

М. В. Катков¹
Р. В. Петрук²
С. О. Лобов³
О. Тойлибай⁴
А. С. Уренова³

МЕТОД ПРИМУСОВОЇ АТМОСФЕРНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ У ВЕЛИКОМУ МІСТІ ЗА НИЗЬКОЇ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ІНВЕРСІЇ

¹Донецький національний технічний університет, Дрогобич;

²Вінницький національний технічний університет;

³Національний аерокосмічний університет ім. Н. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»;

⁴Академія цивільної авіації, Алмати, Республіка Казахстан

В результаті дослідження запропоновано новий метод ліквідації смогу у містах з температурною інверсією приземного атмосферного повітря. Цей метод на основі пристрою створює примусову турбулентність повітряних атмосферних об'ємів, які мають різні рівні забруднення. У пристрої застосовується двоконтурний турбореактивний двигун, який захоплює і пропускає через себе забруднений нижній приземний шар атмосферного повітря. Пристрій переміщує суміш забрудненого повітря і продуктів згоряння на висоту вище інверсійного шару, де за рахунок розчинення у великому об'ємі чистішого повітря концентрація забруднювальних речовин і продуктів згоряння палива зменшується до допустимої, а об'єм переміщеного забрудненого повітря заповнюється чистим повітрям. Пристрій відноситься до галузі створення примусової турбулентності повітряних потоків і може бути використаний у разі нестачі природних ресурсів самоочищення атмосферного повітря у містах з температурною інверсією приземного атмосферного повітря. Це важливо з погляду підвищення екологічної безпеки, особливо для великих мегаполісів, де превалує забруднене повітря від автотранспорту та діяльності потужних підприємств, зокрема комунальних і теплоенергетичних, та висока сконцентрованість висотних споруд (хмарочосів) заважає руху нормальних атмосферних потоків та доступу до свіжого повітря їхнім мешканцям. Отже, розроблений метод і відповідний пристрій дозволяє ефективно здійснювати примусову циркуляцію необхідних обсягів атмосферного повітря великих міст з низьким температурним інверсійним шаром.

Ключові слова: екологічна безпека, низька температурна інверсія, велике місто, пристрій примусової турбулентності, двоконтурний турбореактивний двигун, допустимий рівень забруднення повітря.

Вступ

Забруднення повітря у великих містах, які мають температурну інверсію в нижніх шарах тропосфери, давно переросло в комплекс дедалі збільшуваних глобальних, екологічних, економічних і соціальних проблем, головна причина яких полягає в тому, що температурний інверсійний шар перешкоджає природній турбулентності забрудненого повітря чистим шаром і затримує поблизу поверхні Землі різні забруднення, пов'язані з наслідками соціально-економічного розвитку міст, збільшуючи їхню концентрацію до недопустимого рівня, утворюючи смог. Актуальність роботи зумовлена необхідністю розробки способів вирішення зазначеної проблеми за допомогою нового пристрою примусової атмосферної циркуляції над великими містами, що мають низьку температурну інверсію. Наукова новизна роботи зводиться до особливостей розробленого методу на основі пристрою, що створює примусову атмосферну циркуляцію. При цьому вперше запропоновано вико-

ристання авіаційного двоконтурного турбореактивного двигуна. Результати роботи можуть використовуватися як стартова частина проєкту розробки та впровадження технології примусової повітряної циркуляції атмосфери великого міста з низьким температурним інверсійним шаром [1]—[16].

