

Бобронніков А.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лебедев Д.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМФОРТУ В ЖИТЛОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТА СИСТЕМА ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

У статті зроблено акцент на дослідженні існуючих рішень за темою забезпечення комфорту (comfort) в житловому середовищі.

Розглянуто статті за темою дослідження, що використовують технології доповненої реальності, інтернету речей (IoT) для визначення енергетичних витрат та машинного навчання для з'ясування найбільш комфортних умов для кожного з учасників дослідження. Проаналізовано переваги та недоліки існуючих рішень.

Виконано аналіз національного міжгалузевого стандарту ДСТУ Б EN ISO 7730. ЕРГОНОМІКА ТЕПЛОВОГО СЕРЕДОВИЩА, що є аналітичним визначенням та інтерпретацією теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD та його особливостей. Розглянуті поняття PMV (Predicted Mean Vote – прогнозована середня оцінка) та PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied – прогнозований відсоток незадоволених). Розглянуто поняття місцевого теплового дискомфорту, що є наслідком нерівномірної роботи кліматичних пристроїв у приміщенні. Розглянута залежність між значеннями PMV та PPD що вказує на те, що кількість невдоволених тепловим станом середовища майже ніколи не дорівнює 0% навіть при найбільш сприятливому значенні PMV. Також згаданий стандарт спрощує розрахунок прогнозованої комфортності повітря виходячи з основних наступних параметрів: temperature radiant (середня температура випромінювання), air velocity (швидкість повітря), cloth (одиниця одягу), та met (метаболічна одиниця).

Проаналізовано статті та патент за темою дослідження, що використовують стандарт ISO 7730. Згадано стандарт ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) 55, що практично повторює ISO 7730.

Запропоновано спосіб розширення застосування цього стандарту на більшу кількість показників середовища, що формують відчуття комфорту. Розглянуто приклад застосування принципів з ISO 7730 для оцінки акустичного комфорту приміщення. Для визначення кривих та коефіцієнтів розрахунку PMV-PPD для акустичного комфорту варто залучити респондентів та провести дослідження. Планується використання штучного інтелекту (AI) для розрахунку оптимальних коефіцієнтів PMV-PPD для акустичного комфорту.

Ключові слова: IoT, PMV, PPD, comfort, AI.

Постановка проблеми. Комфортність середовища є важливим аспектом у забезпеченні як ефективного відпочинку, так і роботи будь-якої людини. Існуючі методи керування середовищем аналізують розглядають малу кількість параметрів, як-от температуру чи вологість у приміщенні. Дана робота направлена на створення високоефективних методів та системи забезпечення комфорту, яка враховуватиме розширену кількість параметрів середовища для забезпечення відчуття комфорту людини враховуючи індивідуальні особливості користувача. Можливе використання хмарних обчислень та штучного

інтелекту для ефективного і своєчасного керування параметрами середовища.

Актуальність тематики підтверджується великою кількістю статей у ScienceDirect та патентів у Espacenet за ключовими словами «IoT», «AI», «comfort», «PMV», «PPD» в тому числі і за останні роки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним профільним документом, що регламентує термічний комфорт людини у приміщенні є національний міжгалузевий стандарт ДСТУ Б EN ISO 7730. ЕРГОНОМІКА ТЕПЛОВОГО СЕРЕДОВИЩА та є аналітичним визначенням

та інтерпретацією теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. Він є перекладеним на українську мову стандартом ISO 7730 [1]. В Україні його використовують при проектуванні приміщень вже понад 10 років.

Стандарт вводить два важливих поняття: PMV (Predicted Mean Vote – (прогнозована середня оцінка) та PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied – прогнозований відсоток незадоволених).

PMV дозволяє передбачити оцінку більшості людей щодо теплового комфорту середовища, в якому перебуватимуть опитувані. PPD, в свою чергу, дозволяє передбачити відсоток опитуваних, яким середовище комфортним не здається. Згадується у великій кількості статей та патентів.

Стандарт ASHRAE [2] (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) 55 практично повністю повторює ISO.

Розглянемо графік співвідношення PMV та PPD на рис. 1.

