

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

Присяжний В.І.<sup>1</sup>, Міхеєв В.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний центр управління та випробувань космічних засобів  
01010, м.Київ, вул. Московська, 8  
ncuvkz@spacecenter.gov.ua;

<sup>2</sup> Державне космічне агентство України  
01010, м. Київ, вул. Московська, 8  
yd@nkau.gov.ua

Розглянуто проблему забруднення атмосфери турбореактивними двигунами літальних апаратів та узагальнено шляхи її вирішення. Здійснено в аналіз проблеми забруднення атмосфери турбореактивними двигунами та в узагальненні шляхів її вирішення. Проаналізовано напрямки зменшення забруднення атмосфери газотурбінними двигунами літаків, виявлено їх переваги та недоліки. Запропоновано розглянути проблему вирішувати одночасно у таких п'яти напрямках: хімічному, конструкційному, економічному, впровадження на авіаційному транспорті нових технологій, нормативно-правовому. Встановлено, що забруднення повітряного середовища транспортом з турбореактивними двигунами відбувається головним чином при їх роботі перед стартом, при зльоті та посадці, при наземних випробуваннях в процесі їх виробництва та після ремонту. Робота рідинного ракетного двигуна супроводжується викидом продуктів повного і неповного згорання палива. Викиди забруднюють навколишнє середовище в районі аеродрому та його околицях. Для зниження шкідливих викидів від роботи двигунів необхідно застосовувати такі методи: використання присадок до палива, впорскування води та ін.; розпорошення палива; збагачені суміші в зоні горіння; скорочення часу роботи двигунів на землі; зменшення числа працюючих двигунів при рулюванні (викид відходів знижується в 3–8 разів). Зменшення загальної витрати палива, а отже, і викиду токсичних речовин досягається також вдосконаленням методів експлуатації літаків. Встановлено, що вирішення проблеми забруднення атмосфери авіаційним транспортом повинно бути комплексним. Як результат, пропонується комплексно і одночасно вирішувати розглянуту проблему у таких п'яти напрямках покращення екологічних показників емісії авіаційних двигунів: хімічному, конструкційному, економічному, впровадження на авіаційному транспорті нових технологій та нормативно-правовому. *Ключові слова:* аеропорт, аеродром, атмосфера, авіаційний транспорт, емісія двигунів, екологічна безпека, забруднення, довкілля, викиди.

**Analysis of the ecological state and directions of influence of gas turbine engines of mobile technogenic objects on the state of the environment. V.I. Prisiazhnii, V.S. Mikheev.** The problem of air pollution by turbojet engines of aircrafts is considered and the ways of its solution are generalized. The analysis of the problem of atmospheric pollution by turbojet engines and the generalization of its solutions are carried out. The directions of air pollution reduction by gas turbine engines of airplanes are analyzed, their advantages and disadvantages are revealed. It is proposed to solve the problem at the same time in the following five directions: chemical, structural, economic, introduction of new technologies in aviation transport, regulatory and legal. It is established that air pollution by turbojet engines occurs mainly during their work before launch, during take-off and landing, during ground tests during their production and after repair. The operation of a liquid rocket engine is accompanied by the emission of products of complete and incomplete combustion of fuel. Emissions pollute the environment in and around the aerodrome. To reduce the harmful effects of the engines, the following methods must be applied: use of fuel additives, water injection, etc.; fuel spraying; enriched mixtures in the combustion zone; reducing the running time of engines on the ground; reduction in the number of engines running at steering (waste reduction is reduced by 3–8 times). The reduction of total fuel consumption and, consequently, the emission of toxic substances is also achieved through the improvement of aircraft operating methods. It is established that the solution of the problem of air pollution by air transport should be complex. As a result, it is proposed to comprehensively and simultaneously address the problem under consideration in the following five areas of improvement of environmental performance of aviation engine emissions: chemical, structural, economic, introduction of new technologies in aviation transport and regulatory. *Key words:* airport, airfield, atmosphere, air transport, engine emissions, environmental safety, pollution, environment, emissions.

