

Войчишин Ю.І., Яковенко Є.І., Горбай О.З. Голенко К.Е., Бур'ян М.В.  
*Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна*

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ МІСЬКОГО АВТОБУСА PMV-МЕТОДОМ ЗА ДОПОМОГОЮ CBE THERMAL COMFORT TOOL

Системи забезпечення мікроклімату (опалення, повітрообміну та кондиціонування) формують комфортні умови перевезення. Вони є важливими з точки зору охорони здоров'я і умов праці, і тому є обов'язковим компонентом будь-якого сучасного транспортного засобу. Основні дослідження по цій тематиці проводились для автобусів, електробусів та трамваїв і приміських електричок у напрямку удосконалення роботи систем опалення, повітрообміну та кондиціонування. Метою даного дослідження є визначення сприйняття водієм теплового комфорту в салоні автобуса при компоновці, коли водій відділений перегородкою від всього салону. Було розраховано теоретичне значення метаболічної теплової енергії по кількості спожитого кисню з врахуванням метаболічних процесів в організмі людини. Згідно стандартів ASHRAE за допомогою онлайн програми CBE Thermal Comfort Tool було проведено розрахунки по PMV-методу, враховуючи основні параметри мікроклімату. Побудовано ряд діаграм, зокрема: психрометричні діаграми, діаграми залежності вологості та теплових втрат від температури. У психрометричній діаграмі для кожної точки температура за сухим термометром зона комфорту являє собою комбінацію умов з тими самими DBT і MRT, для яких PMV становить від -0,5 до +0,5. Аналіз нормативно-правової бази України з обраної тематики схиляє до висновку, що в Україні як такої її нема, а документи, які використовуються, виготовлені за кордоном або застарілі. Результати цієї роботи зможуть використовуватися для досліджень режимів роботи водія міських, приміських і автобусів дальнього прямування. На основі подальших практичних досліджень, запланованих провести на основі вищезазначеної теоретичної роботи, можна буде створити методологічні основи формування теплових режимів у кабіні водія та салоні конкретної моделі автобуса та визначити проблемні «точки» систем опалення і вентиляції великогабаритних транспортних засобів.

**Ключові слова:** мікроклімат, тепловий комфорт, метод PMV, сприйняття тепла, теплові виділення, теплопередача.

### ВСТУП

При експлуатації транспортних засобів, особливо автобусів велику роль грає тепловий комфорт в салоні, основними показниками якого є температура, вологість, швидкість повітря та рівень токсичних речовин в салоні. Невідповідність їх рівня оптимальному впливає на пасажирів і призводить до швидкої стомлюваності водія, що негативно позначається на безпеці дорожнього руху. Підвищення або зниження температури погіршує самопочуття водія, знижує його працездатність. При високій температурі порушуються функції мислення, уваги, пам'яті і зменшується точність сенсомоторних реакцій.

Наявні раніше дані про аварії з реального дорожнього руху не дозволяють чітко заявити, чи встановлення систем кондиціонування в транспортних засобах не тільки покращує комфорт пасажирів, але й підвищує безпеку руху. Необхідні вихідні дані про кліматичну ситуацію в транспортних засобах не зафіксовані в статистиці аварій.

Дані дослідження слід проводити у напрямку визначення проблем роботи систем опалення, повітрообміну та кондиціонування, адже дана тематика є проблемна в багатьох виробників автобусної техніки.

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Забезпечення комфортних умов перевезення є сьогодні важливим питанням, яке ставиться перед інженерами-конструкторами та науковцями. Одним із чинників, що формує комфортні перевезення є забезпечення сталої температури в салоні транспортного засобу [1]. На сьогодні загальної нормативної документації по забезпеченню мікроклімату немає, оскільки в різних країнах клімат є різний. До нормативних документів в різних країнах світу належать такі документи: DIN 1946-3, DIN ENISO 7730 1995, EN ISO 7730:2005, IDT, ASHRAE Standard 55, ГОСТ 30393-2015 та застарілого ГОСТ Р 50993-96.

Якщо автобус експлуатується в різних кліматичних умовах, то тестування системи кондиціонування повітря автобуса повинно виконуватися у відповідних місцях щодо очікуваних кліматичних умов. Міжміські автобуси можуть бути припарковані під сонцем перед поїздкою тривалий час. Так, у роботі [6] було проведено експериментальне дослідження для визначення правильності встановлення системи кондиціонування на прототипі автобуса. Експериментальне дослідження проводилось в салоні автобуса. Було виміряно внутрішню та зовнішню температури,

температуру на вході та на виході випарника та значення відносної вологості. Значення відчуття тепла розраховували згідно стандартів ASHRAE. Зовнішню температуру вимірювали з лівого та правого бортів автобуса. Пристрої для вимірювання внутрішньої температури в салоні були розташовані на 900 мм із врахуванням того, щоб вони не сприймали сонячного навантаження. Іншого типу термодинамічний аналіз кондиціонування автобуса проводились у дослідженнях [7-13]. та оцінена енергетична ефективність системи кондиціонування салону.

Згідно також вимог ASHRAE отримано миттєве теплове навантаження за експериментальними даними у дослідженнях [2-4]. Вони проводились на регулярному міському автобусному маршруті м. Житомира при залученні автобуса обладнаного кондиціонером і результати порівнювались з розрахунковими значеннями та вимогами комфорту для літнього сезону. Дослідженнями підтверджено, що при зовнішній температурі повітря  $+24^{\circ}\text{C}$  у салоні автобуса, при відповідних умовах перевезення, не забезпечується бажаний нормативний мікроклімат і система вентиляції салону потребує кондиціонування повітря.