Оцінюючи графік, ми можемо побачити, що згідно стандарту навіть при $PMV = 0$, що власне

вважається найбільш оптимальним значенням, значення PPD є ненульовим, а саме 5%. Отже, для 5% людей навіть нейтральне значення комфортності середовища може здатися некомфортним, ідеального відчуття комфорту неможливо домогтися для 100% одночасно. У таблиці 1 приведена відповідність між значенням PMV та оцінками людей, що знаходяться в середовищі:

На жаль, не завжди виходить досягти однакових параметрів середовища в усіх точках приміщення, тому вводиться поняття локального дискомфорту.

До факторів локального дискомфорту відносять протяг, різницю температури повітря в області ніг та голови, різниця в температурі підлоги, стін, стелі. На рисунку 2 показано залежність між різницею температури в районі ніг та голови (при умові що людина сидить або стоїть).

Згідно з даними, достатньо різниці температури у 4°C щоб в середньому кожна десята людина відчувала дискомфорт.

Таблиця 2 показує приклад розрахованих значень PMV.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2).$$

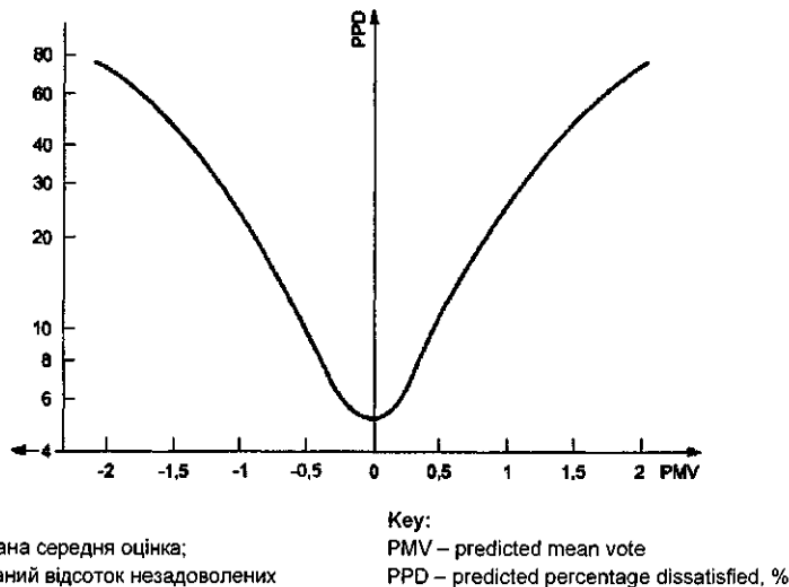


Рис. 1. Співвідношення PMV та PPD

Таблиця 1

Відповідність оцінки PMV та стану середовища

Оцінка	Стан	Оцінка	Стан	Оцінка	Стан
+3	Спекотно	0	Нейтрально	-1	Трохи прохолодно
+2	Тепло			-2	Прохолодно
+1	Трохи тепло			-3	Холодно