Аналіз публікацій та останніх досягнень

Низька температурна інверсія ускладнює вертикальну турбулентність атмосферного повітря та створює стабільний обмежений приземний атмосферний простір, до якого надходять викиди антропогенної діяльності [1]—[3]. Забруднення цього простору не розподіляються за іншими обсягами атмосфери, а накопичуються в ньому і збільшують свої концентрації набагато вище за допустимий рівень [4], [5]. Високе та наднормативне забруднення таких просторів відбувається в основному над великими містами і мегаполісами, де найрозвиненіша соціально-економічна діяльність [6]. Високий рівень забруднення атмосферного повітря над містами, які характеризуються низькою атмосферною температурою інверсією, створює також безліч екологічних, економічних та соціальних проблем. Наявність та загострення цих проблем підтверджується збільшенням витрат на охорону здоров'я [7], [8] та на адміністративно-правові заходи для підтримки промисловості та інфраструктури міста потрібної якості. Труднощі ліквідації цих інтенсивно збільшуваних проблем пов'язані в основному з сучасними методами соціально-економічного розвитку. Наразі існує велика кількість наукових розробок і пропозицій щодо ліквідації цих проблем. Особливе місце в них посідає розробка інженерних пристроїв і методів зниження рівня забруднення атмосферного повітря у великому місті за низької температурної інверсії. До прикладу, у роботі [9] пропонується використовувати географічне розташування великого міста та за допомогою промислових вентиляторів примусово подавати чисте повітря гірської місцевості в місто, де з причин низькотемпературної інверсії відсутня циркуляція атмосферного повітря та постійно фіксується його наднормативне забруднення, а енергію, що забезпечує цей процес, отримувати з енергії, наприклад, потоків річок. Імовірність впровадження таких ідей викликає інтерес, але, на погляд авторів, потребує розробки вичерпних ефективних інженерно-економічних проєктів створення та подання необхідної кількості чистого повітря до різних міських об'єктів. Відома пропозиція використання пристрою для зниження рівня смогу в містах, що страждають від температурної інверсії [10], яке за допомогою вентилятора викидає по еластичній трубі забруднене повітря в атмосферу вище за рівень смогу. До недоліків цього пристрою можна віднести малу продуктивність, оскільки один пристрій забезпечує очищення малих обсягів забрудненого повітря, конструктивну складність, можливу трудомісткість та невиправдану вартість експлуатації. Для зниження рівня забруднення атмосфери повітря та ліквідації смогу запатентовано «Пристрій для зниження рівня смогу» [11]. Він має забезпечувати пряму подачу приземного забрудненого повітря трубопроводом з колектором в атмосферу вище інверсійного шару. При цьому трубопровід досягає необхідної висоти за допомогою аеростату, а колектор оснащується джерелами нагріву забрудненого повітря. Рух (тяга) забрудненого повітря має відбуватися через його меншу питому вагу порівняно з питомою вагою чистого повітря. Недолік можливого використання цього пристрою полягає у його нездатності забезпечити малопродуктивним процесом витяжку великого обсягу забрудненого повітря в містах, які характеризуються низькою температурною інверсією. У роботі [12] пропонується використовувати для руйнування температурної інверсії тепло, що відходить, в процесі отримання електроенергії, але така пропозиція не передбачає вирішення проблеми температурної інверсії, а тільки дає теоретичний опис можливого процесу. Практичний розвиток та використання концепції очищення атмосфери від забруднень за допомогою веж для збору смогу [13], [14], ймовірно, ліквідується інформацією, поданою в роботі [15], яка пояснює, що за відсутності кордонів повітряних атмосферних шарів ненауково припускати, що можна в тому самому обсязі атмосфери одночасно затримувати повітря, очищати його і випускати в ту саму атмосферу. Даними з роботи [16] запропонована можливість впливу на температурний інверсійний шар серією ударних хвиль, створюваних вибухами горючих газів і повітря, коли ці хвилі руйнують шар інверсії і відновлюють вертикальну турбулентність атмосферного повітря. Подано попередню ефективність цієї пропозиції у разі 11-хвилинної серії, що складається з 66 вибухів з шаром смогу до 20 метрів від рівня землі та її максимальної площі 4 км². Запропонований напрямок знаходиться в концептуальній стадії, оскільки, очевидно, ще не вирішено багато проблем використання цього методу у великих містах з масивним шаром смогу.

Завданням цієї роботи є обґрунтування створення нового методу та пристрою примусової ат-

мосферної циркуляції у великому місті за низької температурної інверсії. При цьому за допомогою такого пристрою забруднені шари атмосфери міста мають захоплюватись та викидатись вище інверсійного шару.

