

ЗВ'ЯЗОК ВЕНТИЛЯЦІЇ АВТОБУСА З КОЕФІЦІЄНТОМ ЙОГО ЛОБОВОГО ОПОРУ

О. М. Довбуш, старший викладач

E-mail: oleksandr.m.dovbush@lpnu.ua

О. Т. Возняк, доктор технічних наук, професор

E-mail: orest.voznyak@i.ua

О. О. Савченко, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: o.savchenko@i.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

Н. А. Сподинок, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: n_spoduniuk@meta.ua

Анотація. *Наведено результати дослідження впливу природної та механічної вентиляції салону та кабіни водія на повітряний потік автобуса. Експериментальні дослідження проводилися в аеродинамічній трубі. На основі вимірювань визначено розподіл швидкостей повітря в пограничному шарі. Крім того, було проаналізовано вплив природної вентиляції салону автобуса на товщину повітряного пограничного шару. Результати представлено у вигляді еюри розподілу та аналітичних залежностей. Метою цього дослідження є визначення коефіцієнта лобового опору при застосуванні різних вентиляційних пристроїв. Визначено, що при збільшенні швидкості подачі повітря вентиляційні припливні пристрої слід розміщувати в задній частині автобуса, а витяжні – в передній частині автобуса. Цей захід покращує обтічність кузова під час руху автобуса. У результаті зменшується коефіцієнт лобового опору і покращується його економічний показник витрати палива.*

Ключові слова: *автобус, аеродинамічна труба, пограничний шар, коефіцієнт лобового опору, вентиляція, потік повітря*

Актуальність. *Разом зі зростанням цін на нафту зростає акцент на різних формах енергоощадних конструкцій, особливо в автомобільній промисловості. Зі збільшенням швидкості руху автобуса зростає і аеродинамічний опір. Зниження витрати палива можна досягти за рахунок зменшення аеродинамічного опору. Це дослідження забезпечує теоретичну основу для зменшення опору та енергозбереження [8] для автобуса. Але крім теоретичних досліджень, є потреба в*

експериментальних дослідженнях моделі автобуса в аеродинамічній трубі [2, 3]. Слід зазначити, що модель повинна бути порожнистою, оснащеною вентиляційним обладнанням і виконана в оптимальному масштабі.

Лобовий опір автобуса залежить від його аеродинамічної форми. Величина аеродинамічного опору характеризується коефіцієнтом аеродинамічного опору C_x . За даними [8] природна вентиляція через бокові вікна транспортного засобу впливає на загальний аеродинамічний опір автобуса, а вентиляція через його бокові вікна збільшує товщину його пограничного шару.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Важливою аеродинамічною характеристикою автобуса є його безрозмірний коефіцієнт лобового опору C_x , який є відношенням аеродинамічного лобового опору до динамічної сили, що виникає в результаті дії повітряного потоку. Цей потік повітря характеризується значеннями числа Рейнольдса.

Аналізуючи [1], слід відзначити тісний зв'язок між товщиною пограничного шару повітря та коефіцієнтом лобового опору автобуса. Його зменшення призводить до зменшення лобового опору. Однак виникає потреба у вентиляції салону автобуса, що призводить до збільшення товщини пограничного шару та лобового опору. Для вирішення цього питання необхідно визначити місця встановлення вентиляційних пристроїв для забезпечення необхідної вентиляції салону з мінімальним збільшенням лобового опору.

При проектуванні нових автобусів використовується моделювання і особлива увага приділяється зменшенню лобового опору, що впливає на паливну економічність. Дослідження здебільшого проводяться на моделях автобусів [4, 5] в аеродинамічній трубі [8].

Для оцінки економічного показника витрати палива автобуса певний інтерес представляє сила лобового опору P_x в коефіцієнті лобового опору C_x . Ця величина залежить від лінії течії, форми і товщини повітряного пограничного шару. Крім того, повітрообмін через вентиляційні установки автобуса (приплив та витяжка) впливає на лобовий опір автобуса при русі, що призводить до його збільшення. У цій роботі експериментально визначається коефіцієнт лобового опору C_x в

аеродинамічній трубі, оскільки аналітичний розрахунок цього коефіцієнта є складним.