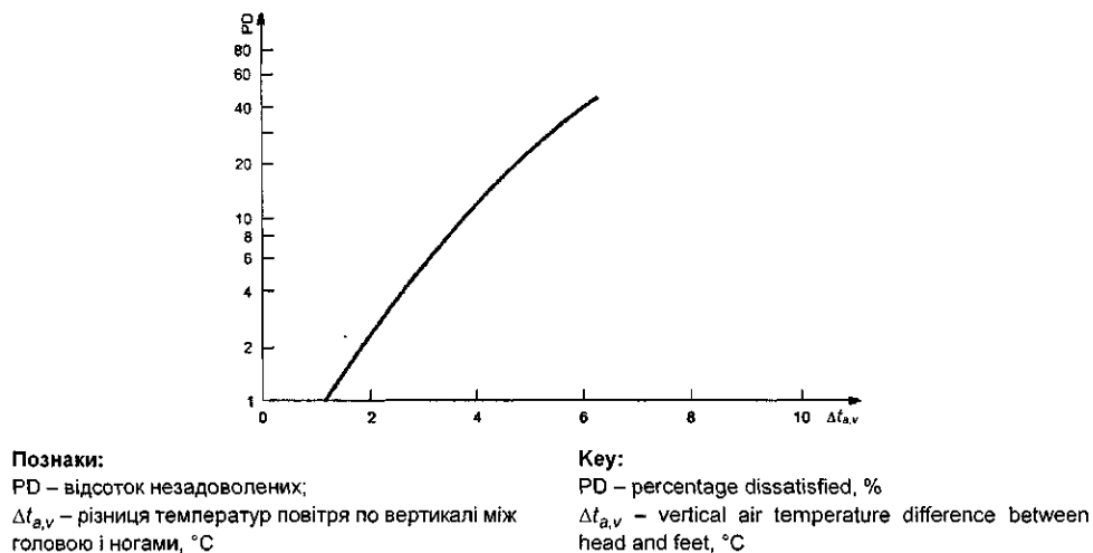


Рис. 2. Місцевий дискомфорт, викликаний вертикальною різницею температур повітря

Таблиця 2

Приклади розрахованих значень PMV для 1 кло та 1 мет

Одяг Clothing		Еквівалентна температура, °C Operative temperature, °C	Відносна швидкість руху повітря, м/с Relative air velocity, m/s							
кло clo	$\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00
1,00	0,155	20	-0,85	-0,87	-1,02	-1,13	-1,29	-1,41	-1,51	-1,81
		21	-0,57	-0,60	-0,74	-0,84	-0,99	-1,11	-1,19	-1,47
		22	-0,30	-0,33	-0,46	-0,55	-0,69	-0,80	-0,88	-1,13
		23	-0,02	-0,07	-0,18	0,27	-0,39	-0,49	-0,56	-0,79
		24	0,26	0,20	0,10	0,02	-0,09	-0,18	-0,25	-0,46
		25	0,53	0,48	0,38	0,31	0,21	0,13	0,07	-0,12
		26	0,81	0,75	0,66	0,60	0,51	0,44	0,39	0,22
		27	1,08	1,02	0,95	0,89	0,81	0,75	0,71	0,56

Вводяться наступні одиниці вимірювання:

1 метаболічна одиниця = 1 мет = 58,2 Вт/м²;

1 одиниця одягу = 1 кло = 0,155 м²·°C/Вт.

Для даної таблиці рівень активності 1 мет. Таку енергію виділяє людина, коли вона сидить і не зайнята ніякою діяльністю. 1 кло – це, наприклад, одягнуті нижня білизна, сорочка, брюки, шкарпетки, черевики.

Для визначення оптимальної температури та швидкості повітря у приміщенні достатньо знайти значення найближче до 0. За нашою таблицею це PMV = 0,02 і воно може бути досягнути при встановленні температури на рівні 24°C та швидкості повітря 0,2 м/с.

Зменшення температури або збільшення швидкості повітря (наявність протягу) призводить до зміни оцінки PMV в сторону від'ємного значення, тобто до похолодання. Збільшення температури або зменшення швидкості повітря призводить до потепління.

Ключовим словом у розглянутих термінах є predictable, тобто «прогнозований». Даний стандарт є інструментом для визначення наскільки комфортним може бути середовище ще до моменту фактичного опитування людей в приміщенні з певними кліматичними параметрами. Якщо при проектуванні параметрів середовища не вдасться забезпечити значення PMV на рівні 0, то можна принаймні порахувати показник PPD, щоб мати очікування якій кількості людей середовище може здатися некомфортним в ту чи іншу сторону.

Постановка завдання. Ціллю статті є розгляд існуючих рішень за темою забезпечення комфортного середовища для людини у приміщенні. Акцент буде зроблено на статтях, що посиляються на стандарт ISO 7730. Також варто проаналізувати патенти технічних рішень, що використовують розглянутий стандарт.

Іншим завданням є розгляд можливих способів покращити існуючі методи забезпечення

комфорту. Проаналізувавши тенденції та основні недоліки існуючих рішень, можна оцінити, які аспекти варто покращити.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо [3]. Тему дослідження можна перекласти як «просторово-часове відображення в режимі реального часу та візуалізація теплового комфорту та керування системою опалення, вентиляції та кондиціонування повітря за допомогою інтеграції технологій доповненої реальності та бездротових сенсорних мереж із підтримкою Інтернету речей AR на Unity. Моделювання середовища за допомогою доповненої реальності».

