

УДК 697.91:697.97:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.4.1.33>

КОМП'ЮТЕРНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ (PMV) З ВИКОРИСТАННЯМ C#-МОДУЛЯ ТА ПОРІВНЯННЯ З АНКЕТНИМИ ДАНИМИ В УМОВАХ НАВЧАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

Череднікова О. В. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
ORCID ID: 0000-0003-4684-9870

Чередніков В. М. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
ORCID ID: 0000-0003-1857-3942

Гузик Д. В. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
ORCID ID: 0000-0003-2130-951X

Чередніков М. В. – студент
Харківського національного університету радіоелектроніки
ORCID ID: 0009-0001-3498-8614

У статті представлено результати дослідження теплового комфорту в умовах навчального середовища на основі поєднання об'єктивних розрахунків індексу PMV (Predicted Mean Vote) та суб'єктивних оцінок користувачів. Для аналітичного визначення PMV було розроблено програмний модуль мовою C#, реалізований згідно з методикою ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Розрахунки здійснено з використанням фактично вимірних параметрів мікроклімату (температура повітря, середня радіаційна температура, швидкість руху повітря, відносна вологість) та даних про теплозахисні властивості одягу й рівень метаболічної активності користувачів. Паралельно було проведено анкетування студентів та викладачів за допомогою стандартизованої форми з 12 запитаннями, що дозволило отримати суб'єктивні оцінки теплового стану та якості повітря.

Порівняльний аналіз показав загальну узгодженість між результатами аналітичних розрахунків і даними анкетування. Водночас виявлено окремі розбіжності, зумовлені індивідуальними особливостями користувачів та впливом локальних умов у приміщенні. Результати дослідження підтверджують, що на теплове сприйняття впливають не лише вимірні параметри мікроклімату, а й такі чинники, як тип одягу, фізична активність, адаптація до середовища та суб'єктивні очікування. Особливу увагу приділено аналізу якості повітря, яка є важливим складником загального відчуття комфорту.

Запропонований C#-модуль продемонстрував високу точність і стабільність роботи, дозволяючи автоматизувати процес оцінки теплового комфорту та отримувати результати в режимі реального часу. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання даного інструменту для моніторингу й оптимізації параметрів мікроклімату в навчальних закладах, що сприятиме підвищенню енергоефективності будівель та створенню сприятливих умов для навчання. Отримані висновки можуть бути корисними

для фахівців у галузі енергоменеджменту, проектувальників систем вентиляції та опалення, а також для адміністрацій освітніх установ, зацікавлених у забезпеченні належного теплового комфорту та якості повітря.

Ключові слова: тепловий комфорт, PMV, PPD, мікроклімат, C#-модуль, енергоефективність будівель, вентиляція, програмне забезпечення, комп'ютерне моделювання, інженерна графіка, візуалізація даних, автоматизація розрахунків.

Cherednikova O. V., Cherednikov V. M., Guzyk D. V., Cherednikov M. V. Computer-based methods for assessing thermal comfort (PMV) using a C# module and comparison with survey data in an educational environment

The article presents the results of a study on thermal comfort in an educational environment based on the combination of objective calculations of the Predicted Mean Vote (PMV) index and subjective assessments provided by users. For the analytical determination of PMV, a software module was developed in C#, implemented in accordance with the methodology of DSTU B EN ISO 7730:2011. The calculations were performed using actual measured microclimatic parameters (air temperature, mean radiant temperature, air velocity, and relative humidity), as well as data on the thermal insulation of clothing and the metabolic activity level of users. In parallel, a survey of students and teachers was conducted using a standardized form consisting of 12 questions, which allowed for obtaining subjective evaluations of thermal sensation and air quality.

The comparative analysis revealed an overall consistency between the results of analytical calculations and the survey data. At the same time, certain discrepancies were identified, caused by individual user characteristics and the influence of local conditions in the room. The study confirms that thermal perception is influenced not only by measured microclimatic parameters but also by factors such as clothing type, physical activity, adaptation to the environment, and subjective expectations. Special attention is given to the analysis of air quality, which is an important component of overall comfort perception.

The proposed C# module demonstrated high accuracy and stability, enabling the automation of thermal comfort assessment and the delivery of real-time results. The practical significance of the research lies in the possibility of using this tool for monitoring and optimizing microclimate parameters in educational institutions, which will contribute to improving the energy efficiency of buildings and creating favorable learning conditions. The findings can be useful for energy management specialists, designers of ventilation and heating systems, as well as for educational institution administrations interested in ensuring adequate thermal comfort and air quality.

Key words: thermal comfort, PMV, PPD, microclimate, C# module, building energy efficiency, ventilation, software, computer modeling, engineering graphics, data visualization, calculation automation.

Постановка проблеми. Забезпечення належного рівня теплового комфорту в навчальних приміщеннях є важливою передумовою для підтримання працездатності, концентрації уваги та загального самопочуття студентів і викладачів. У контексті сучасних вимог до енергоефективності будівель, зокрема в рамках директив ЄС та стандартів національного рівня, зростає потреба у точному контролі та прогнозуванні параметрів мікроклімату.

