

¹Чуйко С.П., Phd, голова циклової комісії
Транспортні технології (на автомобільному транспорті)
²Кравченко О.П., д.т.н., професор, професор кафедри
автомобілів і транспортних технологій

¹Відокремлений структурний підрозділ «Житомирський автомобільно-дорожній фаховий коледж
Національного транспортного університету»,

²Державний університет «Житомирська політехніка»

АНАЛІЗ ТЕПЛОВОЇ ІНЕРЦІЙНОСТІ ПОВІТРЯ В САЛОНІ

АВТОБУСУ З СИСТЕМОЮ КОНДИЦІОНУВАННЯ

Вступ. Важливим фактором перевізного процесу міського транспорту є мікроклімат в салоні. Мікроклімат в салоні автобуса залежить від особливостей систем опалення, вентиляції, кондиціонування, а також ряду конструктивних параметрів самого автобуса (герметичність салону, розташування двигуна, його теплоізоляція, теплопровідність облицювальних та наповнюваних матеріалів боковин, пасажироприсутність, ступінь та тип скління вікон, управління кондиціонером) [1].

Автомобільні кондиціонери відносяться до класу споживачів енергії, від яких напряму залежить витрата палива. Особливість цього полягає в тому, що поки недостатньо даних в технічному описі постачальників основних характеристик транспортного засобу, що потребує проведенню додаткових експериментальних випробувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання комплексного управління мікрокліматом в салоні міського автобуса можна поділити згідно з їх пріоритетом на: підтримання якісного газового складу повітря, забезпечення комфортності перевезення та енергозбереження. Аналіз підходів до оптимального керування мікрокліматом [2] показує, що сучасною тенденцією в цій сфері є розвиток систем управління енерговитратами та комфортністю.

Поширена думка, що температура повітря в салоні міського пасажирського транспортного засобу практично завжди співпадає з температурою огорожуючих конструкцій засобу. В умовах активного кондиціонування повітря пасажирського салону таке твердження часто залишається не зовсім вірним [3]. Пояснюється це тим, що в міському транспорті через відкриті двері на зупинках в салон потрапляє повітря з температурою відмінною від усталеної в салоні. Тривалість перебування дверей у відкритому стані на зупинці в середньому не перевищує 15-20 секунд [4]. За цей період температура стінок салону і сидінь в ньому залишається практично незмінною. Тому, при виборі системи кондиціонування повітря в салоні міського транспорту потрібно враховувати реальну теплову інерційність охолодженого в кондиціонері повітря, що проходить через салон.

Аналіз теплових навантажень проведених на досліджуваному мікроавтобусі показав, що сонячна енергія суттєво впливає на теплову характеристику салону, оскільки вона потрапляє безпосередньо через скло на внутрішнє середовище і у свою чергу, нагріває повітря. При проникненні сонячної радіації від 18% до 31% виникає потреба у охолодженні салону. Доведено, що зменшення коефіцієнта пропускання скління на коефіцієнт 0,2 може призвести до зниження встановленої потужності охолодження на 3,3% [5].

Значний вплив на теплообмін між салоном і зовнішньою температурою надає і масивність конструкцій автобуса, завдяки цьому коливання температури на їхній внутрішній поверхні зменшуються [1].

Метою роботи є визначення впливу інерційності повітря в салоні міського автобуса на навантаження на кондиціонер при забезпеченні енергетичної ефективності керуванням мікрокліматом.

Викладення основного матеріалу. Оптимальне споживання енергії та тепловий комфорт у салоні для пасажирів можуть розраховуватися та моделюватись за допомогою теорії теплопередачі, методу теплового балансу та коефіцієнту теплопередачі [6].

Теплову інерцію певного матеріалу можна визначити за формулою:

$$I_m = \sqrt{\lambda p c} \text{ ,} \quad (1)$$

де λ – теплопровідність матеріалу, Вт/(м К); p – щільність матеріалу, кг/м³; c – питома теплоємність, Дж/кг·°С.

Рівняння теплового балансу в салоні міського автобуса, як прояв закону збереження і перетворення енергії, формується з урахуванням особливої форми передачі енергії. Це рівняння складається з урахуванням теплоти, що надходить в салон і відведеної з нього. При встановленні між ними теплової рівноваги (сталий режим теплообміну) рівняння теплового балансу має вигляд [7]:

$$Q_{ок} + Q_{вд} + Q_{нас} + Q_{нт} = Q_{ск} \text{ ,} \quad (2)$$

де $Q_{ок}$ – теплота, що потрапляє в салон через огорожуючі конструкції, Вт; $Q_{вд}$ – надходження тепла від внутрішніх джерел автобуса, Вт; $Q_{нас}$ – теплота, яка виділяється від присутніх пасажирів, Вт; $Q_{мн}$ – теплота, що надходить в салон з припливним повітрям, в тому числі через відкриті двері, при посадці - висадці пасажирів на технологічних зупинках та тепло інфільтраційного повітря (через нещільності кузова), Вт; $Q_{ок}$ – теплота, що компенсується системою кондиціонування повітря салону автобуса, Вт.