Для температурного та вентиляційного режиму салону міського великогабаритного автобуса розроблено твердотільну модель [5]. На підставі попереднього аналізу виведена спрощена розрахункова область, в якій реалізується неповне обтікання автобуса повітряним потоком. Для розрахунку турбулентних просторових потоків використані рівняння Нав'є-Стокса усереднені по Рейнольдсу. Розрахунки проведено при трьох різних швидкостях і для конфігурації вентиляційних отворів: вікна закриті, відкриті тільки вентиляційні люки на даху. На основі отриманих результатів проведена оцінка мікрокліматичних умов в салоні автобуса на відповідність вимогам нормативних документів.

Демонстрація можливості програми THESEUS-FE для системи мікроклімату проведено для автобуса фірми MAN моделі A37 [14]. На першому кроці було підтверджено збіжність результатів, отриманих з допомогою програмного забезпечення THESEUS-FE і фірми MAN. На другому кроці було продемонстровано перевагу використання THESEUS-FE при створенні розширеної моделі, яка дозволила імітувати тепловий комфорт пасажирів. Результати представлені у вигляді діаграм Мольте.

Комп'ютерне моделювання мікроклімату для електробуса за допомогою програмного продукту Star CCM+ показано у [17], де для одержання і представлення температурних профілів використано два методи. Методи базуються на CFD-аналізі в салоні електробуса в стаціонарному стані без врахування пасажирів. На фоні обмежених енергетичних ресурсів в тягових акумуляторах використання та взаємозв'язок високоефективних окремих компонентів та інтелектуальне управління теплом є головною умовою досягнення прийнятних робочих діапазонів [18].

Аналіз літературних джерел показав, що більшість авторів і в модельних, і в експериментальних дослідженнях в якості опорного стандарту використовують ASHRAE. Тому при проведенні модельних досліджень його використання у даній роботі є доцільним.

### **ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Створення комфортних умов водієві та пасажирам і виконання вимог, представлених в міжгалузевих правилах з охорони праці при експлуатації промислового транспорту, є на даний час обов'язковим. Тому в даній роботі проведено оцінювання сприйняття теплового комфорту водієм автобуса шляхом визначення зони комфорту PMV, обчислення компонентів втрат тепла і побудови психометричних діаграм.

### **РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Створення сприятливого температурного режиму в салоні при перевозці пасажирів з найменшими енергозатратами є необхідною умовою для великогабаритних транспортних засобів.

Однією з найбільш енергоємних, щодо споживання електроенергії, є система опалення салону автобуса. Великі міські автобуси оснащені, як правило, не менш ніж чотирма обігрівачами салону, що кріпляться під пасажирськими сидіннями до їхніх каркасів. Це призводить до проблем з балансом електроенергії автобуса, особливо у зимових умовах експлуатації, коли погіршуються умови електростартерного пуску двигуна та збільшуються витрати електроенергії системою освітлення пасажирського салону.

Важливим елементом рівняння теплового балансу є тепла енергія, що виділяється внаслідок метаболізму пасажирів і водія автобуса. Метаболічні процеси, що протікають в організмі людини (процес поглинання, збереження і виділення продуктів життєдіяльності), обумовлюють кругообіг затрат енергії на окиснення поживних речовин, обмін речовин теплопродукції і механічну роботу м'язів. При цьому енергетичний баланс підтримується, якщо кількість виробленої організмом енергії (яку фізично визначають по об'єму споживаного кисню) є рівним кількості виділеної енергії.

В стані спокою доросла людина споживає [26, 27] 15 л/год кисню (з виділенням теплоти 88 Вт), при виконанні фізичної роботи ця цифра росте майже до 180 л/год (при цьому кількість теплоти може досягати 1060 Вт).

По кількості спожитого кисню метаболічна теплова енергія  $M$ , Вт/м<sup>2</sup>, визначається по формулі:

$$M = 5,8V \frac{V_{O_2}}{F_d} = 5,8 \times 1 \times \frac{15}{1,9} = 45,7 \text{ Вт/м}^2, (1)$$

де 5,8 – енергетичний еквівалент 1 л кисню при нульовій температурі і нормальному барометричному тиску;  $V = 1$  Вт-год-с/л;  $V$  – відношення кількості видихнутого вуглекислого газу і вдихнутого кисню;  $V_{O_2}$  – споживання кисню в нормальних фізичних умовах, л/год;  $F_d$  – площа поверхні організму людини, м<sup>2</sup>:

$$F_d = 0,203G^{0,425}L^{0,725} = 0,203 \times 75^{0,425} \times 1,75^{0,725} = 1,9 \text{ м}^2, (2)$$

де –  $G = 75$  кг, маса середньої людини;  $L = 175$  см, середній зріст людини.

За допомогою онлайн-програми CBE Thermal Comfort Tool на сайті [comfort.cbe.berkeley.edu](http://comfort.cbe.berkeley.edu) було пораховано по PMV-методу та змодельовано деякі процеси враховуючи основні параметри мікроклімату згідно стандартів ASHRAE [28-31].

Для побудови графічних залежностей були використані наступні вихідні дані (табл. 1).

