

УДК 519.6:629.76

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.33.1141

ПРОГНОЗУВАННЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ У ВЕНТИЛЬОВАНОМУ ОБ'ЄМІ ЗІ СКЛАДНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ

БІЛЯЄВ М. М.¹, докт. техн. наук, проф.,
БІЛЯЄВА В. В.², докт. техн. наук, проф.,
БЕРЛОВ О. В.^{3*}, канд. техн. наук, доц.,
КОЗАЧИНА В. А.⁴, канд. техн. наук, доц.,
СЕМЕНЕНКО П. В.⁵, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Кафедра енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський металургійний інститут», пр. Науки, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-98-22, e-mail: y.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

^{3*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁴ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁵ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», вул. Криворізька, 3, 49008, Дніпро Україна, тел. +38 (056) 372-00-22, e-mail: semenenkopv1981@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0447-5591

Анотація. Постановка проблеми. На етапі передстартової підготовки необхідно виконати дуже жорсткі умови щодо умов навколишнього середовища всередині головного обтічника, де знаходиться супутник. А саме, дуже важливо передбачити концентрацію пилу всередині головного обтічника та біля поверхонь супутника під час примусової вентиляції. Тому виникає важлива задача – прогнозування рівня пилового забруднення повітря всередині обтічника та визначення ступеню забруднення особливо «чутливих» поверхонь. Для адекватного рішення даної задачі потрібно мати науково обгрунтовані математичні моделі. **Мета роботи.** Розробка швидкорозрахункової чисельної моделі для прогнозування пилового забруднення об'єму обтічника на етапі передстартової підготовки. **Методика.** Для прогнозування пилового режиму головного обтічника ракети-носія розроблена чисельна модель. Моделюючи рівняння: рівняння масопереносу пилу (враховує перенос пилу за рахунок конвекції, дифузії та гравітаційного осадження), рівняння для потенціалу швидкості (визначення поля швидкості повітряного потоку при обтіканні супутника в головному обтічнику), емпіричні залежності, що допомагають визначити інтенсивність осадження пилу на поверхню супутника. **Наукова новизна.** Розроблена багатофакторна чисельна модель для аналізу пилового забруднення обтічника при примусовій його вентиляції на етапі термостатування. Модель дає можливість здійснювати рішення задачі аеродинаміки та масопереносу в областях, що мають складну геометричну форму. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь використані кінцево-різницеві схеми. **Практична значущість.** Розроблена чисельна модель дає можливість швидко визначати рівень пилового забруднення як в самому обтічнику так і зонах розташування особливо «чутливих» поверхонь супутника. **Висновки.** На основі запропонованої чисельної моделі розроблено комп'ютерний код. Представлено результати обчислювальних експериментів для оцінки поля концентрації пилу всередині головного обтічника ракети-носія.

Ключові слова: пилове забруднення; супутник; транспортний відсік; головний обтічник; математичне моделювання

FORECASTING DUST AIR POLLUTION IN A VENTILATED VOLUME WITH COMPLEX GEOMETRY

BILIAIEV M.M.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
BILIAIEVA V.V.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
BERLOV O.V.^{3*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
KOZACHYNA V.A.⁴, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

SEMENENKO P.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and technologies, ESI “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport”, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Department of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and technologies, ESI “Dnipro Metallurgical Institute”, 4, Science Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-22, e-mail: v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

^{3*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁴ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport”, 2, Lazaryan St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁵ Yuzhnoye State Design Office, 3, Krivorozhskaya St., Dnipro, 49008, Ukraine, tel. +38 (056) 372-00-22, e-mail: semenenkopv1981@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0447-5591