В ході даного дослідження найголовнішим є використання AR (artificial reality) на рушії Unity [4]. Unity – багатоплатформовий інструмент для розроблення відеоігор і застосунків, і рушій, на якому вони працюють. В ході роботи він використовується для моделювання середовища за допомогою доповненої реальності.

Приклад застосування описаної концепції наступний:

1. У кімнаті встановлюються 4 датчики температури, по кожному в кутах приміщення.

2. Система створює тривимірне зображення приміщення, на якому присутні зображення інтер'єру та кордонів приміщення.

3. До зображення додаються виміряні параметри середовища. Це виглядає як області різних кольорів, де червоний зображує температуру вище за комфортну, синя – менша, а зелена відповідає нормі.

4. Користувач наочно бачить, в якій частині кімнати температура не у межах норми і дає команду системі змінити температуру (кліматичні прилади мають керуватися централізовано).

Орієнтовні показники, яке середовище вважати комфортним, береться з вищезгаданого стандарту.

До недоліків статті можна віднести недостатність інформації з приводу способу отримання даних для обрахунку PMV та PPD. Робота

присвячена саме способам візуалізації (моделювання) середовища.

Розглянемо статтю [5]. Український переклад: «Додаток Інтернету Речей для виявлення енергетичної бідності на основі моніторингу теплового комфорту»

В ході дослідження вводиться поняття Energy Poverty (EP) – нездатність забезпечити належний рівень тепла, охолодження та освітленості.

Основною задачею роботи є розробка покращених методів знаходження EP. Методологія дослідження наступна:

В ході дослідження було проаналізовано наступні параметри: температура, вологість, якість повітря, освітленість. Припустимими параметрами є температура 18–24°C, вологість 30–60%, рівень CO2 1000ppm, освітлення 200 лк.

Щодо обладнання, було використана плата розробки ESP32 [6] та недорогі датчики. Використання онлайн баз даних на SQL.

В результаті розроблений дешевий метод моніторингу певних характеристик приміщення, які потім порівнюються з нормами і стандартами. Дозволяє зробити висновок наскільки поганим є рівень EP (іншими словами енергонеефективності).

До недоліків можна віднести те, що не врахована думка користувачів. Врахування думки користувачів є важливим, бо стандарти показують комфорт для «середньостатистичної людини». Також мало висновків про отримані результати: на що вони вказують? Вказані наслідки EP, але не вказані причини. Згідно дослідження (заміри були проведені в житлі небагатої сім'ї в Іспанії), майже всю добу температура >25°C, а вологість <30% що не є нормою відповідно до інформації ВООЗ. Робота направлена саме на способи моніторингу, а не усунення проблеми дискомфортного клімату у приміщенні.

Розглянемо [7] «Застосування IoT та машинного навчання для оцінки сприйняття теплового комфорту».

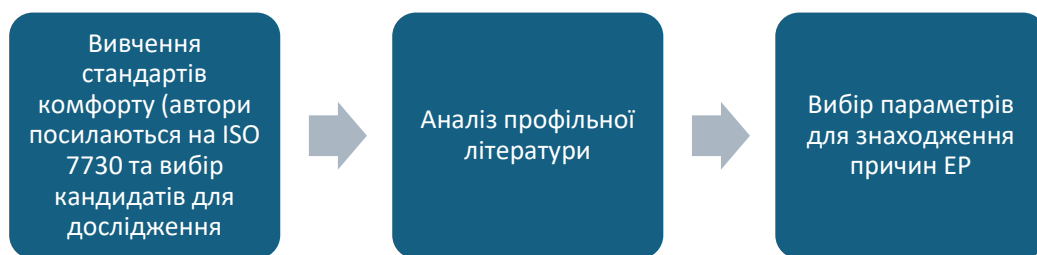


Рис. 3. Методологія дослідження

Мета дослідження – виявити найбільш комфортне для людини співвідношення між температурою робочого приміщення (офісу) та її вологістю. Особисті дані кожного учасника заносяться в таблицю 3.