Матеріали та методи розроблення нового пристрою для примусової атмосферної циркуляції у місті з низькою температурною інверсією

1. *Двоконтурний турбореактивний двигун.* У цій роботі пропонується пристрій, що забезпечує примусову циркуляцію повітря в приземних шарах атмосфери завдяки роботі двоконтурного турбореактивного двигуна (ТРДД) (рис. 1), яким забезпечується забір і подача забруднених шарів повітря в атмосферу вище інверсійного шару. Пропонується використовувати двоконтурний турбореактивний двигун без форсажної камери, який відпрацював свій термін в авіації. Як приклад, розглядається двоконтурний турбореактивний двигун JT9D-7R4H1. Цей тип двигуна застосовується на таких літальних апаратах як Airbus A300, Airbus A310, Boeing 747, Boeing 767 і є одним з найпоширеніших у світі [15]. Основні характеристики двигуна подано у таблиці.

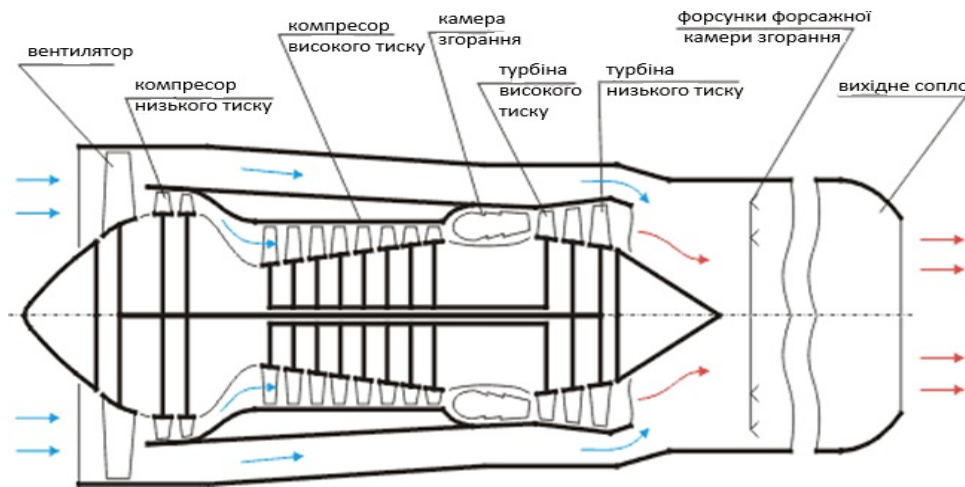


Рис. 1. Принципова схема двоконтурного турбореактивного двигуна ТРДД

Основні характеристики пропонованого ТРДД

Виробник	Pratt & Whitney
Роки виробництва	1966—1990
Суха маса	3905 кг
Довжина	3260 мм
Діаметр	2340 мм
Тяга злітна	21000...22680 кгс
Паливо	авіаційний керосин
Витрати повітря	744 кг/с
Питомі витрати повітря	0,646 кг/кгс·год
Ступінь двоконтурності	5,0 : 1
Питома тяга	5,4...5,8 кгс/кг

Вибір його використання пояснюється тим, що в його конструкції за рахунок поліпшеної роботи компресора та збільшення обсягу проходження повітряних потоків можна значно скоротити витрату палива без втрат його потужності. Причому, використовуючи додаткові конструктивні зміни, можна отримати потрібний варіант. Базова конструкція ТРДД в першому контурі вміщує компресори високого і низького тиску, камеру згорання, турбіни високого і низького тиску і сопло. Другий контур складається з напрямного апарата та сопла. Рухливі лопатки компресора високого тиску (КВТ) під час обертання захоплюють повітря, стискають і направляють всередину корпусу на нерухомі лопатки, де цей потік додатково стискається і створює його осьовий вектор руху. Таких щаблів у компресорі декілька і від їхньої кількості безпосередньо залежить ступінь стиснення повітряної суміші. Така сама конструкція і компресора низького тиску (КНТ), який розташований перед КВТ. У камері згорання стиснене та нагріте повітря змішується з паливом, яке впорскується форсунками, а отриманий паливний заряд спалахує і згоряє, утворюючи потік газів з

великою кількістю енергії, який виходить із сопла у вигляді реактивного потоку.