Тепловий і температурний режими повітря в середині салону, в усталеному тепловому режимі, повинен підкорятися інтегральному рівнянню теплового балансу, яке можна записати за підходом [8]:

$$c_p \cdot G_x [t(\tau) - t_x] + c_p \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{dt}{d\tau} = \alpha \cdot F_{заг} [t_{cm} - t(\tau)] + Q_{сум}, \quad (3)$$

де c_p – питома ізобарна теплоємність холодного повітря (надходить в салон з кондиціонера), Дж/(кг · °C); G_x – витрати холодного повітря, що проходить через салон, кг /с; $t(\tau)$ – середня температура повітря в салоні за аналізований період часу, °C; t_x – температура холодного повітря, що надходить в салон, °C; ρ – щільність повітря (при певній температурі), кг/м³; V – об'єм повітря в салоні, м³; $\frac{dt}{d\tau}$ – температура в певний проміжок часу, °C; α – середній коефіцієнт тепловіддачі панелей салону, Вт/(м² · °C); $F_{заг}$ – загальна площа корпусних поверхонь салону автобуса (боковин, підлоги, стелі, сидінь для пасажирів), м²; t_{cm} – середня температура стінок, підлоги, стелі, сидінь для пасажирів в салоні, °C; $Q_{сум}$ – сумарна потужність внутрішніх джерел тепла, що потрапляє в салон (пасажирів, двигун, електрообладнання), Вт.

В рівнянні (4) прийнято, що температура повітря, що видаляється з салону, в сталому режимі (на міському маршруті), практично співпадає із середньою температурою повітря в салоні автобуса. Об'єм інфільтраційного повітря визначається за формулою [9]:

$$V_{інф} = \frac{a \cdot g \cdot l}{\rho}, \quad (4)$$

де a – коефіцієнт, що характеризує поверхню зовнішніх панелей кузова автобуса; g – питомі витрати повітря на одиницю довжини нещільності, кг/год; l – довжина нещільності, м; ρ – щільність повітря, кг/м³.

Для тришарової боковини кузова загальний коефіцієнт теплопередачі розраховується за підходом [10]:

$$\frac{1}{U_{wall}} = \frac{1}{h_i} + \left(\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3} \right) + \frac{1}{h_o} + r_{cwall}, \text{ K/m}^2\text{W}. \quad (5)$$

З урахуванням вищевказаного можна констатувати про нестационарний режим параметрів повітря в салоні автобуса.

При нестационарних режимах значення температури ($t(\tau)$) відрізняється від температури $t_{сал}$ на величину $\mathcal{G}(\tau)$ для теплового періоду:

$$t(\tau) = t_{сал} - \mathcal{G}(\tau). \quad (6)$$

На різницю температури $\mathcal{G}(\tau)$ впливають: тепло, що надходить в салон з повітрям через відкриті двері на зупинках, об'ємом $V_{дв}$ і теплота, що потрапляє з інфільтраційним повітрям, об'ємом $V_{інф}$.

З урахуванням об'єму припливного повітря в салон $V_{дв}$ та $V_{інф}$ для нестационарного режиму отримаємо:

$$\mathcal{E} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot (V + V_{дв} + V_{інф})}{\alpha \cdot F_{заг} + c_p \cdot G_x} = const. \quad (7)$$

Рівняння (7) характеризує внутрішню теплову інерційність повітря в салоні автобуса. Параметр \mathcal{E} в теорії теплообміну прийнято називати показником інерційності. Загальну тривалість перехідних процесів при технічних розрахунках оцінюють величиною $\tilde{t} \geq 3\mathcal{E}$ [11].

Як приклад скористаємося формулою (13) для визначення теплової інерційності повітря в салоні пасажирського автобуса МАЗ – 206 з системою кондиціонування повітря на постійному міському маршруті в м. Житомир [4, 7]. В результаті розрахунків отримуємо: $\mathcal{E} = 24$ с. З урахуванням перехідного процесу ($\tilde{t} \geq 3\mathcal{E}$) інерційність повітря не перевищує 2 хвилини після закривання дверей на зупинці і температура повітря в салоні приймає сталу величину $t_{сал}$.