До параметрів опитаних відносяться стать, вік, зріст, вага, посада та інші.

Кожен учасник носить браслет, що вимірює такі біологічні параметри організму, як частота серцебиття, інфрачервоний датчик насиченості крові киснем, також містить акселерометер.

Дані збираються кілька разів за секунду. Також проводиться регулярне опитування людей на предмет комфортності середовища в якому вони працюють за допомогою сервісу Google Forms [8].

За допомогою алгоритму штучного інтелекту розраховуються оптимальні значення температури та вологості повітря для кожного учасника. Результат базується на позитивних відгуках про комфортність середовища при наявних значеннях температури в певний момент часу.

На рисунку 4 показано найбільш оптимальні параметри температури та вологості за допомогою темних плям на графіках.

Очевидним є те, що поняття про комфортність середовища в різних людей не збігаються. Наприклад, згідно з результатами, найбільш сухе і гаряче повітря є комфортним для наймолодшої опитаної людини, жінка 29 років (користувач 5). В той же час 2 з 3 опитаних з найбільшою масою тіла (більше 80 кг) віддають перевагу більше вологому і холодному повітрю (користувач 2 та 3).

Важливим є присутність опитування користувачів та згадується важливість одного параметру над іншим. Більше присвячено аналізу

результатів, ніж в минулій статті. В той же час, мало деталей про AI та Machine Learning. Є графіки, створені за допомогою ШІ, але недостатньо пояснень яким чином визначена важливість одних характеристик над іншими.

Розглянемо патент [9]. Описано метод та систему забезпечення правильних налаштувань температури обігріву та охолодження повітря. Використовується модель PMV-PPD. Крім кліматичних показників середовища враховуються також метаболізм людини (виділення тепла тілом) та термічний опір одягу.

Присутні налаштування планів відповідно до кількості спожитої енергії та ціни. Наприклад, план 1 працює до певного порогу витраченої енергії, а план 2 (більш енергоефективний) включається після. Через інтерфейс користувача обирається шаблон (вони вбудовані) або використовується тонка настройка.

Шаблони мають наступні параметри:

tr – temperature radiant – середня температура випромінювання;

vel – velocity – швидкість повітря;

clo – cloth – одиниця одягу;

met – метаболічна одиниця;

ew – external work – робоча активність людини.

На рисунку 6 зображено криву, що допомагає спрогнозувати значення PPD на рівні 19,2%:

Патент є хорошим прикладом застосування стандарту ISO 7730 в умовах реального проекту. Наявність готових шаблонів дозволяє швидко обрати бажаний сценарій відповідно до побажань користувача.

У вищерозглянутих роботах застосовується стандарт ISO 7730, що описує термічний комфорт людини в приміщенні. В той же час, температура,

Таблиця 3

Характеристики опитуваних

User	Age [y]	Weight [kg]	Height [m]	Gender [-]	Profession [-]	Test period [-]	Air temperature [°C] Avg. (St.dv)	Relative humidity [%] Avg. (St.dv)	Solar radiation [W/m ²] Avg. (St.dv)
1	61	61.4	1.75	Male	Senior researcher	Nov 13-17	6.2 (3.9)	85.7 (19.6)	222.0 (153.9)
2	39	81	1.78	Male	Researcher	Nov 6-10	9.3 (1.5)	98.1 (3.5)	102.8 (101)
3	35	85	1.79	Male	Researcher	Nov 6-10	9.3 (1.5)	98.1 (3.5)	102.8 (101)
4	43	46	1.64	Female	Researcher	Nov 20-24	7.2 (2.8)	96.2 (8.4)	143.4 (129.8)
5	29	60	1.60	Female	Junior researcher	Nov 27-30	2.5 (3.1)	88.8 (20.1)	172.0 (164)
6	37	57	1.79	Female	Researcher	Nov 20-24	7.2 (2.8)	96.2 (8.4)	143.4 (129.8)
7	33	80.2	1.91	Male	Technician	Nov 27-30	2.5 (3.1)	88.8 (20.1)	172.0 (164)
8	35	70	1.77	Male	Researcher	Nov 13-17	6.2 (3.9)	85.7 (19.6)	222.0 (153.9)