Індекс передбачуваної середньої оцінки теплового відчуття людини (PMV) є визнаним у світі критерієм оцінки теплового стану користувачів приміщень, але його обчислення потребує врахування великої кількості фізичних параметрів і відповідного математичного апарату. Використання комп'ютерних інструментів, зокрема програмних модулів, реалізованих на мовах програмування, відкриває нові можливості для впровадження аналітичних методів у практику енергоменеджменту в освітніх установах.

Одночасно з цим, не менш важливим є аналіз суб'єктивного сприйняття мікрокліматичних умов самими користувачами приміщень. Систематизація та порівняння результатів анкетного опитування з аналітичними розрахунками дозволяє виявити фактори, які не завжди враховуються стандартними моделями, але мають вагомий вплив на відчуття комфорту.

Таким чином, актуальність дослідження полягає в необхідності поєднання об'єктивних комп'ютерних методів розрахунку та суб'єктивного опитування для

комплексної оцінки теплового комфорту в навчальному середовищі, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень при проектуванні, експлуатації та реконструкції будівель навчального призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика теплового комфорту в навчальних приміщеннях є предметом активних досліджень упродовж останніх десятиліть, оскільки мікроклімат безпосередньо впливає на працездатність, концентрацію уваги та загальне самопочуття учасників освітнього процесу. У міжнародній науковій практиці для кількісної оцінки теплового комфорту найчастіше використовується індекс PMV (Predicted Mean Vote), розроблений Фангером у 1970-х роках [1], та відповідний показник PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), які стандартизовані у ISO 7730 та адаптовані в Україні як ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 [10].

Дослідження показали, що PMV забезпечує достатньо точне прогнозування середньої теплової оцінки великих груп користувачів за умови коректного введення параметрів мікроклімату, теплозахисних властивостей одягу (clo) та рівня метаболічної активності (met) [2], [3]. Разом з тим, низка робіт [4]; [5] вказує на можливі розбіжності між прогнозованими значеннями PMV та фактичними суб'єктивними оцінками, особливо в умовах змінного або адаптивного мікроклімату.

У вітчизняних дослідженнях ([6], [7]) також звертається увага на важливість порівняння інструментально визначених показників з результатами анкетування користувачів. Такий підхід дає змогу враховувати не лише фізіологічні, а й психологічні чинники теплового сприйняття, зокрема індивідуальні звички, одяг, тривалість перебування у приміщенні та рівень фізичної активності.

З технічної точки зору, реалізація алгоритмів PMV у вигляді програмних модулів на сучасних мовах програмування, зокрема C#, активно використовується для інтеграції розрахунків у системи моніторингу мікроклімату та «розумні» системи управління будівлями [8] [9]. Проте у більшості таких робіт акцент робиться на комерційних або інженерних додатках, тоді як сфера освіти залишається недостатньо дослідженою.

Таким чином, існує наукова й практична потреба у вивченні відповідності між об'єктивними розрахунками індексу PMV та суб'єктивними оцінками теплового комфорту саме в умовах навчального середовища. Це дозволить не лише уточнити методики розрахунку для освітніх приміщень, але й сформулювати рекомендації щодо оптимізації параметрів мікроклімату з урахуванням специфіки навчального процесу.

Мета статті. Метою статті є порівняння об'єктивних аналітичних розрахунків індексу PMV, виконаних за допомогою розробленого програмного модуля на C# відповідно до ДСТУ Б EN ISO 7730:2011, із суб'єктивними оцінками теплового комфорту, отриманими в результаті анкетування користувачів навчальної аудиторії, з метою виявлення відповідностей, розбіжностей та факторів впливу на теплове сприйняття в умовах змінного мікроклімату.

Виклад основного матеріалу.

1. Методика

1.1. Опис аудиторії й експериментальних умов.

Дослідження проводилися в учбовому комп'ютерному класі, розрахованого на 10–15 осіб. Геометричні розміри приміщення становлять $5,1 \times 5,3 \times 3,36$ м, що відповідає загальному об'єму близько $90,8 \text{ м}^3$ (рис. 1, а).

Приміщення обладнане системою механічної припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією тепла – ВУТ 300 (виробник *Vents*) (рис. 1, б), що забезпечує

стабільний повітрообмін і часткове енергозбереження за рахунок утилізації тепла витяжного повітря. Система вентиляції працює у штатному режимі з постійним повітрообміном, який відповідає нормам для навчальних закладів.

Вікно та двері класу виходять у внутрішній коридор будівлі та обладнані подвійним склопакетом.

