-ої категорії і контроль досить проводити 1 раз на рік, а оксид вуглецю відноситься до 4 категорії і контроль досить проводити 1 раз в 2 ... 3 року.

При розробці заходів з тимчасового скорочення викидів при несприятливих метеорологічних умовах враховувалися особливості розсіювання домішок в атмосфері і внесок різних джерел в створення концентрацій домішок в приземному шарі повітря.

Таблиця 4.6.

План-графік контролю за дотриманням норм ГДК на джерелах викиду.

Код і найменування домішки	Контроль	Метод контролю
3337 Вуглецю оксид	1 раз в 2-3 року (4 кат.)	ОНД-90 ПДВ 0,36 »1вг
301 Азоту діоксид	1 раз в рік (2 кат.)	ОНД-90 ПДВ. т / г (г/с)

Регулювання викидів шкідливих речовин в природне середовище передбачає їх короткочасне скорочення в періоди несприятливих метеорологічних умов, що призводять до формування високого рівня забруднення повітря. Регулювання викидів здійснюється з урахуванням прогнозу несприятливих метеорологічних умов на основі попереджень про можливий небезпечний зростанні концентрації домішок з метою запобігання.

Формування і розрахунок забруднення навколишнього середовища приаеродромній території забруднюючими речовинами від двигунів повітряних суден необхідно проводити з урахуванням аеродинаміки струменів газоподібних викидів авіаційних двигунів. При розрахунку полів концентрації і щільності потоку враховуємо, що домішки, викинуті в атмосферу надзвуковим струменем випадають на поверхню землі. Тому, виникає необхідність моделювання струменя як джерела домішки. У якості математичної моделі розглядається система диференціальних рівнянь руху і нерозривності для надзвукових струменів, деформованих навколишнім простором і вітровим потоком. У роботі пропонується просторове положення осі струменя розраховувати на основі рішення системи емпіричних рівнянь:

$$x = f(z) \quad (7)$$

$$\frac{df}{dz} = \operatorname{ctg} \alpha_0 + (\rho_g / \rho_c) \cdot (u^2 / v_0^2) / \sin \alpha_0 (2,53 + 3,18z / d_0 + 0,429z^2 / d_0^2) \quad (8)$$

де:  $u/v$  – відношення швидкості вітру до початкової швидкості витікання струменя;  $\rho_g/\rho_c$  – відношення щільності і речовини струменя (газів) до щільності навколишнього середовища;  $\alpha_0$  – кут атаки струменя щодо вертикальної осі;  $d_0$  – початковий діаметр струменя, м;  $x, z$  - координати джерела;  $f$  залежність координати  $x$  від  $z$ .

Слід зазначити, що розглянуті моделі є емпіричними, а тому потребують експериментального підтвердження. Проведення ж експериментів на літальних апаратах пов'язане з певними фінансовими та організаційними труднощами. Тому необхідно більш точне моделювання дифузійних процесів, щоб обґрунтувати адекватність прийнятої моделі і експериментальних даних. При цьому, найбільш суворою є конвективно-дифузійна модель поширення забруднюючих речовин в просторі з залученням теорії струменів.

Рівняння дифузії для опису процесу поширення домішки в загальному вигляді можна представити як:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{div} \varphi \mathbf{u} + \sigma \varphi - \mu \Delta \varphi = f, \quad (9)$$

де  $\varphi$  – концентрація деякої субстанції, мг/м<sup>3</sup>,  $\mathbf{u}$  – вектор швидкості переміщення субстанції,  $\mu$  – деякий коефіцієнт дифузії,  $\sigma$  – коефіцієнт пропорційності. Рішення рівняння (9) слід розглядати у вигляді набору завдань для окремих мезопроцесів, а отримані рішення усереднити у вигляді комплексного функціоналу. Викиди від літальних апаратів можна кількісно оцінити за існуючими дифузійним моделям прогнозування рівнів забруднення навколишнього середовища від двигунів літальних апаратів, в яких враховується фактор розсіювання.

В роботі застосовано методику експериментальних досліджень рівня забруднення навколишнього середовища. Похибка проведених дослідів не перевищила 5%. При цьому удосконалено схему розміщення постів спостережень на злітній смузі і приаеродромній території.

В результаті експериментальних досліджень перевірена адекватність математичної моделі реальним умовам забруднення повітряного простору приаеродромній території шкідливими речовинами.

На основі конвективно-дифузійної моделі поширення забруднюючих речовин в просторі розроблено методику прогнозування рівня забруднення повітряного середовища на приаеродромній території.

Отримано аналітичні залежності для визначення категорії «джерело – забруднююча речовина» за параметрами  $\Phi$  і  $Q$ : при  $\Phi > 0,01$  і  $Q > 0,5$  – I категорія (найбільш несприятлива в плані екології),  $\Phi > 0,001$  і  $Q < 0,5$  – II категорія (для I і II категорій для розглянутого джерела необхідно розробити заходи щодо скорочення викидів даної речовини в атмосферу);  $\Phi > 0,001$  і  $Q < 0,5$  – III категорія,  $\Phi < 0,001$  і  $Q < 0,5$  – IV категорія (для III і IV категорій допускається не розробляти заходи щодо скорочення викидів).

Запропоновано заходи щодо зниження шкідливого впливу шумів літальних апаратів на навколишнє природне середовище приаеродромній території; дано рекомендації щодо виконання мінімальних відстаней від зони посадки і зльоту повітряних суден до будівель поза територією аеродромів, дані рекомендації щодо застосування шумозахисних конструкцій та споруд.

Такий підхід дозволяє розрахувати поле концентрацій шкідливих речовин в приземному шарі атмосфери при аеродромно-технічного забезпечення польотів.

Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити концентрації шкідливих речовин в робочій зоні на технічній позиції обслуговування повітряних суден при роботі силових установок засобів аеродромно-технічного забезпечення і повітряних суден. Похибка проведених дослідів не перевищила 10%. Перевірка адекватності математичної моделі натурних даними показала задовільну збіжність результатів експерименту і розрахункових даних.

Розроблений алгоритм розрахунку концентрації шкідливих речовин в приземному шарі атмосфери на технічній позиції під час аеродромно-технічного забезпечення польотів для типового аеродрому на основі математичного моделювання реалізований на ПЕОМ у вигляді пакета прикладних програм з використанням середовища візуальної розробки Borland C ++ Builder і модуля Stanford Graphics. Прикладні програми мають зручним інтерфейсом, мають хорошу швидкість обчислень і наочно демонструють результат.

Для забезпечення повітряного судна чистим повітрям, що надходить з аеродромного кондиціонера в повітряне судно, доцільна модернізація системи очистки атмосферного повітря за допомогою включення в повітряну систему високоефективних пилових фільтрів і пристроїв для нейтралізації відпрацьованих газів.

Експериментальні дослідження засвідчили, що вихідні параметри повітряного середовища робочої зони, що надходить в систему аеродромного кондиціонера по повітропроводам, прокладених під льотним полем, з місць з концентрацією шкідливих речовин, не перевищують 0,3 ГДК.

Контроль забруднення середовища ґрунтується не тільки на інструментальних вимірах параметрів повітря, але і на аналітичних оцінках їх, зіставленні розрахункових даних з експериментальними для розробки заходів щодо зниження рівнів забруднення, перевірки ефективності природоохоронних заходів, а при необхідності їх доопрацювання та коригування.

На основі отриманих експериментальних вимірів і розрахунків проводиться оцінка джерел викидів по інтенсивності забруднення. Якщо при відсутності деяких параметрів категорію небезпечності забруднюючої речовини визначити важко, то доцільне використовувати показник орієнтовно безпечного максимального разового рівня забруднення повітря.

Крім ГДК щодо шкідливих речовин, в залежності від токсичності речовини виділяються на чотири класи безпеки: 1 – надзвичайно небезпечні, 2 – високо небезпечні, 3 – помірно небезпечні, 4 – малонебезпечні.

До шкідливих речовин, що мають властивість накопичення, відносяться, як правило, близькі за хімічною будовою і характером впливу на організм людини діоксид сірки і сірководень, діоксид сірки і діоксид азоту, діоксид сірки і триоксид сірки, аміак, оксиди азоту, діоксид сірки і фенол і т.д.

Проведені дослідження дозволяють розширити відомі концепції моніторингу атмосферного повітря на аеродромних комплексах не тільки за

рахунок інструментальних замірів параметрів забруднюючих речовин, але і вести активний аналіз із застосуванням ЕОМ для визначення полів концентрацій і коефіцієнта екологічної небезпеки.

Відзначимо, що адекватність і надійність математичних моделей дозволяють до мінімуму скоротити дорогі інструментальні заміри. Натурні виміри можуть проводитися пересувними постами на аеродромах із середнім числом 200 ... 300 циклів «зліт-посадка» реактивних літаків на місяць.

Експериментальна перевірка отриманих теоретичних залежностей проводилася на майданчику централізованої заправки паливом (ЦЗП) аеропорту Жуляни. Визначалися концентрації оксиду вуглецю та оксиду азоту на різній відстані від керма по ЦЗП повітряного судна. Час запуску двох двигунів і рулювання становить близько 10 хвилин. Статистика визначає, що повітряні судна рулять уздовж технічних позицій підготовки до вильоту кожні 15 хвилин зі швидкістю 20-30 км / год. Питомий викид оксиду вуглецю одним судном залежить в основному від режиму роботи двигуна, якісного складу авіаційного палива, ступеня зносу авіаційного двигуна.

Методики розрахункового визначення забруднення земель приаеродромній території розробляються на основі математичних моделей. Ступінь впливу визначається за значенням критерію оцінки зміни якості навколишнього середовища.

#### **4.2. Алгоритм програми побудови інтегральної екологічної оцінки станів приаеродромних територій**

Науково-практичний підхід, що пропонується, має переваги перед існуючими щодо синтезу системи екологічного моніторингу техногенне небезпечних об'єктів, а саме - за рахунок врахування екологічного впливу газотурбінних двигунів на стан довкілля. Крім того, враховується перелік показників стану, які характеризують стан приаеродромній території.



В системі управління екологічною безпекою приаеродромних територій пропонується використовувати концепцію «екологічного ризику». При цьому «ризик» визначається як поєднання ймовірності події та її наслідків. Застосування концепції ризику має перевагу в порівнянні з підходом, заснованим на порівнянні значень показників з нормативами. Ризик, виражений в кількісній формі, інтегрує в єдине ціле поняття «небезпека» і «шкода».

Далі під «ризиком» будемо розуміти можливість переходу приаеродромній території в критичний екологічний стан. Можна виділити наступні особливості аналізу ризику екологічного стану приаеродромній території:

- часткові оцінки екологічного стану повинні оцінювати ступінь невідповідності показника стану встановленим нормативним вимогам;
- завдання інтегральної оцінки стану приаеродромної території в момент часу  $t$  за показниками стану  $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$  структурно відноситься до багатоатрибутичних завдань прийняття рішень [25], які визначаються наступним кортежем:

$$\langle \{P_1, P_2, \dots, P_m\}, \{Sh_1, Sh_2, \dots, Sh_m\}, \{f_1, f_2, \dots, f_m\} \rangle,$$

де  $Sh_j$  – шкала показника стану  $P_j$ ;  $f_j : P_j \rightarrow Sh_j$  – відображення, яке здійснює вимір показника стану  $P_j$ ;  $r$  – правило прийняття рішення.

Алгоритм програми побудови інтегральної екологічної оцінки станів приаеродромних територій передбачає виконання наступних процедур:

- формування множини показників стану;
- вибір шкал вимірювання показників стану;
- вибір функцій нормування показників стану;
- вибір функції агрегування;
- аналіз отриманих інтегральних оцінок.

Розглянемо докладніше кожен етап побудови інтегральної оцінки стану приаеродромних територій в момент часу  $t$ .

1. *Формування множини показників стану* приаеродромної території здійснюється на основі багатокрокових ітераційних процедур із залученням експертів [96]. В результаті створюється безліч незалежних множин показників стану. З одного боку, необхідно врахувати максимально можливе число показників стану, але надмірна їх кількість призводить до ускладнення фізичного виміру і математичної моделі задачі, додаткового навантаження на експертів, неоднозначності інтерпретації отриманих результатів.

З іншого боку, скорочення числа показників стану може призводити до неврахування факторів, що впливають на результат. Таким чином, показники стану повинні відповідати таким властивостям:

- всебічно і повно характеризувати стан приаеродромній території;
- бути достовірними;
- між собою бути статистично незалежними.

При наявності статистичної залежності між показниками стану, часткова оцінка по деякому показнику стану буде враховуватися багаторазово. Для виключення з розгляду таких показників стану, будуються регресійні моделі залежності одних показників стану від інших [51]. Кількість показників стану повинна бути необхідна (використання додаткових показників стану не змінює результатів рішення) і достатнім (відкидання хоча б одного показника стану призводить до істотної зміни результатів) в рамках даного завдання.

Пропонується використовувати підхід до формування переліку показників стану заснований на побудові «дерева» (ієрархічної структури) властивостей (показників), рис. 4.3.

Методи побудови «дерев» властивостей детально розроблені в кваліметрії [85, 86]. «Якість» (стан) приаеродромної території розглядається як система з ієрархічною структурою. Ієрархія – лінійна структура, що має

початкову вершину («корінь»), за якою слідує розподілені за рівнями елементи, кожен з яких залежить від елементів вищого рівня.

Таким чином, необхідне виділення рівнів і елементів «дерева» і встановлення зв'язків між елементами суміжних рівнів. На першому рівні дерева показників фіксується єдиний елемент - якість об'єкта моніторингу в цілому (інтегральна якість). Даний складний елемент розбивається на деяке число менш складних елементів другого рівня, до яких також застосовується процедура розбиття

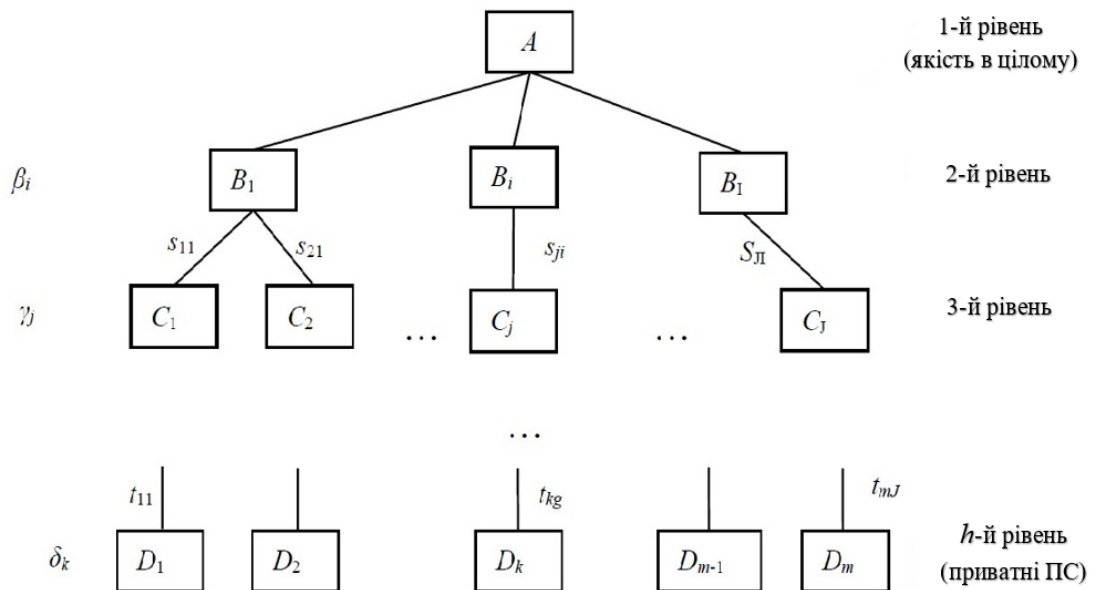


Рис. 4.3. Ієрархічна структура показників об'єкта моніторингу

Таким чином, систематизація списку показників стану здійснюється у вигляді «дерева» показників, «корінь» якого розглядається як узагальнена величина – інтегральна якість об'єкта моніторингу в цілому. Проміжні вузли дерева дозволяють розбити приватні показники стану на групи по типу, виду, функціональним призначенням і ін. Елементи нижнього рівня – поодинокі (приватні) показники стану, за якими проводиться екологічна оцінка якості (стану) приаеродромній території. Для елементів суміжних рівнів задаються відносні ваги зв'язків – ступеня зв'язку елементів фіксованого рівня «дерева» показників з елементами вищого рівня. Дані ваги визначаються на основі

обробки експертної інформації, безпосереднім призначенням або методом парних порівнянь [96, 113]. При цьому числові оцінки пріоритету елементів нижнього рівня «дерева» (вагові коефіцієнти показників стану) відображають частку їх вкладу в інтегральний показник якості об'єкту моніторингу.

2. *Вибір шкал вимірювання* показників стану. Вимірювання окремих (часткових) показників стану може проводитися в різних шкалах. Всі можливі значення часткових показників стану утворюють множину, елементи якої знаходяться в певних відносинах між собою. Шкала вимірювань визначає тип одержуваних даних і клас допустимих над ними операцій.

3. *Вибір функцій нормування* показників стану. Для приведення показників стану, які вміють різні одиниці виміру, до єдиної шкали використовуються функції нормування - безперервні монотонні функції  $f'$

$$f' : [y_j^{\min}, y_j^{\max}] \rightarrow [0,1]$$

4. *Вибір функції агрегування*. Агрегування – це перехід від вектору розмірності  $m$  до вектору меншої розмірності  $m' < m$ . При  $m'=1$  маємо інтегральну (комплексну, узагальнену) оцінку.

Найбільш відомим класом функцій агрегування є клас середніх величин [58], які визначаються співвідношенням:

$$\min \{ y_1, y_2, \dots, y_m \} \leq A(y_1, y_2, \dots, y_m) \leq \max \{ y_1, y_2, \dots, y_m \}.$$

Таким чином, під середньою величиною розуміється деяке значення, що містить максимально можливу інформацію про стан об'єкту моніторингу. Інтегральна оцінка з класу середніх величин дає цілісне уявлення про стан об'єкту моніторингу по всій сукупності показників стану.

Інтегральна оцінка являє собою не довільну з'єднання часткових оцінок по окремим показникам стану, а систему з безліччю взаємопов'язаних елементів, які виступають як єдине ціле. Більшість же середніх величин передбачає відсутність кореляції між окремими показниками стану або

нехтують нею, що часто суперечить дійсності. Таким чином, за інтегральну оцінку стану об'єкту моніторингу можна прийняти просте підсумовування часткових оцінок по окремим показникам стану. Середньозважена геометрична величина заснована на принципі справедливою відносною компенсації, при якому сумарний рівень відносного зниження значення одного або декількох показників стану не перевищує сумарного рівня відносного збільшення значень інших показників стану.

Таким чином, середнє геометричне чутливо до малих значень усереднених показників. При використанні даної оцінки, якщо стан об'єкта моніторингу «незадовільний» хоча б по одному показнику стану, то він «незадовільний» в цілому.

Інтегральну екологічну оцінку стану  $i$ -го об'єкту моніторингу розглядаємо у вигляді

$$d^i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - d_j^i),$$

де  $d_j^i$  – часткова відносна оцінка по  $j$ -му показнику стану.

Інтегральна екологічна оцінка  $d^i$  допускає такі інтерпретації:

1) безрозмірна величина, що характеризує ступінь невідповідності якості  $i$ -го стану об'єкту моніторингу вимогам, що пред'являються до сукупності його часткових показників стану;

2) обсяг  $m$ -мірного одиничного паралелепіпеда, що характеризує ідеальний стан об'єкта моніторингу з «найкращими» значеннями всіх показників стану, з якого віднято обсяг паралелепіпеда, що характеризує аналізований стан об'єкта моніторингу.

У роботах [38, 39] описується варіант згортки показників стану при вирішенні багатокритеріальних задач оцінювання на основі узагальненої функції бажаності, запропонованої Е. Харрінгтоном. Даний підхід заснований на використанні часткової (одиничної) функції бажаності для перетворення вимірюваних, натуральних значень показників стану в

безрозмірну шкалу бажаності (перевагу) з фіксованими межами. Це вербально-числова шкала, що складається з вербального (змістовного) опису виділених градацій шкали і відповідних їм числових значень показників стану. При цьому більш кращому значенню показнику стану ставиться у відповідність більше значення бажаності, що дозволяє характеризувати ступінь визначення показника стану. Безліч значень показників стану експертом розбивається на підмножини, для яких стан об'єкту моніторингу з такими значеннями визначається оцінкою «добре», «погане», «задовільний» і т.д. Це суб'єктивна шкала, яка відображає знання експерта про окремі показники стану, що дозволяє інтерпретувати результат в термінах «бажаність», «корисності».