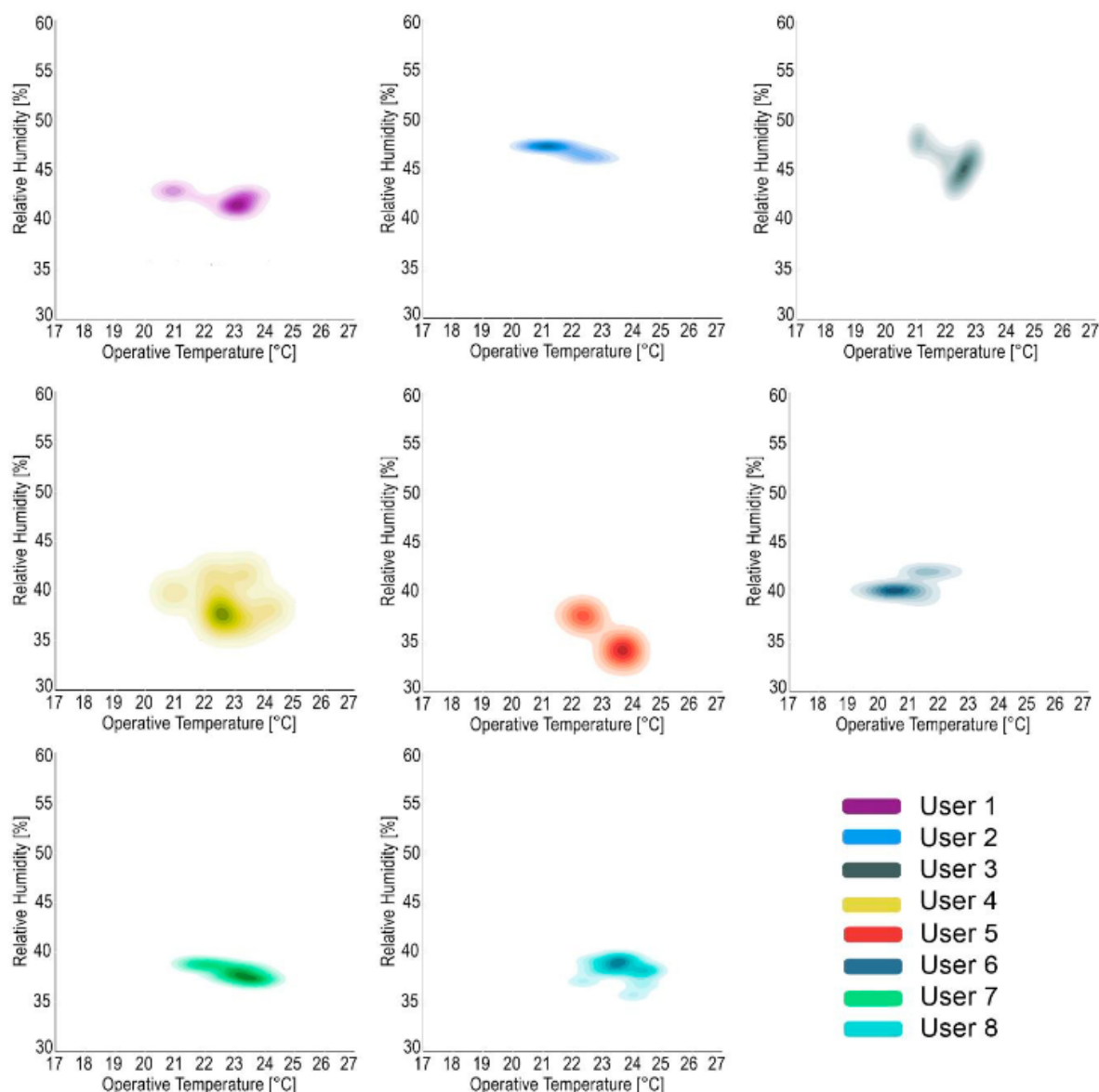


Рис. 4. Оптимальні параметри середовища для кожного з опитуваних

```

CONSTS = {
  1: { "tr": -3, "vel": 0.05, "clo": 1.0, "met": 1.2, "ew": 0 },
  2: { "tr": -2, "vel": 0.05, "clo": 0.9, "met": 1.2, "ew": 0 },
  3: { "tr": -1, "vel": 0.05, "clo": 0.8, "met": 1.2, "ew": 0 },
  4: { "tr": 0, "vel": 0.05, "clo": 0.7, "met": 1.2, "ew": 0 },
  5: { "tr": 0.5, "vel": 0.05, "clo": 0.6, "met": 1.2, "ew": 0 },
  6: { "tr": 1, "vel": 0.05, "clo": 0.5, "met": 1.2, "ew": 0 },
  7: { "tr": 2, "vel": 0.05, "clo": 0.4, "met": 1.2, "ew": 0 },
  8: { "tr": 3, "vel": 0.05, "clo": 0.3, "met": 1.2, "ew": 0 },
  9: { "tr": 2, "vel": 0.05, "clo": 0.4, "met": 1.2, "ew": 0 },
  10: { "tr": 1, "vel": 0.05, "clo": 0.6, "met": 1.2, "ew": 0 },
  11: { "tr": -2, "vel": 0.05, "clo": 0.8, "met": 1.2, "ew": 0 },
  12: { "tr": -3, "vel": 0.05, "clo": 1.0, "met": 1.2, "ew": 0 },
}

```

Рис. 5. Приклади готових шаблонів

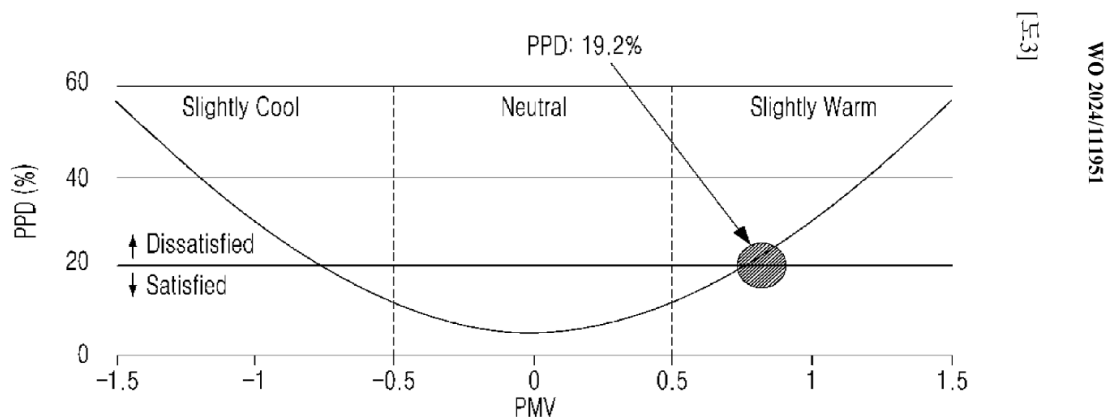


Рис. 6. Оцінювання PPD відповідно до рівня PMV

вологість та швидкість повітря є не єдиними факторами, які впливають на відчуття комфорту. На відчуття комфорту також можуть впливати такі показники середовища, як чистота повітря, освітленість робочого місця, шум, вібрації, та ін.

Розглянутий стандарт є зручним інструментом прогнозування середньої оцінки саме теплової комфортності середовища та прогнозування відсотка невдоволених користувачів. Дані методи можна розширити для використання з іншими показниками середовища, що впливають на комфорт.

Наприклад, PMV та PPD може бути застосований для оцінки акустичного комфорту приміщення. Шум негативно впливає на настрій та працездатність людини. З'явиться можливість передбачити, який рівень шуму в приміщенні не помічатиме більшість людей, що гарантуватиме найменше значення PPD.

Для визначення кривих та коефіцієнтів розрахунку PMV-PPD для акустичного комфорту

варто залучити респондентів та провести дослідження.