Мета дослідження – визначення товщини пограничного шару при обтіканні повітря модель автобуса та коефіцієнта лобового опору.

Матеріали та методи дослідження. Експериментальні вимірювання проводились на моделі автобуса. У цьому автобусі сидіння водія відокремлено від пасажирського салону.

Для автобусів підходять різні системи вентиляції, які, зокрема, підтримують нормалізований рівень шуму і концентрації CO₂ та інших забруднюючих речовин. Одним з них є індивідуальні повітророзподільні блоки. Це дає можливість динамічного керування мікрокліматом [7] у салоні. Інша система – встановлення трьох вентиляційних люків, враховуючи, що клімат у приміщенні залежить від системи розподілу повітря. Цей захід має деякі переваги порівняно з традиційними варіантами вентиляції. Механічна вентиляція також підходить завдяки вентиляційним установкам. Це обладнання включає вентиляційний люк із доданим вентилятором і розміщеним у випускній секції люка. Вентилятор забезпечує подачу повітря, коли автобус зупиняється або рухається на низькій швидкості. Проведено дослідження пограничного шару повітря на обтічній частині кузова автобуса в аеродинамічній трубі.

Такий же коефіцієнт лобового опору для моделі автобуса, який оснащений різними вентиляційними установками. Між цими значеннями існує взаємозв'язок. Збільшення товщини пограничного шару призводить до збільшення коефіцієнта лобового опору. Але вентиляція автобусного салону призводить до збільшення товщини пограничного шару.

З метою дослідження різного впливу обладнання вентиляції та кондиціонування повітря на визначення коефіцієнта лобового опору автобуса було проведено експериментальні аеродинамічні дослідження. Дослідження проводилися в двоконтурній аеродинамічній трубі з розміром відкритої робочої секції $d \times D = 1,0 \times 1,2$ м у Національному університеті "Львівська політехніка", Україна (рис.1).

Порожниста модель автобуса з іншим вентиляційним обладнанням була точною копією автобуса в масштабі 1:15.



Рис. 1. Порожниста модель автобуса в аеродинамічній трубі

Результати досліджень та їх обговорення. Визначення сили лобового опору здійснювалось прямим вимірюванням за рахунок шестикомпонентної ваги з гнучким підвісним вузлом.

Слід зазначити, що подачу повітря через малі віконця, розташовані в центральній і задній частині автобуса, можна розглядати як відсмоктування повітря з пограничного шару. Цей фактор призводить до поліпшення обтічної форми тіла разом із зменшенням товщини пограничного шару. Завдяки видаленню повітря через невеликі вікна в задній частині автобуса і, зокрема, через вікно водія, витягне повітря з пасажирського салону додається в пограничний шар. Завдяки цьому фактору збільшується товщина пограничного шару. Також погіршується обтічність кузова і збільшується коефіцієнт опору.

Слід зазначити, що зовнішній незбурений потік помітно спотворюється, що стає дуже суттєвим. Це є результатом реверсування його ліній потоку від поверхні. Розрив пограничного шару спричиняє особливо раптові спотворення, і тіло обтічної лінії перестає бути гладким. При цьому збільшується товщина пограничного шару, внаслідок чого пряме розв'язання рівнянь пограничного шару стає неможливим. При цьому необхідно враховувати вплив реверсу пограничного шару на тіло ліній

течії та використовувати результати експериментальних досліджень розподілу швидкостей повітря.

Для розрахунку товщини пограничного шару біля вікон водія було проведено експериментальні аеродинамічні дослідження.

Повітряний пограничний шар на кузові обтічної лінії автобуса досліджувався за наявності або відсутності витяжки повітря через зсувні вікна та через вікно водія. Розподіл швидкостей у пограничному шарі досліджувався через голчастий зонд, встановлений на спеціальній підставці.

Вхідне вікно знаходиться в зоні тиску з позитивним градієнтом. Товщина пограничного шару повітря в цій зоні збільшується.