Стрімкий розвиток авіатранспорту і підвищення його ролі в житті людини не може не вплинути на навколишнє середовище. Основний вплив авіації на довкілля полягає не тільки в акустичному забрудненні, а й через викиди газів в атмосферу, що призводить до зміни клімату і забруднення повітря

в навколишньому середовищі, в тому числі околицях аеродромів.

До об'єктів аеродрому входять не тільки літаки, але й засоби його обслуговування – автотранспорт та інша спецтехніка. В результаті повітряних перевезень відбувається забруднення ґрунтів, водних

об'єктів і атмосфери, а сама специфіка впливу повітряного транспорту на навколишнє середовище виявлена в значній шумовій дії і значних викидах різних забруднюючих речовин продуктами згоряння авіаційних палив при різних режимах роботи двигунів [1].

Забруднення біосфери продуктами згоряння авіаційних палив – це перший прояв впливу повітряного транспорту на екологічну ситуацію. Однак авіація має ряд відмінних рис порівняно з іншими видами транспорту. Використання газотурбінних двигунів (ГТД) зумовлює інший характер процесів і структуру викидів відпрацьованих газів, а застосування в якості палива гасу змінює компоненти забруднюючих речовин.

На відпрацьовані гази авіаційних двигунів припадає 75–87% усіх викидів цивільної авіації, що включають атмосферні викиди спеціального автотранспорту і стаціонарних джерел [2–4].

**Актуальність дослідження.** 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. На території аеродрому здійснюється запуск двигунів, рулювання, зліт і посадка літаків, при яких в атмосферу надходять шкідливі продукти вихлопів авіаційних двигунів, попереднього старту (місць очікування) і на злітно-посадковій смузі. Руліїні доріжки 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. 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 рухових 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 CH 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 зро-

стає при роботі на режимах, які близькі до номінального (зліт, набір висоти, польотний режим) [5].

**Емісії авіаційних двигунів.** 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 (CO<sub>2</sub>, 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 ГТДУ в 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 згоряння [2, 6].

**Мета дослідження** – аналіз причин забруднення атмосфери турбореактивними двигунами та визначення шляхів її розв'язання.

Аналіз інформаційних джерел [4, 9–12] показав, що максимальне забруднення навколишнього середовища можливе під час граничної силової напруженості повітряного судна, 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. Дослідження екологів засвідчили, що найбільш забрудненими ділянками є прилеглі території в районі аеродромів і зокрема злітно-посадкової смуги [13].

У зв'язку з цим Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO) з 1977 року публікує Міжнародні стандарти щодо норм на емісію повітряно-реактивних двигунів [9], застосування і дотримання яких призводить до зменшення викидів токсичних сполук.

Створений ІКАО банк даних про емісії двигунів (EEDB – ICAO Engine Emission Bank) містить інформацію про значення EI для сертифікованих двигунів (в грамах забруднювача на кілограм палива для NO<sub>x</sub>, CO та HC), а також витрату особливих видів палива (в кілограмах у секунду) для різних режимів роботи різних типів двигунів. Крім того, тут зазначається число димності – безрозмірний параметр,

який обчислюється за 10-бальною шкалою і характеризує емісію диму як «непрозорість» вихлопного струменя. Показники викиду для двигуна PW4074D, яким оснащені, наприклад, аеробуси A330, наведені в табл. 1 [13].

Вимірювання концентрацій токсичних компонентів регламентується в інструктивних матеріалах ІКАО (Міжнародна організація цивільної авіації), перевиданих у 2014 р [10]. Цей документ містить методики проведення вимірювань, оброблення одержаних результатів, рекомендовані прилади. Зокрема, дим вимірюється в так званих «числах димності» (SN) шляхом фільтрації продуктів згоряння через контрольний білий фільтр. За ступенем затемнення поверхні фільтра обложеними частинками оцінюється рівень задимленості.