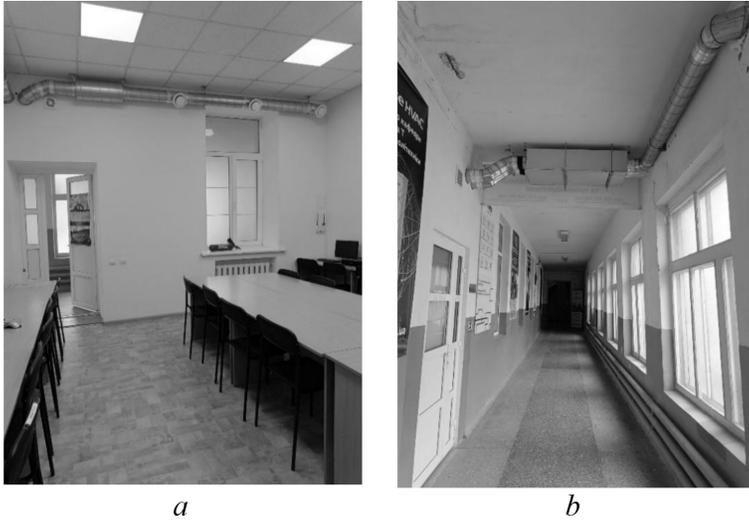


Рис. 1. а) Учебний комп'ютерний клас; б) Установка ВУТ 300 (Vents)

Експериментальні дослідження проводилися в умовах нормальної експлуатації приміщення:

- кількість присутніх у класі відповідала типовому заняттю (10–15 осіб);
- робочі місця були обладнані персональними комп'ютерами, які додатково впливали на теплове навантаження;
- двері залишалися зачиненими під час вимірювань;
- вентиляційна установка працювала на номінальній швидкості подачі повітря.

Дані умови дозволили наблизити результати розрахунків та вимірювань до реальних сценаріїв використання приміщення та забезпечити коректність оцінки параметрів теплового комфорту за індексами PMV та PPD.

1.2. Обладнання та вимірювання (датчики температури рекуператора ВУТ 300 (Vents), детектор-дatalogгер вологості та вуглекислого газу CO₂ – НТ-501, анемометр Venetech GM816A).

Для збору даних про параметри мікроклімату в аудиторії використовувався комплекс вимірювального обладнання, який дозволив здійснити моніторинг температури, вологості, швидкості руху повітря та концентрації вуглекислого газу.

1. Датчики температури рекуператора ВУТ 300 (Vents). Використовувалися вбудовані термодатчики системи механічної припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією тепла. Вони забезпечували вимірювання температури припливного та витяжного повітря в режимі реального часу, що дозволяло оцінювати ефективність рекуперації та вплив системи вентиляції на температурний баланс приміщення.

2. Детектор-дatalogгер вологості та вуглекислого газу НТ-501. Прилад застосовувався для одночасного вимірювання температури (град. С), відносної вологості

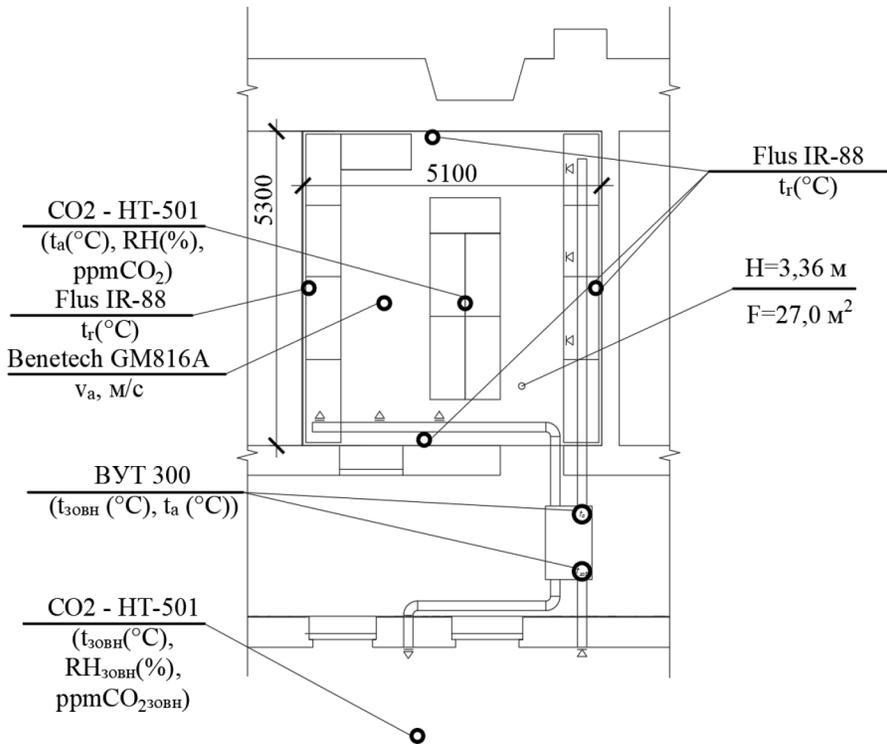


Рис. 2. План-схема розташування вимірювального обладнання

повітря (%) та концентрації CO₂ (ppm). Запис даних здійснювався з інтервалом у 1 хвилину, що дозволяло аналізувати динаміку зміни параметрів у процесі заняття. Прилад забезпечує точність вимірювань у межах $\pm 3\%$ RH для вологості та ± 50 ppm для CO₂.

3. Анемометр Benetech GM816A. Використовувався для вимірювання швидкості руху повітря (м/с) у зоні перебування людей. Портативний прилад з крильчастим датчиком забезпечує точність вимірювань $\pm 0,1$ м/с і дозволяє оперативно контролювати повітряні потоки, створювані вентиляційною системою.