Abstract. Problem statement. At the stage of pre-launch preparation, it is necessary to fulfill very strict conditions regarding the environmental conditions inside the main fairing, where the satellite is located. Namely, it is very important to predict the concentration of dust inside the main fairing and near the surfaces of the satellite during forced ventilation. Therefore, an important task arises – predicting the level of dust pollution of the air inside the fairing and determining the degree of pollution of especially “sensitive” surfaces. To adequately solve this problem, it is necessary to have scientifically based mathematical models. **The purpose of the article.** Development of a fast-calculating numerical model for predicting dust contamination of the fairing volume at the pre-launch preparation stage. **Methodology.** A numerical model has been developed to predict the dust regime of the main fairing of the launch vehicle. Modeling equations: dust mass transfer equation (takes into account dust transport due to convection, diffusion and gravitational deposition), equation for the velocity potential (determination of the air flow velocity field when flowing around the satellite in the main fairing), empirical dependencies that help determine the intensity of dust deposition on the satellite surface. **Scientific novelty.** A multifactorial numerical model has been developed for the analysis of dust contamination of the fairing during its forced ventilation at the stage of thermostating. The model makes it possible to solve the problem of aerodynamics and mass transfer in areas with a complex geometric shape. Finite-difference schemes are used for the numerical integration of the modeling equations. **Practical significance.** The developed numerical model makes it possible to quickly determine the level of dust contamination both in the fairing itself and in the areas of particularly “sensitive” surfaces of the satellite. **Conclusions.** Based on the proposed numerical model, a computer code has been developed. The results of computational experiments to estimate the dust concentration field inside the main fairing of a launch vehicle are presented.

Keywords: dust pollution; satellite; transport compartment; main fairing; mathematical modeling

Постановка проблеми. Головний обтічник ракети-носія є конструктивним елементом, де розташовується супутник (рис. 1). Термостатування об'єму головного обтічника є дуже важливою процедурою на етапі передстартової підготовки ракети-носія [1–12]. Тривале термостатування повітря вимагає дуже «жорстких» умов чистоти повітря всередині головного обтічника. Тривала вентиляція може призвести до забруднення пилом чутливих поверхонь супутника. Особливо чутливими поверхнями супутника є :

- сонячні батареї;
- оптичні інструменти;
- рефлектори передавачів сигналів;
- чутливі сенсорні елементи.

Тому, важливим, практичним завданням є прогнозування рівня пилового

забруднення супутника всередині головного обтічника під час його примусової вентиляції для визначення зон, де може бути небезпечне накопичення пилу.



Рис. 1. Головний обтічник [<https://cutt.ly/uetrDluX>]

Для рішення цієї проблеми важливо використання математичних моделей [1; 2; 10], тому що проведення експерименту для реального об'єкту практично неможливо. Це пов'язано з тим, що власник супутника не дозволяє «втручання» в середину обтічника (внесення якісь додаткових детекторів, вимірювальної апаратури тощо), коли супутник вже встановлено у ньому. Тому, створення науково обґрунтованих математичних моделей для прогнозування пилового режиму всередині обтічника є важливою прикладною задачею.

Мета статті – розробка швидкорозрахункової чисельної моделі для прогнозування пилового забруднення об'єму обтічника на етапі передстартової підготовки.

Методика. Для визначення концентрації пилу в головному обтічнику під час примусової вентиляції необхідно послідовно вирішити наступні задачі:

1. Розрахувати поле швидкостей повітряного потоку в головному обтічнику.
2. Розрахувати поле концентрації пилу в головному обтічнику.
3. Розрахуйте кількість частинок пилу, які осядуть на «чутливій» поверхні.

Складність вирішення цих завдань полягає в тому, що необхідно проводити розрахунки в області зі складною геометрією.

Для оцінки поля швидкостей у головному обтічнику під час його примусової вентиляції на передстартовому етапі було використано модель потенційного руху [1; 11]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

де P – потенціал швидкості повітряного потоку.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку визначаються на основі залежностей (2):

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2)$$

Граничні умови для рівняння (1) наступні:

$$1. \frac{\partial P}{\partial x} = V_{in} \text{ – на вхідній границі (} V_{in} \text{ –}$$

відома швидкість потоку повітря на цій границі).

$$2. P + \text{Const} \text{ – на межі виходу.}$$

$$3. \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \text{ – є зовнішньою нормаллю до}$$

твердої поверхні.