У загальному випадку для двостороннього обмеження виду

$$y_j^{min} \leq y_j \leq y_j^{max}$$

перетворення значень показника якості  $y_j$  в значення функції бажаності  $d_j$  здійснюється наступним чином:

$$d_j(z_j) = \exp(-|z_j|^k)$$

де  $k > 0$  – константа,  $z_j$  – «кодоване» значення  $j$ -го показника стану, яке визначається за формулою

$$z_j = [2y_j - y_j^{max} - y_j^{min}] / [y_j^{max} - y_j^{min}].$$

Після фіксації значень показника стану  $y_j$  і відповідної функції бажаності  $d_j^0$  обчислюється значення показника ступеня  $k$  за формулою:

$$k = \frac{\ln \left( \ln \frac{1}{d_j^0} \right)}{\ln |z_j^0|}$$

Завдання значень  $y_j^0$  і  $d_j^0$  здійснюється експертом з урахуванням характеру показника стану, статистичних, довідкових даних. Вибір даних

точок впливає на крутизну кривої бажаності, що дозволяє так само врахувати важливість окремих показників стану, для яких  $k$  буде мати більше значення в порівнянні з іншими. Для випадку односторонніх обмежень виду  $y_j < y_j^{max}$  або  $y_j > y_j^{min}$  перетворення значень показника стану  $y_j$  в значення функції бажаності  $d_j$  здійснюється за такою формулою:

$$d_j = \exp[-\exp(-z_j)]$$

де  $z_j$  – «кодоване» значення  $j$ -го показника стану, що обчислюється за формулою

$$z_j = \gamma_0 + \gamma_1 y_j$$

Для цієї залежності «чутливість» в областях бажаності близьких до 0 і 1 нижче, ніж в середній зоні (рис. 4.4).

Коефіцієнти  $\gamma_0$ ,  $\gamma_1$  визначаються фіксуванням значень функції бажаності  $d_{j1}$ ,  $d_{j2}$  для двох значень ПС відповідно  $y_{j1}$ ,  $y_{j2}$ .

Побудувавши функції бажаності по всім показникам стану, їх подальша згортка в узагальнену функцію бажаності здійснюється з використанням середньозваженого геометричного [109]:

$$d = \prod_{j=1}^m [\exp(-\exp(-z_j))]^{\lambda_j} = \exp\left(-\sum_{j=1}^m \lambda_j \exp(-z_j)\right)$$

де  $z_j$  – «кодоване» значення  $j$ -го показника стану, що обчислюється за формулою  $z_j = \gamma_0 + \gamma_1 y_j$ . Для цієї залежності «чутливість» в областях бажаності близьких до 0 і 1 нижче, ніж в середній зоні графічного представлення функції бажаності Е. Харрінгтона. Коефіцієнти  $\gamma_0$ ,  $\gamma_1$  визначаються фіксуванням значень функції бажаності  $d_{j1}$ ,  $d_{j2}$  для двох значень показників екологічного стану ПРАТ, відповідно  $y_{j1}$ ,  $y_{j2}$ .

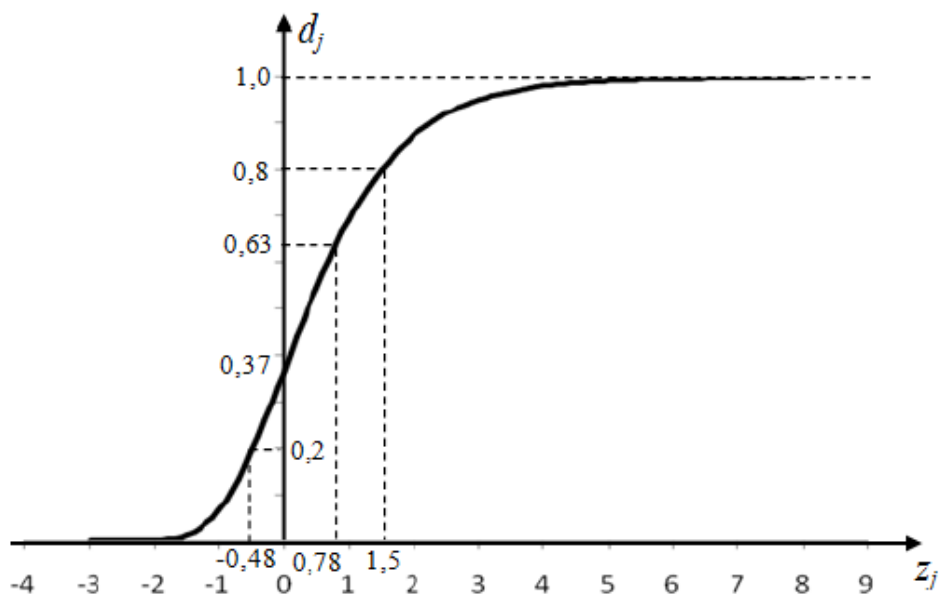


Рис. 4.4. Графічне представлення функції бажаності Е. Харрінгтона

Нелінійна залежність узагальненої функції бажаності від часткових (окремих) показників стану показана на рис. 4.5. Вибір даного виду середнього відображає той факт, що стан об'єкта моніторингу визнається незадовільним, якщо воно незадовільно, хоча б по одному з показнику стану, незалежно від рівня якості за іншими показниками стану.

Завдання побудови інтегральної екологічної оцінки стану приаеродромній території може бути розглянута як задача пошуку точки  $d$  на відрізку  $[0,1]$  – значення інтегральної оцінки, мінімально віддаленої по заданому правилу щодо точок  $d_1, d_2, \dots, d_m$  – значень часткових (окремих) оцінок стану об'єкта моніторингу.

Значення інтегральної екологічної оцінки  $d^i$  мають порядковий характер, вони не відображають на скільки або в скільки разів краще стан одного об'єкта моніторингу щодо іншого, але дозволяють кваліфіковано ранжувати (упорядкувати) об'єкт моніторингу по загальному рівню якості. При цьому результати можна інтерпретувати в особливій порядкової шкалою - вербально-числової шкалою Харрінгтона (таблиця 4.7). Це дає можливість автоматизувати процедуру змістовної інтерпретації отриманих результатів.



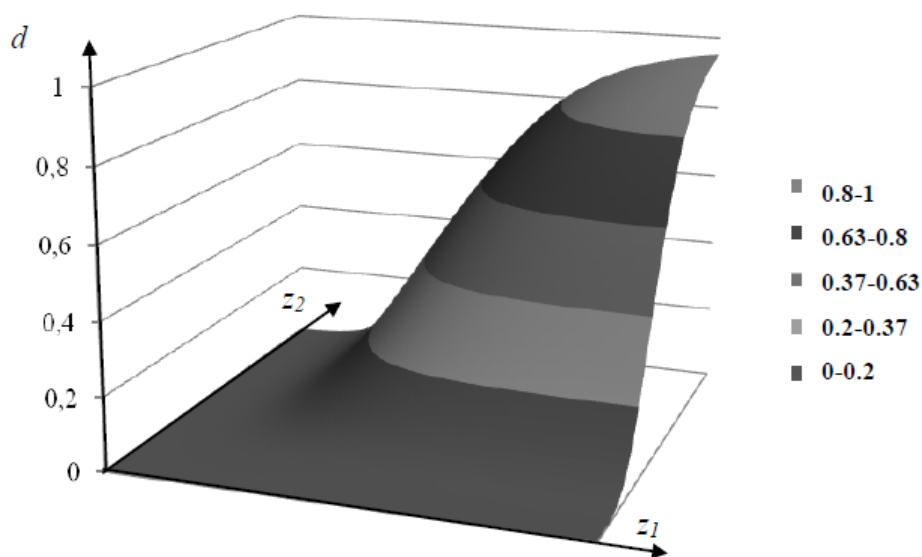


Рис. 4.5. Графічне представлення узагальненої функції бажаності Е. Харрінгтона

Таблиця 4.7

Рівень неякісності об'єкта моніторингу за шкалою Харрінгтона

№ п/п	Змістовний опис градації	Чисельні значення
1	Дуже високий	(0.8, 1)
2	Високий	(0.63, 0.8]
3	Середній	(0.37, 0.63]
4	Низький	(0.2, 0.37]
5	Дуже низький	(0, 0.2]

Таким чином, вербальні шкали - це сукупність суджень про ступінь визначення показника в нечислових шкалах і характеризуються суб'єктивізмом і неточністю. Числові шкали – це упорядкований набір чисел, що визначають ступінь визначення показника. Вербально-числові (змішані) шкали включають в себе як елементи вербальної шкали – змістовний опис градацій, так і числовий шкали - числові значення, що відповідають кожній з градацій. Сенс таких шкал полягає в тому, що вони дозволяють виміряти

ступінь визначення показника, що має суб'єктивний характер. Вербально-числові шкали відносяться до психофізичних шкал, що встановлюють відповідності між фізичними (оцінками стану об'єкта моніторингу) і психологічними факторами (експертними оцінками «бажаності» значень показників стану).

Формування вербально-числової шкали складається з двох етапів: вибір градацій шкали і визначення для них чисельних значень. Перелік градацій шкали вибирається таким чином, щоб їх змістовні інтерпретації були однаково помітні усіма експертами, які беруть участь в побудові. При цьому чисельні значення градацій шкали Харрінгтона отримані на основі аналізу і обробки великого обсягу статистичних даних [38, 39].

Як засіб програмної реалізації побудови інтегральної екологічної оцінки станів приаеродромних територій використовувалася платформа NET Framework, заснована на використанні загальномовного середовища виконання Common Language Runtime (CLR). Її функціональні можливості доступні в будь-яких мовах програмування, що використовують це середовище.

Для створення додатків з графічним інтерфейсом застосовувалася технологія Windows Presentation Foundation (WPF), яка встановлена в Windows Vista (.NET Framework 3.0) і вище.

WPF надає засоби для створення візуального інтерфейсу, в тому числі і мову XAML (Extensible Application Markup Language). XAML – мова декларативного опису інтерфейсу, заснованого на XML. У WPF є Shape клас, що дозволяє працювати з графічними примітивами як з об'єктами класів Shape (Ellipse, Rectangle і т.д.) і динамічне додавати їх в runtime середовищі до XAML-розмітці додатку.

Таким чином, вибір даної технології визначається можливостями платформи WPF, які використовувалися для реалізації графічної побудови дерева якостей приаеродромних територій. Для роботи з WPF потрібна .NET-

сумісна мова, тому використовувалась об'єктно-орієнтована мова програмування високого рівня C #.

*Найменування і позначення програми.* Для оцінки станів приаеродромних територій використовувався програмний комплекс побудови інтегральної оцінки станів об'єктів моніторингу (програма Integral Assessment). Програма Integral Assessment працює під управлінням операційної системи Windows версії 7 і вище. Для її функціонування необхідний програмний продукт Excel версії 2007 і вище. Програма Integral Assessment написана на мові C# в середовищі розробки Microsoft Visual Studio 2012 Professional.

*Функціональне призначення.* Програма Integral Assessment призначена для виконання наступних функцій:

- 1) побудови дерева (ієрархічної структури) якостей приаеродромних територій;
- 2) визначення числових оцінок пріоритету елементів дерева за допомогою методів аналізу ієрархій;
- 3) обчислення нелінійних часткових і інтегральної екологічної оцінок статків приаеродромних територій.

*Опис логічної структури.* Основні етапи алгоритму програми:

- 1) побудова ієрархічної структури («дерева») якостей приаеродромних територій;
- 2) визначення переліку показників стану приаеродромних територій;
- 3) опис шкал вимірювань показників стану приаеродромних територій;
- 4) розрахунок числових оцінок пріоритету елементів дерева показників якостей стану приаеродромних територій;
- 5) формування списку станів приаеродромних територій;
- 6) побудова матриці вихідних даних (таблиці типу «стан об'єкта моніторингу - показник стану»).
- 7) визначення інтервалу зміни показників стану приаеродромних територій;

- 8) завдання гранично допустимих значень показників стану приаеродромних територій;
- 9) побудова часткових екологічних оцінок і визначення нормативних рівнів;
- 10) побудова інтегральної екологічної оцінки стану приаеродромних територій;
- 11) ранжування станів приаеродромних територій за величиною інтегральної екологічної оцінки стану приаеродромних територій;
- 12) графічне представлення результату побудови інтегральних екологічних оцінок приаеродромних територій;
- 14) імпорт (експорт) нормативно-експертної інформації, вхідних і вихідних даних з файлів (в файл) у систему управління екологічною безпекою.

Екологічна оцінка станів приаеродромних територій характеризує досягнутий рівень якості по конкретному показнику стану і в залежності від експертних суджень (песимістичних або оптимістичних) може бути отримана різними способами. Окремі та інтегральні екологічні оцінки мають змістовну, імовірне, інформаційну та геометричну інтерпретації.

Інтегральна екологічна оцінка є середньозваженою величиною і дозволяє оцінити «зверху» середньозважені арифметичне і геометричне. Така оцінка відображає «песимістичний» експертний погляд і може бути застосована для прогнозу станів приаеродромних територій порядковою шкалою.

На рис. 4.6 приведена структурна схема основних модулів програмного продукту Integral Assessment. Модульність програми дозволяє абстрагуватися від прив'язки UI частини до обчислювальної, так як автономність модулів дозволяє виконувати модифікацію їх реалізацій без порушення функціональності.

Головним модулем програми є WPF Application, до якого за допомогою механізму залежностей (як динамічно підкачуємі бібліотеки - `dynamicly`

linked library, DLL) підключаються необхідні розширення і модулі-доповнення. Динамічна бібліотека являє собою окремий модуль, який може використовуватися автономно поза додатки WPF. Використання dllбібліотек дозволяє структурувати програмний продукт; оптимізувати необхідний обсяг пам'яті для роботи програми; при необхідності реалізувати можливість паралельного обчислення.

Структура основного WPF-додатку [46, 113] складається з чотирьох графічних вікон (window в термінах WPF-додатки) і одного «обмінника даними», що грає роль контейнера для об'єктів, доступ до яких потрібно здійснювати з window-компонент під час роботи (рис. 4.6).

Модуль Shared Data зі статичними public властивостями і зберігає дані, до яких мають доступ усі модулі програми для забезпечення зв'язності даних в рамках головної програми. Інформація про структуру всього дерева якостей приаеродромної території використовується як при введенні інформації про «новому» показнику стану, так і при формуванні матриці вихідних даних (таблиці типу «об'єкт моніторингу - показник стану»).

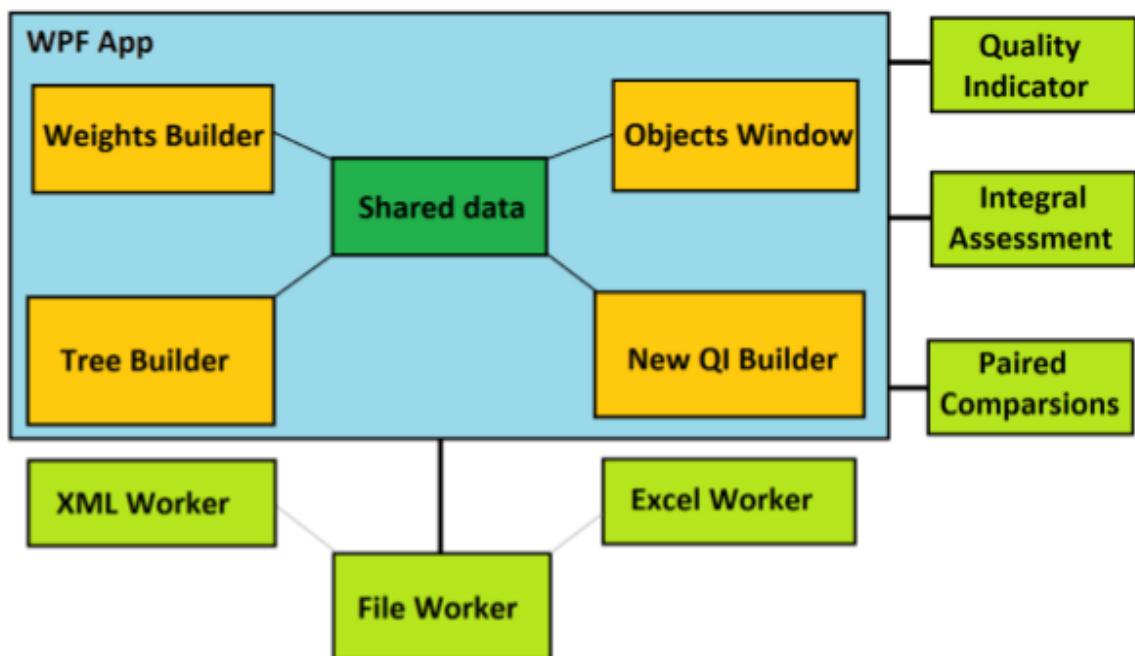


Рис. 4.6. Модулі програми побудови інтегральної екологічної оцінки станів об'єктів моніторингу

Tree Builder – графічний інтерфейс побудови, завантаження, редагування і збереження дерева якості приаеродромних територій (рис. 4.7).

При натисканні на будь-який елемент дерева якостей в робочому вікні програми з'являються піктограми доступних дій: висновок, редагування інформації про елемент, додавання нового елемента, видалення фрагмента дерева, редагування (введення) матриці парних порівнянь.

Weighths Builder – вікно для визначення вагових коефіцієнтів фрагмента дерева якостей приаеродромних територій. Перехід до цього етапу виконується після натиснення кнопки «Налаштування вагових коефіцієнтів» у вікні Tree Builder. Користувачеві надається можливість, як прямого призначення вагових коефіцієнтів, так і їх визначення на основі методу парних порівнянь. Інтерфейс вікна Weighths Builder наведено на рис. 4.8.

New QI Builder – модуль додавання (редагування) нового (раніше доданого) показника стану, що представляє собою форму для заповнення (редагування) полів характеристик створюваного (раніше доданого) показника стану – назви, одиниці виміру, інтервалу зміни, гранично допустимого значення, напрямки поліпшення якості (рис. 4.9).

Objects Window – модуль для формування матриці вихідних даних (таблиці типу «стан об'єкта моніторингу - показник стану»). В даному вікні надається можливість додати нову приаеродромну територію і значення його показника стану або редагуються значення показника стану для раніше доданих приаеродромних територій, а також обчислити інтегральну кваліметрическим оцінку станів приаеродромних територій. Для взаємозв'язку з Microsoft Excel передбачено імпорт матриці вихідних даних з файлів формату .xls (x).

File Worker - модуль, що забезпечує роботу з XML- і Excel-файлами. В рамках цього модуля в зв'язці з модулем Quality Indicator реалізований імпорт (експорт) дерева якостей об'єкту моніторингу.

Модуль Quality Indicator описує ієрархічну структуру. Кожен екземпляр класу містить посилання на пов'язані з ним елементи суміжних (нижнього і вищого) ієрархій.

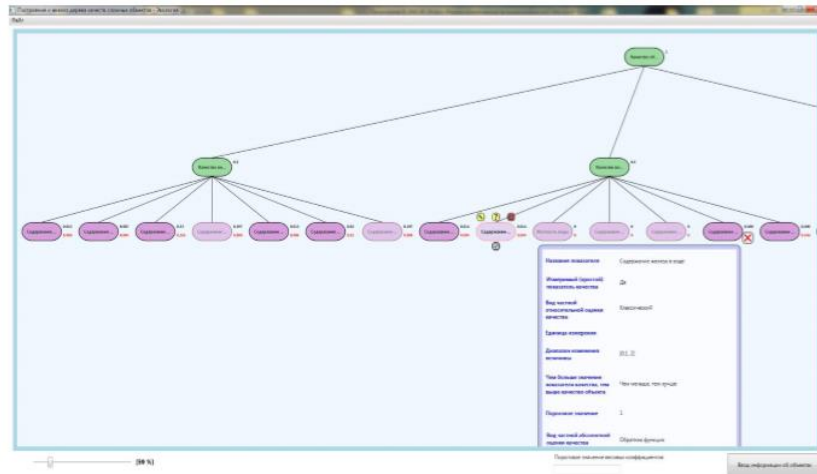


Рис. 4.7. Інтерфейс модуля роботи з деревом якостей Tree Builder

Качество водной среды  
Иван Иванов

1 2 2

	Содержание нитрата в воде	Содержание железа в воде	Жесткость воды	Содержание сульфата в воде	Содержание марганца в воде	Содержание хлора в воде	Содержание фтора в воде
Содержание нитрата в воде	Свойство 1	Свойство 2	Свойство 3	Свойство 4	Свойство 5	Свойство 6	Свойство 7
Содержание железа в воде	Свойство 1	Свойство 2	Свойство 3	Свойство 4	Свойство 5	Свойство 6	Свойство 7
Жесткость воды	Свойство 1	Свойство 2	Свойство 3	Свойство 4	Свойство 5	Свойство 6	Свойство 7
Содержание сульфата в воде	Свойство 1	Свойство 2	Свойство 3	Свойство 4	Свойство 5	Свойство 6	Свойство 7
Содержание марганца в воде	Свойство 1	Свойство 2	Свойство 3	Свойство 4	Свойство 5	Свойство 6	Свойство 7
Содержание хлора в воде	Свойство 1	Свойство 2	Свойство 3	Свойство 4	Свойство 5	Свойство 6	Свойство 7
Содержание фтора в воде	Свойство 1	Свойство 2	Свойство 3	Свойство 4	Свойство 5	Свойство 6	Свойство 7

РАССЧИТАТЬ ВЕСА

Рис. 4.8. Інтерфейс модуля налаштування вагових коефіцієнтів Weights Builder

Добавление нового показателя

Имя показателя качества  
Свойство 1

Измеримый (простой) показатель качества

Единицы измерения  
баллы

Минимальное значение  
0

Максимальное значение  
10

Пороговое значение  
5

Чем больше, тем лучше?