Таблиця 1

Вихідні параметри для моделювання

№	Найменування	Одиниця виміру	Значення	Примітка
1.	Температура повітря	°C	22	
2.	Швидкість повітря	м/с	0,1	
3.	Вологість повітря	%	60	
4.	Рівень метаболізму	---	1,5	При водінні автобуса
5.	Коефіцієнт ізоляції одягу	---	0,61	Для літнього одягу

Задавши потрібні параметри, вказані в табл. 1, за допомогою вищенаведеної програми можна поррахувати параметри комфортності. Деякі залежності визначені за допомогою даної методики розрахунку є показані на рис. 1-6.

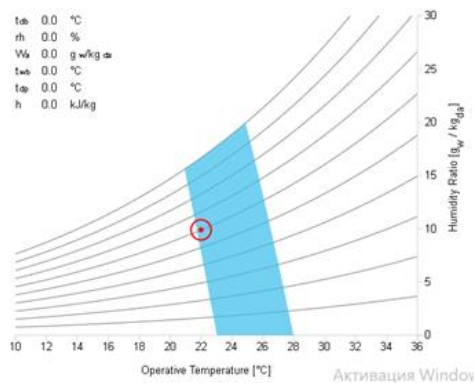


Рисунок 1 – Психрометрична діаграма за робочою температурою повітря

У психрометричній діаграмі (рис. 1) абсцисою є робоча температура, і для кожної точки температура за сухим термометром дорівнює середній радіаційній температурі ( $DBT = MRT$ ). Зона комфорту являє собою комбінацію умов з тими самими  $DBT$  і  $MRT$ , для яких  $PMV$  становить від -0,5 до +0,5, відповідно до стандарту. Цей стандарт застосовується лише до здорових людей. Цей стандарт не поширюється на: а) ізоляція одягу яких перевищує 1,5 ; б) чий одяг дуже непроникний; с) які сплять, лежать у дотик до постільної білизни або можуть поправляти ковдри чи постільну білизну.

Інструменти комфорту CBE автоматично обчислюють відносну швидкість повітря та динамічну ізоляцію одягу.

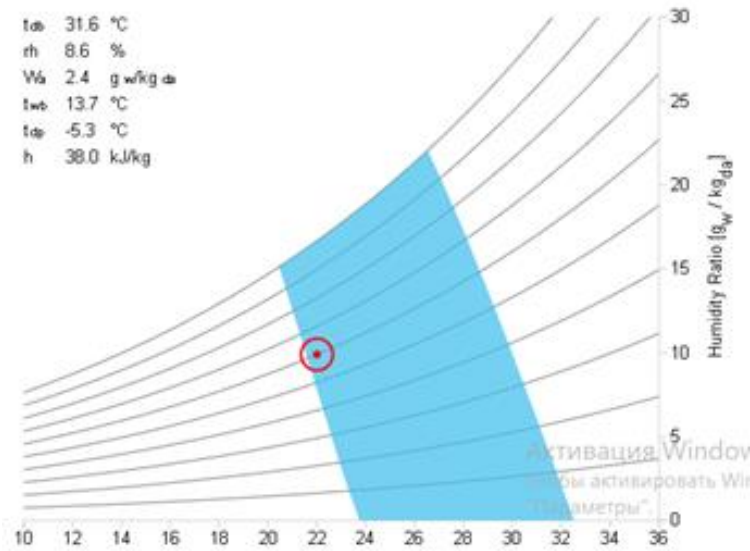


Рисунок 2 – Психрометрична діаграма за температурою сухого термометра

У психрометричній діаграмі (рис. 2) абсцисою є температура сухого термометра, а середня температура випромінювання (MRT) є фіксованою і контролюється вікном введення. Кожна точка на діаграмі має однаковий MRT, який визначає межу зони комфорту. Таким чином можна побачити, як зміни в MRT впливають на тепловий комфорт.

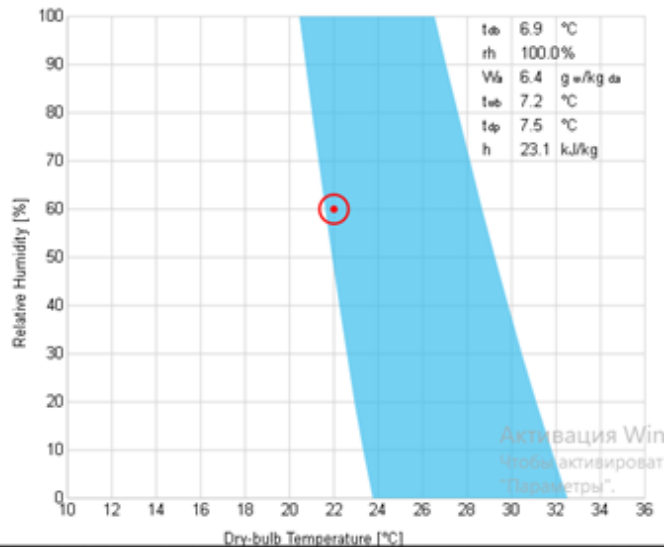


Рисунок 3 – Діаграма залежності вологості від температури за сухим термометром

Діаграма (рис. 3) відображає температуру за сухим термометром і відносну вологість. Розрахунки PMV все ще базуються на всіх психрометричних змінних, але візуалізація стає легшою для розуміння.