Результати цих досліджень показали, що товщина пограничного шару є приблизно постійною поблизу зсувних малих віконець, що передбачалося.

Існує безрозмірний коефіцієнт аеродинамічного опору C_x , який пов'язаний з товщиною пограничного шару повітря.

Величина C_x залежить від тіла ліній течії повітряного потоку, а також від форми і товщини пограничного шару повітря. Внаслідок тертя швидкість повітря значно менша, ніж на певній відстані від поверхні автобуса.

Вимірювання проводились при швидкостях повітряного потоку від 19 м/с до 25 м/с, що відповідає $Re = 2,01 \times 10^6 \div 2,65 \times 10^6$ [6].

Повітряний пограничний шар і коефіцієнт лобового опору на обтічній частині кузова автобуса досліджували за наявності або відсутності руху повітря через різне обладнання вентиляції та кондиціонування, розміщене на різних ділянках поверхні автобуса. Отримані результати представлені на рис. 3, який є горизонтальними перерізами.

Визначення сили лобового опору використовувалося прямим вимірюванням за рахунок шестикомпонентної ваги з гнучким підвісним вузлом.

Слід зазначити, що подачу повітря через малі віконця, розташовані в центральній і задній частині автобуса, можна розглядати як відсмоктування повітря з пограничного шару. Цей фактор є корисним, поліпшує обтічність форми тіла разом із зменшенням товщини пограничного шару. Завдяки видаленню повітря

через невеликі вікна в задній частині автобуса і, зокрема, через вікно водія, відпрацьоване повітря з пасажирського салону додається в пограничний шар. Завдяки цьому фактору збільшується товщина пограничного шару. Також збільшується аеродинамічний об'єм кузова і збільшується коефіцієнт опору.

Слід зазначити, що зовнішній незбурений потік помітно спотворюється, що стає дуже суттєвим. Це є результатом реверсування його лінії потоку від поверхні. Відривання пограничного шару викликає особливо раптові спотворення, і тіло обтічної лінії перестає бути гладким. При цьому збільшується товщина пограничного шару, внаслідок чого пряме розв'язання рівнянь пограничного шару стає неможливим (рис.2). При цьому необхідно виконати вплив реверсу пограничного шару на лінійну течію тіла та використовувати лише результати експериментальних досліджень розподілу швидкостей повітря.

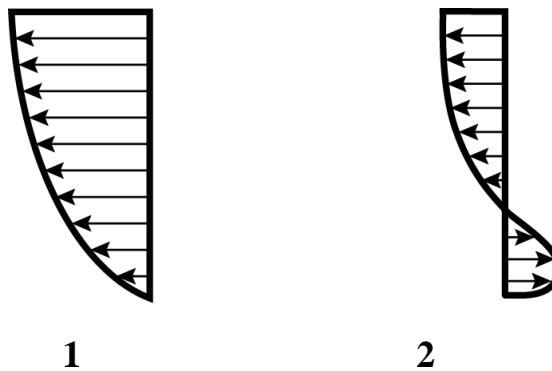


Рис. 2. Розподіл швидкостей в пограничному шарі:

1 - біля зсувних вікон; 2 - біля вікна водія

Експериментальні результати визначення коефіцієнта лобового опору C_x моделі автобуса з різним вентиляційним обладнанням наведені в таблиці.

Дані, наведені в таблиці, свідчать про те, що автобус, обладнаний кватирками природної вентиляції, призводить до підвищення коефіцієнта лобового опору C_x більше, ніж рішення з вентиляційними люками. Таким чином, використання люків є оптимальним рішенням щодо швидкості вентиляції в салоні та лобового опору автобуса. Маленькі зсувні віконця, водійське вікно є недоцільними, тому що лобовий опір збільшується приблизно на 8% - 9%. Найбільш недоцільним є

використання водійського вікна. Тому водійська частина повинна бути ізольована від пасажирського салону.