Вид абсолютной оценки качества  
Степенной

Степенной показатель нормировки  
=

Вид частной относительной оценки  
Классический

Сохранить ПК

Рис. 4.9. Інтерфейс модуля редагування інформації про приватну показнику стану New QI Builder

Даний підхід спрощує роботу з ієрархічною структурою при визначенні числових оцінок пріоритету і видаленні елементів дерева. Передбачено графічний інтерфейс користувача і імпорт/експорт дерев з файлів з розширенням .TR.

Модуль Paired Comparisons реалізує метод парних порівнянь визначення вагових коефіцієнтів показника стану та надає користувачеві показники стану за порядкової шкалою або в шкалі відносин з врахуванням коефіцієнтів відносної важливості показника стану.

Модуль Integral Assessment призначений для побудови кваліметричних оцінок станів приаеродромної території. Вхідною інформацією є: дерево якостей (QualityIndicator) з експертними оцінками відносної важливості його елементів; таблиця типу «стан об'єкта моніторингу-показник стану»; інтервали зміни і гранично допустимі значення показників стану.

*Зв'язки програми з іншими програмами.* Програма Integral Assessment технологічно пов'язана з програмою MS Office Excel для імпорту і експорту вхідних і вихідних даних з файлів.

*Використовувані технічні засоби.* Робоче місце користувача повинно відповідати таким мінімальним вимогам: Intel-совмісний процесор з тактовою частотою 1.2 GHz, ОЗУ 512 Мб, ОС Windows 7, вільний дисковий простір 1 Гб для 32-розрядної ОС і 2.1 Гб для 64-розрядної ОС, встановлений пакет .NET Framework 4.5.

*Виклик і завантаження.* Для запуску програми Integral Assessment необхідна її попередня установка на локальний диск комп'ютера в каталог Integrest. Виклик і завантаження програми Integral Assessment здійснюється наступним чином:

1) перейти в каталог Integrest на локальному диску, що містить виконуваний файл програми Integral Assessment.exe;

2) запустити виконуваний файл Integral Assessment.exe.

*Вхідні дані.* Вхідними даними програми Integral Assessment є:



- 1) експертне уявлення про дерево якостей приаеродромної території;
- 2) матриці парних порівнянь експертами пріоритетності елементів ієрархічної структури;
- 3) експертна інформація про показник стану (назва, нижня і верхня межа інтервалу зміни, гранично допустиме значення, напрям поліпшення якості);
- 4) матриця даних про стани приаеродромних територій по раніше сформованого списку показників стану (таблиця типу «стан об'єкта моніторингу-показник стану»).

*Вихідні дані.* Вихідними даними програми Integral Assessment є:

- 1) графічне представлення дереві якостей приаеродромної території;
- 2) числові оцінки пріоритету елементів ієрархічної структури;
- 3) безрозмірні відносні приватні кваліметричні оцінки станів приаеродромних територій;
- 4) інтегральні кваліметричні оцінки станів приаеродромних територій;
- 5) ранжування станів приаеродромних територій за величиною інтегральної кваліметричної оцінки.

Створена програма побудови інтегральної імовірісно-кваліметричної оцінки станів приаеродромних територій дозволяє:

- здійснювати опис алгоритму ранжирування станів приаеродромних територій за величиною інтегральної кваліметричної оцінки.

- використовувати модифікований алгоритм перерахунку (коригування) інтегральної кваліметричної оцінки для інваріантної переранжировки станів приаеродромних територій при додаванні нових спостережень зі збереженням вихідного упорядкування.

Необхідність коригування кваліметричних оцінок статків приаеродромних територій виникає в наступних випадках: для оцінки зміни стану приаеродромних територій; при отриманні нової інформації про стан приаеродромних територій.

Програмний комплекс побудови інтегральної кваліметричної оцінки станів приаеродромних територій містить модуль побудови дерева якостей

об'єкта і банк моделей приватних і інтегральної оцінок. Запропонований програмний комплекс дозволяє формувати репрезентативну сукупність показників і підбирати відповідний варіант інтегральної оцінки, що відображає експертні знання про якість приаеродромних територій.

#### **4.3. Оцінка екологічної безпеки навколишнього середовища в районах аеродромів України**

Головною метою моніторингу екологічної ситуації є збирання і оброблення даних для прийняття управлінських рішень, спрямованих на підвищення якості навколишнього середовища (НС) в досліджуваному регіоні. Під якістю НС розуміється ступінь відповідності її характеристик потребам населення і технологічним вимогам. Якість НС формується під впливом техногенних факторів, пов'язаних з викидами промислових підприємств, сільськогосподарських і транспортних об'єктів досліджуваної території.

Гранично допустима концентрація (ГДК) – максимальний вміст забруднюючої речовини, яка не надає будь-яких хворобливих змін в організмі людини і несприятливих спадкових змін у потомства при тривалому впливі.

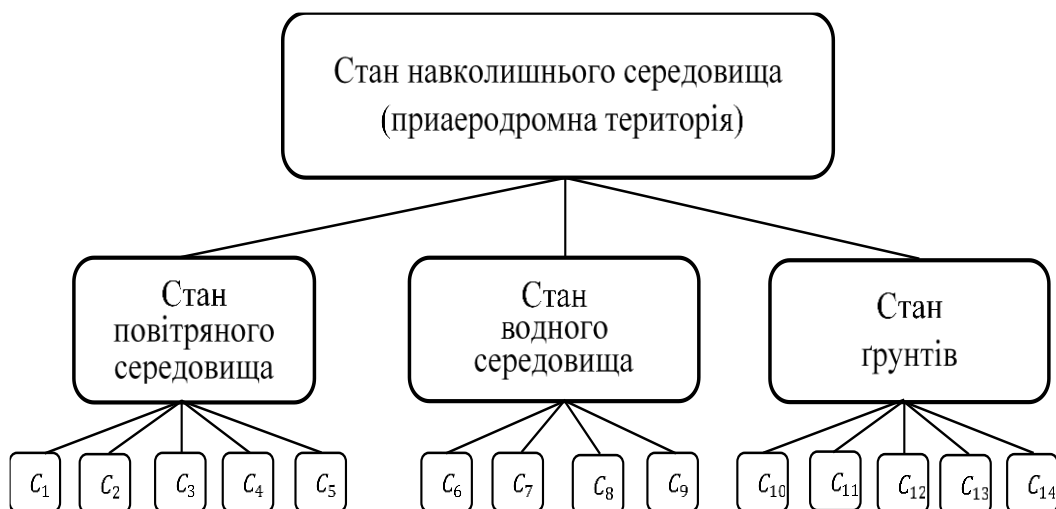
Розглянемо застосування інтегральної екологічної оцінки станів НС для аналізу екологічної ситуації в 17 приаеродромних територіях України в категоріях ризику. Побудова інтегральної оцінки ризику хімічного забруднення навколишнього середовища (НС) здійснюється відповідно до ієрархічної структури, представленою на рис. 4.10

Станом на 1 червня 2019 року перевізники і пункти призначення представлені в таблиці 4.8.

Список діючих цивільних аеродромів, аеродромів цивільної авіації та злітно-посадкових майданчиків України приведений в таблиці 4.9.

Інформаційними джерелами бази екологічних даних міжнародних аеропортів (табл. 4.10-4.12) були фондові матеріали Центру державного санітарно-епідеміологічного нагляду Збройних Сил України (Додаток Г).

Зонування районів аеропортів за інтегральною оцінкою ризику хімічного забруднення ОС в вербально-числової шкалою Харрінгтона наведено на рис. 4.11.



$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  – відповідно, вміст діоксиду азоту, зважених речовин (пилу), діоксиду сірки, оксиду вуглецю, свинцю в повітрі;  $C_6, C_7, C_8, C_9$  – відповідно вміст марганцю, заліза, нітратів, нітритів у воді;  $C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}$  – відповідно вміст міді, цинку, свинцю, кадмію, нікелю в ґрунті.

Рис. 4.10. Ієрархічна структура оцінки забруднення навколишнього середовища (приаеродромної території)

Інтегральна екологічна оцінка в системі екологічного моніторингу забезпечує інформаційну підтримку прийняття управлінських рішень щодо зниження ризику хімічного забруднення навколишнього середовища. Для районів з дуже високим ризиком хімічного забруднення навколишнього середовища необхідна невідкладна розробка рекомендацій щодо зниження екологічного ризику на державному рівні.

Для районів з низьким і дуже низьким ризиком хімічного забруднення навколишнього середовища домагаються компромісу між вартістю заходів щодо зниження ризику і користю від них. Таки заходи носять локальний характер і застосовуються до конкретних джерел небезпеки.

*Інтегральна оцінка ризику хімічного забруднення навколишнього середовища в районі аеропорту «Київ» імені Ігоря Івановича Сікорського (міжнародний аеропорт в місті Київ, район Жуляни)*

Аеропорт займає територію площею 265 га. Має одну злітно-посадкову смугу (ВВП) довжиною 2310 м і шириною 45 м (до реконструкції - 1800 м і 49 м відповідно). Ця ВПП також використовується розташованим на території аеродрому 410-м заводом цивільної авіації [142, 143].

У першій половині 2009 року була закінчена реконструкція злітно-посадкової смуги і з'явилася можливість приймати більш важкі літаки, такі як Boeing 737 і Airbus A320. З 11 травня 2009 року аеропорт почав роботу в цілодобовому режимі. Аеропорт має статус міжнародного. С 27 березня 2011 років через аеропорт Жуляни здійснює рейси авіакомпанія Wizz Air, яка змінила свою базу і перевела сюди повітряні судна з аеропорту Бориспіль. З 15 вересня 2013 року авіакомпанія flydubai відкрила прямий рейс з Жулян в Дубай (DXB). Рейс виконується 14 раз в тиждень, два рази на день.

Початкові дані та інтегральна екологічна оцінка ризику забруднення навколишнього середовища в районі аеропорту Жуляни представлено в таблиці 4.13.

На розглянутих прикладах апробований розроблений науково-методичний апарат системно-екологічного підходу до побудови інтегральної оцінки ризику забруднення навколишнього середовища в районах аеропортів України.

Таблиця 4.8

## Перевізники і пункти призначення

<b>Авіакомпанія</b>	<b>Пункти призначення</b>
<u>Alitalia</u>	<u>Рим (Фьюмичіно)</u>
<u>Belavia</u>	<u>Мінськ</u>
<u>Bravo Airways</u>	<u>Амман, Бейрут, Тегеран</u>
<u>Buta Airways</u>	<u>Баку</u>
<u>Ernest Airlines</u>	<u>Бергамо, Болонья, Генуя, Мілан (Мальпенса), Неаполь, Рим</u>
<u>Jordan Aviation</u>	<u>Амман</u>
<u>LOT</u>	<u>Варшава</u>
<u>Мотор Січ</u>	<u>Запоріжжя, Львів, Одеса, Ужгород</u>
<u>Pegasus Airlines</u>	<u>Анкара, Бодрум, Ізмір</u>
<u>УРГА</u>	<i>чартерні рейси</i>
<u>Vueling Airlines</u>	<u>Барселона</u>
<u>Wizz Air</u>	<u>Афіни, Берлін, Біллуна, Братислава, Бремен, Будапешт, Варшава, Вена, Вільнюс, Вроцлав, Ганновер, Гамбург, Гданськ, Дортмунд, Катовіце, Кельн/Бонн, Копенгаген, Краків, Ларнака, Лейпциг, Лісабон, Лондон — Лутон, Люблін, Меммінген, Нюрнберг, Познань, Рига, Салоніки, Таллінн, Франкфурт</u>
<u>YanAir</u>	<u>Батумі, Одеса, Тель-Авів (Бен-Гуріон)</u>

Таблиця 4.9

## Список діючих цивільних аеродромів, аеродромів цивільної авіації та злітно-посадкових майданчиків України

<b>Категорія аеродромів</b>	<b>Місце знаходження</b>
Міжнародні	Вінниця, Дніпро, Запоріжжя, Івано-Франківськ, Київ (Бориспіль), Київ (Жуляни), Кривий Ріг, Львів, Миколаїв, Одеса, Полтава, Рівне, Суми, Тернопіль, Ужгород, Харків, Черкаси, Чернівці, Херсон
Місцеві	Біла Церква, Бородянка, Житомир, Київ (Антонов-1), Київ (Антонов-2), Київ (Бузова), Київ (Південний), Кропивницький, Кременчук, Маріуполь, Озерне, Харків (Сокільники)
Недіючі і неконтрольовані України	Бровари, Донецьк, Євпаторія, Заводське, Ізмаїл, Керч, Лиманське, Луганськ, Севастополь, Северодонецьк, Сімферополь

Таблиця 4.10

## Показники забруднення повітря в районах аеродромів

№ п/п	Аеропорт	У <sub>1</sub>	У <sub>2</sub>	У <sub>3</sub>	У <sub>4</sub>	У <sub>5</sub>	У <sub>6</sub>	У <sub>7</sub>
1	ДП «Міжнародний аеропорт Бориспіль»	0,25	0,27	0,09	1,12	0,0005	0,003	0,008
2	Міжнародний аеропорт «Дніпропетровськ»	0,02	0,25	0,05	1,92	0,0002	0,0036	0,009
3	КП «Міжнародний аеропорт «Запоріжжя»»	0,035	0,272	0,107	2,43	0,0001	0,003	0,007
4	Міжнародний аеропорт «Івано-Франківськ»	0,075	0,35	0,1	0,6	0,0001	0,003	0,0085
5	КП «Міжнародний аеропорт Київ (Жуляни)»	0,011	0,07	0,1	1,92	0,0003	0,004	0,008
6	КП «Міжнародний аеропорт Кривий Ріг»	0,012	0,291	0,28	2,21	0,0001	0,004	0,008
7	КП «Аеропорт Вінниця»	0,02	0,12	0,11	1,67	0,0003	0,0041	0,007
8	КП «Міжнародний аеропорт Одеса»	0,011	0,186	0,125	1,65	0,0002	0,003	0,007
9	Обласне КП «Міжнародний аеропорт Рівне»	0,056	0,29	0,07	1,69	0,0003	0,0042	0,011
10	Обласне КП «Аеропорт Суми»	0,033	0,252	0,199	0,742	0,0002	0,004	0,008
11	Аеропорт «Тернопіль»	0,04	0,31	0,15	1,56	0,0002	0,0038	0,010
12	КП «Аеропорт Черкаси»	0,051	0,21	0,04	1,8	0,0002	0,0049	0,011
13	Міжнародний аеропорт «Харків»	0,03	0,14	0,12	1,81	0,0003	0,004	0,011
14	КП «Міжнародний аеропорт Чернівці»	0,071	0,271	0,071	1,266	0,00023	0,0056	0,022
15	Аеропорт «Херсон»	0,04	0,17	0,18	2,11	0,0003	0,0070	0,009
16	ДП «Міжнародний аеропорт Львів» імені Данила Галицького»	0,011	0,117	0,1	0,71	0,0003	0,004	0,008
17	Закарпатське обласне КП «Міжнародний аеропорт Ужгород»	0,012	0,2	0,12	1,68	0,0003	0,004	0,008

Примітка: у<sub>1</sub>, у<sub>2</sub>, у<sub>3</sub>, у<sub>4</sub>, у<sub>5</sub>, у<sub>6</sub>, у<sub>7</sub> - відповідно вміст діоксиду азоту, зважених речовин (пилу), діоксиду сірки, оксиду вуглецю, свинцю, фенолу, формальдегідів в повітрі

Таблиця 4.11

## Показники забруднення води в районах аеропортів

№ п/п	Аеропорт	У <sub>8</sub>	У <sub>9</sub>	У <sub>10</sub>	У <sub>11</sub>	У <sub>12</sub>	У <sub>13</sub>	У <sub>14</sub>
1	ДП «Міжнародний аеропорт Бориспіль»	0,08	0,1	7,8	2,2	0,003	77,8	0,16
2	Міжнародний аеропорт «Дніпропетровськ»	0,05	0,3	10	3,1	0,003	65,4	0,3
3	КП «Міжнародний аеропорт «Запоріжжя»»	0,107	0,1	7,47	15,02	0,002	110,11	0,31
4	Міжнародний аеропорт «Івано-Франківськ»	0,1	0,1	8,949	32,863	0,0304	56,82	0,201
5	КП «Міжнародний аеропорт Київ (Жуляни)»	0,1	0,1	8,3	3,2	0,03	143,3	0,21
6	КП «Міжнародний аеропорт Кривий Ріг»	0,28	0,1	6,54	28,52	0,003	83,41	0,24
7	КП «Аеропорт Вінниця»	0,12	0,005	5,67	13,3	0,0037	16,78	0,33
8	КП «Міжнародний аеропорт Одеса»	0,124	0,05	6,32	2,526	0,003	84,14	0,32
9	Обласне КП «Міжнародний аеропорт Рівне»	0,08	0,1	6,549	13,49	0,0152	37,067	0,402
10	Обласне КП «Аеропорт Суми»	0,189	0,05	8,03	3,69	0,003	115,37	0,32
11	Аеропорт «Тернопіль»	0,16	0,1	7,01	5,57	0,004	55,2	0,25
12	КП «Аеропорт Черкаси»	0,04	0,1	10,202	12,785	0,0081	409,26	0,428
13	Міжнародний аеропорт «Харків»	0,12	0,005	5,87	16,2	0,0036	28,7	0,25
14	КП «Міжнародний аеропорт Чернівці»	0,072	0,1	6,2	24,64	0,003	30,7	0,19
15	Аеропорт «Херсон»	0,19	0,005	5,3	10,52	0,003	18,6	0,27
16	ДП «Міжнародний аеропорт Львів» імені Данила Галицького»	0,1	0,006	6,98	18,6	0,003	24,66	0,298
17	Закарпатське обласне КП «Міжнародний аеропорт Ужгород»	0,12	0,1	5,8	8,2	0,15	106,4	0,28

Примітка: У<sub>8</sub>, У<sub>9</sub>, У<sub>10</sub>, У<sub>11</sub>, У<sub>12</sub>, У<sub>13</sub>, У<sub>14</sub> - відповідно вміст марганцю, заліза, нітритів, хлоридів, фторидів у воді

Таблиця 4.12

## Показники забруднення ґрунту в районах аеропортів

№ п/п	Аеропорт	У <sub>15</sub>	У <sub>16</sub>	У <sub>17</sub>	У <sub>18</sub>	У <sub>19</sub>	У <sub>20</sub>
1	ДП «Міжнародний аеропорт Бориспіль»	0,1	18,3	1	0,4	0,5	1
2	Міжнародний аеропорт «Дніпропетровськ»	0,1	25,1	0,1	1	0,2	1,17
3	КП «Міжнародний аеропорт «Запоріжжя»»	0,25	19,036	0,1	1	0,2	1,557
4	Міжнародний аеропорт «Івано-Франківськ»	0,1	21,2	0,1	1	0,2	1
5	КП «Міжнародний аеропорт Київ (Жуляни)»	0,2	6,61	0,8	0,1	1,8	2,29
6	КП «Міжнародний аеропорт Кривий Ріг»	0,248	12,213	0,134	1	0,314	4,037
7	КП «Аеропорт Вінниця»	0,1	50	1	0,2	0,5	1
8	КП «Міжнародний аеропорт Одеса»	0,1	32,84	1	0,5	0,53	3,149
9	Обласне КП «Міжнародний аеропорт Рівне»	0,1	19,6	0,1	1	0,2	1
10	Обласне КП «Аеропорт Суми»	0,1	33,41	1	0,5	0,615	3,017
11	Аеропорт «Тернопіль»	0,1	19,42	1	0,5	0,52	1,02
12	КП «Аеропорт Черкаси»	0,25	34,6	1	2	1,03	3,42
13	Міжнародний аеропорт «Харків»	0,1	50	1	0,2	0,5	1
14	КП «Міжнародний аеропорт Чернівці»	0,1	23,4	0,1	1	0,2	12,3
15	Аеропорт «Херсон»	0,1	50	1	0,2	0,51	1,24
16	ДП «Міжнародний аеропорт Львів» імені Данила Галицького»	0,1	50	1	0,2	0,5	1
17	Закарпатське обласне КП «Міжнародний аеропорт Ужгород»	0,2	12,1	0,8	1	2	6,82

