

Голенко К.Е.¹, викладач кафедри
трибології, автомобілів та матеріалознавства, к.т.н.
Войчишин Ю.І.², аспірант кафедри
проектування машин та автомобільного інжинірингу
Бабак О.П.¹, доцент кафедри
трибології, автомобілів та матеріалознавства, к.т.н.
Роман Д.А.², студент кафедри
проектування машин та автомобільного інжинірингу
¹ Хмельницький національний університет;
² Національний університет «Львівська політехніка»;

МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ МІСЬКИХ АВТОБУСІВ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

На сьогодні тема комфорту пасажирських перевезень не стоїть на місці і є надзвичайно актуальною як у промисловому, так і в науковому сенсі. Одним із важливих моментів у проектуванні транспортних засобів загального користування є створення комфортних умов для перевезення пасажирів та роботи водія. Особливо гострим є питання якісної оцінки стану робочого місця водія, адже при грубому порушенні мікрокліматичних показників знижується реакція сенсомоторних систем організму [1], і, відповідно, це може призвести до аварії. У свою чергу комфорт під час перевезення пасажирів є залежним від багатьох факторів: шумоізоляція, плавність руху, екологічна безпека, маневреність, а також тепловий режим у пасажирській частині та салоні автобуса загалом. У зв'язку з цим мікроклімат слід вважати одним із головних чинників якісного та комфортного перевезення, а, відповідно, і актуальним серед сучасних міських автобусів, наприклад, типу Low-floor (рис.1).

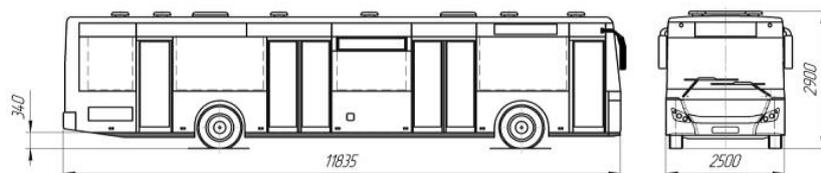


Рис.1. Міський автобус типу Low-floor класу тахі (ВАТ Укравтобуспром – 5289)

Міські варіації автобусів Low-floor характеризуються розміщенням широких накопичувальних площадок в їх структурі кузова, трапом для інвалідної коляски та відведеними для неї локаціями у салоні [2]. На відміну від класичної компоновки кузова з висотою підлоги 610-730 мм, що формує силову структуру та уможливило встановлення стандартних мостів, автобуси типу Low-floor вимагають застосування порталних мостів та потужної ферми даху, що відіграє роль несучої структури. Очевидно, що така конструкція міського автобуса є значно дорожчою порівняно з класичною компоновкою у всіх сенсах (виробництво, розробка, сертифікаційні випробування, включно з краш-тестами), тому й розрахунки по формуванню ефективного мікроклімату салону є зазвичай ґрунтовними та деталізованими, адже рівень комфорту безпосередньо впливає на економічну ефективність експлуатації автобуса (дохід з перевезень).

Суть роботи системи рідинного опалення полягає у виробленні тепла в опалювальній печі [3]. Далі відбувається підігрів теплоносія і розподіл його тепла в так зване мале коло обігріву, яке обігріває ДВЗ, салон та робоче місце водія [4]. Ця система може працювати в трьох режимах: додаткове опалення, опалення при стоянці, та має функцію економного режиму.

Для опису теплових потоків в салоні автобуса слід звернутися до рівнянь Нав'є-Стокса, що використовуються для опису течії неідеального газу або рідини для механічних систем [5-7].

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = F - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta v, \\ \text{div } v = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Де v – швидкість середовища, $\Delta v = \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}$; ρ – густина, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кінематичний коефіцієнт в'язкості, F – густина маси зовнішніх, по відношенню до об'єму, масових сил, p – тиск, μ – динамічний коефіцієнт в'язкості. У цій системі рівнянь параметри μ та ρ відомі і масові сили F дані, тому система закрита і містить дві невідомі функції $v = (x, y, z, t)$ та $p = (x, y, z, t)$.

В нашому досліді ми будемо оперувати терміном «конвекція» - явищем перенесення тепла в рідинах, газах або сипких середовищах потоками самої речовини (неважливо, вимушено або мимоволі). Вимушена конвекція пов'язана із законом охолодження Ньютона, який подається як:

$$P = \frac{dQ}{dt} = hA(T - T_0), \quad (2)$$

Де P - це швидкість передачі тепла; h – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі; A - площа відкритої поверхні; T - температура зануреного об'єкта; T_0 – температура рідини, що перебуває під конвекцією.