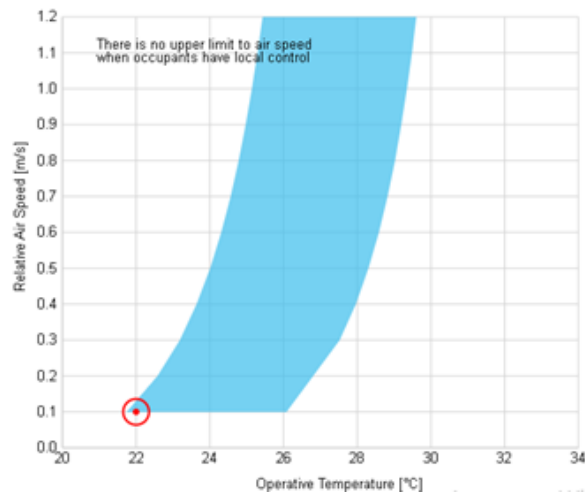


Рисунок 4 – Залежність швидкості повітря від робочої температури

На діаграмі (рис. 4) представлена залежність швидкості повітря від робочої температури. Робоча температура для кожної точки визначається температурою сухого термометра, що дорівнює середній радіаційній температурі ( $DBT = MRT$ ). Розрахунок зони комфорту PMV базується на всіх психрометричних змінних із значеннями PMV від -0,5 до +0,5 відповідно до стандарту.

Метод зони комфорту з підвищеною швидкістю повітря поширюється на всі приміщення, де рівень активності мешканців становить від 1,0 до 2,0, а утеплювач одягу – від 0,0 до 1,5. Немає верхньої межі швидкості повітря, якщо загальний одяг пасажирів  $> 0,7$  та швидкість метаболізму  $> 1,3$ .

Параметри, які показані на діаграмі на рис. 5:

1) Water vapor diffusion through the skin – дифузія водяної пари через шкіру; 2) Evaporation of sweat from skin surface – випаровування поту з поверхні шкіри; 3) Respiration – дихання; 4) Respiration – відчутне дихання; 5) Radiation from clothing surface – випромінювання від поверхні одягу; 6) Convection from clothing surface – конвекція від поверхні одягу; 7) Total latent – рівень прихованості; 8) Total sensible – рівень відчутності; 9) Total heat loss – загальні втрати тепла; 10) Metabolic rate – швидкість обміну речовин.

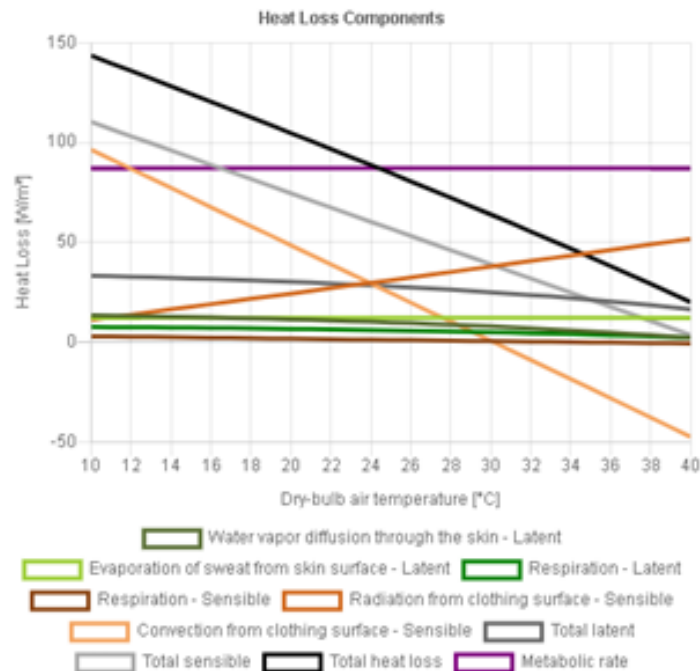


Рисунок 5 – Графік залежності компонентів втрат тепла від температури

На діаграмі (рис. 5) видно, що такі компоненти тепловтрат, як дифузія пари через шкіру, випаровування поту з поверхні шкіри і швидкість обміну речовин, майже не змінюються при вибраних вхідних параметрах.

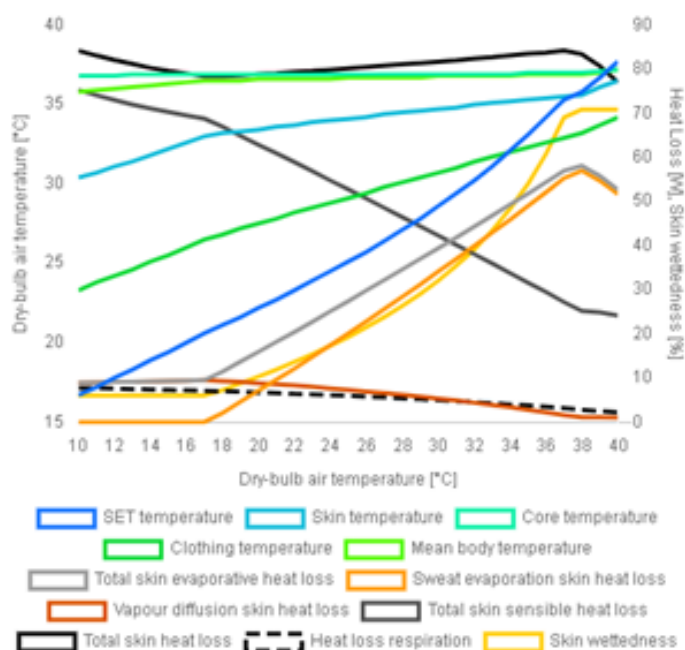


Рисунок 6 – Залежність теплових втрат параметрів від температури

Параметри, які показані на діаграмі на рис. 6:

1) SET temperature – стандартна ефективна температура; 2) Skin temperature – поверхнева температура; 3) Core temperature – температура ядра; 4) Clothing temperature – температура одягу; 5) Mean body temperature – середня температура тіла; 6) Total skin evaporative heat loss – загальна тепловтрата шкіри через випаровування; 7) Sweat evaporation skin heat loss – випаровування поту втрата тепла шкірою; 8) Vapour diffusion skin heat loss – втрата тепла шкіри дифузією парів; 9) Total skin sensible heat loss – загальна видима втрата тепла шкірою; 10) Total skin heat loss – повна втрата тепла шкірою; 11) Heat loss respiration – дихання з втратою тепла; 12) Skin wettedness – зволоження шкіри.

Діаграма (рис. 6) показує, що найбільшу температурну залежність мають такі компоненти, як теплові втрати шкіри через випаровування і загальні втрати тепла шкірою.

### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведений аналіз з обраної тематики нормативних документів DIN 1946-3, DIN EN ISO 7730 1995, EN ISO 7730:2005, IDT, ASHRAE Standard 55, ГОСТ 30393-2015 та застарілого ГОСТ Р 50993-96 з різних країн світу схиляє до висновку, що в Україні практично відсутня нормативно правова база, а документи, які використовуються є не повністю адаптованими або застарілі.

Для проведення розрахунків використано стандарт ASHRAE та за допомогою онлайн програми CBE Thermal Comfort Tool було проведено розрахунки основних параметрів мікроклімату по PMV-методу. Однак, цей стандарт застосовується лише до здорових людей і не поширюється на ізоляцію одягу яка перевищує 1,5, дуже непроникний одяг та степінь дотику натільної білизни.

Результати цієї роботи зможуть бути використаними для досліджень режимів роботи водіїв міських, приміських і автобусів дальнього прямування після проведення експериментальних досліджень, які заплановано провести на основі даних теоретичних досліджень. Проведення розрахунків при варіації параметрів середовища в салоні автобуса, що дозволить рекомендувати межі теплового комфорту є завданням наступного етапу досліджень.

### ВИСНОВКИ

Основним завданням дослідження було оптимізація теплообміну салону автобуса з метою покращення якості пасажирських перевезень та умов роботи водія. Для досягнення мети були проведені розрахунки теплового комфорту в програмі CBE Thermal Comfort Tool. При обчисленнях брались вихідні дані близькі до тих, що зазначені у нормативних документах.

Розрахунок комфортності теплосприйняття показав, що важливим компонентом системи теплообміну є тепловіддача від пасажирів. Одержані результати свідчать, що при визначенні теплового комфорту потрібно враховувати не тільки параметри зовнішнього середовища, а також певні характеристики одягу пасажирів чи водія і процеси метаболізму.

#### ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Л. Крайник, Ю. Гай. Мікроклімат салону автобуса. Формування нормативної бази. Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні: тези доповідей III-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції, Львів, 22-23 лютого 2018 року. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. С. 14–15.
2. Кравченко О.П., Чуйко С.П. Дослідження теплового балансу салону автобуса у теплий період року. Вісник східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. 2019. №3 (251). С. 101-106.
3. Чуйко С.П., Кравченко А. П. Критерии тепловой нагрузки кабины водителя автобуса МАЗ-206 в летний период эксплуатации. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 2020, №10(62). С. 62-67.
4. S.P. Chuiko, “Znyzhennya enerhoyemnosti avtobusiv katehoriyi M3 na miskyh marshrutah”, Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.
5. Т.І. Круць, Р.В. Зінько, Д.Г. Музичка, Ю.М. Черевко. Дослідження швидкісних і температурних показників в процесі вентиляції салону автобуса. «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (ІПРК-2019): матеріали тез доповідей XX міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ-Херсон, 10–13 вересня 2019 р.) / КПІ ім. І.Сікорського [та ін.]. 2019. – С.174-179.
6. Şaban Ünal. (2017). An Experimental Study on a Bus Air Conditioner to Determine its Conformity to Design and Comfort Conditions. *Yildiz Technical University Press*, pp.1089-1101.
7. Mehmet Bilgili, Ediz Cardak, Arif Emre Aktas. (2017). Thermodynamic Analysis of Bus Air Conditioner Working with Refrigerant R600a. *European Mechanical Science*, 1(2), pp.69-75.
8. M. Hegar M., M. Kolda, M. Kopecka, V. Rajtmajer, A. Ryska, Bus HVAC energy consumption test method based on HVAC unit behavior, *International Journal of Refrigeration*, 36 (2013) 1254-1262.
9. Ç. Kutlu, Ş. Ünal, M.T. Erdinç, Thermodynamic analysis of bi-avaporater ejector refrigeration cycle using R744 as natural refrigerant, *Journal of Thermal Engineering*, 2(2) (2016), 735-740.
10. B.T. 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) 45-53.
11. O. Solmaz, M. Ozgoren, M.H. Aksoy, Hourly cooling load prediction of a vehicle in the southern region of Turkey by Artificial Neural Network, *Energy Conversion and Management*, 82 (2014) 177–187.
12. M.K. Mansour, M.N. Musa, M.N.W. Hassan, K.M. Saqr, Development of novel strategy for multiple circuit, roof top bus air conditioning system in hot humid countries, *Energy Conversion and Management*, 49 (2008) 1455-1468.
13. O. Büyükalaca, T. Yılmaz, Ş. Ünal, E. Cihan, E. Hürdoğan, Calculation of cooling load of a bus using radiant time series (RTS) method, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ/Turkey, 16-18 May (2011) 227-230 (in Turkish).
14. Dr. S. Paulke, F. Artmeier, Dr. K.-E. Yildirim, Dr. V. Bader, Prof. Dr. A. Gubner. P+Z Engineering GmbH, Volkswagen Research, MAN, 13 p.
15. С. Немий, М. Гинда. Вплив конструктивних особливостей теплорозподільчих пристроїв на ефективність системи опалення автобусів. 14-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. 23-24 травня 2019. С. 84-85.
16. Прохоров И.В., Бутарович Д.О., Рябов Д.М. Исследование температурного поля воздуха обитаемых зон салона электробуса. Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. №2 (125). С. 205 – 209.
17. Edvin Eriksson Johansson, Maja Skärby. (2019). Interior climate simulation of electric buses. Master thesis in Applied Mechanics. Department of Mechanics and Maritime Sciences CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Gothenburg, 60 p.
18. Dr.-Ing. Robert Basile. Challenges for air conditioning and heating solutions in electrobuses. SPHEROS, 7 p.
19. Dietmar Göhlich, Tu-Anh Ly, Alexander Kunith, Dominic Jefferies. (2015). Economic assessment of different air-conditioning and heating systems for electric city buses based on comprehensive energetic simulations. *World Electric Vehicle Journal*, 7, 9 p.
20. Taiquan Liu. (2019). Thermal Management Solutions for Battery Electric Buses in Cold Climates. Master's Thesis. Aalto University School of Engineering Department of Mechanical Engineering, 107 p.