Дані, наведені в таблиці, свідчать про те, що автобус, обладнаний кватирками природної вентиляції, призводить до підвищення коефіцієнта лобового опору C_x більше, ніж рішення з вентиляційними люками. Таким чином, використання люків є оптимальним рішенням щодо швидкості вентиляції в салоні та лобового опору автобуса. Маленькі зсувні віконця, водійське вікно є недоцільними, тому що лобовий опір збільшується приблизно на 8% - 9%. Найбільш недоцільним є використання водійського вікна. Тому водійська частина повинна бути ізольована від пасажирського салону.

1. Коефіцієнт лобового опору шини при різних схемах вентиляції

Схема вентиляції	Коефіцієнт опору C_x	Збільшення [%]
<i>Природна вентиляція відсутня</i>		
1. Маленькі вікна і три люки закриті.	0.650	0.0
<i>Є природна вентиляція: водійське вікно відкрите, три люки закриті</i>		
2. Відчинено три віконця.	0.750	15.4
3. Відчинено два віконця.	0.737	13.4
4. Одне віконце відкрите.	0.714	9.8
5. Усі віконця зачинені.	0.700	7.7
<i>Є природна вентиляція: водійське вікно і три люки закриті</i>		
6. Відчинено три віконця.	0.692	6.5
7. Відчинено два віконця.	0.686	5.5
8. Одне віконце відкрите.	0.668	2.8
<i>Є природна вентиляція: вікно водія відкрите, три люки відкриті</i>		
9. Три люки відкриті, всі кватирки закриті.	0.721	10.9

На основі [8] можна здійснити кількісну оцінку при розгляді питання економії споживання палива автобусом. На рис. 3 показано витрати палива $Q, \text{л}/100 \text{ км}$ при різних швидкостях автобуса та його різні коефіцієнти лобового опору.

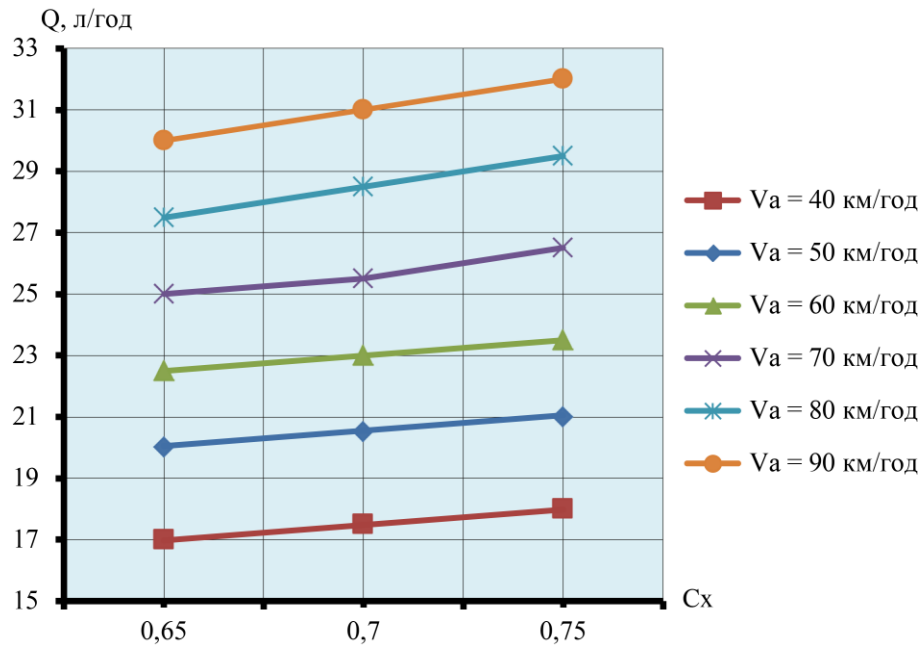


Рис. 3. Витрата палива в автобусі залежно від швидкості руху автобуса

Як видно з рис. 3, при збільшенні C_x від 0,65 до 0,75 витрата палива зростає на 4 % при $V_a = 40$ км/год і на 8 % при $V_a = 90$ км/год.