За допомогою комп'ютерного моделювання можна створити симуляційну модель роботи системи опалення салону автобуса. Модель натурної імітації може бути побудована як у 3D-представленні (AutoCad, Solidworks, Ansys (CFD-моделювання), так і у вигляді розрахункових блок-схем (Matlab, Simulink, SimulationX, OpenModelica) [7-8].

Закладемо у розрахунки наступні параметри у середовищі Ansys Fluent:

- конвекцію для статичного повітря, значення котрої прийнято рівним $25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ для імітації натурних випробувань внутрішнього об'єму салонів (рис.2) [9-10];
- швидкість у площі входу (т. А на рис.2) - $0,25 \text{ m/s}$;
- температура в області входу – 318 K ;
- температура внутрішнього об'єму і стінок - 293 K

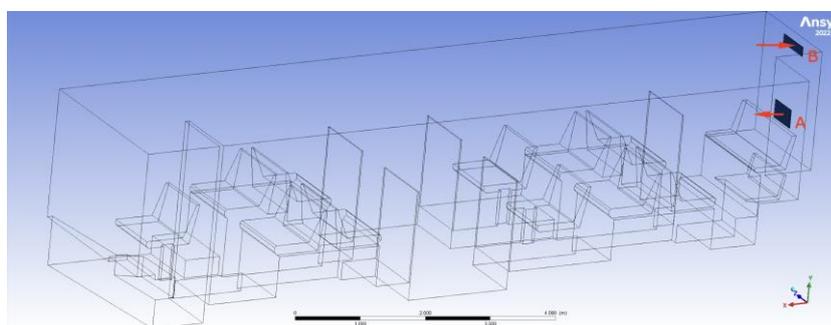


Рис.2. 3D-модель салону міського автобуса Low-entry з областями входу та виходу повітряних потоків

Проаналізуємо результати на основі карти швидкості (рис.3): у верхній частині об'єму салону помічено ламінарні потоки повітря [11] зі швидкістю порядку $0,17\text{-}0,22 \text{ м/с}$. Стінка позаду водія відокремлює потоки повітря, що розбиваються об неї та не доходять до спини водія. При цьому в лобовій частині салону (перед водієм) розподіл тепла досить активний, тому циркуляція повітря тут присутня в повній мірі.

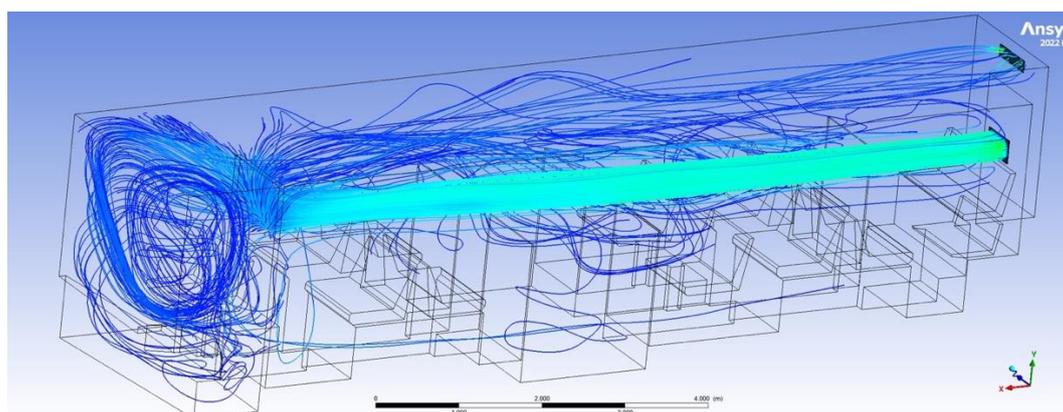


Рис.3. Карта потоків повітря в об'ємі салону автобуса (середовище Ansys Fluent)

Основні процеси алгоритмів розрахунку гідро- та термодинаміки в усіх програмах складаються з таких етапів [12–13]: 1) створення геометрії об'єкту; 2) створення розрахункової математичної моделі; 3) створення розрахункової сітки; 4) введення вхідних граничних умов; 5) запуск розрахунків створеної моделі з вхідними параметрами; 6) візуалізація результатів розрахунків в графічній формі та чисельному вигляді.