21. Anne Liebold, Po-Hsu Lin, Bernhard Vetsch, Cordin Arpagaus, Stefan S. Bertsch. (2016). Simulation of a VRF system applied in electric buses in Taiwan. Purdue University. International Refrigeration and Air Conditioning, 11 p.
22. Eirik Trygstad. (2017). R744 HVAC unit for NSB Flirt trains. Norwegian University of Technology and Science, 188 p.
23. Dawit Getachew Melesse. (2014). Thermal Comfort for Passenger Train from Addis Ababa to Dire Dawa: A Thesis submitted to the school of Graduate studies of Addis Ababa University in partial Fulfillment of the Requirements for the Degrees of Masters of sciences in Mechanical Engineering. Addis Ababa Institute of Technology School of Mechanical and Industrial Engineering, 110 p.
24. Д. Ю. Шавырин, А. А. Красниченко, Н. Л. Иванов. Системы кондиционирования и отопления пассажирских вагонов. УрГУПС. Екатеринбург, 2017. 97 с.
25. 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.
26. Теоретические основы создания микроклимата в помещении: Учебное электронное издание по изучению дисциплины «Теоретические основы создания микроклимата в помещении» для студентов очной, заочной и дистанционной форм обучения ВлГУ, обучающихся по направлению «Строительство» (08.03.01) профиль «Теплогазоснабжения и вентиляции (ТГВиГ)» / В.Н. Дорофеев / Владим. гос. ун-т; сост.: Изд-во ВлГУ, 2017.
27. К. Бух. (2006). Klima am Arbeitsplatz. Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse – Bedarfsanalyse für weitere Forschungen, 34 s.
28. ASHRAE Applications Handbook SI, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, USA, (2003).
29. ASHRAE Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, USA, (2001).
30. ASHRAE Standard 55, Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, USA, (2004).
31. ASHRAE Standard 62, Ventilation for acceptable indoor air quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, USA, (2001).