Висновки. Проблема забезпечення комфорту в житловому приміщенні є актуальною зважаючи на кількість опублікованих робіт за останні роки. Стандарти ISO 7730 та ASHRAE 55 є галузевими стандартами в області забезпечення комфортного клімату в середовищі, де перебуває людина. Вони направлені на передбачення наскільки комфортним буде теплове відчуття середовища для більшості людей, а для якого відсотка людей – ні.

Сучасна техніка здатна точно вимірювати параметри середовища і швидко їх обраховувати. Складнощі можуть представляти саме способи керування середовищем у найефективніший для людини спосіб. Варто розглянути способи модифікації вищезгаданого стандарту для врахування більшої кількості параметрів середовища, що впливають на комфорт. Такими параметрами можуть бути чистота повітря, освітленість робочого місця, шум, вібрації, та ін.

Список літератури:

1. ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. URL: <https://www.iso.org/standard/39155.html>
2. Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. URL: <https://surl.li/lgsqyt>
3. Mohsen Mohammadi, Ghiwa Assaf, Rayan H. Assaad “Real-time spatial-temporal mapping and visualization of thermal comfort and HVAC control by integrating immersive augmented reality technologies and IoT-enabled wireless sensor networks: Towards immersive human-building interactions”, Journal of Building Engineering, Volume 94, 2024, 109887, ISSN 2352–7102
4. Unity Real-Time Development Platform | 3D, 2D, VR & AR Engine. URL: <https://unity.com/>
5. Ascensión López-Vargas, Agapito Ledezma-Espino, “IoT application for energy poverty detection based on thermal comfort monitoring”, Heliyon, Volume 9, Issue 1, 2023, e1 2943, ISSN 2405–8440
6. ESP32. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/ESP32>
7. Francesco Salamone, Lorenzo Belussi, Cristian Currò, Ludovico Danza, Matteo Ghellere, Giulia Guazzi, Bruno Lenzi, Valentino Megale, Italo Meroni, “Application of IoT and Machine Learning techniques for the assessment of thermal comfort perception.”, Energy Procedia, Volume 148, 2018, P. 798–805, ISSN 1876-6102
8. Google Forms. URL: <https://docs.google.com/forms/u/0/>
9. JI YOUNG MIN, KWON DONG WOO, METHOD AND SYSTEM FOR INFERRING OPTIMAL INDOOR COOLING/HEATING SETTING TEMPERATURE, Patent WO2024111951A1, 26.07.2024

Bobronnikov A.S., Lebedev D.Yu. METHODS OF PROVIDING COMFORT IN THE LIVING ENVIRONMENT AND A SYSTEM FOR THEIR IMPLEMENTATION

The article focuses on the study of existing solutions on the topic of ensuring comfort in the living environment.

Articles on the topic of research that use augmented reality technologies, the Internet of Things (IoT) to determine energy losses and machine learning to determine the most comfortable conditions for each of the study participants are reviewed. The advantages and disadvantages of existing solutions are analyzed.

The analysis of the national inter-industry standard DSTU B EN ISO 7730. ERGONOMICS OF THE THERMAL ENVIRONMENT is performed, which is an analytical definition and interpretation of thermal comfort based on calculations of PMV and PPD indicators and its features. The concepts of PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) are considered. The concept of local thermal discomfort is considered, which is a consequence of uneven operation of climate devices in a room. The dependence between the values of PMV and PPD is considered, which indicates that the number of people dissatisfied with the thermal state of the environment is almost never equal to 0% even at the most favorable value of PMV. The aforementioned standard also simplifies the calculation of predicted air comfort based on the following main parameters: temperature radiant (average radiation temperature), air velocity, cloth (clothing unit), and met (metabolic unit).

Articles and a patent on the topic of the study that use the ISO 7730 standard are analyzed. The ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) standard 55 is mentioned, which practically repeats ISO 7730.

A method for expanding the application of this standard to a larger number of environmental indicators that form a sense of comfort is proposed. An example of applying the principles of ISO 7730 to assess the acoustic comfort of a room is considered. To determine the curves and coefficients for calculating PMV-PPD for acoustic comfort, it is worth involving respondents and conducting research. It is planned to use artificial intelligence (AI) to calculate optimal PMV-PPD coefficients for acoustic comfort.

Key words: IoT, PMV, PPD, comfort, AI.