Відпрацювання запуску ГТД і його експлуатація на ранніх етапах використання з розвитком процесів під час роботи двигунів вимагає формування певних підходів до прогнозування пускових властивостей ГТД (у тому числі й закладанні пускових властивостей на стадії проектування) і відповідного вибору режимів роботи пускової системи силових установок ЛА [3]. 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. Однак на сьогодні, питання застосування ГТД ЛА і режимів його роботи на початкових етапах за умови мінімальних викидів у навколишнє середовище шкідливих речовин не достатньо висвітлюються в літературі, що обмежує в отримання знань.

Інформація щодо забезпечення екологічної безпеки або дотримання екологічних норм у районах аеродромів також обмежена, що ускладнює оцінку характеру їх впливу на екосистему. Це пов'язано з тим, що на сьогодні недостатньо приділяється увага дослідженням в галузі екології в районі аеродромів [12]. Тому вивчення можливої оцінки стану навколишнього середовища в районі аеродромів є актуальним напрямком для зменшення шкідливих виділень з відпрацьованими газами. При цьому, особливо слід приділяти увагу питанню оцінки виділення шкідливих речовин ГТД ЛА в екосистему.

Незалежно від системи запалювання паливо-повітряної суміші в камері згоряння ГТД (якщо це електричні іскрові системи або електричні плазмові чи лазерні системи) від неї залежать особливості режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння [15] та викиди продуктів згоряння авіаційного палива.

На сьогодні вже вивчені принципи їх роботи, вплив на високу питому потужність і можливість ефективного використання силової тяги за рахунок об'єднання декількох функцій – джерела обертаючого моменту в процесі запуску і бортового джерела живлення в процесі польоту при режимній роботі ГТД [2, 3]. При цьому основними напрямками досліджень запуску ГТД ЛА є вивчення режимів роботи і моделювання газотурбінних двигунів в умовах земного і польотного запуску, запуску з авторотації та дослідження характеристик вузлів ГТД під час запуску.

Крім цього, на сучасному етапі розвитку суспільства цікаві питання щодо викидів продуктів згоряння авіаційного палива і їх впливу на навколишнє природне середовище. Залишається пріоритетним вивчення ступеня впливу продуктів згоряння авіаційного палива при викиді з ГТД ЛА і можливість визначення складових продуктів згоряння. Тому на основі аналізу екологічної ситуації в районі аеродромів доцільно визначити напрямки зміни ступеня впливу газотурбінних двигунів на навколишнє середовище [2, 12].

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). У вихлопі містяться й інші забруднювачі атмосфери: оксиди сірки, альдегіди, аерозолі, одоранти, а також ароматичні поліциклічні вуглеводні, наприклад, бензопірен [13, 16–18]. Якщо розглядати кількість утворених шкідливих продуктів у вигляді масової частки від згорілого палива, то для більшості режимів роботи двигуна вихід цих продуктів зазвичай становить 0,1–1%.

Концентрація викидів значною мірою залежить від режиму роботи двигуна. Камери згоряння розраховуються на одержання максимальних ККД при зльоті і крейсерському режимі. При дроселюванні двигуна повнота згоряння зменшується і, як наслідок, збільшується кількість викидів забруднюючих

Таблиця 1

Викиди двигуна PW4074D за банком даних про емісії ІКАО

Експлуатаційний режим	Потужність двигуна, %	Час, хв	Витрата палива, кг/с	Індекс емісії палива, г / кг			Показник димності
				HC	CO	NO <sub>x</sub>	
Зліт	100	0,7	3,042	0,02	0,3	42,46	4,22
Набір висоти	85	2,2	2,471	0,02	0,35	32,71	2,36
Зниження	30	4,0	0,869	0,04	0,96	11,35	0,65
Малий газ	7	26,0	0,305	3,12	26,34	3,8	0,33
Паливо (кг) і емісії (г) для ЗПЦ			1138	1502	12885	20269	-

речовин. Так, у режимі малого газу повнота згоряння становить 88–96% і залежить від розмірів двигуна, його потужності, ресурсу, кількості повітря, що пропускається з компресора тощо.