Примітка: У<sub>15</sub>, У<sub>16</sub>, У<sub>17</sub>, У<sub>18</sub>, У<sub>19</sub>, У<sub>20</sub> - відповідно вміст кадмію, марганцю, міді, нікелю, свинцю, цинку в ґрунті



**Екологічна  
схема України**

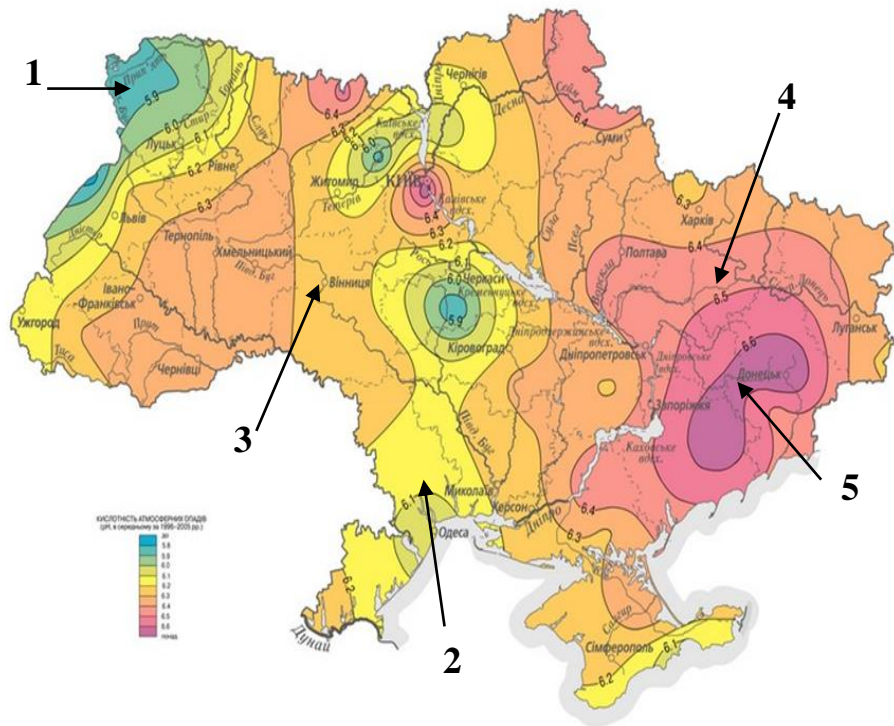


Рис. 4.11. Інтегральна оцінна карта ризику хімічного забруднення навколишнього середовища в районах аеропортів України за шкалою Харрінгтона (1 – дуже низький; 2 – низький; 3 – середній; 4 – високий; 5 – дуже високий)

Таблиця 4.13

Показники стану та інтегральна екологічна оцінка ризику забруднення навколишнього середовища а районі аеропорту Жуляни

№ п/п	Рік	у <sub>1</sub>	у <sub>2</sub>	у <sub>3</sub>	у <sub>4</sub>	у <sub>5</sub>	у <sub>6</sub>	у <sub>7</sub>	Рівень забруднення
1	2001	0,020	0,17	0,27	4,09	0,0009	0,013	0,022	високий
2	2002	0,018	0,16	0,25	3,85	0,0009	0,014	0,022	високий
3	2003	0,016	0,15	0,23	3,73	0,0008	0,013	0,020	середній
4	2004	0,014	0,14	0,22	3,62	0,0007	0,011	0,018	середній
5	2005	0,012	0,13	0,20	3,45	0,0007	0,010	0,016	низький
6	2006	0,010	0,12	0,17	3,14	0,0006	0,009	0,012	середній
7	2007	0,008	0,12	0,19	3,35	0,0007	0,009	0,012	низький
8	2008	0,006	0,11	0,20	3,67	0,0006	0,010	0,013	низький
9	2009	0,009	0,10	0,21	3,81	0,0007	0,010	0,014	низький
10	2010	0,009	0,10	0,23	3,95	0,0008	0,010	0,016	середній
11	2011	0,011	0,15	0,25	4,01	0,0008	0,011	0,016	високий
12	2012	0,011	0,13	0,20	3,56	0,0006	0,010	0,013	високий
13	2013	0,012	0,11	0,15	3,12	0,0005	0,008	0,010	середній
14	2014	0,012	0,11	0,14	2,87	0,0005	0,007	0,010	низький
15	2015	0,011	0,10	0,13	2,56	0,0004	0,006	0,009	низький
16	2016	0,011	0,08	0,12	2,11	0,0004	0,005	0,008	низький
17	2017	0,012	0,07	0,11	1,93	0,0003	0,005	0,008	низький

#### 4.4. Науково-практичні рекомендації щодо побудови системи управління екологічною безпекою приаеродромних територій

Пропонується створення та застосування система управління екологічною безпекою приаеродромних територій, яка призначена для виконання наступних завдань (рис.4.12):

- 1) комплексні спостереження за станом приаеродромній території, оцінка та прогноз змін екологічного стану приаеродромній території;

2) регулярні спостереження і контроль, за певною програмою, для оцінки екологічного стану приаеродромних територій, аналізу процесів, що відбуваються і своєчасного виявлення тенденцій їх зміни;

3) комплексна система довгострокових спостережень для оцінки і прогнозу змін стану приаеродромних територій;

4) прийняття управлінських рішень щодо попередження (ліквідації) критичних ситуацій, що роблять шкідливий вплив на здоров'я населення та інші живі організми.

Робота системи управління екологічною безпекою приаеродромних територій здійснюється наступним чином. Інформаційна підсистема здійснює моніторинг в певні рівновіддалені моменти часу  $t$ . Якщо в момент часу  $t$  виявлено порушення вимоги хоча б по одному показнику стану (критичний стан приаеродромній території), то визначається керуючий вплив для приведення значення відповідного показника стану до норми (рис. 4.12).

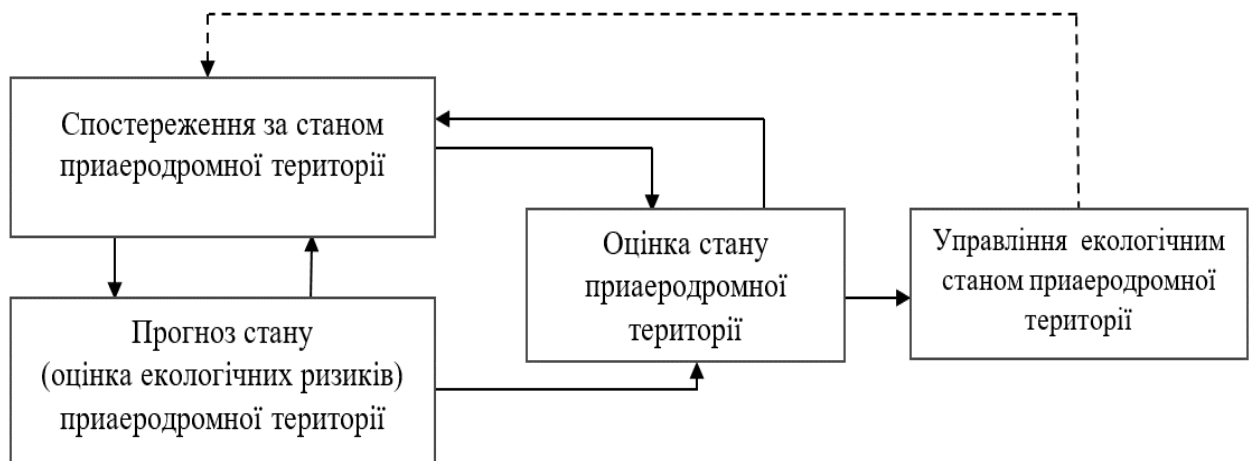


Рис. 4.12. Система управління екологічною безпекою приаеродромних територій

Інформаційна підсистема моніторингу приаеродромній території повинна виконувати наступні функції (рис.4.13): автоматизувати збір вихідних даних про стан приаеродромній території; організувати

централізоване зберігання даних з метою подальшого їх аналізу; обробка та аналіз даних; своєчасне інформування відповідальної особи про невиконання вимог екологічної безпеки або інших значущих екологічних змін стану приаеродромній території.

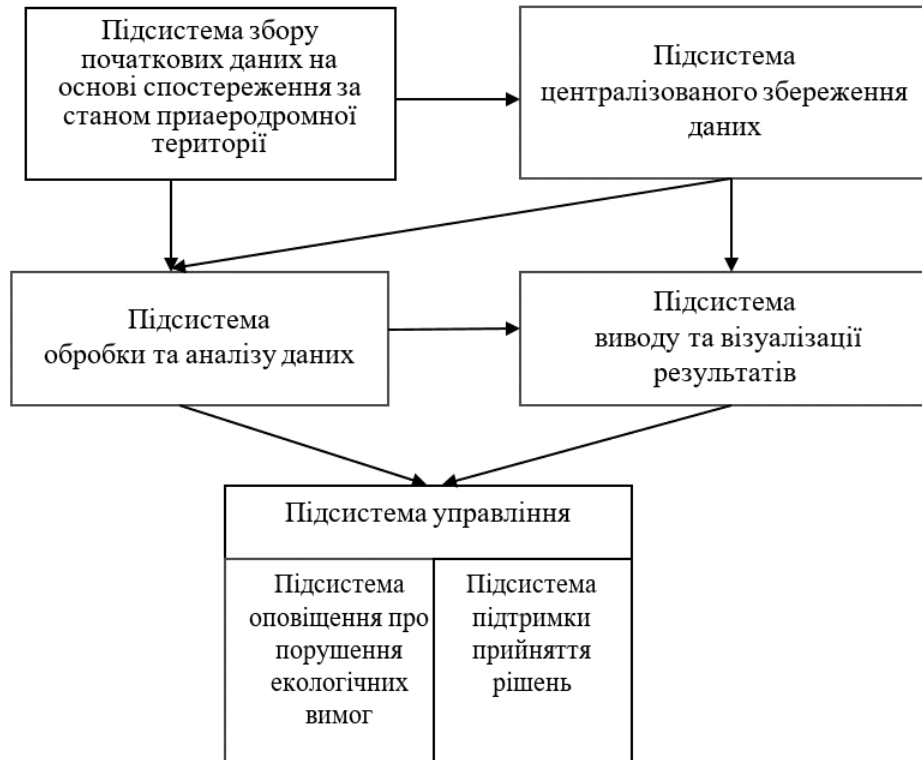


Рис. 4.13. Структурна схема інформаційної підсистеми моніторингу приаеродромній території

Інформаційна підсистема моніторингу за станом приаеродромній території повинна відповідати основним і спеціальним вимогам:

- бути заснованою на обґрунтованих, математично коректних і практично реалізованих методах;
- бути простою і універсальною в реалізації;
- бути відкритою, тобто мати можливість розширення переліку показників стану, збільшення кількості об'єктів моніторингу, обробки і візуалізації результатів;

- бути узгодженою на всіх етапах розробки. Для забезпечення вирішення конкретних завдань в інформаційній системі моніторингу за станом складного об'єкта передбачені відповідні підсистеми (рис. 4.13).

Підсистема обробки та аналізу даних складається з блоків, що дозволяють визначати інтегральну оцінку стану приаеродромній території в даний момент часу, його зміни і прогнозний стан.

Підсистема виведення і візуалізації результатів призначена для відображення вихідних даних і результатів розрахунків в табличному і графічному видах.

Створення та застосування запропонованої системи управління екологічною безпекою приаеродромних територій дозволить здійснювати:

- контроль забруднення приаеродромній території;
- автоматизацію процесів збору, обробки, передачі та подання інформації в системі екологічного моніторингу;
- оцінку забруднення приаеродромній території і ризику для здоров'я населення;
- автоматизацію соціально-гігієнічного моніторингу на базі геоінформаційних технологій;
- облік, накопичення і всебічний аналіз багаторічних даних, оцінку і прогноз відомостей щодо соціально-гігієнічного моніторингу;
- побудову інтегральних оцінок розвитку аеропортів.

Використання розробленого вербально-числового аналізу ризику в інформаційній системі моніторингу за станом приаеродромних територій, дозволяє підвищити обґрунтованість прийняття управлінських рішень.

Система управління екологічною безпекою приаеродромних територій повинна використовувати дві функції: формування управлінських рішень; реалізація управлінських рішень ( виконавча функція).

*Формувач управління в системі екологічного управління.*

Формувач управління в системі екологічного управління призначений для виконання наступних завдань.

Проведення комплексного аналізу впливу авіації та об'єктів її обслуговування на навколишнє середовище. Аналіз сучасних напрямків розвитку систем екологічної безпеки повітряного середовища регіону.

Побудова моделі системи підтримки прийняття рішень щодо забезпечення екологічної безпеки природно-господарських систем, що відрізняється адаптивністю управління до поточних змін еколого-економічних характеристик досліджуваних систем.

Розробка науково-методичного апарату підтримки прийняття рішень при забезпеченні екологічної безпеки регіону в умовах нечіткої вихідної інформації, що відрізняється адаптивністю цілей і стратегій поведінки складових природно-господарської системи, що забезпечують необхідний рівень безпеки повітряного середовища регіону. Відмінною особливістю такого підходу є застосування апарату штучних нейронних мереж при налаштуванні параметрів системи в умовах, що змінюються еколого-економічних і метеорологічних умовах.

Проведення комплексних досліджень якості приземної атмосфери, водних ресурсів, ґрунтового покриву, акустичної обстановки в районі конкретної авіаційної частини військово-повітряних сил. Екологічне оцінювання впливу авіаційної частини на навколишнє середовище і здоров'я людини. Встановлення інтенсивності впливу на навколишнє середовище різних джерел техногенного навантаження в авіамістечку. Проведення класифікації джерел забруднення навколишнього середовища в авіаційній частині.

Прогноз просторового формування рівнів забруднення приземного шару атмосфери в зоні обслуговування повітряного судна.

Моделювання і прогнозування просторового забруднення навколишнього повітряного середовища приаеродромної території

газоподібними викидами від двигунів повітряного транспорту, розробка та обґрунтування математичної моделі просторового формування забруднення приземного шару атмосфери на технічній позиції обслуговування повітряного судна, створення методики розрахунку викидів забруднюючих речовин від засобів наземного забезпечення польотів.

Встановлення нових емпіричних залежностей для розрахунку забруднення повітря від працюючих двигунів літаків і засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів з урахуванням їх кількості, місця розташування і погодно-кліматичних умов.

Розробка методики прогнозування забруднення повітряного середовища від двигунів повітряних суден.

Розробка математичних моделей прогнозування забруднення повітряного середовища аеродромів, з урахуванням чинника розсіювання шкідливих речовин, що викидаються двигунами повітряних суден з метою визначення категорії джерел викидів і оцінки ступеня впливу двигунів повітряних суден на забруднення атмосферного повітря.

Формування емпіричних залежностей, що характеризують динаміку поширення шкідливих газоподібних речовин під час роботи засобів наземного забезпечення польотів і синтез алгоритму і методики розрахунку поля концентрації шкідливих речовин на майданчику обслуговування повітряного судна.

Отримання аналітичних залежностей для розрахунку необхідної витрати повітря в режимі "зліт-посадка", що знижує концентрації забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери до гранично допустимого рівня.

Розробка математичної моделі прогнозування рівнів забруднення навколишнього середовища від двигунів літальних апаратів, що відрізняється від застосовуваних використанням при розрахунку фактору розсіювання шкідливих речовин.

Розробка математичної моделі забруднення приземного шару атмосфери на технічній позиції обслуговування повітряного судна під час аеродромно-

технічного забезпечення польотів, що враховує дифузійне розсіювання продуктів згоряння авіаційного та автомобільного палива і нестационарність джерела.

Отримання інженерної методики для розрахунку емісії продуктів згоряння палива до різних режимів роботи засобів аеродромно-технічного забезпечення під час забезпечення польотів і кліматичних умов.

Розробка математичної моделі комплексної оцінки забруднення приземного шару атмосфери на технічній позиції обслуговування повітряного судна.

Розробка залежності для розрахунку викидів шкідливих газоподібних речовин в атмосферу при експлуатації засобів наземного забезпечення польотів.

Розробка алгоритму розрахунку поля концентрації шкідливих речовин на майданчику обслуговування повітряного судна.

*Виконавча підсистема в системі екологічного управління.*

Виконавча підсистема в системі екологічного управління призначена для виконання наступних завдань.

Постановка і проведення експерименту по апробації та аналізу отриманих наукових результатів.

Розробка заходів щодо зниження шкідливого впливу газоподібних викидів і генерується шуму від літальних апаратів на навколишнє середовище приаеродромної території.

Формування пропозицій щодо здійснення екологічного моніторингу навколишнього повітряного середовища приаеродромної території.

Формування пропозицій заходи щодо зниження шкідливого впливу шумів літальних апаратів на навколишнє природне середовище приаеродромної території; а також рекомендацій щодо дотримання мінімальних відстаней від зони посадки і зльоту повітряних суден до будівель поза територією аеродромів, рекомендацій щодо застосування шумозахисних конструкцій будівель і споруд.



Розробка методики експериментальних досліджень рівня забруднення навколишнього середовища, що полягає в удосконаленні схеми розміщення постів спостережень і контролю, а також додаткових постів на злітній смузі і приаеродромної території.

Пропозиція заходів по зниженню шкідливого впливу шумів повітряних суден на навколишнє природне середовище приаеродромної території, які рекомендують дотримання мінімальних відстаней від зони посадки і зльоту повітряних суден до будівель поза територією аеродромів, а також застосування шумозахисних конструкцій будівель і споруд.

Розробка комплексу заходів щодо зниження емісії шкідливих речовин від засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів в процесі обслуговування повітряного судна та щодо забезпечення повітряного судна чистим повітрям, що подається в салон (кабіну) аеродромним кондиціонером.

#### **Висновки по розділу 4**

1. Проведена екологічна оцінка впливу аеродромних комплексів на природне середовище приаеродромної території, яка передбачає оцінювання забруднення приземного шару атмосфери на технічній позиції підготовки повітряних суден до вильоту, розробку та використання програми побудови інтегральної оцінки станів приаеродромних територій, аналіз екологічної безпеки навколишнього середовища в районах аеродромів України.

2. Проведене оцінювання забруднення приземного шару атмосфери на технічній позиції підготовки повітряних суден до вильоту ґрунтується на статистичних даних ринку авіаційних пасажирських та вантажних перевезень в Україні 34 авіакомпанії.

3. Для проведення екологічної оцінки впливу аеродромних комплексів на природне середовище приаеродромної території застосовано алгоритмічне й програмне забезпечення інтегральної екологічної оцінки стану об'єктів

моніторингу. Побудова інтегральної оцінки стану об'єктів моніторингу передбачає виконання двох процедур: створення та застосування семантичної моделі інтегральної оцінки стану приаеродромної території; проведення інтегральної екологічної оцінки стану об'єкту моніторингу. Величина інтегральної оцінки стану об'єктів моніторингу приаеродромної території залежить від інтервалів змін показників стану та їх гранично допустимих значень.

4. Проведено аналіз динаміки викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря України від стаціонарних та пересувних джерел за 1990 – 2018 роки. В Україні налічується 20 цивільних аеропортів, які рівномірно розташовані по всій території країни. Статистичні дані про діяльність за 2018 рік свідчать про стабільний розвиток не лише аеропортів, а галузі цивільної авіації в цілому. Так, упродовж звітного року перевезення пасажирів, вантажів та пошти здійснювали 34 вітчизняні авіакомпанії, якими виконано 100,3 тис. комерційних рейсів (за 2017 рік – пр 93 тис. рейсів).

5. Визначено значення індексу забруднення атмосфери (ІЗА) в районах аеропортів України у 2018 році. Встановлено, що поршневі, газотурбінні і ракетні двигуни повітряних суден викидають в атмосферу токсичні компоненти, що розсіюється в атмосфері: оксиди вуглецю та азоту, вуглеводні, сажу, альдегіди, а при спалюванні ракетного палива – оксид вуглецю, пари соляної кислоти, хлор, двоокис вуглецю і азоту, трьохокис алюмінію. Забруднення навколишнього середовища від двигунів повітряних суден істотніше в порівнянні з наземним автомобільним транспортом: на 55% більше викидається оксидів вуглецю; на 77% – оксидів азоту; на 93% – вуглеводнів; на 97% – аерозолів. Оцінка ступеня забруднення приземного шару атмосфери приаеродромній території проводиться шляхом порівняння вмісту в ній речовин з діючими гігієнічними нормативами.