Для прогнозування рівня пилового забруднення головного обтічника ракетно-носія під час процедури примусової вентиляції було використано рівняння переносу пилових частинок [1; 11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

де C – концентрація пилу; u, v – компоненти вектору швидкості повітря в головному обтічнику; t – час; μ_x, μ_y – коефіцієнти дифузії.

Граничні умови для рівняння (3) наступні:

1. На вході в головний обтічник: $C = C_{(in)}$, де $C_{(in)}$ – відома концентрація пилу.

2. На виході повітря з головного обтічника: $C_{ij} = C_{(out)}$, де $C_{(out)}$ – концентрація пилу в останній комірці; $C_{(ij)}$ – концентрація пилу в передостанній комірці.

3. На твердих поверхнях головного обтічника і підлоги супутника:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

де n – одинична нормаль до поверхні.

Початкові умови $t = 0$ наступні: $C = C_0$, де C_0 – відома концентрація пилу в головному обтічнику. Коефіцієнти дифузії визначалися наступним чином:

$$\mu_x = k_0 \cdot u, \mu_y = k_0 \cdot v, k_0 = 0,1.$$

Для розв'язання задачі аеродинаміки рівняння (1) було зведено до вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (4)$$

де t – фіктивний час.

Перед розв'язанням рівняння (4) необхідно задати початкову умову для фіктивного часу, наприклад, $P = 0$ для $t = 0$.

Далі для розв'язання рівняння (4) було використана схема умовної апроксимації. На першому кроці розв'язувалося наступне рівняння:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right].$$

На кожному кроці невідоме значення концентрації домішки визначається за допомогою методу біжучого рахунку, тобто за явною формулою.

На другому кроці розв'язувалося наступне рівняння:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

На кожному кроці невідоме значення концентрації домішки визначається за допомогою методу біжучого рахунку, тобто за явною формулою.

Значення потенціалу швидкості на кожному кроці визначалося за явною формулою на кожному кроці. Розрахунок закінчується, коли виконується наступна умова:

$$|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon,$$

де ε – мале число. У розрахунках було прийнято $\varepsilon = 0,01$; n – номер ітерації.

Далі були розраховані компоненти швидкості повітряного потоку за наступними формулами:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для чисельного розв'язання рівняння переносу пилу в обтічнику використовується схема розщеплення. Для побудови схеми здійснювалося таке фізичне розщеплення рівняння масопереносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right).$$

Перше рівняння із цієї системи – це рівняння конвективного переносу, друге рівняння – рівняння дифузії.

При чисельному інтегруванні рівняння конвективного переносу використовуються такі залежності:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння конвективного переносу записується так:

– на першому кроці розщеплення різницеve рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k + L_y^+ C^k = 0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеve рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = 0.$$

Невідоме значення C у кожному рівнянні визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовується двоетапна різницева схема розщеплення, яка має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Концентрація пилу в даних рівняннях визначалася за явною формулою.

Для розрахунку кількості частинок пилу, які мають розмір більше 5 мкм і падають на горизонтальну поверхню, була використана емпірична модель [9]:

$$C_s = c \cdot p \cdot C_n^{0.773} t,$$

де $c = 1,076$ – емпіричний коефіцієнт, t – час, $p = 2,851$ – емпіричний коефіцієнт [9]; C_n – концентрація пилу в повітрі поблизу чутливої поверхні.

На основі розглянутої чисельної моделі створено код, мова програмування – FORTRAN.

Результати. Нижче представлено результати чисельних експериментів, які були проведені з використанням розроблених чисельних моделей. Обчислювальні експерименти проводилися для супутників всередині головного обтічника ракети-носія CYCLONE-IV. Розглянуто два випадки, коли супутник, що розташований всередині обтічника, має складну геометричну форму (рис. 2, 3). Розміри головного обтічника цієї ракети-носія становили 4,99×4 м (двовимірна модель). На верхній межі розрахункової області задавався рівномірний потік повітря зі швидкістю 2 м/с. Діаметр частинок пилу, які потрапляють в основний обтічник, становив 7 мкм. Концентрація пилу в потоці повітря, який використовувався для примусової вентиляції, становила 2 000 частинок/м³. «Чутливі» поверхні для кожного сценарію показані ділянкою А–В на рисунках 2, 3.