4. Пірометр лазерний Flus IR-88 для вимірювання температури випромінювання поверхонь в приміщенні (град. С).

Перед початком дослідження кожен прилад проходив калібрування відповідно до інструкцій виробника. Вимірювання проводилися у робочій зоні приміщення на висоті 1,0 м від підлоги, що відповідає рівню дихальної зони сидячої людини.

Отримані експериментальні дані використовувалися як вхідні параметри для розрахунку індексу PMV згідно з методикою ДСТУ Б EN ISO 7730:2011.

1.3. Опис анкетування

Для збору суб'єктивних даних про тепловий комфорт та якість повітря в навчальній аудиторії 107Ц було розроблено анкету, яка відповідає вимогам стандартів ASHRAE 55 та ISO 7730. Анкетування проводилось серед студентів та викладачів, які перебували в приміщенні під час навчального процесу. Опитування відбувалося паралельно з вимірюванням об'єктивних параметрів мікроклімату, що дозволяло здійснити безпосереднє порівняння результатів.

Анкета була реалізована у вигляді Google Форми, посилання на яку респонденти отримували через електронні засоби комунікації. Заповнення проводилося анонімно, що мінімізувало вплив психологічних факторів на відповіді.

Структура анкети включала 12 запитань, згрупованих за тематичними блоками:

Ідентифікаційні параметри опитування – дата та час проведення.

Соціально-демографічні характеристики – вік та стать респондента.

Умови перебування – тривалість знаходження в приміщенні.

Оцінка теплового комфорту – суб'єктивне відчуття температури за 7-бальною шкалою PMV (від -3 «дуже холодно» до +3 «дуже спекотно»).

Якість повітря – суб'єктивна оцінка від «дуже хороша» до «дуже погана».

Симптоми дискомфорту – перелік можливих фізіологічних реакцій (головний біль, втома, сухість у горлі тощо).

Оцінка роботи вентиляційної системи – бальна шкала від 1 до 5.

Бажана зміна температури – знизити, залишити без змін або підвищити.

Характеристика одягу – вибір з переліку варіантів з вказанням термічного опору у clo.

Рівень метаболічної активності – вибір варіанту з відповідними значеннями у met (met) та Вт/м².

Дані, зібрані за допомогою анкети, дозволили співставити суб'єктивні оцінки користувачів із об'єктивними розрахунками індексів PMV та PPD, виконаними за вимірними параметрами мікроклімату. Такий підхід забезпечує комплексне розуміння теплового комфорту, поєднуючи інженерні та гуманітарні аспекти дослідження.

1.4. Алгоритм розрахунку індексу PMV згідно з ДСТУ Б EN ISO 7730:2011

Розрахунок прогнозованої середньої оцінки теплового комфорту (Predicted Mean Vote, PMV) та прогнозованого відсотка незадоволених (PPD) здійснюється відповідно до вимог ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 «Ергономіка теплового середовища».

Метод базується на рівнянні теплового балансу людини, в якому враховуються шість основних параметрів:

M – швидкість метаболізму (met , Вт/м²);

W – зовнішня механічна робота (met , Вт/м²);

I_{cl} – термічний опір одягу (clo);

t_a – температура повітря (°C);

t_r – середня температура випромінювання (°C);

v_a – швидкість руху повітря (м/с);

RH – відносна вологість (%).

Етапи алгоритму розрахунку

1. Підготовка вихідних даних

Конвертація M та W з met у Вт/м²:

$$M_{\text{Вт/м}^2} = M_{\text{met}} \cdot 58,15;$$

$$W_{\text{Вт/м}^2} = W_{\text{met}} \cdot 58,15.$$

Переведення термічного опору одягу в м²·К/Вт:

$$I_{cl} = I_{cl} clo \cdot 0,155.$$

2. Обчислення площі поверхні одягу

Коефіцієнт F_{cl} визначається за формулою:

$$F_{cl} = \begin{cases} 1 + 1,29 \cdot I_{cl}, & I_{cl} \leq 0,078 \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl}, & I_{cl} > 0,078 \end{cases}$$

Таблиця 1

Відповідність пунктів анкети вхідним параметрам моделі PMV

№ питання анкети	Зміст питання	Параметр PMV / категорія даних	Позначення в ISO 7730	Одиниці вимірювання
1, 2	Дата і час опитування	Умови проведення (контекст вимірювань)	–	–
3	Вік	Демографічні дані (непрямий вплив)	–	–
4	Стать	Демографічні дані (непрямий вплив)	–	–
5	Тривалість перебування в приміщенні	Контекст теплової адаптації	–	хвилини
6	Суб'єктивна оцінка температури	Індикатор теплового відчуття (оцінка PMV)	PMV	–3 ... +3 (бал)
7	Оцінка якості повітря	Додатковий показник (не входить до формули PMV)	–	вербальна шкала
8	Симптоми дискомфорту	Психофізіологічні реакції	–	перелік симптомів
9	Оцінка роботи вентиляційної системи	Якість повітрообміну (не входить до формули PMV)	–	1...5 (бал)
10	Бажана зміна температури	Очікування користувачів (психологічний аспект)	–	варіант відповіді
11	Характеристика одягу	Термічний опір одягу	I_{cl}	clo
12	Рівень метаболічної активності	Метаболічна теплопродукція	M	met або Вт/м ²

3. Визначення парціального тиску водяної пари
Використовується температура повітря та відносна вологість:

$$P_a = RH \cdot 10 \cdot \exp\left(16,6536 - \frac{4030,183}{T_a + 235}\right),$$

де P_a – у Па.