6. Визначено, що до завдань акустичного моніторингу відносяться: інвентаризація джерел шуму і їх акустична характеристика; визначення сумарного рівня шуму від злітної смуги і допоміжних служб аеродромних

комплексів і допустимого акустичного навантаження на кордоні житлової забудови; оцінка ефективності заходів і запропонованих шумозахисних споруд. Еквівалентний рівень звуку визначається за допомогою інтегруючих шумомірів або іншої спеціальної акустичної апаратури. Категорії джерел викидів визначаються відповідно до рекомендацій з основних питань повітря охоронної діяльності з метою раціональної організації робіт з контролю дотримання нормативів викидів з урахуванням впливу викидів забруднюючих речовин на забруднення атмосферного повітря.

7. Формування і розрахунок забруднення навколишнього середовища приаеродромної території забруднюючими речовинами від двигунів повітряних суден необхідно проводити з урахуванням аеродинаміки струменів газоподібних викидів авіаційних двигунів. При розрахунку полів концентрації і щільності потоку домішок, викинутих в атмосферу надзвуковим струменем і випадають на поверхню землі, виникає необхідність моделювання струменя як джерела домішки.

8. Оцінка забрудненості ландшафтів приаеродромної території була проведена на основі екологічного аналізу точок, розташованих в районах досліджуваних об'єктів в районах аеродромів України. Контроль за станом земель приаеродромної території, що знаходиться в зоні впливу повітряного транспорту і технічних засобів забезпечення польотів, визначає необхідність сучасного інформаційного забезпечення. Визначальною умовою отримання комплексних відомостей про територію є матеріали аерокосмічної зйомки. Безпосередній аналіз стану природних вод за даними проведеного моніторингу, в районах прилеглих до приаеродромної території, не показав значного збільшення в них вмісту шкідливих речовин. Їх зміст в поверхневому стоці, що надходить з аеродромних комплексів, на 25–30% нижче ГДК. У районах приаеродромної території відзначається певне забруднення ґрунтів токсичними сполуками (до 1 ГДК і трохи більше).

9. Обґрунтовано, що формування і розрахунок забруднення навколишнього середовища приаеродромної території забруднюючими

речовинами від двигунів повітряних суден необхідно проводити з урахуванням аеродинаміки струменів газоподібних викидів авіаційних двигунів. При розрахунку полів концентрації і щільності потоку враховуємо, що домішки, викинуті в атмосферу надзвуковим струменем випадають на поверхню землі. Тому, виникає необхідність моделювання струменя як джерела домішки. У якості математичної моделі розглядається система диференціальних рівнянь руху і нерозривності для надзвукових струменів, деформованих навколишнім простором і вітровим потоком.

10. Запропоновано алгоритм програми побудови інтегральної екологічної оцінки станів приаеродромних територій. В системі управління екологічною безпекою приаеродромних територій пропонується використовувати концепцію «екологічного ризику». При цьому «ризик» визначається як поєднання ймовірності події та її наслідків.

11. Алгоритм програми побудови інтегральної екологічної оцінки станів приаеродромних територій передбачає виконання наступних процедур: формування множини показників стану; вибір шкал вимірювання показників стану; вибір функцій нормування показників стану; вибір функції агрегування; аналіз отриманих інтегральних оцінок.

Пропонується використовувати підхід до формування переліку показників стану приаеродромної території заснований на побудові «дерева» (ієрархічної структури) властивостей (показників), який враховує:

- стан повітряного середовища, – вміст діоксиду азоту, зважених речовин (пилу), діоксиду сірки, оксиду вуглецю, свинцю в повітрі;
- стан водного середовища, – вміст марганцю, заліза, нітратів, нітритів у воді;
- стан ґрунтів, – вміст міді, цинку, свинцю, кадмію, нікелю в ґрунті.

12. Завдання побудови інтегральної екологічної оцінки стану приаеродромної території може бути розглянуто як задача пошуку точки  $d$  на відрізку  $[0,1]$  – значення інтегральної оцінки, мінімально віддаленої по

заданому правилу щодо точок  $d_1, d_2, \dots, d_m$  – значень часткових (окремих) оцінок стану об'єкта моніторингу.

13. Як засіб програмної реалізації побудови інтегральної екологічної оцінки станів приаеродромних територій використовувалася платформа NET Framework, заснована на використанні загальномовного середовища виконання Common Language Runtime (CLR). Вибір даної технології визначається можливостями платформи WPF, яка використовувалися для реалізації графічної побудови дерева якостей приаеродромних територій. Для роботи з WPF застосовувалася .NET-сумісна мова, тому використовувалась об'єктно-орієнтована мова програмування високого рівня C#. Для оцінки станів приаеродромних територій використовувався програмний комплекс побудови інтегральної оцінки станів об'єктів моніторингу (програма Integral Assessment). Програма Integral Assessment працює під управлінням операційної системи Windows версії 7 і вище. Для її функціонування необхідний програмний продукт Excel версії 2007 і вище. Програма Integral Assessment написана на мові C# в середовищі розробки Microsoft Visual Studio 2012 Professional.

14. Алгоритм програми побудови інтегральної екологічної оцінки станів приаеродромних територій полягає в наступному:

- побудова ієрархічної структури («дерева») якостей приаеродромних територій;
- визначення переліку показників стану приаеродромних територій;
- опис шкал вимірювань показників стану приаеродромних територій;
- розрахунок числових оцінок пріоритету елементів дерева показників якостей стану приаеродромних територій;
- формування списку станів приаеродромних територій;
- побудова матриці вихідних даних (таблиці типу «стан об'єкта моніторингу – показник стану»).

- визначення інтервалу зміни показників стану приаеродромних територій;
- завдання гранично допустимих значень показників стану приаеродромних територій;
- побудова часткових екологічних оцінок і визначення нормативних рівнів;
- побудова інтегральної екологічної оцінки стану приаеродромних територій;
- ранжування станів приаеродромних територій за величиною інтегральної екологічної оцінки стану приаеродромних територій;
- графічне представлення результату побудови інтегральних екологічних оцінок приаеродромних територій;
- імпорт (експорт) нормативно-експертної інформації, вхідних і вихідних даних з файлів (в файл) у систему управління екологічною безпекою.

15. Проведена оцінка екологічної безпеки навколишнього середовища в районах аеродромів України. Застосування інтегральної екологічної оцінки станів навколишнього середовища здійснено в категоріях ризику для аналізу екологічної ситуації в 17 приаеродромних територіях України.

16. Надана інтегральна оцінка ризику хімічного забруднення навколишнього середовища в районі Аеропорту «Київ» імені Ігоря Івановича Сікорського (міжнародний аеропорт в місті Київ, район Жуляни). Запропонований науково-методичний апарат апробований до побудови інтегральної оцінки ризику забруднення навколишнього середовища в районах аеропортів України.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених у дисертаційній роботі досліджень вирішено актуальне наукове завдання, яке полягає в розробці методів і алгоритмів оброблення даних в інформаційній системі моніторингу забруднення навколишнього середовища в районах аеродромів продуктами згоряння авіаційного палива від ГТД ЛА на основі вербально-числового аналізу ризику для підвищення обґрунтованості прийняття управлінських рішень. В роботі розкриті особливості та закономірності удосконалення системи управління екологічною безпекою при оцінюванні екологічного впливу мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля на прикладі газотурбінних двигунів. При цьому основні наукові і практичні результати полягають у такому.

1. В роботі запропоновано алгоритм побудови інтегрального екологічного оцінювання стану навколишнього середовища ПРАТ, який відрізняється тим, що екологічна оцінка є середньозваженою геометричною величиною і може застосовуватися для вербально-числового аналізу екологічного ризику та враховує вплив ГТД ЛА. Алгоритм побудови інтегрального екологічного оцінювання стану навколишнього середовища ПРАТ передбачає використання запропонованої аналітичної моделі, яка характеризує закономірності впливу на стан довкілля в залежності від режимів роботи авіаційних ГТД на основі розрахунку викидів продуктів горіння авіаційного палива. Запропонований підхід надає можливість проведення екологічного оцінювання для визначення рівня забруднення навколишнього середовища на ПРАТ.

2. В роботі запропоновано науково-методичний апарат зниження викидів токсичних речовин шляхом незначної модифікації існуючих камер згоряння та перебудови камер згоряння.

3. Запропоновано науково-методичний підхід оцінювання стану аеродромних комплексів при забрудненні продуктами горіння авіаційного

палива від ГТД повітряних суден на території аеродромів, відмінною рисою, якого є можливість застосування інформаційної підсистеми моніторингу ПРАТ для подальшого аналізу прогнозування екологічних ризиків в системі управління екологічною безпекою ПРАТ.

4. Викиди від авіації відбуваються через використання палива для реактивних двигунів (гасу) і авіаційного бензину (для поршневих двигунів), які використовуються в якості палива для повітряних суден. При цьому основними забруднюючими речовинами є ті, які виникають в результаті спалювання (СО, СО<sub>2</sub>, вуглеводні і оксиди азоту, а також викиди SO<sub>2</sub>, які залежать від рівня сірки в паливі). Іншими шкідливими речовинами, які виділяються у відносно невеликих концентраціях, є N<sub>2</sub>O і CH<sub>4</sub>.

5. Як засіб програмної реалізації побудови інтегрального екологічного оцінювання станів ПРАТ використовувалася платформа NET Framework, заснована на використанні загальномовного середовища виконання Common Language Runtime (CLR). Вибір даної технології визначається можливостями платформи WPF, які використовувалися для реалізації графічної побудови дерева якостей ПРАТ. Для роботи з WPF застосовувалася NET-сумісна мова, тому використовувалась об'єктно-орієнтована мова програмування високого рівня C#. Для оцінки станів ПРАТ використовувався програмний комплекс побудови інтегральної оцінки станів об'єктів моніторингу (програма Integral Assessment). Програма Integral Assessment працює під управлінням операційної системи Windows версії 7 і вище. Для її функціонування необхідний програмний продукт Excel версії 2007 і вище. Програма Integral Assessment написана на мові C# в середовищі розробки Microsoft Visual Studio 2012 Professional.

6. Запропонований алгоритм програми побудови інтегрального екологічного оцінювання станів ПРАТ апробований до оцінювання ризику забруднення навколишнього середовища в районах аеропортів України.

7. Розроблений науково-методичний та програмне забезпечення орієнтовано на фахівців операторів державних систем екологічного



моніторингу при виконанні завдань управління екологічною безпекою та оцінки екологічних ризиків впливу газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля.

8. Достовірність наукових і практичних результатів підтверджена збігом отриманих результатів із відомими даними та перевіркою експериментальних досліджень. Основні наукові і практичні результати, що отримані в дисертаційній роботі впроваджені та можуть бути застосовані в системах екологічного моніторингу при вербально-числовому аналізі ризику для підвищення обґрунтованості прийняття управлінських рішень.

9. Мета дослідження, яка полягала у розробці методів і алгоритмів оброблення даних в інформаційній системі моніторингу забруднення навколишнього середовища в районах аеродромів продуктами згоряння авіаційного палива від ГТД ЛА на основі вербально-числового аналізу ризику для підвищення обґрунтованості прийняття управлінських рішень – досягнута, та всі часткові завдання вирішені повністю. Наукові результати досліджень є внеском в теорію розроблення наукових методів дослідження комплексного оцінювання та прогнозування впливу техногенного забруднення на навколишнє середовище та людину.

10. Основні положення опубліковані у 26 статтях в наукових журналах та збірниках наукових праць. Результати апробовано на 15 наукових конференціях, що підтверджено опублікованими тезами доповідей. Матеріали роботи були використані у 5 звітах науково-дослідної роботи.

11. Перспективним напрямком подальших досліджень є створення системи управління екологічною безпекою ПРАТ з прогнозуванням екологічних ризиків та підтримки прийняття управлінських рішень.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Абрамович Т.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. 339 с.
2. Авдеев Б. В., Гончар Л.Л. Способы снижения газовых вредных выхлопов дизельными двигателями: Межвузовский сборник научно-методических трудов // «Совершенствование наземного обеспечения авиации» Часть III, Воронеж, ВВАИИ, 2000. – с. 32-38.
3. Авдеев Б.В., Гончар Л.Л. Образование вредных веществ в автомобильных двигателях: Межвузовский сборник научно-методических трудов // «Совершенствование наземного обеспечения авиации» Часть III, Воронеж, ВВАИИ, 2000. – с. 20-24.
4. Авиационная акустика. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов (ч. 1) / Ред. Мунин А. Г. М.: Машиностроение, 1988 – 248 с.
5. Авиационные правила. Часть 34. охрана окружающей среды. эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. нормы и испытания / Межгосударственный авиационный комитет. 2003. – 93 с.
6. Автомобильный транспорт. Охрана окружающей среды. Экологическое обозрение. М., Информавтотранс, 1998. – 35 с.
7. АИ-222-25Ф – «Мотор Сич» [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.motorsich.com/rus/products/aircraft/tde/ai-222-25f/>
8. Акимов В.М. Основы надежности газотурбинных двигателей (репринт) [Текст] / В.М. Акимов // – М.: Эколит, 2011. – 208 с.
9. Аксенов И.Я., Аксенов В.И. Транспорт и охрана окружающей среды. – М., Транспорт, 1986. 176 с.
10. Александров И.А. Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных смесей. Л., Химия, 1975. – 320 с.
11. Анализ объектов окружающей среды. Инструментальные методы. Под ред. Р.Сониасси. пер. с англ. – М. Мир. – 1993. – 78 с.
12. Анализ эффективности работы газотурбинных установок с усовершенствованной схемой впрыска водяного пара в камеру сгорания и

паровым охлаждением газовой турбины: учебное пособие / А.В. Ефимов, Т.А. Гаркуша, Т.А. Есипенко – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 68 с.

13. Андреев В.А., Солобозов В. Топливо для летательных аппаратов XXI века // Наука и жизнь. 2001. No 3. – с. 23-25.

14. Андреев К.Д. Улучшение параметров работы ГТУ впрыском воды в проточную часть компрессоров // К.Д. Андреев, А.Л. Беркович, В.Г. Полищук, В.А. Рассохин / Вестник двигателестроения. – 2004. – № 2. – с. 18-20.

15. Арутюнова А.К. Комплексная оценка качества атмосферы города // Электронная промышленность. Наука. Технологии. Издания, 2004 г. Вып. 4. – с. 188-189.

16. Арутюнова А.К., Каракеян В.И. Оптимизация локальной системы мониторинга приземного слоя атмосферы города. // Электронная промышленность. Наука. Технологии. Издания, 2005 г. Вып. 1. – с. 61-66.

17. Афанасьев Ю. А., Фомин С. А. Мониторинг и методы контроля окружающей среды. Часть I. М., МНЭПУ, 1998. – 208 с.

18. Безопасность жизнедеятельности / Под общей ред. Белова С. В. М., Высшая школа, 2000. – 443 с.

19. Безуглая Э.Ю. и др. К оценке метеорологических условий загрязнения атмосферы. Тр. ГГО 1987, Вып. 511, с. 87-98.

20. Безуглая Э.Ю. Мониторинг состояния загрязнения городов. Л., Гидрометеиздат, 1986. – 200 с.

21. Беккер А. А., Агаев Т. Б. Охрана и контроль загрязнения природной среды.-Л., Гидрометеиздат, 1989, 362 с.

22. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

23. Беспамятнов Г. П., Кротов Ю. А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде: Справочник. – Л., Химия, 1995. –528 с.

24. Бойс М. Передовые схемы для газовых турбин в установках комбинированного цикла / М. Бойс / Газотурбинные технологии.– 2001.– с. 5-9.

25. Бондар О.І. , Машков О.А., Міхеєв В.С. Системний підхід щодо оцінювання екологічного впливу авіаційної техніки на стан довкілля/ Екологічні науки: науково-практичний журнал / К.: ДЕА, 2020. – № 1(28), с.191–200.

26. Бондар О.І., Машков О.А., Міхеєв С.В. Актуальні проблеми удосконалення системи управління екологічною безпекою при транскордонних екологічних конфліктах / 5-й Міжнародний конгрес “Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування”: збірник матеріалів. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 1 електр. опт. диск (DVD). Львів, 26–29 вересня 2018, с.85.

27. Бондар О.І., Новосельська Л.П., Іващенко Т.Г., Основи біологічної безпеки (екологічна складова). – Херсон: ФОП Гринь Д.С., 2014. – 324 с.

28. Буке И.И., Фомин С.А. Экологическая экспертиза и оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС). М., МНЭПУ, 1997. – 96 с.

29. Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды / Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 423 с.

30. Волков А.Г. Исследование эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей. Часть 1. Газотурбинные установки [Текст] / А.Г. Волков, О.Д. Дегтярев, Г.В. Павленко // Х.: ХАИ, 2006. – 56 с.

31. Волков А.Г. Исследование эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей. Часть 2. Силовые установки самолетов [Текст] / А.Г. Волков, О.Д. Дегтярев, Г.В. Павленко // Х.: ХАИ, 2007. – 57 с.

32. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценка экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. – М. Экономика, – 1996. – 96 с.

33. Гаевский С. А. Автоматика авиационных газотурбинных силовых установок / С. А. Гаевский, Ф. Н. Морозов, Ю. П. Тихомиров; под ред. проф. А. В. Штоды. – Москва: Воениздат, 1980. – 247 с.

34. Газотурбинный двигатель E70/8РД. Двухтопливный морского исполнения. Технические условия E80001100ТУ / ОАО «НПО «Сатурн», 2011. – 64 с.

35. Газотурбинный двигатель M70ФРУ для кораблей с динамическими принципами поддержания (КДП). Технические условия 830000800ТУ / ОАО «НПО «Сатурн», 2008. – 78 с.

36. Голубев Н.В., Новиков Ю.В. Окружающая среда и транспорт. М.: Транспорт, 1987, – 102 с.

37. Гончар Л.Л. Способы снижения газовых вредных выхлопов двигателями с искровым зажиганием: Межвузовский сборник научно методических трудов // «Совершенствование наземного обеспечения авиации» Часть III. – Воронеж, ВВАИИ, 2000. – с. 24-27.

38. Гончар Л.Л. Экспериментальная оценка загрязнения воздуха продуктами сгорания авиационного топлива на технической позиции: Сборник научных трудов // Воронеж, ВИРЭ, 2002. – с.79-83.

39. Гончар Л.Л., Марьичев В. В. Снижение негативного воздействия продуктов сгорания топлива на аэродромах: Межвузовский сборник научно методических трудов // «Совершенствование наземного обеспечения авиации» Часть III. – Воронеж, ВВАИИ, 2001. – с. 21-22.

40. ГОСТ 22283-88. Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения.

41. ГОСТ 22606-77 Системы зажигания авиационных газотурбинных двигателей электрические. Термины и определения. – Введ. 1978-07-01. – М.: Стандартиформ, 1978. – 6 с.

42. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли пыли, дымы и туманы. – Изд. 2-е. – Пер. с англ. Под ред. Н.А. Фукса. – Л.: Химия, 1972. – 428 с.

43. Двигатель АЛ-31ФП. Руководство по технической эксплуатации 96 ФП. РЭ 1 (96-А/АМР-00-Р) [Текст] // ОАО «НПО «Сатурн», 2004. – 2035 с.
44. Двигатель ПС-90А. Руководство по эксплуатации 94-00-807 РЭ (Книга 1) [Текст] // ОАО «Авиадвигатель», 1990. – 634 с.
45. Двухконтурный двухвальный бесфорсажный турбореактивный двигатель АЛ-55И. Руководство по эксплуатации (55И-АММ/SDS-I, 55И-АММ/SDS-II, 55И-АММ/СММ) [Текст] // ОАО «НПО «Сатурн», 2013. – 1207 с.
46. Егоренков Д.Л. Основы математического моделирования. Построение и анализ моделей с примерами на языке Matlab. [Текст] / Д.Л. Егоренков, А.Л. Фрадков, В.Ю. Харламов // СПб.: БГТУ, 1994. – 190 с.
47. Епифанов С.В. Анализ методик синтеза математических моделей газотурбинных двигателей на этапе запуска [Электронный ресурс] / С.В. Епифанов, Ф.Ф.Сиренко, И.И. Головин // Электронный журнал «Авиационно-космическая техника и технология», 2013. – №10 (107). – Режим доступа: <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/АКТТ/2013/АКТТ1013/EpifSir.pdf>.
48. Ефимов А.В. Анализ эффективности работы газотурбинных установок с усовершенствованной схемой впрыска водяного пара в камеру сгорания и паровым охлаждением газовой турбины: учебное пособие / А.В. Ефимов, Т.А. Гаркуша, Т.А. Есипенко – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 68 с.
49. Жарков А. Л., Гончар Л. Л. Воздействие отработавших газов двигателей на окружающую среду: Межвузовский сборник научно-методических трудов // «Совершенствование наземного обеспечения авиации» Часть I. – Воронеж, ВВАИИ, 2000. – С. 121-124.
50. Жегалин О.И., Лупачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей. М., Транспорт, 1985. – 120 с.
51. Житомирский Г.И. Конструкция самолетов: учебник / Г. И. Житомирский. – М.: Машиностроение, 2005. – 406 с.
52. Запорожец А.И. Результаты исследования неблагоприятных условий загрязнения атмосферного воздуха выбросами вредных веществ от

авиационных двигателей / Проблемы охраны труда и окружающей среды в производственных процессах гражданской авиации, – Сб. научных трудов КНИГА, Киев, 1989.