Контрольні вимірювання параметрів повітря проводились під час руху по маршруту за 1 хвилину до зупинки і через 1 хвилину після початку руху автобуса із зупинки. Результати досліджень наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Мікроклімат в салоні автобуса за 1 хвилину до технологічної зупинки

Місце проведення вимірювань	Температура повітря, °C		Швидкість повітря, v, м/с		Відносна вологість повітря, φ %	
	зовнішня, t_z , °C	в салоні, t_c , °C	зовнішня, v_z , м/с	в салоні, v_c , м/с	зовнішня, φ_z , %	в салоні, φ_c , %
Об'єм V2	30,0	25,7	0,8 – 1,0	0,3	54	45
Об'єм V3	30,0	25,6	0,8 – 1,0	0,5	54	47
Об'єм V4	30,0	25,8	0,8 – 1,0	0,4	54	47

Аналіз зміни температури в салоні автобуса за відповідний час роботи кондиціонера показав зменшення температури в автобусі до оптимальних значень відповідає лінійній характеристики відтворення стабільності мікроклімату, що пояснює інерційність повітря в салоні.

Проведені дослідження підтверджують математичні розрахунки тривалості відтворення належного температурного режиму в салоні автобуса, при чому інерційність повітря не перевищує 2 хвилин після закривання дверей на зупинці. Це свідчить, що навіть при збільшенні теплової інерційності повітря за певних умов у 2 рази, тепловий комфорт не вплине на загальний мікроклімат в салоні автобуса і зменшить навантаження на кондиціонер.

Висновки. Теплова інерційність салону автобуса проявляється під часу руху на маршруті. Належна робота системи вентиляції і кондиціонування дозволяє без додаткових енергетичних витрат знизити навантаження на кондиціонер та зберегти комфортні умови на зупинках під час посадки-висадки пасажирів. Разом з тим, виникає потреба у покращенні теплозахисних властивостей і герметизації кузова автобуса, що дозволить використовувати кондиціонер меншої потужності.

Література

1. Kravchenko O., Hrabar I., Gerlici J., Chuiko S., Kravchenko K. Forming comfortable microclimate in the bus compartment via determining the heat loss / Communications. Scientific Letters of the University of Zilina. 2021. Vol. 23 (2), P. B150-B157.
2. Pervez S., Nursyarizal N., Perumal N., Irraivan E., Taib I. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable building / Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 34, 2014 pp. 409–429.
3. Емельянов, А.Л. Системы индивидуального регулирования температуры воздуха в купе пассажирского вагона / А.Л. Емельянов, С.Е. Буравой, Е.С. Платунов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2008. – №1.
4. Чуйко С.П., Кравченко О.П. Обґрунтування факторів впливу на витрату палива автобусів міських маршрутів з кондиціонером / Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Науково - прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей» (14-16 червня 2022). – Луцьк: ЛНТУ, 2022. - С. 164-166.
5. В. Torregrosa-Jaime, F. Bjurling, J.M. Corberan, F.D. Sciallo, J. Paya, Transient thermal model of a vehicle's cabin validated under variable ambient conditions / Applied Thermal Engineering, 75 (2015), pp. 45-53.
6. Sahraei, H. Interior Climate U-Value Calculation and Optimization for Electric Buses at Volvo Buses / Master's Thesis, Department of Mechanics and Maritime Sciences, Chalmers University of Technology Gothenburg, Gothenburg, Sweden, 2020.
7. Кравченко О.П., Чуйко С.П. Дослідження теплового балансу салону автобуса у теплий період року / Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. Науковий журнал. №3 (251). – Северодонецьк: СХУ ім. В. Даля, 2019. – С. 101-106.
8. Емельянов, А.Л. Тепловая инерционность воздуха в помещениях с системами кондиционирования / А.Л. Емельянов, С.Е. Буравой, Е.С. Платунов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2007, № 1
9. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. - Київ: Мінрегіон України, 2013. - 240 с.
10. Chiriac G., Lucache D.D., Nit,uc ̃a C., Dragomir A., Ramakrishna S. Electric Bus Indoor Heat Balance in Cold Weathe / Appl. Sci. 2021, 11, 11761.
11. Емельянов, А. Л. Обобщенная математическая модель нестационарного теплового режима пассажирского вагона с СКВ / А.Л. Емельянов, С.Е. Буравой, Е.С. Платунов // Науч. журнал НИУ ИТМО. Серия: «Холодильная техника и кондиционирование». – 2007. – № 1.