4. Ітераційне визначення температури поверхні одягу (T_{cl})
Початкове наближення:

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \cdot (3,96 \cdot 10^{-8} \cdot F_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + F_{cl} \cdot H_c \cdot (T_{cl} - T_a)).$$

Коефіцієнт теплопередачі конвекцією H_c обчислюється як:

$$H_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} & \text{for } 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_a} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_a} & \text{for } 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_a} \end{cases}.$$

Розрахунок повторюється до досягнення різниці між ітераціями $\leq 0,00015$ °C.

5. Розрахунок PMV.

Остаточне значення визначається за рівнянням:

$$PMV = [0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028] \cdot L$$

де L – сумарний тепловий дисбаланс між виробленим і відведеним теплом з урахуванням:

- випромінювальних і конвективних втрат;
- випаровування поту та вологи;
- дихальних теплових втрат.

6. Розрахунок PPD.

Відсоток незадоволених визначається як: $PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2}$.

Особливості методу

- Розрахунок передбачає стабільний стан теплового обміну.
- Точність залежить від правильності вимірювання вхідних параметрів.
- PMV інтерпретується за 7-бальною шкалою від -3 (дуже холодно) до $+3$ (дуже жарко), а PPD показує відсоток людей, які будуть незадоволені мікрокліматом.

2. Розробка програмного модуля на C#

2.1. Архітектура програмного модуля

Розроблений програмний модуль реалізовано у вигляді класу Calculator, що належить до простору імен CalculatorLibrary. Архітектура модуля передбачає чітке розділення на функціональні складові:

- DTO-шар (Data Transfer Objects):

InputDTO – для задання параметрів, що характеризують тепловий стан людини та мікрокліматичні умови;

OutputDTO – для повернення результатів розрахунків індексів теплового комфорту.

- Методи обчислень:

Calculate() – основний метод, що реалізує алгоритм розрахунку показників PMV (Predicted Mean Vote) та PPD (Predicted Percentage Dissatisfied);

CalculateTclAndHc() – допоміжний метод, призначений для визначення температури поверхні одягу (Tcl) та коефіцієнта теплопередачі при конвекції (Hc) за ітераційною схемою;

CalculateHc() – метод для обчислення коефіцієнта теплопередачі при природній або примусовій конвекції.

2.2. Вхідні дані

Вхідні параметри передаються до методу Calculate() через структуру InputDTO та включають:

- MetabolicRate (met) – швидкість обміну речовин;
- ExternalWork (met) – величина зовнішньої роботи;
- Clothing (clo) – термічний опір одягу;
- AirTemperature (°C) – температура повітря;
- MeanRadiantTemperature (°C) – середня температура випромінювання;
- RelativeHumidity (%) – відносна вологість повітря;
- RelativeAirVelocity (м/с) – відносна швидкість руху повітря.

2.3. Вихідні дані

Результати розрахунків повертаються у вигляді об'єкта OutputDTO, який містить: Pmv – прогнозовану середню оцінку теплового комфорту (діапазон від -3 до $+3$ згідно ISO 7730);

Ppd – прогнозований відсоток незадоволених умовами (%).

2.4. Алгоритм роботи програмного модуля

Алгоритм обчислення PMV та PPD реалізовано у три основні етапи і описується блок-схемою рис. 3:

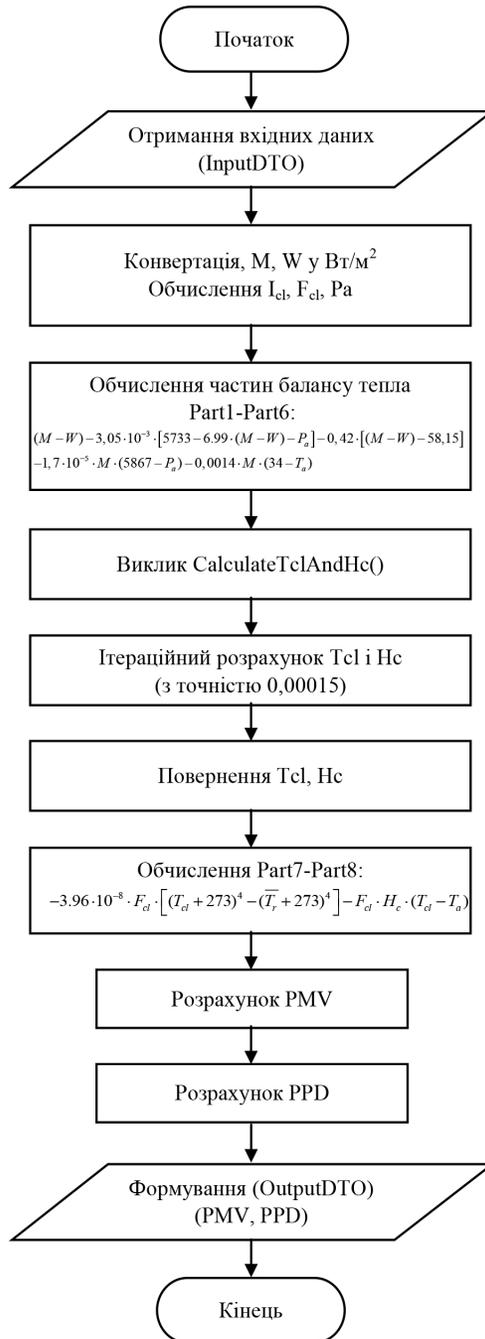


Рис. 3. Блок-схема алгоритму розрахунку PMV та PPD за C#-кодом

1. Підготовка фізичних величин

Перетворення показників метаболічної активності та зовнішньої роботи з одиниць *met* у $\text{Вт}/\text{м}^2$;

Розрахунок термічного опору одягу (*Icl*);

Визначення коефіцієнта поверхні одягу (*Fcl*) залежно від значення *Icl*;

Обчислення парціального тиску водяної пари (P_a) на основі температури повітря та відносної вологості.

2. Допоміжні розрахунки

Обчислення складових енергетичного балансу людини по частинах (*Part1–Part8*);

Part1–Part6:

$$\begin{aligned} PMV = & [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot (M - W) - \\ & - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - P_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - \\ & - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - T_a). \end{aligned}$$

Part7–8:

$$-3,96 \cdot 10^{-8} \cdot F_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4] - F_{cl} \cdot H_c \cdot (T_{cl} - T_a).$$

Виклик методу *CalculateTclAndHc()* для визначення температури поверхні одягу (*Tcl*) та коефіцієнта теплопередачі (*Hc*) за ітераційним методом з точністю 0,00015;

$$\begin{aligned} T_{cl} = & 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \cdot (3,96 \cdot 10^{-8} \cdot F_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - \\ & - (T_r + 273)^4] + F_{cl} \cdot H_c \cdot (T_{cl} - T_a)); \\ H_c = & \begin{cases} 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} & \text{for } 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_a} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_a} & \text{for } 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_a} \end{cases}. \end{aligned}$$

Використання методу *CalculateHc()* для обчислення коефіцієнта теплопередачі з урахуванням режиму конвекції (природної або примусової).

3. Фінальний розрахунок

Визначення *PMV* згідно з формулою, наведеною у стандарті ISO 7730;

$$\begin{aligned} PMV = & [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \times \\ & \times \left\{ \begin{aligned} & (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - P_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - \\ & - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) - \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot F_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4] - F_{cl} \cdot H_c \cdot (T_{cl} - T_a) \end{aligned} \right\}. \end{aligned}$$

Обчислення *PPD* на основі експоненційної залежності від значення *PMV*;

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2}.$$

Округлення результатів та формування об'єкта *OutputDTO* для повернення кінцевих значень користувачу.

3. Результати та статистичний аналіз

3.1. Умови мікроклімату. На основі проведених вимірювань встановлено, що температура повітря в приміщенні залишалася сталою на рівні 16,6 °С,

а температура випромінювання поверхонь – 17,25 °С. Відносна вологість складала 49 %, а швидкість руху повітря – 0,05 м/с, що відповідає умовам слабкої повітряної динаміки. Зовнішні параметри під час вимірювань: температура повітря 19,9 °С, відносна вологість 35 %, рівень CO₂ – 409 ppm.

Рівень вуглекислого газу в приміщенні під час опитування і вимірювань становив 1488 ppm, що перевищує рекомендовані гігієнічні норми (1000 ppm для навчальних і офісних приміщень), свідчить про недостатню інтенсивність вентиляції та можливий дискомфорт користувачів.

3.2. *Параметри теплового комфорту (PMV та PPD)*. Індекс прогнозованої середньої оцінки теплового комфорту (PMV) коливався від -1,46 до 0,21, що вказує на переважно прохолодні відчуття серед опитаних. Прогнозований відсоток незадоволених температурними умовами (PPD) змінювався від 5 % до 49 %, причому найвищі значення фіксувалися при PMV, близьких до -1,46.

Зведені статистичні показники:

- Середній PMV: -0,82
- Середній PPD: 24,88 %
- Мінімальний PMV: -1,46 (PPD = 49 %)
- Максимальний PMV: 0,21 (PPD = 6 %)

Для візуалізації та порівняння отриманих даних PMV розрахункове та PMV, отримане в результаті анкетування, побудована діаграма Бленда – Альтмана (рис. 4). Вхідні дані для побудови діаграми:

№, PMV_розрах, PMV_анкета (1, -1, -2), (2, -1, 0), (3, 0, -1), (4, 0, 0), (5, -1, -1), (6, -1, 0), (7, -1, 0), (8, 0, -1), (9, -0.25, 0), (10, 0.35, -1), (11, -0.25, 0), (12, -0.25, 0), (13, -0.25, 0), (14, -0.56, 0).