2. *Пристрій для примусової атмосферної циркуляції у місті з низькою температурною інверсією.* Пристрій для примусової атмосферної циркуляції у великому місті з низькою температурною інверсією містить двоконтурний турбореактивний двигун без форсажної камери, який за рахунок енергії згоряння газу всмоктує нижній шар забрудненого повітря. До двигуна приєднується металева труба з вигином під 90° для повороту і подачі реактивного струменя в перший еластичний рукав з поліетилентерефталату, який з'єднується з другим рукавом більшого діаметра, виготовленого також з поліетилентерефталату. З'єднання рукавів на потрібній висоті за рахунок різниці діаметрів рукавів має круговий отвір для всмоктування верхнього шару забрудненого повітря. У верхній та нижній частині другого рукава прикріплюються аеростати тороїдальної форми, заповнені гелієм, які забезпечують вертикальне положення рукавів. Схема пристрою створення примусової повітряної циркуляції атмосферних шарів великого міста, що має низьку інверсію, показана на рис. 2.

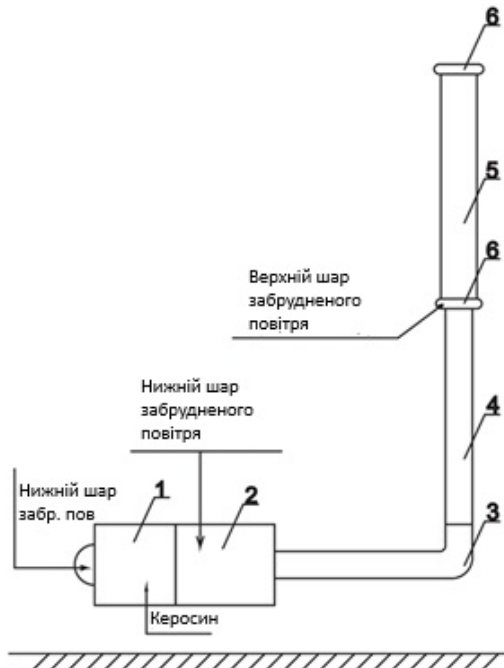


Рис. 2: 1 — перший контур ТРД; 2 — другий контур ТРД; 3 — металева труба з плавним вигином; 4 — перший еластичний рукав; 5 — другий еластичний рукав; 6 — тороїдальні камери (аеростати)

де ρ — густина; g — прискорення вільного падіння; v_1 — швидкість потоку на висоті 1; h_1 — висота 1; P_1 — тиск на висоті 1; v_2 — швидкість потоку на висоті 2; h_2 — висота 2; P_2 — тиск на висоті 2.

При цьому, згідно з законом Бернуллі, статичний тиск виявляється нижчим за атмосферний. Тому через щілину між рукавами всмоктується повітря з шару смогу. За секунду через неї всмоктується 2652 кг забрудненого повітря або 2210 м³/сек. Після всмоктування швидкість потоку газів знижується до 36 м/сек і він викидається з цією швидкістю в шари чистого атмосферного повітря і над інверсійними шарами розсіюється. У результаті, за секунду ця установка викидає в атмосферу 3396 кг/сек або 2830 м³/сек (10 км³/год) забрудненого приземного атмосферного повітря та забезпечує його турбулентність з чистим атмосферним повітрям. В результаті цієї турбулентності концентрація забруднювальних речовин і продуктів згоряння палива для реактивного двигуна зменшується до допустимої за рахунок їхнього розведення у великому об'ємі чистішого повітря. Повітря, після турбулентності повітряних потоків, що мають різні рівні забруднення, вже з допустимим рівнем концентрації забруднювальних речовин, у свою чергу, забезпечуватиме турбулентність, заповнюючи об'єм забрудненого переміщеного приземного атмосферного повітря.

Обговорення результатів

Розроблені авторами новий метод та відповідний пристрій для примусової атмосферної циркуляції у великому місті з низькою температурною інверсією відносяться до способів та пристроїв у галузі технологій очищення забруднених територій і можуть бути використані для ліквідації екологіч-

них загроз і збитків урбосередовищ. При цьому у запропонованому пристрої використовується можливість двоконтурного турбореактивного двигуна захоплювати забруднені об'єми атмосфери повітря міст і переміщувати їх в атмосфері вище інверсійного шару (до прикладу, двоконтурного турбореактивного двигуна JT9D-7R4H1) близько 10 км³/год. Технічний результат цього пристрою можна використовувати для впровадження технології примусової повітряної циркуляції атмосферного повітря великих міст з низьким температурним інверсійним шаром, оскільки для його конкретного впровадження потрібно вичерпні дані про поведінку атмосферного повітря в містах, що мають низьку температурну інверсію, а також детальна інженерна розробка пристрою та економічних проблем його застосування у великому місті.