53. Зрелов В.А. Отечественные газотурбинные двигатели. Основные параметры и конструктивные схемы / В.А. Зрелов. – М.: Машиностроение, 2005. – 280 с.

54. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. 560 с.

55. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок (Кн. 5) / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин и др. // М.: Машиностроение, 2008. – 186 с.

56. Инструктивный материал по сборам за авиационную эмиссию, связанную с местным качеством воздуха. Док. 9884. ИКАО, 1 издание, 2007.

57. Інтеграція авіаційних силових установок і літальних апаратів / [Терещенко Ю.М., Кулик М.С., Панін В.В. та ін.]; за ред. Ю.М. Терещенка. — К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 344 с.

58. Казанджан П.К. Теория авиационных двигателей / П. К. Казанджан, Н. Д. Тихонов, В. Т. Шулекин. - М.: Транспорт, 2000. – 287 с.

59. Калабеков А.Л. Проблемы экологии: экологический мониторинг в оценке загрязнения городской среды. М., 2003. – 215 с.

60. Конструкція літальних апаратів: підруч. / А.П. Бойко, О.В. Мамлюк, Ю. М. Терещенко, В.М. Цибенко; за ред. Ю. М. Терещенка. – К.: Вища освіта, 2001. – 383 с.

61. Копелев С.З. Конструкция и расчет систем охлаждения ГТД / С.З. Копелев, А.Ф. Слитенко. – Харьков: Изд-во Основа, 1994. – 240 с.

62. Кравченко И. В. Силовые установки летательных аппаратов / И. В. Кравченко, И. Л. Христофоров. – М.: МАИ, 2003. – 104 с.

63. Кулагин В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Кн. 1-3. / В.В. Кулагин / М.: Машиностроение, 2002. – 616 с. (Кн. 1-2), 464 с (Кн. 3).

64. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Лефевр // М.: Мир, 1986. – 568 с.
65. Малахов Л.П. Оценка содержания вредных продуктов эмиссии авиационных двигателей в воздухе аэропортов гражданской авиации. «Методы и средства защиты окружающей среды в авиационной промышленности» Сб. науч. трудов МАИ. – М., МАИ, 1980, – с. 92-96.
66. Маслов В.А., Дзюбенко О.Л. Моделирование и прогнозирование загрязнения приаэродромных территорий выбросами воздушных судов государственной авиации: монография / М., Русайк, 2017, – 110 с.
67. Машков О.А., Жукаускас С.В., Нігородова С.А., Міхеєв В.С. Розвиток теорії функціональної стійкості екологічних систем, як стійкості функціонала екологічної безпеки / Екологічні науки: науково-практичний журнал. – К.ДЕА, 2019, с. 62-76.
68. Машков О.А., Мамчур Ю.В., Міхеєв С.В. Сучасні проблеми управління екологічною безпекою з використанням пілотованих літальних апаратів / “Проблеми екологічної безпеки” XVI міжнародна науково-технічна конференція: Матеріали конференції – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2018 – с.65.
69. Машков О.А., Міхеєв С.В. Проблеми математичного моделювання та застосування методів механіки для забезпечення екологічної безпеки складних об’єктів / Матеріали Міжнародної наукової конференції присвяченої 100-річчю Національної академії наук України: «Мікро- та нанонеоднорідні матеріали: моделі та експеримент», Львів, Україна, «Растр-7», 17-18 вересня 2018, с. 16-18.
70. Международная организация гражданской авиации. Комитет по охране окружающей среды от воздействия авиации. Доклад 1-го совещания (Монреаль, июнь, 1986): Документ ИКАО 9499, САЕР/1. Монреаль, 1986. – 235 с.



71. Международная организация гражданской авиации. Рекомендации, касающиеся деятельности ИКАО в области окружающей среды: Раб. док. 134 сессии Совета ИКАО. С-WP/9375,1991. – с. 1-17.

72. Международная организация гражданской авиации. Комитет по охране окружающей среды от воздействия авиации. Доклад 2-го совещания (Монреаль, декабрь, 1991): Документ ИКАО 9592, САЕР/2. Монреаль, 1992. – 205 с.

73. Мельников Б. Н. Анализ основных результатов и новых направлений деятельности ИКАО в области экологической безопасности воздушного транспорта: Сборник научных трудов // «Проблемы безопасности полетов». – М., ВИНТИ, 1994, № 3. 80 с.

74. Михеев В.С. Алгоритмы регулирования расхода топлива САУ ГТД / Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2004 / Тези доповіді. – Х. НАКУ «ХАІ». –2004, – с.159.

75. Михеев В.С. Повышение отказоустойчивости регуляторов САУ / Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2004 / Тези доповіді. – Х. НАКУ «ХАІ». – 2004, – с.157.

76. Михеев В.С. Прибор оперативного контроля информационных потоков «ALEX» / Технологические системы: Научно-технический журнал. – К.: 2001. – №11, – с.12-14.

77. Михеев В.С. Применение принципа структурной избыточности при проектировании САУ ГТД / Авіаційно-космічна техніка і технології. Х.: НАКУ «ХАІ», – 2005, Вип. 10(26), с. 163-165.

78. Михеев В.С. Применение системного подхода для обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД / Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2005 / Тези доповіді. – Х. НАКУ «ХАІ». – 2005, – с. 165.

79. Михеев В.С. Разработка алгоритмов регулирования расхода топлива электронного регулятора ГТД / Научно-технический журнал: Вестник двигателестроения, №2, 2004, с.193-196.

80. Михеев С.В. Проблеми оцінювання екологічного впливу мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля на прикладі газотурбінних двигунів / Матеріали науково-технічної конференції “Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу” м. Київ, ДЕА, 24-25 квітня 2018 р., с. 20.

81. Михеев В.С. Розвиток теорії функціональної стійкості екологічних систем, як стійкості функціонала екологічної безпеки /Машков О.А., Жукаускас С.В., Нігородова С.А., Михеев В.С. / Екологічні науки: науково-практичний журнал / К.: ДЕА, 2019. – № 4(27), с. 62-77.

82. Михеев В.С. Рубрикатор завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою космічних систем ДЗЗ та ГІС (нормативно-методичний документ) / Пашков Д.П., Бондар О.І., Машков О.А., Шевченко Р.Ю., Михеев В.С., Патлашенко Ж.І., Тимошенко М.М./ Київ, вид ДЕА, 2018. 26 с.

83. Михеев С.В. Assessment of surface air pollution on the technical position of aircraft preparation for departure / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон: Вид. ХНТУ, 2018., с. 95.

84. Михеев С.В. Environmental protection technology by changing the geometric characteristics of the combustion chamber, the zone distribution of fuel and the transfer of air from the compressor to the atmosphere / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон: Вид. ХНТУ, 2017., с. 256.

85. Михеев С.В. Екологічна оцінка впливу аеродромних комплексів на природне середовище приаеродромної території / Матеріали науково-

технічної конференції «Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу» м. Київ, ДЕА, 24-25 квітня 2019 р., с.49.

86. Міхеєв С.В. Застосування інформаційних технологій для оцінювання емісії забруднюючих речовин авіадвигунів / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон: Вид. ХНТУ, 2016., с. 178.

87. Міхеєв С.В. Інформаційні технології оцінки екологічної безпеки навколишнього середовища в районах аеродромів України / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон: Вид. ХНТУ, 2019., с. 89.

88. Міхеєв С.В. Сучасні технології визначення забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів / Матеріали 3 Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації», Державний університет телекомунікацій МОН України, 11-12 квітня 2019 р., с.68.

89. Новиков Ю.В. Экология, окружающая среда и человек. М.: Фаир, 1998. – 310 с.

90. Новиков Ю.В., Голубев И.Р. Окружающая среда и транспорт. – М., Транспорт, 1987. – 207с.

91. Ноздрин В.И. Эффективность инициативных мер по снижению расхода топлива и загрязнения окружающей среды / В.И. Ноздрин // Проблемы безопасности полетов. – 2003. – №7. – с. 35-38.

92. Охрана окружающей среды. Том 1. Авиационный шум: Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО, Издание 3, июль 2008 г.

93. Охрана окружающей среды. Том 2. Эмиссия авиационных двигателей: Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО, Издание 5, июль 2014 г.

94. Пивторак Р.М. Экологические ряды авиационных двигателей [Текст] / Р.М. Пивторак, А.А. Пивторак // Вісник НАУ, 2008. № 3. – с. 302-305.
95. Подольский В.П., Артюхов В.Г., Турбин В.С., Канищев А.Н. Автотранспортное загрязнение придорожных территорий. Воронеж, ВГУ, 1999. – 276 с.
96. Полищук А.И. и др. Автоматизированная система сбора, обработки и обобщения режимной информации о загрязнении воздуха в городах. Тр. ГГО, 1979. Вып. 436, с. 124-132.
97. Поповичева О.Б., Старик А.М. Авиационные сажевые аэрозоли: физико-химические свойства и последствия эмиссии в атмосферу // Известия РАН. ФАО. 2007. Т 43, № 2. – с. 147-164.
98. Приложение 14 к Конвенции о Международной организации гражданской авиации. Воздушные судна. Монреаль, 2009. – 350 с. [ИКАО. Международные стандарты и рекомендуемая практика].
99. Присяжний В.І., Міхєєв В.С. Аналіз екологічного стану та напрямків впливу газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля / К.: ДЕА, 2019. – № 4(27), с. 5-11.
100. Программы создания и развития перспективных двигателей. Разработка экологически чистых двигателей в Германии / Экспресс – информация «Авиационное двигателестроение». 2010. №5. – с. 1-2.
101. Руководство по технической эксплуатации самолета RRJ-95B/LR/ Раздел 72 – Газотурбинный двигатель SaM 146 [Текст] // ЗАО ГСС, 2008. – 937 с.
102. Семейство перспективных двигателей ПД-14 [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.avid.ru/pd14/>.
103. События в гражданской авиации и окружающая среда: Рабочий документ 38-й сессии Ассамблеи ИКАО – [www.icao.int](http://www.icao.int).
104. Старик А.М., Фаворский А.Н. Авиация и атмосферные процессы // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. 2015. Т. 20, № 1 (40). – с. 1-20.

105. Теорія авіаційних газотурбінних двигунів: /Ю.М. Терещенко, Л.Г. Волянська, М.С. Кулик, В.В. Панін; за заг. ред. проф. Ю.М. Терещенка. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 500 с.
106. Технические характеристики двигателя АЛ-31СТ [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.turbunist.ru/144-texnicheskie-karakteristiki-dvigatelya-al-31st.html>
107. Трофімов І.Л. Аналіз впливу авіаційного транспорту на забруднення атмосфери // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2014. № 1. С. 119–124.
108. Турбогенератор синхронный трехфазный типа ТЗФГ-110-2МУЗ. Техническое описание и руководство по монтажу и эксплуатации ОБС.460.922 РЭ //АО «Электросила», 2002. – 71 с.
109. Флоров И.Ф. Методы оценки эффективности применения двигателей в авиации / И. Ф. Флоров // Труды ЦИАМ. – 1985. – № 1099. – 260 с.
110. Франчук Г.М. Екологічна оцінка впливу авіаційних транспортних процесів на якість компонентів довкілля [Текст] / Г.М. Франчук, А.М. Антонов, С.М. Маджд, Я.В. Загоруй // Вісник НАУ. 2006. № 1. – с. 184-190.
111. Франчук Г.М. Екологія, авіація і космос: підручник [Текст] / Г.М. Франчук, В.М. Ісаєнко. – К.: НАУ, 2010. – 456 с.
112. Халецкий Ю.Д. ИКАО: новый стандарт на шум самолетов гражданской авиации // Двигатели. 2014. No 2 (92). С. 8-11.
113. Чен, К. Matlab в математических исследованиях / К. Чен, П. Джиблин, А. Ирвинг // М.: Мир, 2001. – 353 с.
114. Экологические проблемы в авиации и пути их решения / В.А. Миягашева, Д.Р. Иншаков, А.В. Пономарев, О.Г.Бойко / Актуальные проблемы авиации и космонавтики, М., 2016, т.1, с. 808-810.
115. Экология / Русско-английский терминологический словарь. М., 1993. – 120с.

116. ([http://www.bioethanol.ru/bioethanol/news/kitajj\\_nachinaet\\_ispolzovat\\_biotoplivo\\_v\\_grazhdanskoy\\_aviatsii/](http://www.bioethanol.ru/bioethanol/news/kitajj_nachinaet_ispolzovat_biotoplivo_v_grazhdanskoy_aviatsii/)).

117. Asgari, H. Modeling and simulation of the start-up operation of a heavy-duty gas turbine by using NARX models / H. Asgari, X. Chen, R. Sainudiin, M. Morini, M. Pinelli and others // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014 Dusseldorf, Germany. GT2014-25056.

118. Boeing 747-400 Operators manual [Текст] // Boeing Commercial Airplanes Group, 2000. – 964 p.

119. Chapman, S.J. Matlab programming for engineers (second edition) [Текст] / S.J. Chapman // Thomson Learning, 2002. – 477 p.

120. EU states tread warily on naming and shaming aircraft operators that have failed to comply with EU ETS rules. <http://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=2021>.

121. Gaudet, S.R. Development of a dynamic modeling and control system design methodology for gas turbines [Текст] / S.R. Gaudet // Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada, 2007. – 312 p.

122. Goodman J.C. Aviation and the Environment Nova Science Publishers, Inc., 2009, 515 pages, ISBN-10: 160692320X, ISBN-13: 9781606923207.

123. Gunston, B. World encyclopedia of aero engines, 5th edition. [Текст] / B. Gunston // UK: Sutton Publishing Limited, 2006. – 197 p.

124. Hirsch, N. Space ignition method using microwave radiation [Текст] / N. Hirsch, A. Gallatz // MTZ Worldwide, 2009. – vol. 70, issue 3. – pp. 32-35.

125. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%B5%D0%B2\\_\(%D0%B0%D1%8D%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%B5%D0%B2_(%D0%B0%D1%8D%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82))

126. ICAO Aircraft engine emission Databank. November 2016. <https://www.easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>

127. ICAO Aircraft engine emission Databank. November 2016. <https://www.easa.europa.eu/documentlibrary/icao-aircraft-engine-emissions-data-bank>

128. Jones. ALL THE WORLD'S AIRCRAFT. P. Jackson. Ninety-fifth year of issue 2004-2005. – 2004. – 860 p.
129. Jones, G. Extrapolation of compressor characteristics to the low-speed region for sub-idle performance modeling [Текст] / G. Jones, P. Pilidis // Proceedings of ASME Turbo Expo 2002 Amsterdam, Netherlands. GT-2002-30649.
130. Jones, G. Performance modeling of windmilling gas turbines: Eng. D. Thesis / Geoffrey B. Jones. – Cranfield, 2002. – 207 p.
131. Lee D., Fahey D.W., Forster P.M. et al. Aviation and global climate change in 21st century // *Atm. Environ.* 2009. Vol. 43. P. 3520–3537.
132. Liu X., Penner J.E., Wang M. Influence of anthropogenic and black carbon on upper tropospheric clouds in the NCAR CAM3 model coupled to the IMPACT global aerosol model // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. D03204. doi:10.1029/2009JD010492.
133. Mashkov O.A., Mikheev V.S., Nigorodova S.A., Zhukauskas S.V. System support of ecological security of the ecosystem by creating a system of tips for making informational ecological decisions / *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / К., ДЕА, 2020. – № 2(29), 2020, с. 133–142.
134. Olsen S.C., Brasseur G.P., Wuebbles D.J., Barret S.R.H. et al. Comparison of model estimates of the effects of aviation emissions on atmospheric ozone and methane // *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40. P. 6004-6009. doi:10.1002/2013GL057660.
135. On Board. A sustainable future. Environmental Report. – ICAO, 2016.
136. Palme, T. Compressor Map prediction by neural networks [Текст] / T. Palme, P. Waniczek, H. Honen, M. Assadi, P. Jeschke // *Journal of energy and power engineering*, 2012. – № 6. – p. 1651-1662.
137. Panov, V. GasTurboLib: Simulink Library for gas turbine engine modelling [Текст] / V. Panov // Proceedings of ASME Turbo Expo 2009 Orlando, USA. GT2009-59389.

138.TR Laser technology revolutionizes industry [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.ctr.at/en/r-d-technologies/laser.html?print=/proc/self/environ.h>.

139. Walsh, P.P. Gas turbine performance (Second edition) [Текст] / P.P. Walsh, P. Fletcher // Blackwell Publishing Ltd., 2004. – 658 p.

140. Xue, D. Linear Feedback Control. Analysis and design with Matlab [Текст] / D. Xue, Y.Chen, D.P. Atherton // Society for industrial and applied mathematics, 2007. – 367 p.

141. Zachos, P. Gas Turbine Sub-idle Performance Modelling; Altitude relight and windmilling: Ph. D. Thesis / Pavlos K. Zachos. – Cranfield, 2010. – 239 p.

142. <https://www.unian.net/tourism/news/10869257-v-ukraine-rastut-aviaperevozki-statistika-poletov-za-yanvar-2020-goda.html>.

143. <https://www.avianews.com/ukraine/>.

144. <https://menr.gov.ua/news/31768.html>.



## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях України*

1. Китайчук И.Е., Михеев В.С. Прибор оперативного контроля информационных потоков «ALEX» / Технологические системы: Научно-технический журнал. – К.: 2001. – №5(11), с.12–14.
2. Кулик А.С., Симонов В.Ф., Пасичник С.Н., Сидоренко Н.Ф., Панов В.М., Михеев В.С. Разработка алгоритмов регулирования расхода топлива электронного регулятора ГТД / Научно-технический журнал: Вестник двигателестроения, №2, 2004, с.193–196.
3. Применение принципа структурной избыточности при проектировании САУ ГТД / Ю.Ф. Басов, И.Е. Китайчук, В.С. Михеев, В. М. Панов, Н.Ф. Сидоренко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 10(26). – С. 163–165.
4. Программно-технический комплекс для испытаний газотурбинных двигателей / Михеев В.С., Китайчук И.Е., Жеребкина Т.Ф., Авраменко И.Е. / *Радіоелектронні і компютерні системи*, – 2007, №6(25), с. 120–122.
5. Определение коэффициента ПД-закона управления дозатором топлива из состава САУ ГТД / Китайчук И.Е., Михеев В.С., Модиевский Е.А., Шийка А.Н. / Х.: НАКУ «ХАІ», – 2008, Вип. 9(56), с.138–142.
6. Особенности стартовой раскрутки ГТД с помощью встроенной вентильной электрической машины / Китайчук И.Е., Михеев В.С., Модиевский Е.А., Остроумов Б.В. / Х.: НАКУ «ХАІ», – 2009, Вип. 8(65), с.143–147.
7. Присяжний В.І., Міхеев В.С. Аналіз екологічного стану та напрямків впливу газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля / К.: ДЕА, 2019. – № 4(27), с. 5–11.

8. Міхеєв В.С. Розвиток теорії функціональної стійкості екологічних систем, як стійкості функціонала екологічної безпеки /Машков О.А., Жукаускас С.В., Нігородова С.А., Міхеєв В.С. / Екологічні науки: науково-практичний журнал / К.: ДЕА, 2019. – № 4(27), с. 62–77.

9. Бондар О.І., Машков О.А., Міхеєв В.С. Системний підхід щодо оцінювання екологічного впливу авіаційної техніки на стан довкілля / Екологічні науки: науково-практичний журнал / К.: ДЕА, 2020. – № 1(28), 2020, с. 191–200.

10. Mashkov O.A., Mikheev V.S., Nigorodova S.A., Zhukauskas S.V. System support of ecological security of the ecosystem by creating a system of tips for making informational ecological decisions / Екологічні науки: науково-практичний журнал / К., ДЕА, 2020. – № 2(29), 2020, с. 133–142.

11. Бондар О.І., Машков О.А., Міхеєв В.С. Системний підхід щодо створення системи підтримки екологічних рішень для забезпечення екологічної безпеки держави / Екологічні науки: науково-практичний журнал. К.: ДЕА, 2020. – № 3(30), 2020, с. 30–38.

