

УДК 612:613.6:628.9

Д. О. ПАНТЕЛЕЙЧУК, В. В. СОРОЧИНСЬКИЙ

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ МІКРОКЛІМАТУ НА ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ СТАН ЛЮДИНИ

*Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, Вінниця,
Україна, e-mail: vindims@gmail.com*

Анотація. У статті здійснено огляд і системний аналіз сучасних підходів до оцінювання впливу мікроклімату приміщень на функціональний стан людини. Розглянуто мікроклімат як багатфакторну систему, що включає параметри теплового середовища та якості повітря, а також проаналізовано їхній опосередкований вплив на фізіологічний, психологічний і когнітивний стан людини. Узагальнено методи оцінювання функціонального стану, зокрема суб'єктивні (опитувальники теплового відчуття, комфорту та прийнятності), об'єктивні (фізіологічні показники терморегуляції, серцево-судинної та нервової систем) і продуктивні (когнітивні тести). Детально розглянуто математичні моделі теплового комфорту, зокрема модель прогнозованої середньої оцінки PMV/PPD та адаптивні моделі, що застосовуються в міжнародних стандартах. Проведено критичний аналіз їхніх обмежень, пов'язаних з усередненим підходом, неврахуванням індивідуальної різноманітності та складністю застосування в приміщеннях змішаного типу. Окреслено перспективні напрями розвитку, що базуються на персоналізованих моделях із використанням алгоритмів машинного навчання та натільних сенсорів, а також на інтегрованому врахуванні теплового комфорту і якості повітря. Отримані узагальнення можуть бути використані для вдосконалення систем керування мікрокліматом і підвищення комфорту, здоров'я та когнітивної продуктивності людини в робочих та побутових приміщеннях.

Ключові слова: мікроклімат приміщень; тепловий комфорт; якість повітря; функціональний стан людини; когнітивна продуктивність; модель PMV/PPD; адаптивна модель теплового комфорту; фізіологічні показники; натільні сенсори; машинне навчання.

Abstract. The article reviews and systematically analyzes modern approaches to assessing the impact of indoor microclimate on a person's functional state. The microclimate is considered as a multifactorial system that includes parameters of the thermal environment and air quality, and their indirect impact on a person's physiological, psychological and cognitive state is analyzed. Methods for assessing functional state are summarized, including subjective (questionnaires of thermal sensation, comfort and acceptability), objective (physiological indicators of thermoregulation, cardiovascular and nervous systems) and productive (cognitive tests). Mathematical models of thermal comfort are considered in detail, in particular the model of the predicted mean vote PMV/PPD and adaptive models used in international standards. A critical analysis of their limitations associated with the averaged approach, disregard for individual diversity and the complexity of application in mixed-type premises is conducted. Promising directions of development are outlined, based on personalized models using machine learning algorithms and wearable sensors, as well as on integrated consideration of thermal comfort and air quality. The obtained generalizations can be used to improve microclimate control systems and increase human comfort, health, and cognitive performance in working and domestic premises.

Keywords: indoor microclimate; thermal comfort; air quality; human functional state; cognitive performance; PMV/PPD model; adaptive thermal comfort model; physiological indicators; wearable sensors; machine learning.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-322-330

ВСТУП

Актуальність дослідження впливу мікроклімату на функціональний стан людини зумовлена зростаючою урбанізацією, змінами клімату та інтенсифікацією трудової діяльності в приміщеннях з різноманітними умовами.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Розуміння того, як параметри навколишнього середовища, зокрема мікрокліматичні, впливають на фізіологічні, психологічні та поведінкові реакції людини, є критично важливим для забезпечення оптимальних умов праці, збереження здоров'я та підвищення продуктивності. В сучасному світі людина значну частину свого життя проводить у приміщеннях – виробничих, офісних, житлових, де мікроклімат відіграє ключову роль у формуванні її самопочуття та працездатності. Неоптимальні мікрокліматичні умови можуть призводити до зниження концентрації уваги, підвищення втоми, збільшення кількості помилок та, у довгостроковій перспективі, до розвитку професійних захворювань [1]. Тому глибокий аналіз цієї проблеми є необхідною передумовою для розробки ефективних стратегій оптимізації середовища життєдіяльності людини, зокрема з метою підвищення ефективності праці.

Метою цієї статті є проведення огляду та системного аналізу сучасних методів оцінювання впливу мікроклімату приміщень на функціональний стан людини та шляхів їх подальшого вдосконалення.

1. ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ ТА ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Мікроклімат приміщення – це складна, локалізована системою фізичних, хімічних та біологічних параметрів, які сукупно визначають умови всередині приміщення [2]. Це поняття виходить далеко за межі простої температури повітря. Воно охоплює дві основні групи параметрів: теплового середовища та якості повітря.