Висновки

Отже, наявність і загострення проблем забруднення атмосферного повітря та низької інверсії у великих мегаполісах зумовлює збільшення витрат на охорону здоров'я і на адміністративно-правові заходи для підтримки промисловості та інфраструктури міста у потрібній якості. Попередні розробки мають низку недоліків, а саме: відомі пристрої забезпечують очищення малих обсягів забрудненого повітря і зазвичай потребують розробки вичерпних і складних інженерно-економічних проектів створення та подання необхідної кількості чистого повітря до різних міських об'єктів; їхню малу продуктивність та конструктивну складність, а також значну трудомісткість та невиправдану вартість експлуатації, і відповідно нездатності забезпечити малопродуктивним процесом витяжку великого обсягу забрудненого повітря в містах, що характеризуються низькою температурною інверсією.

Враховуючи вищезазначені проблеми і недоліки відомих розробок, у цій роботі на прикладі двоконтурного турбореактивного двигуна JT9D-7R4H1 з поданою схемою пристрою та його основними технічними характеристиками обґрунтовано переваги розробленого авторами інноваційного методу. Створено новий пристрій примусової атмосферної циркуляції у великому місті за низької температурної інверсії, за допомогою якого забруднені шари атмосфери міста ефективно і у необхідних обсягах захоплюються та викидаються вище за інверсійний шар.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Xu Tingting, Liu Bing, Minsi Zhang, Yu Song, Ling Kang, and Tiantian Wang, "Temperature inversions in China derived from sounding data from 1976 to 2015," *Chemical and Physical Meteorology*, vol. 73, pp. 1-18, 2021. <https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1898906>.
- [2] Li Hui, et al., "The Influence of Temperature Inversion on the Vertical Distribution of Aerosols," *Remote Sensing*, № 18, pp. 4428, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14184428>.
- [3] Shao Min, Xu Xiaoying, Lu Yutong, and Dai Qili, "Spatio-temporally differentiated impacts of temperature inversion on surface PM2.5," in *Eastern China. Sci Total Environ*. 2023 Jan 10;855:158785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158785>.
- [4] V. Yavuz, "Unveiling the impact of temperature inversions on air quality: comprehensive analysis of polluted and highly polluted days in Istanbul," *Acta Geophys*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01417-0>.
- [5] Souad Lagmiri, and Salem Dahech, "Temperature Inversion and Particulate Matter Concentration in the Low Troposphere of Cergy-Pontoise (Parisian Region)," *Atmosphere*, no. 15(3), 349, 2024. <https://doi.org/10.3390/atmos15030349>.
- [6] L. T. Molina, "Introductory lecture: air quality in megacities," *Faraday Discuss*, no. 226, pp. 9-52, 2021. <https://doi.org/10.1039/D0FD00123F>.
- [7] Trinh TT, Le TT, Nguyen TDH, and Tu BM, "Temperature inversion and air pollution relationship, and its effects on human health in Hanoi City, Vietnam," *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 41, pp. 929-937, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0190-0>.
- [8] Liao Liping, Du Minzhe, and Chen Zhongfei, "Air pollution, health care use and medical costs: Evidence from China," *Energy Economics*, vol. 95, pp. 105132. March, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105132>.
- [9] М. М. Ісєєєв, «Технологія очищення повітря з прикладу м. Алмати», *Вісник Казахської Академії праці та соціальних відносин*, № 2, с. 51-53, 2017.
- [10] US 5425413 A, *Method for preventing the formation and destruction of upper atmospheric inversions, improving air circulation at ground level, and improving urban air quality*.
- [11] S. Laxmipriya, A. A. Kumar, S. Aravinthan, and N. Arunachalam, "Reduction of Air Pollution Using Smog-Free-Tower a Review Paper," *IRJAET*, no. 4, pp. 3251-3255, 2018.
- [12] D. Cyranoski, "China tests giant air cleaner to combat smog," *Nature*, 555, 7695, 2018. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed].
- [13] S. Guttikunda, and P. Jawahar, *Can We Vacuum Our Air Pollution Problem Using Smog Towers Atmosphere*, no. 11 (9), 922, 2020. <https://doi.org/10.3390/atmos11090922>.
- [14] F. Jędrzejek, et al., "The Innovative Method of Purifying Polluted Air in the Region of an Inversion Layer," *Front. Environ. Sci.*, 9:784477, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.784477>.
- [15] М. В. Катков та ін. *Установка для ліквідації смогу у міських умовах*. Повідомлення щодо встановлення дати подання заявки на винахід (корисну модель), Ресстраційний номер заявки у 2024 03959.
- [16] L. J. Clancy, *Aerodynamics*. Wiley, 1975. ISBN 978-0-470-15837-1.