12. Бондар О.І., Машков О.А., Міхеєв В.С., Жукаускас С.В., Нігородова С.А. Технологія побудови автоматизованої системи екологічного моніторингу з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів / Екологічні науки: науково-практичний журнал / К.: ДЕА, 2020.-№ 4(31), 2020, с. 11-19.

***Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

13. Михеев В.С. Повышение отказоустойчивости регуляторов САУ / Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2004 / Тези доповіді. – Х. НАКУ «ХАІ». – 2004, – с.157.

14. Михеев В.С. Алгоритмы регулирования расхода топлива САУ ГТД / Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2004 / Тези доповіді. – Х. НАКУ «ХАІ». – 2004, – с.159.

15. Михеев В.С. Применение системного подхода для обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД / Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2005 / Тези доповіді. – Х. НАКУ «ХАІ». – 2005, – с.165.

16. Міхеєв С.В. Застосування інформаційних технологій для оцінювання емісії забруднюючих речовин авіадвигунів / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.– Херсон: Вид. ХНТУ, 2016., с. 178.

17. Міхеєв С.В. Environmental protection technology by changing the geometric characteristics of the combustion chamber, the zone distribution of fuel and the transfer of air from the compressor to the atmosphere / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.– Херсон: Вид. ХНТУ, 2017., с. 256.

18. Міхеєв В.С. Рубрикатор завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою космічних систем ДЗЗ та ГІС (нормативно-методичний документ) / Пашков Д.П., Бондар О.І., Машков О.А., Шевченко Р.Ю., Міхеєв В.С., Патлашенко Ж.І., Тимошенко М.М./ Київ, вид ДЕА, 2018. 26 с.

19. Машков О.А., Мамчур Ю.В., Міхеєв С.В. Сучасні проблеми управління екологічною безпекою з використанням пілотованих літальних апаратів / “Проблеми екологічної безпеки” XVI міжнародна науково-технічна конференція: Матеріали конференції — Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2018 с.65.

20. Міхеєв С.В. Assessment of surface air pollution on the technical position of aircraft preparation for departure / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.– Херсон: Вид. ХНТУ, 2018., с. 95.

21. Михеєв С.В. Проблеми оцінювання екологічного впливу мобільних техногенних об'єктів на стан довкілля на прикладі газотурбінних двигунів / Матеріали науково-технічної конференції “Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу” м. Київ, ДЕА, 24–25 квітня 2018 р., с. 20.

22. Машков О.А., Михеєв С.В. Проблеми математичного моделювання та застосування методів механіки для забезпечення екологічної безпеки складних об'єктів / Матеріали Міжнародної наукової конференції присвяченої 100-річчю Національної академії наук України: «Мікро- та нанонеоднорідні матеріали: моделі та експеримент», Львів, Україна, «Растр-7», 17–18 вересня 2018, с. 16–18.

23. Бондар О.І., Машков О.А., Михеєв С.В. Актуальні проблеми удосконалення системи управління екологічною безпекою при транскордонних екологічних конфліктах / 5-й Міжнародний конгрес “Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування”: збірник матеріалів. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 1 електр. опт. диск (DVD). Львів, 26–29 вересня 2018, с.85.

24. Михеєв С.В. Інформаційні технології оцінки екологічної безпеки навколишнього середовища в районах аеродромів України / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон: Вид. ХНТУ, 2019., с. 89.

25. Михеєв С.В. Сучасні технології визначення забруднюючих речовин газотурбінних двигунів мобільних техногенних об'єктів / Матеріали 3 Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації», Державний університет телекомунікацій МОН України, 11–12 квітня 2019 р., с.68;

26. Михеєв С.В. Екологічна оцінка впливу аеродромних комплексів на природне середовище приаеродромній території / Матеріали науково-

технічної конференції «Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу» м. Київ, ДЕА, 24–25 квітня 2019 р., с.49;

27. Бондар О.І., Машков О.А., Міхеєв В.С. Системний підхід до визначення та усунення екологічних загроз та ризиків України /Актуальні питання техногенної безпеки України: Матеріали II Всеукраїнської наукової конференції. Миколаїв: Видавець Торубара В.В., 2020. – с. 155–160.

## АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Національного центру управління та випробувань космічних засобів,  
канд. техн. наук, старш. наук. співр.



Володимир ПРИСЯЖНИЙ

« 04 » грудня 2018 року

А К Т

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
Міхеєва Володимира Сергійовича «Оцінювання екологічного впливу мобільних  
техногенних об'єктів на стан довкілля на прикладі газотурбінних двигунів»

Комісія Національного центру управління та випробувань космічних засобів у складі: голови комісії – першого заступника начальника Національного центру Волоха К.П., начальника відділу науково-дослідної та випробувальної роботи, канд. техн. наук Мамарева В.М. та головного фахівця відділу науково-дослідної та випробувальної роботи, канд. техн. наук Кутового О.М. у період з 3 по 4 грудня 2018 року розглянула основні результати дисертаційного дослідження, отримані особисто Міхеєвим В.С., а саме:

алгоритм побудови інтегрального екологічного оцінювання стану навколишнього середовища приаеродромних територій, який відрізняється тим, що в ньому екологічна оцінка є середньозваженою геометричною величиною і може застосовуватися для вербально-числового аналізування екологічного ризику та враховує вплив газотурбінних двигунів літальних апаратів;

аналітичну модель, яка характеризує закономірності впливу на стан довкілля в залежності від режимів роботи авіаційних ГТД на основі розрахунку викидів продуктів горіння авіаційного палива, що надає можливість проведення екологічного оцінювання для визначення рівня забруднення навколишнього середовища на приаеродромній території;

науково-методичний апарат зниження викидів токсичних речовин шляхом незначної модифікації існуючих камер згоряння та їх перебудови;

метод оцінювання стану аеродромних комплексів при забрудненні продуктами горіння авіаційного палива від ГТД повітряних суден на території аеродромів, відмінною рисою, якого є можливість застосування інформаційної підсистеми моніторингу приаеродромних територій для подальшого аналізу прогнозування екологічних ризиків в системі управління екологічною безпекою приаеродромних територій.

Основні результати дисертаційних досліджень автора опубліковані у фахових наукових виданнях та апробовані та наукових конференціях, зокрема:

1. Кулик А.С., Симонов В.Ф., Пасичник С.Н., Сидоренко Н.Ф., Панов В.М., Міхеєв В.С. Разработка алгоритмов регулирования расхода топлива электронного

регулятора ГТД / Научно-технический журнал: Вестник двигателестроения, №2, 2004, с.193–196.

2. Программно-технический комплекс для испытаний газотурбинных двигателей / Михеев В.С., Китайчук И.Е., Жеребкина Т.Ф., Авраменко И.Е. / Радиоэлектронні і компютерні системи, – 2007, №6(25), с. 120–122.

3. Міхеєв С.В. Застосування інформаційних технологій для оцінювання емісії забруднюючих речовин авіадвигунів / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.– Херсон: Вид. ХНТУ, 2016., с. 178.

4. Міхеєв С.В. Environmental protection technology by changing the geometric characteristics of the combustion chamber, the zone distribution of fuel and the transfer of air from the compressor to the atmosphere / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.– Херсон: Вид. ХНТУ, 2017., с. 256.

5. Міхеєв В.С. Рубрикатор завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою космічних систем ДЗЗ та ГС (нормативно-методичний документ) / Пашков Д.П., Бондар О.І., Машков О.А., Шевченко Р.Ю., Міхеєв В.С., Патлашенко Ж.І., Тимошенко М.М./ Київ, вид ДЕА, 2018. 26 с.

На підставі розгляду представлених матеріалів комісія встановила та цим актом засвідчує, що результати вищезазначеного дисертаційного дослідження, отримані Міхеєвим Володимиром Сергійовичем, використані у Національному центрі при проведенні прикладних наукових досліджень щодо обґрунтування напрямків розвитку систем екологічного моніторингу приаеродромних територій, у тому числі шляхом використання космічних систем ДЗЗ та ГС. Алгоритм побудови інтегрального екологічного оцінювання стану навколишнього середовища приаеродромних територій передбачає використання аналітичної моделі, яка характеризує закономірності впливу на стан довкілля в залежності від режимів роботи авіаційних ГТД на основі розрахунку викидів продуктів горіння авіаційного палива. Запропонований підхід надає можливість проведення екологічного оцінювання для визначення рівня забруднення навколишнього середовища на приаеродромних територіях.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є підставою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії:

 К.П. Волох

Члени комісії:

 В.М. Мамарєв

 О.М. Кутовий

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Державної екологічної академії  
післядипломної освіти та управління  
доктор біологічних наук, професор,  
член-кор. НААН України

— О.І.Бондар

«26» 12 2018р.

### АКТ впровадження результатів дисертаційних досліджень Міхеєва Володимира Сергійовича

Комісія у складі: голови комісії – проректор з наукової роботи доктор технічних наук, професор Машков О.А. та члени комісії: завідувач кафедри екологічного моніторингу геоінформаційних та аерокосмічних технологій, доктор технічних наук, професор Пашков Д.П. та професор кафедри екологічного моніторингу геоінформаційних та аерокосмічних технологій доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Ващенко В.М., склала акт про впровадження результатів наукових досліджень на основі розглянутих матеріалів дисертаційної роботи Міхеєва Володимира Сергійовича, а саме:

запропоновано алгоритм побудови інтегрального екологічного оцінювання стану навколишнього середовища приаеродромній території, який відрізняється тим, що в ньому екологічна оцінка є середньозваженою геометричною величиною і може застосовуватися для вербально-числового аналізування екологічного ризику та враховує вплив газотурбінних двигунів літальних апаратів;

отримано аналітичну модель, яка характеризує закономірності впливу на стан довкілля в залежності від режимів роботи авіаційних газотурбінних двигунів на основі розрахунку викидів продуктів горіння авіаційного палива, що надає можливість проведення екологічного оцінювання для визначення рівня забруднення навколишнього середовища на приаеродромній території;

удосконалено науково-методичний апарат зниження викидів токсичних речовин шляхом незначної модифікації існуючих камер згоряння та їх перебудови;

отримав подальший розвиток метод оцінювання стану аеродромних комплексів при забрудненні продуктами горіння авіаційного палива від газотурбінних двигунів повітряних суден на території аеродромів, відмінною рисою, якого є можливість застосування інформаційної підсистеми



моніторингу приаеродромній території для подальшого аналізу прогнозування екологічних ризиків в системі управління екологічною безпекою приаеродромній території.


Результати дисертаційних досліджень увійшли до звітів науково-дослідних робіт, що виконувалися у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління: «Дослідження антропогенних джерел електромагнітного випромінювання та їх впливу на екосистеми» (0118U006675); «Розробка методики застосування ортотрансформованих космічних знімків для оцінки стану навколишнього середовища» (0118U005460); «Розробка нормативно-методичного документа – рубризатора завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою космічних систем ДЗЗ та ГС» (0118U005461); «Розробка проекту автоматизованої системи моніторингу довкілля Київської області» (0117U007076).

Матеріали роботи використані у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління в навчальному процесі при викладанні та підготовці матеріалів дисциплін «Методологія та організація наукових досліджень», «Філософія науки та інноваційного розвитку» та курсів підвищення кваліфікації фахівців в галузі екології та природокористування.

Дисертаційні дослідження Міхеева Володимира Сергійовича мають важливе значення для науки і технічних розробок. Рекомендувати та продовжити дослідження в даному напрямку.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався, у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії:  
доктор технічних наук, професор  О.А. Машков

Члени комісії:  
доктор технічних наук, професор  
доктор фізико-математичних наук,  Д.П. Пашков

старший науковий співробітник  В.М. Ващенко

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник Льотної академії

НАУ, доктор, професор

Неділько С.М.



**АКТ**

**Впровадження результатів дисертаційних досліджень  
Міхеєва Володимира Сергійовича**

Даним актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Міхеєва Володимира Сергійовича прийняті до впровадження в роботі Льотної академії Національного авіаційного університету для удосконалення інформаційного та програмного забезпечення імітаційної моделі інформаційної підсистеми моніторингу приаеродромної території.

Запропонований науково-методичний апарат дозволяє удосконалити науково-методичний апарат оцінювання стану аеродромних комплексів при забрудненні продуктами горіння авіаційного палива від ГТД повітряних суден на території аеродромів.

Результати дисертаційної роботи мають важливе значення та можуть бути застосовані при побудові системи управління екологічною безпекою приаеродромних територій.

Дисертаційні дослідження Міхеєва Володимира Сергійовича мають важливе значення для науки і технічних розробок.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є підставою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії:

Кандидат технічних наук, доцент,  
декан факультету обслуговування  
повітряного руху ЛА НАУ

А.М. Невиніцин

Члени комісії:

кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри обслуговування  
повітряного руху ЛА НАУ  
кандидат технічних наук,  
начальник центру безпілотних  
літальних апаратів ЛА НАУ

А.С. Пальоний

Ю.Г. Ковальов



# ГЕОТЕХНОЛОГІЯ

**Науково-виробнича впроваджувальна фірма**

02098, Україна, Київ-98, вул. Дніпровська набережна, 7, к.23.  
Тел./факс +38 044553-95-74; тел. +38 044553-01-79; моб. тел.  
+38 066 616 79 27 E-mail: [geotech-m@mail.ru](mailto:geotech-m@mail.ru)

## АКТ

### впровадження результатів дисертаційних досліджень Міхєєва Володимира Сергійовича

Засвідчуємо, що результати наукових досліджень на основі матеріалів дисертаційної роботи Міхєєва Володимира Сергійовича впроваджені у Науково-Виробничої Впроваджувальної Фірми «ГЕОТЕХНОЛОГІЯ».

Запропоновані методики, моделі, алгоритми, дозволили удосконалити апаратуру дистанційного керування вертикальної аеродинамічна енерговітроустановка ВАДЭУ-Інтегратор Природних Енергій ІПЭ «СМЕРЧ», та підвищити ефективність навчання операторів при ліквідації аварій вибухо-імпульсними технологіями в напрямку забезпечення екологічної безпеки. Переваги впровадження результатів дисертаційних полягають в тому, що запропоновані методи, моделі, алгоритми, що дозволяють оцінювати стан навколишнього середовища та аналізувати дані викидів продуктів горіння авіаційного палива від ГТД повітряних суден, надають можливість визначитися з ефективним режимом застосування силових установок літальних апаратів. Запропонований науково-методичний апарат дозволяє розрахувати та визначитися з природоохоронними заходами, що може позитивно впливати на стан довкілля в районі аеродрому для забезпечення екологічної безпеки. Розроблений науково-методичний апарат прийнято до застосування при проведенні екологічного оцінювання для визначення рівня забруднення навколишнього середовища на території аеродрому, що є підґрунтям для здійснення прогностичного аналізу та визначення рівня екологічних ризиків. Запропонований науково-методичний апарат дозволяє знизити обчислювальну складність за рахунок використання інтегральних екологічних оцінок та покращує можливості оператора при виникненні нештатних, аварійних ситуацій в порівнянні з існуючими методичними розробками.

Дисертаційні дослідження Міхєєва Володимира Сергійовича мають важливе значення для науки і технічних розробок. Рекомендуємо Міхєєву В.С. продовжити дослідження в даному напрямку.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався, у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Генеральний директор,  
Член Комітету з розвитку виробничої кооперації  
з підприємствами Торгово-Промислової палати України

Є.А. Мухін

«\_20\_» грудня 2018 року



## ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ТА РУЙНАЦІЯ ОЗОНОВОГО ШАРУ

### Викиди основних забруднюючих речовин у атмосферне повітря

Показники	
Площа території України, км <sup>2</sup>	603549
Середня наявна чисельність населення країни, млн.осіб	42,3
Площа сільськогосподарських угідь, млн га	41,5
Всього викидів забруднюючих речовин в атмосферу на одну особу	59,3 кг
у територіальному розрізі на 1 км <sup>2</sup>	4,4 т

Показники	Діоксид сірки, тис.т	Діоксид азоту, тис.т	Оксид вуглецю, тис.т	Неметанові леткі органічні сполуки, тис.т	Оксиди азоту (NO <sub>2</sub> ), тис.т	Аміак (NH <sub>3</sub> ), тис.т	Загальний обсяг ЗЧ (ЗЗЧ), тис.т	ГЧ <sub>10</sub> , тис.т	ГЧ <sub>25</sub> , тис.т
Усього	715,7	372,2	1761,1	181,3	372,5	16,8	341,6	54,1	21,2
Показники	Діоксид сірки, тис.т	Діоксид азоту, тис.т	Оксид вуглецю, тис.т	Неметанові леткі органічні сполуки, тис.т	Оксиди азоту (NO <sub>2</sub> ), тис.т	Аміак (NH <sub>3</sub> ), тис.т	Загальний обсяг ЗЧ (ЗЗЧ), тис.т	ГЧ <sub>10</sub> , тис.т	ГЧ <sub>25</sub> , тис.т
Усього	715,7	372,2	1761,1	181,3	372,5	16,8	341,6	54,1	21,2
Стаціонарні джерела	698,1	215,3	744,3	43,7	215,3	16,8	317,5	54,1	21,2
Пересувні джерела	17,6	156,9	1016,8	137,6	156,9	0,007	24,1	...	...
Викиди основних забруднюючих речовин у повітря на одну особу, кг	16,9	8,8	41,6	4,3	8,8	0,4	8,1	1,3	0,5
Викиди основних забруднюючих речовин на одиницю площі	1,2	...	3	0,3	0,6	0,03	0,6	0,1	0,04
м. Київ	8,0	5,3	2,4	1,3					

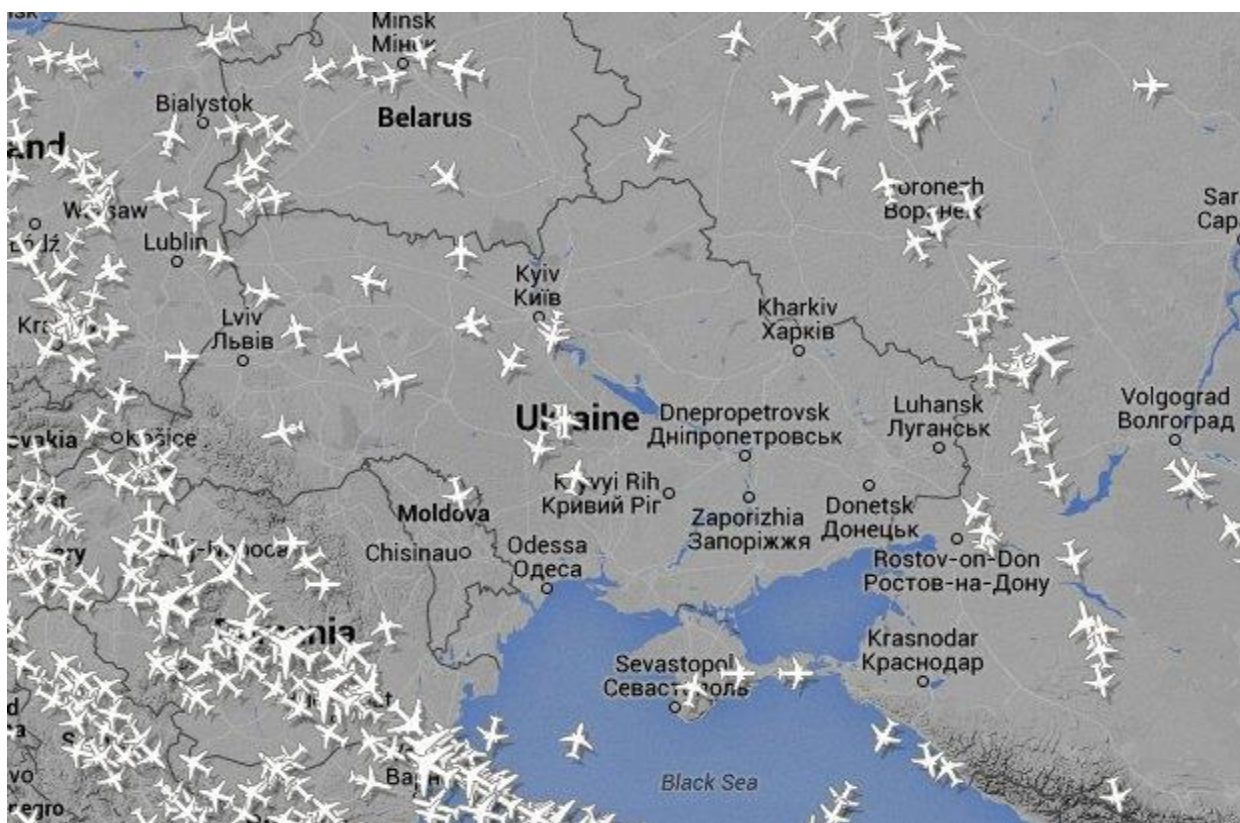
**Вміст забруднювальних речовин в атмосферному повітрі міст України за даними спостережень гідрометеорологічних організацій, 2018 р.**