## REFERENCES

1. Lyubomyr Krainyk, Yuriy Hai. (2018). Mikroklimat salonu avtobusa. Formuvannya normatyvnoyi bazy. Avtobusobuduvannya ta pasazhyrski perevezennya v Ukraini: tezy dopovidey III-yi Vseukrayinskoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi, Lviv, 22-23 lyutoho 2018 roku, 14–15.
2. Kravchenko O.P., Chuyko S.P. (2019). Doslidzhennya teplovoho balansu salonu avtobusa u teplyy period roku. Visnyk shidnoho natsionalnoho universytetu im. V.Dalya, 3 (251), 101-106.
3. Chuyko S.P., Kravchenko A. P. (2020). Kriterii teplovy nahruzki kabiny vodytelya avtobusa MAZ-206 v lyetnyy period expluatatsii. Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal), 10(62), 62-67.
4. Kernyskyy, I.; Yakovenko, Y.; Horbay, O.; Ryviuk, M.; Humenyuk, R.; Sholudko, Y.; Voichyshyn, Y.; Mazur, Ł.; Osiński, P.; Rusakov, K. et al.(2021). Development of comfort and safety performance of passenger seats in large city buses. Energies, Volume 14, Issue 22, 1-13.
5. Kruts, T.I., Zinko, R.V., Muzychka, D.H., Cherevko, Y.M. (2019). Doslidzhennya shvydkisnyh i temperaturnykh pokaznykiv v protsesi ventylyatsiyi salonu avtobusa. «Prohresyvna tehnika, tehnolohiya ta inzhenerna osvita» (PRTK-2019): materialy tez dopovidey XX mizhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi konferentsiyi (m. Kyiv-Kherson, 10–13 veresnya 2019 r.), 174-179.
6. Şaban Ünal. (2017). An Experimental Study on a Bus Air Conditioner to Determine its Conformity to Design and Comfort Conditions. Yildiz Technical University Press, pp.1089-1101.
7. Mehmet Bilgili, Ediz Cardak, Arif Emre Aktas. (2017). Thermodynamic Analysis of Bus Air Conditioner Working with Refrigerant R600a. European Mechanical Science, 1(2), pp.69-75.
8. M. Hegar M., M. Kolda, M. Kopecka, V. Rajtmajer, A. Ryska. (2013). Bus HVAC energy consumption test method based on HVAC unit behavior, International Journal of Refrigeration, 36, 1254-1262.
9. Ç. Kutlu, Ş. Ünal, M.T. Erdiñç. (2016). Thermodynamic analysis of bi-avaporater ejector refrigeration cycle using R744 as natural refrigerant, Journal of Thermal Engineering, 2(2), 735-740.



10. B.T. Jaime, F. Bjurling, J.M. Corberan, F.D. Sciullo, J. Paya. (2015). Transient thermal model of a vehicle's cabin validated under variable ambient conditions, *Applied Thermal Engineering*, 75, 45-53.
11. O. Solmaz, M. Ozgoren, M.H. Aksoy. (2014). Hourly cooling load prediction of a vehicle in the southern region of Turkey by Artificial Neural Network, *Energy Conversion and Management*, 82, 177-187.
12. M.K. Mansour, M.N. Musa, M.N.W. Hassan, K.M. Saqr. (2008). Development of novel strategy for multiple circuit, roof top bus air conditioning system in hot humid countries, *Energy Conversion and Management*, 49, 1455-1468.
13. O. Büyükalaca, T. Yılmaz, Ş. Ünal, E. Cihan, E. Hürdoğan. (2011). Calculation of cooling load of a bus using radiant time series (RTS) method, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ/Turkey, 16-18, 227-230 (in Turkish).
14. Dr. S. Paulke, F. Artmeier, Dr. K.-E. Yildirim, Dr. V. Bader, Prof. Dr. A. Gubner. P+Z Engineering GmbH, Volkswagen Research, MAN, 13.
15. S. Nyemyy, M. Hynda. (2019). Vplyv konstruktyvnyh osoblyvostey teplorozpodilchyyh prystroyiv na efektyvnist systemy opalennya avtobusiv. The 14-th mozhnarodnyy symposium ukrayinskyh inzheneriv-mehaniiv u Lvovi. 23-24 travnya, 84-85.
16. Prohorov, I.V., Butarovich, D.O., Ryabov, D.M. (2019). Issledovaniye temperaturnoho polya vozduha obitayemyh zon salona elektrobusa. Mashynostroyeniye i transport: teoriya, tehnolohii, proizvodstvo. *Trudy NHTU im. R.E. Alexeeva*, 2 (125). 205 – 209.
17. Edvin Eriksson Johansson, Maja Skärby. (2019). Interior climate simulation of electric buses. Master thesis in Applied Mechanics. Department of Mechanics and Maritime Sciences CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Gothenburg, 60.
18. Dr.-Ing. Robert Basile. Challenges for air conditioning and heating solutions in electrobuses. SPHEROS, 7.
19. Dietmar Göhlich, Tu-Anh Ly, Alexander Kunith, Dominic Jefferies. (2015). Economic assessment of different air-conditioning and heating systems for electric city buses based on comprehensive energetic simulations. *World Electric Vehicle Journal*, 7, 9.
20. Taiquan Liu. (2019). Thermal Management Solutions for Battery Electric Buses in Cold Climates. Master's Thesis. Aalto University School of Engineering Department of Mechanical Engineering, 107.
21. Anne Liebold, Po-Hsu Lin, Bernhard Vetsch, Cordin Arpagaus, Stefan S. Bertsch. (2016). Simulation of a VRF system applied in electric buses in Taiwan. Purdue University. *International Refrigeration and Air Conditioning*, 11.
22. Eirik Trygstad. (2017). R744 HVAC unit for NSB Flirt trains. Norwegian University of Technology and Science, 188.
23. Dawit Getachew Melesse. (2014). Thermal Comfort for Passenger Train from Addis Ababa to Dire Dawa: A Thesis submitted to the school of Graduate studies of Addis Ababa University in partial Fulfillment of the Requirements for the Degrees of Masters of sciences in Mechanical Engineering. Addis Ababa Institute of Technology School of Mechanical and Industrial Engineering, 110.
24. D. Y. Shavyrin, A. A. Krasnichenko, N. L. Ivanov. (2017). Sistemy Kondytsionirovaniya i otopleniya passazhirskih vahonov. *UrHUPS*, 97.
25. Dr.-Ing. Joseph Temming. (2003). Fahrzeugklimatisierung und Verkehrssicherheit. Auswirkungen sommerlichen Klimas in Kfz auf die Leistungsfähigkeit der Fahrer. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT). Frankfurt am Main, 319.
26. Teoretichiskiye osnovy sozdaniya mikroklimata v pomeshchenii: Uchebnoye elektronnoye izdaniye po izucheniyu distsypliny «Teoretichiskiye osnovy sozdaniya mikroklimata v pomeshchenii» dlya studiyetov ochnoy, zaочноy i distantsyonnoy form obucheniya VIHU, obuchayushchihsya po napravlniyu «Stroitelstvo» (08.03.01) profil «Teplohozsnab i ventilyatsyya (THViH)» / V.N. Dorofeyev / Vladim. hos. un-t; sost.: Izd-vo VIHU, 2017.
27. K. Bux. (2006). Klima am Arbeitsplatz. Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse – Bedarfsanalyse für weitere Forschungen, 34.
28. ASHRAE Applications Handbook SI, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, USA, (2003).
29. ASHRAE Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, USA, (2001).
30. ASHRAE Standard 55, Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, USA, (2004).