На рис. 3 наведено вимірювання витрати палива в автобусі, яке є значенням експериментально виміряного реального автобуса.

Дані з табл. 1 та рис. 3 дають можливість кількісно оцінити паливні та економічні показники автобусів різного призначення, обладнаних різними системами вентиляції та кондиціонування повітря в салонах.

$$Q = (5,5 + 0,13 V_a) + (2 + 0,2 V_a) C_x \quad (1)$$

Висновки і перспективи. 1. При збільшенні швидкості припливу повітря вентиляційні припливні пристрої слід розташовувати в задній частині кузова, а витяжні – в передній частині. Цей захід покращує обтічність кузова під час руху автобуса. В результаті зменшується коефіцієнт лобового опору і покращується його економічний показник витрати палива.

2. Використання люків є оптимальним рішенням щодо швидкості вентиляції в салоні та лобового опору автобуса. Малі зсувні віконця, водійське вікно є недоцільним, тому що лобовий опір збільшується приблизно на 8% - 9%. Водійська частина повинна бути ізольована від салону, тому що використання водійського вікна є найбільш недоцільним.

3. Ці заходи забезпечують необхідну швидкість повітряного потоку всередині салону без збільшення лобового опору автобуса та зберігають економічний показник споживання палива автобусом на прийнятному рівні.

References

1. Čarija, Z., Marušić, E., Novak, Z., et al. (2014). Numerical analysis of aerodynamic characteristics of a bumped leading edge turbine blade. *Engineering Review*, 34, 2, 93-101.
2. Dubau C., G. (2021). Calculation of kinematic characteristics throughout the range of conditions to maximize the power extracted from wind in the case of small size turbine. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 2(15), 1, 31-34.
3. V. Gorobets, V. Trokhaniak, M. Masiuk, N. Spodyniuk, O. Blesnyuk, Ye. Marchishina (2021). CFD modeling of aerodynamic flow in a wind turbine with vertical rotational axis and wind flow concentrator. *Agricultural Engineering*, 64 (2), 159–166.
4. Kievbus (2008). <http://old.kievbus.info/buses/67-42021.html>
5. Retrieved from https://mln.com.ua/blog/unikalnyy_avtobus_s_gbo/.
6. Rumsey, C. L., Spalart, P. R. (2009). Turbulence Model Behavior in Low Reynolds Number Regions of Aerodynamic Flowfields, *AIAA Journal*, 47 (4), 982-993.
7. Z. Blikharsky, P. Koszelnik, P. Mesaros (2020). *Lecture Notes in Civil Engineering*, 47, 518–525.
8. O. Voznyak, O. Dovbush, P. Kapalo, M. Adamski, F. Domnita, C. Bacotiu (2021). Frontal resistance coefficient of the buses with the different ventilation equipment. *Engineering Review, Hrcak*, 41 (2), 1 – 8.

THE RELATIONSHIP OF BUS VENTILATION WITH ITS FRONTAL RESISTANCE COEFFICIENT

O. Dovbush, O. Voznyak, O. Savchenko, N. Spodyniuk

Abstract. *The article presents the results of a study of the influence of natural and mechanical ventilation of the cabin and the driver's cabin on the air flow of the bus. Experimental studies were carried out in wind tunnels. Based on the measurements, the distribution of air velocities in the boundary layer was determined. In addition, the influence of natural ventilation of the interior space on the thickness of the air boundary layer was analyzed. The results are presented by means of a distribution diagram and analytical dependences. The purpose of this study is to determine both the thickness of the boundary layer when air passes through the car model and the drag coefficient. Experimental studies of the flow of a bus model in a wind tunnel have been carried out. It is determined that when the speed of air supply is increased, the ventilation supply devices should be placed in the rear part of the bus, and the exhaust devices should be placed in the front part of the bus. This measure improves body flow while the bus is moving. As a result, the coefficient of frontal resistance decreases and its economic indicator of fuel consumption improve.*

Key words: *bus, wind tunnel, boundary layer, coefficient of frontal resistance, ventilation, air flow*