3.3. *Суб'єктивні оцінки та відчуття*. Опитані респонденти надали такі оцінки якості повітря: дуже хороша – 37,5 % випадків, задовільна – 62,5 % випадків.

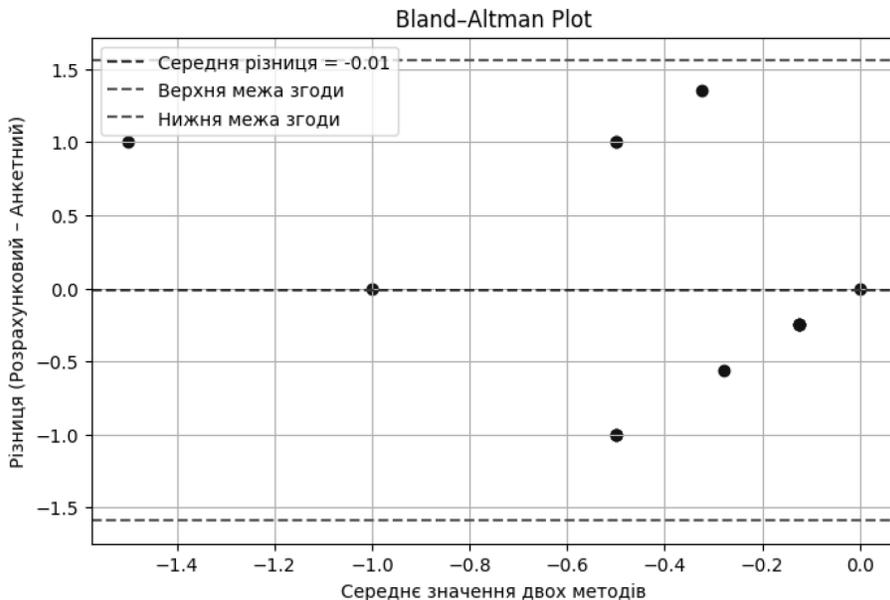


Рис. 4. Діаграма Бленда – Альтмана порівняння отриманих даних PMV розрахункове та PMV анкетне

Виявлені основні скарги: утруднене дихання – 1 випадок, сонливість – 1 випадок, головний біль – 1 випадок, відсутність додаткових скарг – 5 випадків. Більшість респондентів (62,5 %) за можливості підвищили б температуру в приміщенні, 25 % – не змінювали б її, 12,5 % – знизили б.

3.4. Оцінка вентиляційної установки

Оцінка ефективності роботи вентиляційної установки за п'ятибальною шкалою коливалася від 3 (незадовільно) до 5 (відмінно). Середнє значення – 4,38, що свідчить про загалом позитивне сприйняття, але з окремими випадками недостатньої роботи.

3.5. Інтерпретація

Зафіксований рівень CO₂ (1488 ppm) вказує на недостатній повітрообмін.

Температура 16,6 °C є нижчою за оптимальну для комфортних умов (рекомендовано 20–24 °C для холодного періоду).

Значення PMV < 0 у більшості випадків підтверджують відчуття прохолоди, що корелює із бажанням респондентів підвищити температуру. Високі значення PPD (до 49 %) свідчать про значну частку незадоволених мікрокліматом.

Отримані результати показують узгодженість між розрахунковим індексом PMV та суб'єктивними оцінками теплового комфорту, отриманими з анкетування. В більшості випадків значення розрахункового PMV знаходяться у вузькому діапазоні від –1 до 0, що відповідає стану «трохи прохолодно» та «нейтрально» згідно зі шкалою ISO 7730. Середні оцінки з анкет варіюються від –2 («прохолодно») до 0 («нейтрально»), причому в окремих випадках респонденти відзначали більший дискомфорт, ніж передбачав розрахунок. Це вказує на необхідність додаткової корекції моделі розрахунку або врахування більшої кількості індивідуальних параметрів під час прогнозування теплового комфорту.

Обговорення. Аналіз порівняння розрахункових значень PMV та оцінок, отриманих з анкетування, показав наявність помітних розбіжностей між об'єктивними та суб'єктивними показниками теплового комфорту. Хоча в цілому спостерігається тенденція до узгодженості, значна частина респондентів оцінювала свій тепловий стан як холодніший або тепліший, ніж передбачає модель ISO 7730.

Основними чинниками таких відмінностей можуть бути:

1. Одяг. Незважаючи на використання усереднених значень теплового опору одягу (clo) під час розрахунків, фактичний одяг окремих респондентів міг відрізнятися від прийнятого стандартного набору. Наприклад, додаткові шари, теплі аксесуари чи, навпаки, легкий одяг значно впливають на тепловий баланс.

2. Рівень фізичної активності. Розрахунки виконувалися з урахуванням типових значень метаболічної активності для конкретних умов (met), однак фактична активність (ходіння, стояння в черзі, виконання робіт) могла змінювати тепловіддачу тіла. Люди, що активно рухалися, могли відчувати себе тепліше, а ті, що перебували в статичному положенні, – прохолодніше.