31. ASHRAE Standard 62, Ventilation for acceptable indoor air quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, USA, (2001).

***Yu. Voichyshyn, Ye. Yakovenko, O. Horbai, K. Holenko, M. Burian. Simulation of thermal comfort of a city bus using the PMV method using CBE Thermal Comfort Tool.***

Today, the topic of vehicle microclimate is very relevant and does not stand still, because many scientists and engineers around the world are working on its improvements. Microclimate systems (heating, air exchange and air conditioning) provide comfortable transportation, so they are important and should be taken into account when designing their vehicle. The work of scientists from both Ukraine and abroad is analyzed in the work. The main research was conducted in the field of improving the heating, air exchange and air conditioning systems of buses, electric buses and trams and suburban trains. The main objectives of this study are to determine the importance of the driver's perception of thermal comfort in the cabin or cab (in the layout, when the driver is separated by a partition from the whole cabin). Also, taking into account metabolic processes in the human body, the theoretical value of metabolic thermal energy by the amount of oxygen consumed was calculated. Using the online program CBE Thermal Comfort Tool, PMV calculations were performed taking into account the main parameters of the microclimate according to ASHRAE standards and some diagrams were presented: psychrometric diagram of operating air temperature, psychrometric diagram of dry bulb temperature, humidity versus dryness diagram, thermometer, diagram of the dependence of air velocity on the operating temperature, diagram of the dependence of the components of heat loss on temperature and diagram of the dependence of heat loss parameters on temperature. Analyzing the regulatory framework of Ukraine on the selected topic, we can conclude that in Ukraine it does not exist as such, and the documents used are produced abroad or outdated. The results of this work can be applied to further research in the future. Based on further practical research conducted on the basis of the above theoretical work, it will be possible to analyze the thermal conditions in the cabin or cab of a particular bus and it will be possible to identify problem "points" for further discussion and further study.

**Key words:** microclimate, thermal comfort, PMV method, heat absorption, heat production, heat transfer.

*ВОЙЧИШИН Юрій Іванович*, аспірант, кафедри автомобілебудування, Національний університет «Львівська політехніка» e-mail: [Jurko-Q@ukr.net](mailto:Jurko-Q@ukr.net), ORCID 0000-0001-7004-0567.

*ЯКОВЕНКО Євгенія Ігорівна*, к.т.н., доцент, доцент кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій, e-mail: [yevheniia.i.yakovenko@lpnu.ua](mailto:yevheniia.i.yakovenko@lpnu.ua), ORCID 0000-0001-9065-5649

*ГОРБАЙ Орест Зенонович*, д.т.н., проф., завідувач кафедри автомобілебудування, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: [orest\\_60@yahoo.ca](mailto:orest_60@yahoo.ca), ORCID 0000-0002-0915-5637.

*ГОЛЕНКО Костянтин Едуардович*, к.т.н., викладач кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, Хмельницький національний університет, e-mail: [kgolenko@gmail.com](mailto:kgolenko@gmail.com), ORCID 0000-0002-6140-4573

*БУР'ЯН Михайло Володимирович*, к.т.н., ст. викл. кафедри автомобілебудування, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: [mikeburian@gmail.com](mailto:mikeburian@gmail.com), ORCID 0000-0003-2859-3461.

*Yurii VOICHYSHYN*, student, Department of Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University e-mail: [Jurko-Q@ukr.net](mailto:Jurko-Q@ukr.net), ORCID 0000-0001-7004-0567.

*Yevheniia YAKOVENKO*, PhD, Associate Professor at the Department of Electronic Information and Computer Technology, e-mail: [yevheniia.i.yakovenko@lpnu.ua](mailto:yevheniia.i.yakovenko@lpnu.ua), ORCID 0000-0001-9065-5649.

*Orest HORBAI*, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University e-mail: [orest\\_60@yahoo.ca](mailto:orest_60@yahoo.ca), ORCID 0000-0002-0915-5637.

*Kostyantyn HOLENKO*, PhD, teacher of Department of tribology, automobiles and materials science. Khmelnytsky National University, e-mail: [kgolenko@gmail.com](mailto:kgolenko@gmail.com) ORCID 0000-0002-6140-4573.

*Mykhailo BURIAN*, PhD, teacher of Automotive Engineering Department, Lviv Polytechnic National University e-mail: [mikeburian@gmail.com](mailto:mikeburian@gmail.com), ORCID 0000-0003-2859-3461.

DOI 10.36910/automash.v2i19.901