Катков Михайло Васильович — канд. техн. наук, доцент кафедри природоохоронної діяльності, e-mail: mvkatkov@gmail.com .

Донецький національний технічний університет, Дрогобич;

Петрук Роман Васильович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: prroma07@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Лобов Сергій Олександрович — канд. техн. наук, доцент кафедри космічної техніки та нетрадиційних джерел енергії, e-mail: s.lobov@khai.edu .

Національний аерокосмічний університет ім. Н. Є. Жуковського, «Харківський авіаційний інститут», Харків;

Тойлибай Озгерісхан — старший викладач кафедри авіаційної техніки та технологій.

Академія цивільної авіації, Алмати, Республіка Казахстан;

Уренова Анастасія Сергіївна — фахівець-еколог, e-mail: a.s.urenova@student.khai.edu .

Національний аерокосмічний університет ім. Н. Є. Жуковського, «Харківський авіаційний інститут», Харків

M. V. Katkov¹
R. V. Petruk²
S. O. Lobov³
O. Toylybay⁴
A. S. Urenova¹

Method of Forced Atmospheric Circulation in a Large City with Low Temperature Inversion

¹Donetsk National Technical University, Drohobych;

²Vinnitsia National Technical University;

³N. E. Zhukovsky National Aerospace University, “Kharkiv Aviation Institute”;

⁴Academy of Civil Aviation, Almaty, Republic of Kazakhstan

The data of the given research propose a new method for smog elimination in cities with temperature inversion of ground atmospheric air. This method based on device creates forced turbulence of air atmospheric volumes with different pollution levels. The device uses a two-circuit turbojet engine that captures and passes through itself the polluted air from lower atmospheric layer. The device moves a mixture of polluted air and combustion products to a height above the inversion layer, where, due to dilution in a large volume of cleaner air, the concentration of pollutants and fuel combustion products decreases to an acceptable level. The volume of the displaced polluted air is filled with clean atmospheric air. The device relates to the field of creating forced turbulence of air flows and can be used in the absence of natural resources for self-purification of atmospheric air, in cities with temperature inversion of atmospheric air near the surface. This is important from the point of view of increasing environmental safety, especially for large megacities, where polluted air from motor vehicles and the activities of powerful enterprises, in particular municipal and thermal power plants, prevails, and the high concentration of high-rise buildings (skyscrapers) interferes with normal atmospheric flows and access to fresh air for their residents. Therefore, the developed method and the corresponding device allow for effective forced air circulation of atmospheric air in large cities with a low temperature inversion layer.

Keywords: environmental safety, low temperature inversion, large city, forced turbulence device, dual-circuit turbojet engine, permissible level of air pollution.

Katkov Mykhailo V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Environmental Protection, e-mail: mvkatkov@gmail.com ;

Petruk Roman V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: prroma07@gmail.com ;

Lobov Serhiy O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Space Technology and Non-Conventional Energy Sources, e-mail: s.lobov@khai.edu ;

Toylybay Ozgerishant — Senior Lecturer of the Chair of Aviation Techniques and Technologies;

Urenova Anastasia S. — Specialist-ecologist, e-mail: a.s.urenova@student.khai.edu