Розрахунок потоку рідини чи газу в сучасних програмних продуктах виконується шляхом чисельного розв'язку системи рівнянь, які описують загальний випадок руху рідини чи газу середовища. Перепишемо рівняння Нав'є - Стокса (3) та рівняння нерозривності у вигляді (4):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (4)$$

Тут використано скорочений запис рівнянь $i, j = 1 - 3$, допускається сумування по однаковим індексам, x_1, x_2, x_3 – осі координат, t – час. Член f_i виражає дію сил мас.

Обчислювальний експеримент не може повністю замінити натурний, тому що він сам потребує верифікації як метод. Але в принципі, в деяких випадках він може бути аргументовано його заміною. Таким чином, обчислювальний експеримент займає важливе місце у наукових дослідженнях та при інженерних розробках.

Висновки. Застосування запропонованої методики аналізу мікроклімату салонів міських автобусів носить практичну користь для конструкторських бюро на етапі проектування нових моделей та модифікації існуючих, адже імплементація реальних крайових умов випробувань у розрахункову модель в середовищі Ansys Fluent дозволяє отримати досить близькі до натурних експериментів результати. Похідною вигодою від застосування зазначеної методики є можливість підвищити комфорт перевезення пасажирів за допомогою перерозподілу повітряних мас, зміни конфігурації вентиляційних каналів та обігрівачів шляхом ітерацій компоновок 3D-моделі салону, що безпосередньо впливає на економічну ефективність експлуатації транспортного засобу.

Література

6. Dr.-Ing. Joseph Temming. Fahrzeugklimatisierung und Verkehrssicherheit. Auswirkungen sommerlichen Klimas in Kfz auf die Leistungsfähigkeit der Fahrer. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT). Frankfurt am Main. 2003, 319 p.
7. Голенко К.Е. Особливості формування несівних структур каркасу автобуса типу Low- entry / К.Е. Голенко, Л.В. Крайник // Вісник НУ "Харківський політехнічний ін-т". – Харків: НУ "Харківський політехнічний ін-т", 2008. – 152 с.
8. Deh U., Klimatyzacja w samochodzie. WKiŁ, Warszawa 2008.
9. Jerzy Merksiz, Dariusz Michalak, Maciej Bajerlein, Mateusz Nowak, Łukasz Rymaniak, Andrzej Zólkowski. Wpływ zastosowania różnych konstrukcji piecy ogrzewania postojowego w autobusiemiejskim na zmniejszenie energochłonności. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. 4/2012, s 120-127.
10. Soman, Akhil & Nair, Anu & Remilbabu. (2016). Study on Natural Convection Heat Transfer In an Enclosure – A review. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 13. 26-30. 10.9790/1684-1304062630.
11. P.Anu Nair P, Saju Elias, Vincy John and Rajan K Amboori, An Inexpensive Technique to Determine the Parameter in Free Convection Heat Transfer from Two Parallel Heated Vertical Plates, European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2(10), 2015, 49-55.
12. О. І. Нікольський, О. П. Шеремета. Моделювання теплових процесів в РЕА: навчальний посібник / О. І. Нікольський, О. П. Шеремета. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 116 с.
13. Akvile Jonuskaite. Flow Simulation with SolidWorks. Bachelor Thesis. Plastic Technology. 52 p.
14. Dixon, Michael & Romatschke, Ulrike. (2022). 3D Convective/Stratiform Echo Type Classification and Convectivity Retrieval from Radar Reflectivity. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 10.1175/JTECH-D-22-0018.1.
15. Войчишин Ю.І., Круць Т.І., Зінько Р.В., Горбай О.З. Дослідження мікроклімату салону міського автобуса. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, №1 (14), 2020. С. 49-57.
16. Satz, Helmut. (2022). Turbulence and Convection. 10.1093/oso/9780192864178.003.0012.
17. Drankovskiy V. E., Rezvaya K. S., Krupa E. S. Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units. Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 20 (1192). P. 53–57.
18. Elin A., Lugova C., Kolesnik E. Testing of the CFX-5 package on the examples of flow of liquid and gas in the running parts of VNIIAEN specialization pumps: flow modeling in the flow part of the intermediate stage of the multistage centrifugal pump. Scientific and practical journal "Pumps and equipment". 2007. Vol. 6 (47). P. 42–46.