Результати чисельного експерименту наведені на рисунках 4, 5. На цих рисунках концентрація показана в безрозмірному вигляді: кожне число на цих рисунках показує концентрацію у відсотках від максимальної концентрації $C_{\max}$ в розрахунковій області.

Результати чисельного експерименту показують, що геометрична форма супутника суттєво впливає на розподіл пилу всередині головного обтічника. Зона інтенсивного пилового забруднення, для обох сценаріїв, формується у верхній частині супутника, тобто біля отвору крізь який потрапляє повітря всередину обтічника. Це обумовлено різким гальмуванням повітряного потоку коли він взаємодіє зі супутником.

Кількість частинок пилу, які потрапляють на чутливі поверхні на протязі 1 доби (область А–В, рис. 2, 3), показано в таблиці.

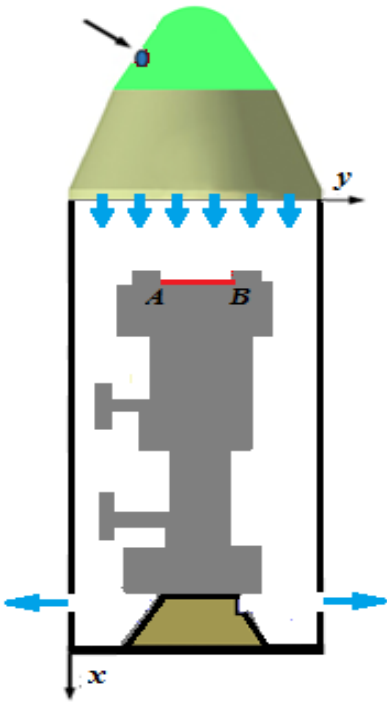


Рис. 2. Схема розрахункової області (сценарій № 1)

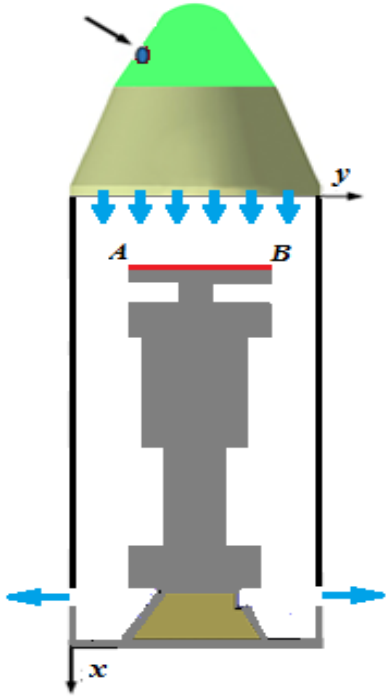


Рис. 3. Схема розрахункової області (сценарій № 2)

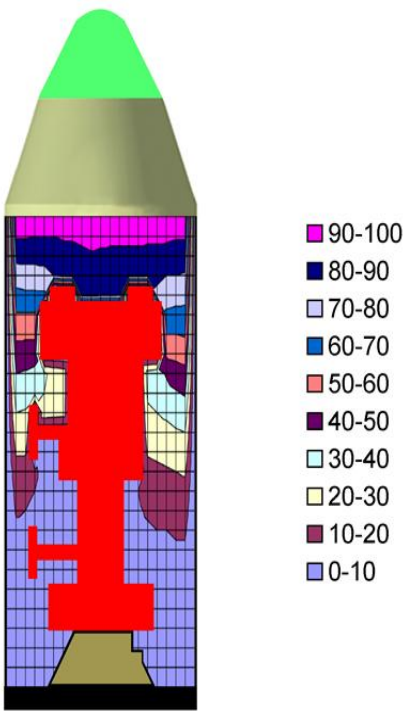


Рис. 4. Поле безрозмірної концентрації пилу в головному обтічнику (сценарій № 1), $C_{max} = 2\,000$