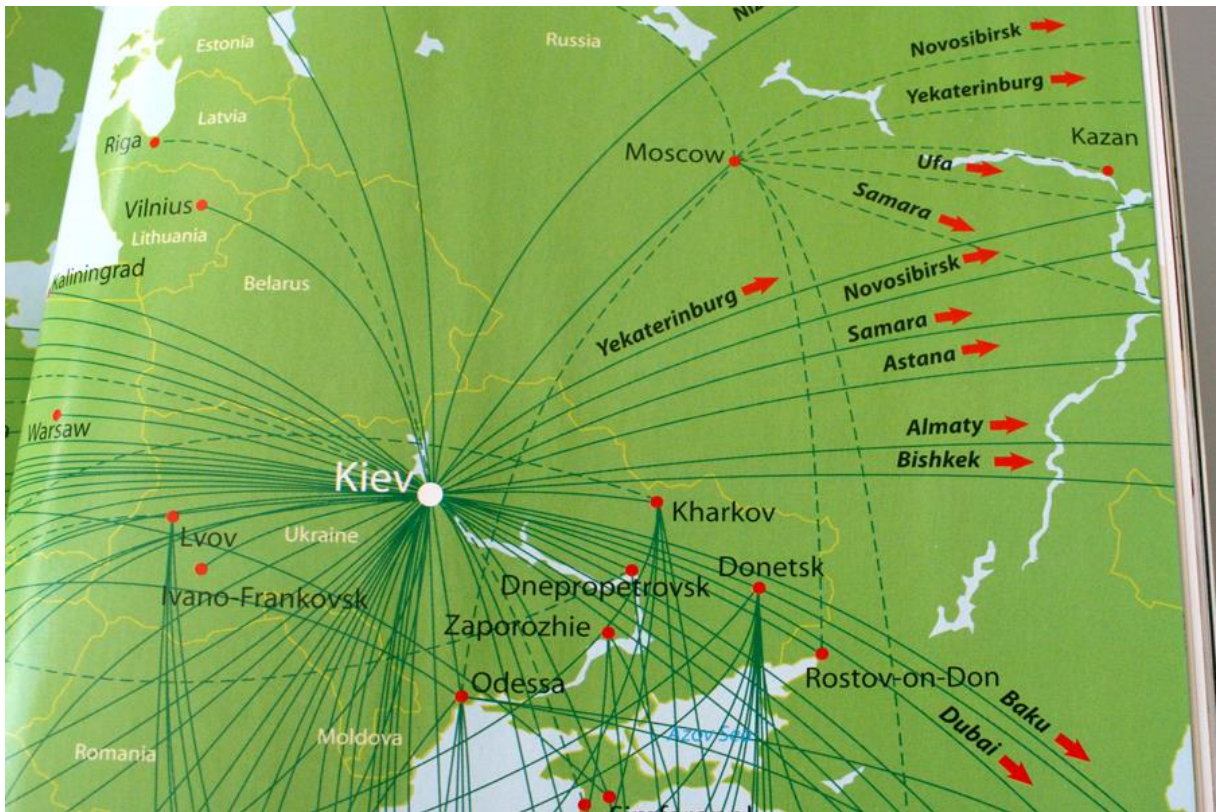
Речовина	Клас небезпеки	Кількість міст, охоплених спостереженнями	Середньорічний вміст, мг/м <sup>3</sup>	Середньодобові гранично допустимі концентр. (ГДКс.д.) мг/м <sup>3</sup>	Максимальний вміст, мг/м <sup>3</sup>	Максимально разові гранично допустимі концент. (ГДКм.р.) мг/м <sup>3</sup>	Частка міст (%), де середньорічний вміст перевищував:			Частка міст (%), де максимальний разовий вміст перевищував:		
							1 ГДКс.д.	5 ГДК с.д.	10 ГДК с.д.	1 ГДК м.р	5 ГДК м.р	10 ГДК м.р
Завислі	3	39	0,13	0,15	2,0	0,5	28	0	0	49	0	0
Діоксид сірки	3	39	0,015	0,050	0,236	0,500	0	0	0	0	0	0
Оксид вуглецю	4	37	1,7	3,0	44,0	5,0	8	0	0	51	3	0
Діоксид азоту	3	39	0,06	0,04	0,66	0,20	56	0	0	51	0	0
Оксид азоту	3	23	0,03	0,06	0,61	0,40	9	0	0	4	0	0
Сірководень	2	11	0,002	-*	0,039	0,008	-	-	-	36	0	0
Фенол	2	17	0,004	0,003	0,041	0,010	41	0	0	82	0	0
Фтористий	2	11	0,004	0,005	0,048	0,020	18	0	0	55	0	0
Хлористий	2	10	0,05	0,20	0,54	0,20	0	0	0	30	0	0
Аміак	4	16	0,02	0,04	0,43	0,20	6	0	0	6	0	0
Формальдегід	2	30	0,007	0,003	0,170	0,035	83	3	0	53	0	0

## ІНФРАСТРУКТУРА АЕРОПОРТІВ ТА КАРТА ПОВІТРЯНИХ МАРШРУТІВ В УКРАЇНІ

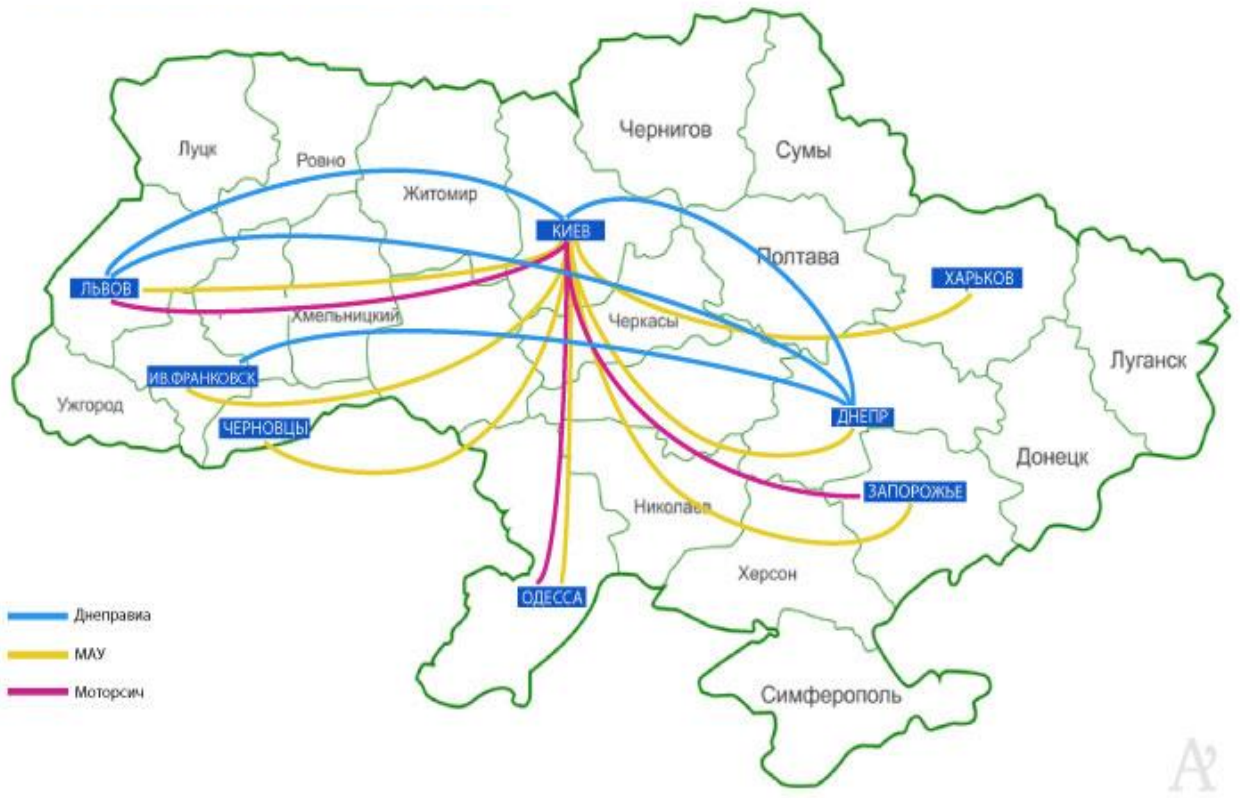
( <https://www.flyuia.com/ua/ru/information/air-routes-map>

<https://www.google.com/search?q=%D0%BA%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0>  
B0 )





### КАРТА ВНУТРІШНІХ РЕЙСІВ

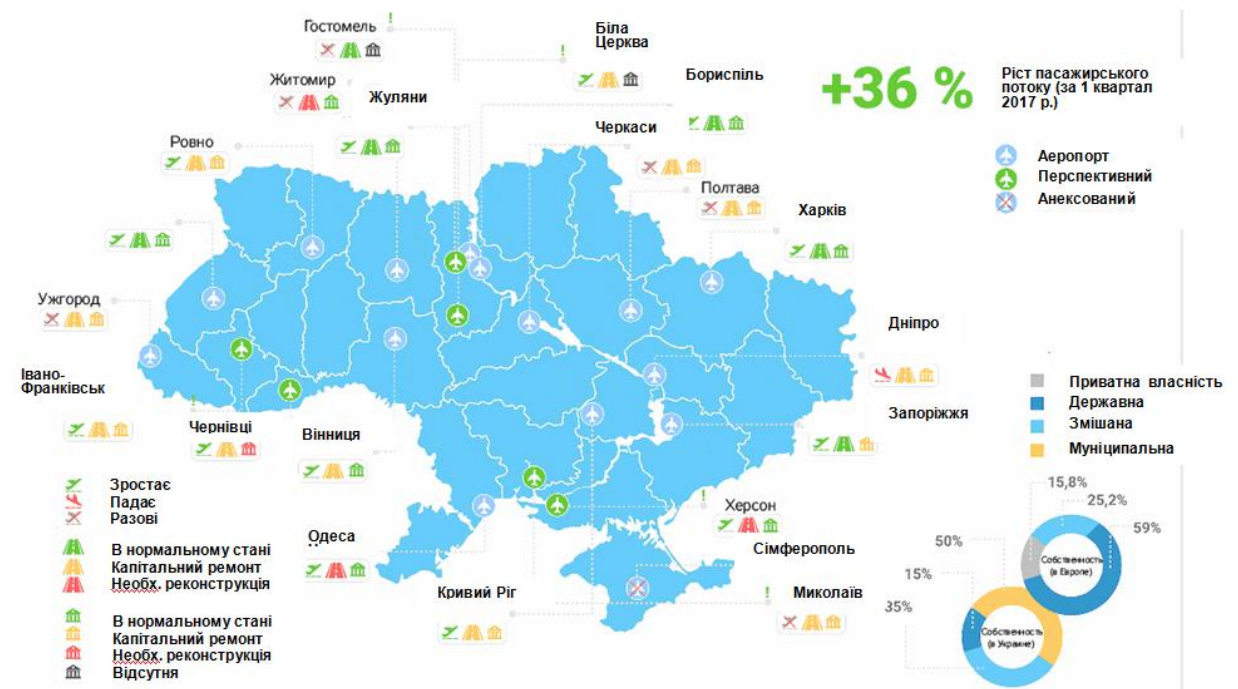


## Майбутнє великих аеропортів України в 2030 р.



В 2030 р. літає кожний другий українець.  
 В 2017 р. літає кожний двадцятий українець.

## Інфраструктура діючих аеропортів України (станом на червень 2017 р.)



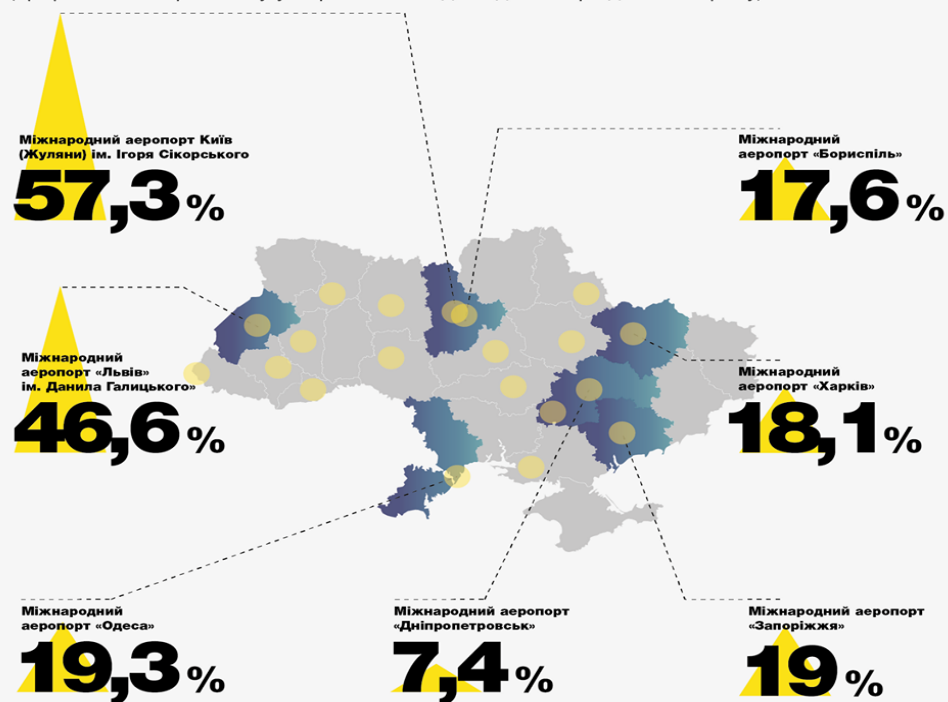


## Аеропорти України



### ОСНОВНІ АЕРПОРТИ УКРАЇНИ

підсумки роботи за 9 місяців 2018 року  
(приріст пасажиропотоку у порівнянні з відповідним періодом 2017 року)



# МІЖНАРОДНІ АЕРОПОРТИ

УКРАЇНИ



1. ДП "Міжнародний аеропорт Бориспіль"
2. Міжнародний аеропорт "Дніпропетровськ"
3. КП "Міжнародний аеропорт "Запоріжжя"
4. Міжнародний аеропорт "Івано-Франківськ"
5. КП "Міжнародний аеропорт Київ (Жуляни)"
6. КП "Міжнародний аеропорт Кривий Ріг"
7. КП "Аеропорт Вінниця"
8. КП "Міжнародний аеропорт Одеса"
9. Обласне КП "Міжнародний аеропорт Рівне"
10. Обласне КП "Аеропорт Суми"
11. Аеропорт "Тернопіль"
12. КП "Аеропорт Черкаси"
13. Міжнародний аеропорт "Харків"
14. КП "Міжнародний аеропорт Чернівці"
15. Аеропорт "Херсон"
16. ДП "Міжнародний аеропорт Львів" імені Данила Галицького
17. Закарпатське обласне КП "Міжнародний аеропорт Ужгород"



УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ:  
 КП - КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
 ДП - ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО

ПАСАЖИРОПОТІК ЧЕРЕЗ АЕРОПОРТИ УКРАЇНИ, ОСІБ  
 січень - квітень 2018 року

5 121 700



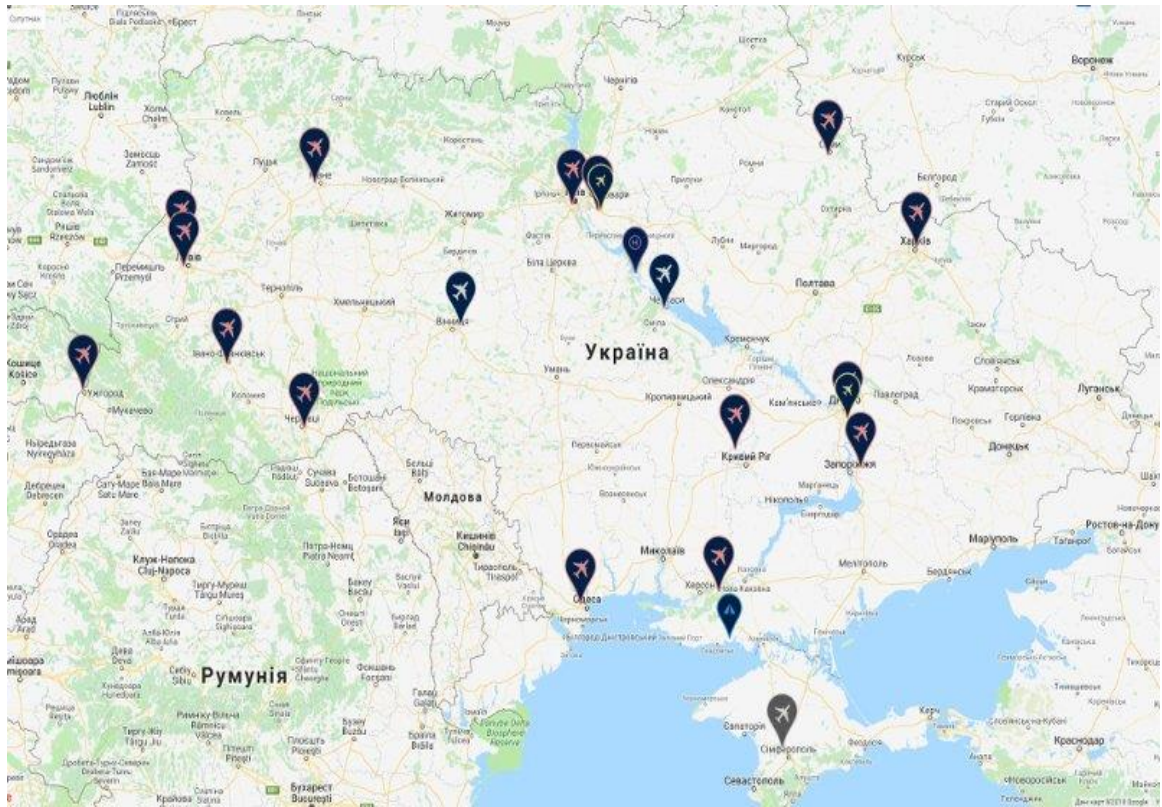
КІЛЬКІСТЬ КОМЕРЦІЙНИХ РЕЙСІВ  
 січень - квітень 2018 року

26 900

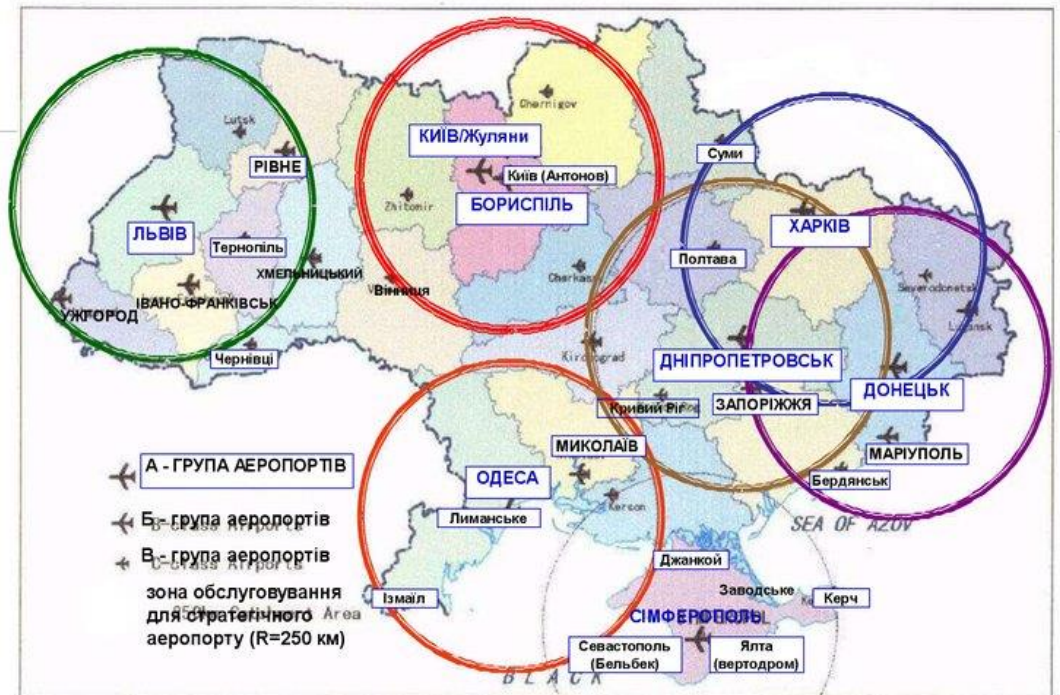
ДЖЕРЕЛА: МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ ТА ДЕРЖАВІАСЛУЖБА

## ПОВПРЯНИЙ ТРАНСПОРТ УКРАЇНИ: ПІДСУМКИ 2017 РОКУ





### Аеропорти України





Злітно-посадкова смуга аеропорту Жуляни