Головними викидами при малому газі є окис вуглецю (до 50–60 г/кг палива) і вуглеводні (до 10–20 г/кг палива) як у вигляді палива (фізичне недопалення), так і у вигляді частково окислених компонентів палива (хімічне недопалення). Останні речовини і зумовлюють характерний запах властивий всім аеропортам, що використовують літаки з ГТД.

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

Ще більше ускладнює 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 CO і HC у вихлопних газах дуже малий. Однак високі температури і тиск в камері призводять до утворення оксидів азоту і диму. На зльоті викиди  $NO_x$  сягають 40–50 г/кг палива і диму – до 10-15 одиниць (SAE) [13].

Оксиди сірки утворюються при окисленні сірки, що міститься в паливі. Рівні викиду безпосередньо пов'язані з вмістом сірки в паливі і не залежать більшою мірою від типу двигуна. Оскільки в реактивному двигуні видалення окислів з вихлопних газів ускладнене, то 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 [13]. Порівняно висока концентрація альдегідів відносно низького викиду незгорілих вуглеводнів пов'язана з горінням бідної паливної суміші. Рівень викиду залежить від пристрою камери згоряння, особливо від зміни часу температури продуктів згоряння.

Аерозольні викиди з газових турбін 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 агломерати і конденсати малого розміру і можуть бути адсорбентами для активних викидів. Роль аерозолів у забрудненні атмосфери, якщо не брати до уваги погіршення видимості, не вивчена.

За результатами систематичного дослідження характеристик запаху вихлопу реактивних двигунів публікації відсутня.

Механізм утворення поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) у процесі горіння авіаційних

палив зрозумілий тільки в загальних рисах, але на сьогодні немає жодної публікації про систематичні виміри ПАВ у вихлопних газах ГТД. Проте авіація є одним із можливих джерел широкого поширення канцерогенів в атмосфері. Результати роботи з дослідження закономірностей виникнення бензапірена в вихлопних газах авіадвигунів відображені в роботах [12].

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.

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

$$EPA_{Pi} = \frac{\sum_i \left( \frac{\tau_i}{60} \right) G \tau_i EI_{ij}}{\sum_{ji} \left( \frac{\tau_j}{60} \right) R_j} \quad (1)$$

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 тривалість режимів злітно-посадкового циклу (табл. 1).

За результатами випробувань звичайних (однорезонних) камер згоряння можуть бути визначені емісійні характеристики двигуна за наближеним значенням формули:

$$\begin{aligned} (EI_{NO_x})_{ДВ} = & (EI_{NO_x})_{КАМ} \left( \frac{P_{2ДВ}}{P_{2КАМ}} \right)^{0.5} \frac{T_{3ДВ}}{T_{3КАМ}} \frac{v_{ДВ}}{v_{КАМ}} \exp 0,0188 \times \\ & \times (H_{ДВ} - H_{КАМ}) \exp \left( \frac{T_{2ДВ} - T_{2КАМ}}{288} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $P_2$  і  $T_2$  – повні значення тиску і температури на вході в камеру згоряння;

$v$  – характерна швидкість в камері згоряння;

$H$  – 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, що вимірюються при випробуваннях камери згоряння і двигуна відповідно):

$$(EI_{CO})_{ДВ} = (EI_{CO})_{КАМ} \frac{P_{2КАМ}}{P_{2ДВ}}, \quad (3)$$

$$(EI_{HC})_{ДВ} = (EI_{HC})_{КАМ} \frac{P_{2КАМ}}{P_{2ДВ}}. \quad (4)$$

## Емісійні характеристики двигуна JT8D-17 (вихідний рівень) з нормами ЕРА

Режим роботи	Емісія						Число димності	
	CO		HC		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

Як приклад в табл. 2 наведені емісійні характеристики двигуна JT8D-17 і норми ЕРА [13].