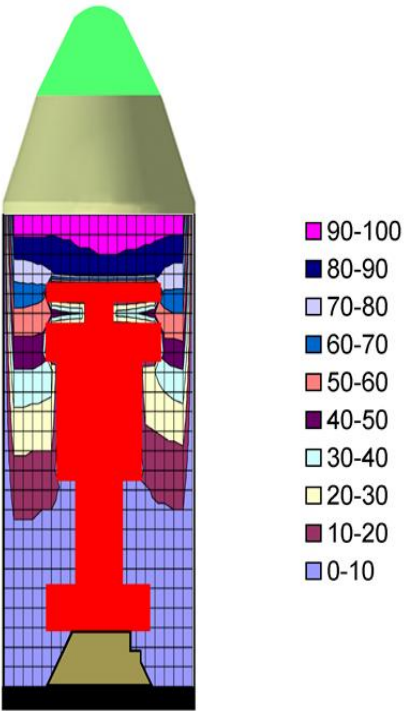


Рис. 5. Поле безрозмірної концентрації пилу в головному обтічнику (сценарій № 2)

Таблиця

Кількість частинок, які осідають на чутливій поверхні

Сценарій № 1	Сценарій № 2
252 частинок	351 частинок

Результати з таблиці показують, що для сценарію № 2 буде спостерігатися інтенсивне пилове забруднення чутливої поверхні. Це пов'язано з тим, що дана поверхня має більший розмір ніж «чутлива» поверхня для сценарію № 1.

Варто зазначити, що час обчислень склав 6 с.

Наукова новизна та практична цінність. Розроблена багатфакторна чисельна модель для аналізу пилового забруднення обтічника при примусовій його вентиляції на етапі термостатування. Модель дає можливість здійснювати рішення задачі аеродинаміки та масопереносу в областях, що мають складну геометричну форму. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь

використані кінцево-різницеві схеми.

Висновки

1. Розроблено швидкодіючу чисельну модель для прогнозування пилового забруднення головного обтічника ракети-носія під час його примусової вентиляції. Запропонована чисельна модель дозволяє врахувати основні фізичні фактори, які впливають на розподіл пилу в головному обтічнику під час примусової вентиляції.

2. Розроблена комп'ютерна програма дозволяє проводити обчислювальні розрахунки за короткий час. Ця комп'ютерна програма може бути використана для первинної оцінки пилового режиму в головному обтічнику на етапі його примусової вентиляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляєв М., Біляєва В., Русакова Т., Козачина В., Берлов О., Семененко П., Козачина В., Бразалук І., Клим В., Татарко Л. Розробка методу оцінки запиленості повітря в головному обтічнику ракети-носія. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2022. № 5/1 (119). С. 17–25.
2. Francisco J. T. Вентиляція відсіків. Критерії проектування космічних апаратів. NASA-SP-8060. 1970, 31 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710018690>
3. Посібник користувача Falcon. *Space Exploration Technologies Corp*. URL: <https://cutt.ly/WettMMly>
4. Кашанов А. Е., Дегтярьов А. В., Гладкий Е. Г., Баранов Є. Ю. Оцінка технічних ризиків при пуску ракети-носія «Дніпро». *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2012. № 5 (92). С. 113–117.
5. Посібник користувача ракети-носія Ariane 5. 2016. URL: https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2011/07/Ariane5Users-Manual_October2016.pdf.
6. Налласамі Р., Кандула М., Дансіл Л., Шалхорн П. Тривимірне поле течії в масштабованій моделі корисного навантаження обтічника ракети-носія. *38-а конференція і виставка з гідродинаміки*. Вашингтон, 2008. С. 1–21.
7. Триббл А. К., Бояджан Б., Девіс Д. та ін. Керівництво з інженерного проектування контролю забруднення аерокосмічного співтовариства. NASA. 1996. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960044619/downloads/19960044619.pdf>
8. Булавка С.С. Результати експериментальних досліджень удосконаленої системи термостатування повітря ракет-носіїв. *Наукові нотатки*. 2021. № 71. С. 9–15.
9. Ванхове Е., Тонду Т., Руссель Ж. Ф., Фей Д., Гіге П. Кількісний та якісний моніторинг молекулярного забруднення в реальному часі. *Журнал космічних апаратів і ракет*. 2016. № 53 (6). С. 1166–1171.
10. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
11. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O. & Semenenko P. Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. *26th International Scientific Conference Transport Means*. 2022. Pp. 122–127.
12. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Mashykhina P. & Rusakova K. Predicting Dust Pollution in the Passenger Compartment. *26th International Scientific Conference Transport Means*. 2022. Pp. 206–211.