Теплове середовище визначається параметрами, що впливають на тепловий баланс людини, включаючи температуру повітря, середню випромінювану температуру, відносну вологість та швидкість руху повітря [3]. Якість повітря в приміщенні характеризується складом повітря, включаючи концентрації газів (наприклад, CO₂, CO, O₃), наявністю твердих частинок (PM2.5, PM10) та летких органічних сполук (VOC) [4]. Ці параметри не є статичними; вони динамічно змінюються під впливом зовнішнього клімату, архітектурних рішень (орієнтація приміщень, будівельні матеріали), систем опалення, вентиляції та кондиціонування, а також, що критично важливо, кількості та активності людей [2], а також інших живих істот – тварин та рослин.

Функціональний стан людини у контексті взаємодії з приміщенням є багатовимірною конструкцією. Це не статична умова, а процес, що динамічно підтримується середовищем [5]. Цей стан відображає здатність організму людини забезпечувати гомеостаз та ефективно функціонувати. Останнім часом прийнято проводити декомпозицію поняття «функціональний стан» на три взаємопов'язані сфери:

1) фізіологічний стан, що визначає здатність до адаптивної регуляції станів організму, а це, в свою чергу, включає процеси терморегуляції, серцево-судинну активність, ендокринні реакції та активність вегетативної нервової системи [5];

2) психологічний (афективний) стан, який охоплює емоційну стійкість, суб'єктивні відчуття теплового комфорту чи дискомфорту [6], задоволеність середовищем, настрій та рівень втоми;

3) когнітивний стан, який включає когнітивну ясність та продуктивність [5], тобто здатність до концентрації уваги, обробки інформації, запам'ятовування, прийняття рішень та виконання професійних завдань [3].

Оцінка впливу мікроклімату вимагає розуміння цілісної системи мозок – тіло – середовище. Вплив мікроклімату на функціональний стан не є лінійним, а опосередкованим. Дослідження демонструють чіткий ланцюжок впливу [4]. Зміни в мікрокліматі сприймаються організмом через систему рецепторів та аналізаторні системи організму. Це викликає фізіологічні реакції (наприклад, зміна варіабельності серцевого ритму, процеси терморегуляції). Ці фізіологічні зміни безпосередньо корелюють із суб'єктивним сприйняттям [4] (наприклад, відчуттям дискомфорту). Зрештою, сукупність фізіологічного стресу та суб'єктивного сприйняття неминуче впливають на когнітивні результати та продуктивність діяльності людини.

Таким чином, для повної оцінки впливу недостатньо оцінити лише продуктивність; необхідно зрозуміти проміжні ланки – фізіологічні відгуки та суб'єктивне сприйняття – щоб виявити механізм впливу і передбачити негативні наслідки зміни мікроклімату якомога раніше.

Для комплексної оцінки функціонального стану людини в науковій практиці на сьогодні встановився трьохпарадигмальний підхід, що охоплює суб'єктивні, об'єктивні та продуктивні методи.

Суб'єктивне оцінювання є класичним підходом, від якого не відмовляються через важливість самовідчуття людини. Тепловий комфорт за визначенням є станом свідомості, що виражає задоволеність тепловим середовищем [7]. Методологічною базою суб'єктивного оцінювання є опитувальники. Існує кілька стандартизованих шкал для вимірювання різних аспектів суб'єктивного сприйняття.

Шкала теплового відчуття (TSV) описує, наскільки тепло чи холодно людині в приміщенні. Найпоширенішою є 7-бальна шкала ASHRAE.[8]. Ця шкала, кодифікована в стандарті ANSI/ASHRAE

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

[9], безпосередньо пов'язана з індексом PMV (буде розглянутий нижче) і включає такі градації [10]: +3 (Гаряче / Hot), +2 (Тепло / Warm), +1 (Злегка тепло / Slightly warm), 0 (Нейтрально / Neutral), -1 (Злегка прохолодно / Slightly cool), -2 (Прохолодно / Cool), -3 (Холодно / Cold).

Шкала теплових уподобань (TPV) дозволяє оцінити бажання людини змінити середовище. Найчастіше використовується трьохбальна шкала Макінтайра: «холодніше», «без змін», «тепліше» [5].

Шкала теплового комфорту (TCV) або прийнятності дає відповідь на пряме запитання про те, чи є середовище комфортним або прийнятним для людини (наприклад, за шкалою від «дуже неприйнятно» до «дуже прийнятно») [7].

Важливо розрізняти ці шкали. Дослідження показують, що «відчуття» та «комфорт» – це різні поняття [4]. Людина може повідомити про відчуття «легкої прохолоди» ($TSV = -1$), але водночас вважати це середовище «комфортним». Плутанина між цими поняттями, а також погане документування (в багатьох дослідженнях та результатах опитувань навіть не вказано, яка шкала використовувалася) є, на наш погляд, суттєвою методологічною проблемою в цій галузі.