**Висновки.**

1. Забруднення повітряного середовища транспортом з турбореактивними двигунами відбувається переважно при їх роботі перед стартом, зльоті та посадці, наземних випробуваннях у процесі їх виробництва та після ремонту. Робота рідинного ракетного двигуна супроводжується викидом продуктів повного і неповного згоряння палива, що складаються з O, NO<sub>x</sub>, OH та ін.

2. Викиди забруднюють навколишнє середовище в районі аеродрому та його околицях.

3. Для зниження шкідливих викидів від роботи двигунів необхідно застосовувати такі методи: використання присадок до палива, впорскування води та ін.; розпорошення палива; збагачення суміші в зоні горіння; скорочення часу роботи двигунів на землі; зменшення числа працюючих двигунів при рулюванні (викид відходів знижується в 3–8 разів).

4. Для зниження питомого вмісту токсичних речовин у відпрацьованих газах поряд з удосконаленням експлуатованих типів газотурбінних двигунів створюються нові ГТД з новими конструкціями камери згоряння, системи упорскування паливно-повітряної суміші, компресорами, що забезпечують раціональне співвідношення в суміші паливо-повітря, краще розпорошення і перемішування суміші, яка подається в камеру, і більш повне її згоряння.

5. Зменшення загальної витрати палива і викиду токсичних речовин досягається вдосконаленням методів експлуатації літаків.

6. Доведено, вирішувати проблеми забруднення атмосфери авіаційним транспортом необхідно комплексно. Як результат, пропонується одночасно покращувати екологічні показники емісії авіаційних двигунів шляхом хімічного, конструкційного, економічного напрямів та впроваджувати на авіаційному транспорті нові технології з дотриманням нормативно-правового режиму.

**Література**

1. Франчук Г.М. Екологія, авіація і космос: підручник [Текст] / Г.М. Франчук, В.М. Ісаєнко. К.: НАУ, 2010. 456 с.
2. Пивторак Р.М. Экологические ряды авиационных двигателей [Текст] / Р.М. Пивторак, А.А. Пивторак // Вісник НАУ, 2008. № 3. С. 302–305.
3. Программы создания и развития перспективных двигателей. Разработка экологически чистых двигателей в Германии / Экспресс – информация «Авиационное двигателестроение». 2010. №5. С. 1 – 2.
4. 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.
5. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И. Промышленность и окружающая среда. МОСКВА : ИКЦ «Академкнига», 2002. 469 с.
6. Приложение 14 к Конвенции о Международной организации гражданской авиации. Воздушные судна. Монреаль, 2009. 350 с. [ICAO. Международные стандарты и рекомендуемая практика].
7. Инструктивный материал по сборам за авиационную эмиссию, связанную с местным качеством воздуха. Док. 9884. ИКАО, 1 издание, 2007.
8. Охрана окружающей среды. Том 2. Эмиссия авиационных двигателей: Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО, Издание 5, июль 2014г.
9. Старик А.М., Фаворский А.Н. Авиация и атмосферные процессы // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. 2015. Т. 20, № 1(40). С. 1–20.
10. Трофімов І.І. Аналіз впливу авіаційного транспорту на забруднення атмосфери // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2014. № 1. С. 119–124.

11. ICAO Aircraft engine emission Databank. November 2016. <https://www.easa.europa.eu/documentlibrary/icao-aircraft-engine-emissions-data-bank>
12. События в гражданской авиации и окружающая среда: Рабочий документ 38-й сессии Ассамблеи ИКАО –[www.icao.int](http://www.icao.int).
13. Goodman J.C. Aviation and the Environment Nova Science Publishers, Inc., 2009, 515 pages, ISBN-10: 160692320X, ISBN-13: 9781606923207.
14. 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.
15. 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. Let.* 2013. Vol. 40. P. 6004–6009. doi:10.1002/2013GL057660.
16. On Board. A sustainable future. Environmental Report. ICAO, 2016.