REFERENCES

1. Biliaiev M., Biliaieva V., Rusakova T., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P., Kozachyna V., Brazaluk I., Klym V. and Tatarko L. *Rozrobka metodu otsinky zapylenosti povitrya v holovnomu obtichnyku rakety-nosiya* [Developing method for assessment air dustiness in the main fairing the launch vehicle]. *Skhidno-Yevropeys'ky zhurnal peredovykh tekhnolohiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. 2022, vol. 5 (1 (119)), pp. 17–25. (in Ukrainian).
2. Francisco J.T. Compartment venting. NASA space vehicle design criteria. NASA. 1970. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710018690> (in Ukrainian).

3. *Posibnyk korystuvacha Falcon* [Falcon User's Guide]. Space Exploration Technologies Corp. 2021. URL: <http://www.spacex.com/media/falcon-users-guide-2021-09.pdf> (in Ukrainian).
4. Kashanov A.E., Dehtiarev A.V., Hladkyi E.H. and Baranov E.Iu. *Otsinka tekhnichnykh ryzykiv pry pusku rakety-nosiya "Dnipro"* [Assessment of technical risks during the launch of the Dnipro launch vehicle]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya* [Aerospace Engineering and Technology]. 2012, no. 5 (92), pp. 113–117. (in Ukrainian).
5. *Posibnyk korystuvacha rakety-nosiya Ariane 5* [Ariane 5: User's Manual. Arianespace]. 2016. URL: https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2011/07/Ariane5_Users-Manual_October2016.pdf (in Ukrainian).
6. Nallasamy R., Kandula M., Duncil L. and Schallhorn P. *Tryvymirne pole techiyi v masshtabovaniy modeli korysnoho navantazhennya obtichnyka rakety-nosiya* [Three-Dimensional Flowfield in the Scaled Payload Fairing Model of an Expendable Launch Vehicle]. *38-a konferentsiya i vystavka z hidrodynamiky* [38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit]. Vashington, 2008, pp. 1–21. (in Ukrainian).
7. Tribble A.C., Boyadjan B., Davis J. et. al. *Kerivnystvo z inzhenerneho proektuvannya kontrolyu zabrudnennya aerokosmichnoho spivtovarystva* [Contamination Control Engineering Design Guidelines the Aerospace Community]. NASA, 1996. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960044619/downloads/19960044619.pdf> (in Ukrainian).
8. Bulavka S.S. *Rezultaty eksperymental'nykh doslidzhen' udoskonalenoyi systemy termostatuвання povitrya raket-nosiyiv* [Results of experimental studies of the improved air thermostating system of launch vehicles]. *Naukovi notatky* [Scientific Notes]. 2021, no. 71, pp. 9–15. (in Ukrainian).
9. Vanhove E., Tondou T., Roussel J.F., Faye D. and Guigue P. *Kil'kisnyy ta yakisnyy monitorynh molekulyarnoho zabrudnennya v real'nomu chasi* [Real-time quantitative and qualitative monitoring of molecular pollution]. *Zhurnal kosmichnykh aparativ i raket* [Journal of Spacecraft and Rockets]. 2016, no. 6 (53), pp. 1166–1171. (in Ukrainian).
10. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayuschey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
11. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O. and Semenenko P. *Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle*. 26th International Scientific Conference Transport Means. 2022, pp. 122–127.
12. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Mashykhina P. and Rusakova K. *Predicting Dust Pollution in the Passenger Compartment*. 26th International Scientific Conference Transport Means. 2022, pp. 206–211.

Надійшла до редакції: 01.03.2025.