3. Локальні джерела тепла та охолодження. Розташування поруч із вентиляційними решітками, дверима, вікнами чи тепловими приладами (радіатори, нагрівачі) призводить до локальних відмінностей температури, швидкості та напрямку руху повітря, що не завжди відображається в усереднених вимірюваннях.

Отримані результати свідчать, що навіть при точних вимірюваннях параметрів мікроклімату, модель PMV має певні обмеження в умовах, коли індивідуальні та просторові фактори не враховуються повною мірою. Для підвищення точності прогнозування доцільно доповнювати розрахунки додатковими польовими даними, включаючи детальніший облік одягу, активності та мікролокаційних особливостей середовища.

Висновки. Проведений аналіз узгодженості між розрахунковими значеннями індексу PMV, отриманими за допомогою розробленого C#-модуля, та оцінками з анкетування в умовах навчального середовища показав високу ступінь збігу результатів. Середня різниця між двома методами склала $-0,01$, що свідчить про відсутність систематичного зсуву у вимірюваннях. Межі згоди ($\pm 1,96$ SD) становили приблизно від $-1,56$ до $+1,54$, і 100 % спостережень потрапили у цей інтервал.

Це свідчить про те, що для всіх респондентів значення PMV, обчислені за допомогою C#-модуля, добре узгоджуються з суб'єктивними оцінками теплового комфорту. Незначні розбіжності для окремих учасників можуть бути пов'язані з індивідуальними фізіологічними особливостями, рівнем адаптації до мікроклімату та суб'єктивним сприйняттям умов. Таким чином, використання C#-модуля для автоматизованого розрахунку PMV є доцільним та може ефективно застосовуватися в навчальних закладах для моніторингу та оптимізації умов мікроклімату.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Fanger, P. O. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970. 244 p.
2. Parsons, K. *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort and Performance*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 635 p.
3. Havenith, G., Holmér, I., Parsons, K. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 34, no. 6, pp. 581–591. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00008-7
4. Humphreys, M. A., Nicol, J. F. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in everyday thermal environments. *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, no. 6, pp. 667–684. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00018-X
5. de Dear, R. J., Brager, G. S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 1998, vol. 104, no. 1, pp. 145–167.
6. Дьяків, О. В., Іваненко, С. П., Кузьменко, Л. В. Дослідження показників теплового комфорту в адміністративних та навчальних приміщеннях. *Енергетика та електрифікація*, 2018, № 6, с. 22–29.
7. Мельник, І. Г. Оцінка мікроклімату та теплового комфорту в освітніх закладах: методи та результати. *Вісник КНУБА*, 2020, № 4, с. 85–92. DOI: 10.32347/visnyk2020.4.85-92.
8. Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D. Modelling the thermal performance of buildings using artificial neural networks. *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, no. 6, pp. 529–539. DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00120-2
9. Kim, J., Hong, T. A review on the computational methods for predicting human thermal comfort in the built environment. *Building and Environment*, 2020, vol. 180, 106909. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106909
10. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту за показниками PMV та PPD і умовами локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2005, IDT). Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 36 с.

REFERENCES:

1. Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
2. Parsons, K. (2014). *Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance* (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press.

3. Havenith, G., Holmer, I., & Parsons, K. (2015). Personal factors in thermal comfort assessment: Clothing properties and metabolic heat production. *Energy and Buildings*, 34(6), 581–591. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00008-7)
4. Humphreys, M. A., & Nicol, J. F. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in everyday thermal environments. *Energy and Buildings*, 34(6), 667–684. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X)
5. de Dear, R. J., & Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 104(1), 145–167.
6. D'iakiv, O. V., Ivanenko, S. P., & Kuzmenko, L. V. (2018). Doslidzhennia pokaznykiv teplovoho komfortu v administratyvnykh ta navchal'nykh prymishchenniah [Investigation of thermal comfort indicators in administrative and educational premises]. *Enerhetyka ta elektryfikatsiia – Energy and Electrification*, (6), 22–29 [in Ukrainian].
7. Mel'nyk, I. H. (2020). Otsinka mikroklimatu ta teplovoho komfortu v osvitynykh zakladakh: metody ta rezultaty [Assessment of microclimate and thermal comfort in educational institutions: methods and results]. *Visnyk KNUBA – Bulletin of Kyiv National University of Construction and Architecture*, (4), 85–92. <https://doi.org/10.32347/visnyk2020.4.85-92> [in Ukrainian].
8. Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (2002). Modelling the thermal performance of buildings using artificial neural networks. *Energy and Buildings*, 34(6), 529–539. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00120-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00120-2)
9. Kim, J., & Hong, T. (2020). A review on the computational methods for predicting human thermal comfort in the built environment. *Building and Environment*, 180, 106909. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106909>
10. DSTU B EN ISO 7730:2011 (2013). Erhonomika teplovoho seredovyscha. Analitychne vyznachennia ta interpretatsiia teplovoho komfortu za pokaznykamy PMV ta PPD i umovamy lokal'noho teplovoho komfortu (EN ISO 7730:2005, IDT) [Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (EN ISO 7730:2005, IDT)]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy. 36 p. [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.09.2025

Дата публікації: 30.10.2025