Об'єктивне оцінювання спрямоване на вимірювання фізіологічних реакцій організму на мікроклімат, що дає змогу отримати незалежні індикатори комфорту або стресу незалежно від суб'єктивного самопочуття людини. Для збору даних використовуються як стаціонарні медичні прилади, так і натільні датчики [7]. До основних фізіологічних показників, що вимірюються та оцінюються в ході об'єктивного аналізу, належать:

1) перморегуляція – визначення температура глибоких шарів тіла та середня температура поверхні шкіри [7];

2) серцево-судинна активність – частота серцевих скорочень (HR) та варіабельність серцевого ритму (HRV) [7];

3) активність мозку – електроенцефалографія (EEG) для аналізу частотних діапазонів мозкових хвиль [4];

4) активність потовиділення – шкірно-гальванічна реакція (GSR) або електродермальна активність (EDA) [7];

5) м'язова активність – електроміографія (EMG) для виявлення м'язового тремтіння, спричиненого холодом [17];

6) кровонаповнення – артеріальний тиск та насичення крові киснем [7].

Ці показники не просто корелюють із дискомфортом, а й дозволяють виявити його біологічні механізми. Наприклад, в [5] встановлено прямий зв'язок між терморегуляцією та активністю вегетативної нервової системи (зокрема, блукаючого та симпатичного нервів), яка вимірюється за допомогою HRV. Було показано, що вище співвідношення низьких та високих частот (LF/HF) в аналізі HRV, що вказує на симпатичний стрес, безпосередньо корелює з неприємним тепловим відчуттям та дискомфортом. Ця закономірність відкриває шлях до створення моделей, які можуть передбачати дискомфортні стани, не покладаючись на суб'єктивні дані.

Оцінювання продуктивності (аналіз когнітивного стану) – це підхід, що зосереджується на оцінюванні прямого впливу мікроклімату на здатність людини виконувати завдання [4]. Методологія підходу полягає у проведенні стандартизованих когнітивних тестів у контрольованих лабораторних умовах [7] або в реальних умовах за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм чи мобільних додатків [7]. При цьому можуть вимірюються різні аспекти когнітивних функцій людини.

Високорівневий системний підхід – прикладом є дослідження Cognitive Function study, яке ідентифікувало дев'ять функціональних доменів, на які впливає мікроклімат, зокрема: кризове реагування, використання інформації та стратегія діяльності [7].

Спеціалізований підхід – для оцінки конкретних функцій використовуються валідовані тести [7], такі як пест Струпа (оцінює виконавчу функцію, вибірку увагу та швидкість обробки інформації), арифметичні тести (оцінюють робочу пам'ять та концентрацію), завдання на віддалені асоціації (оцінює конвергентне мислення та творче вирішення проблем), також інші тести, які включають завдання на сприйняття, просторову орієнтацію та пам'ять [7].

Найбільш надійні та сучасні дослідження застосовують усі три підходи в комплексі (оцінювання суб'єктивне, об'єктивне та продуктивності), щоб валідувати повний ланцюжок впливу: «середовище → фізіологічний відгук → сприйняття → продуктивність».

Систематичний підхід, описаний у [4], є яскравим прикладом такого поєднання. Дослідники одночасно вимірювали: об'єктивні характеристики середовища, суб'єктивне сприйняття якості середовища, внутрішні реакції організму (фізіологічні та когнітивні), продуктивність (у цьому випадку оцінювалась академічна успішність). Результати дослідження показали статистично значимі асоціації на кожному етапі цього ланцюжка: між параметрами середовища та сприйняттям ($p < 0.05$), між

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

сприйняттям та реакціями організму ($p < 0.05$), між реакціями організму та успішністю ($p < 0.01$) [4]. Це підтверджує опосередковану модель впливу та доводить, що суб'єктивне сприйняття є не просто шумовим показником, а ключовою проміжною змінною, яка має реальні фізіологічні кореляти та наслідки для продуктивності.

2. ПОКАЗНИКИ СЕРЕДОВИЩА

Розглянемо вплив теплового середовища і якості повітря в приміщенні на людину.

Несприятливі температури (при чому як високі, наприклад, 30 °C, так і низькі, наприклад, 18 °C) чинять значно сильніший вплив на фізіологічні параметри, такі як частота серцевих скорочень та частота дихання, порівняно з помірними умовами (наприклад, 22 °C) [7].

Численні дослідження підтверджують, що несприятливі температури значно погіршують когнітивні функції. Ця залежність має U-подібну форму: і низькі, і високі температури пов'язані з підвищеним ризиком погіршення когнітивних функцій [7]. Оптимальна продуктивність, зокрема увага, спостерігається у вузькому температурному діапазоні, зазвичай 20–24 °C. Інші дослідження звужують цей оптимум до 22–24 °C [6]. Відхилення від цього оптимального діапазону має суттєві наслідки. Так, відхилення на 4 °C у будь-який бік подвоює ймовірність труднощів з увагою у літніх людей [7]. При підвищенні температури на 1 °C (понад 22 °C) точність виконання завдань знижується приблизно на 1,4 % [7]. Дослідження роботи з дому підтвердило цей нелінійний зв'язок ($p < 0.05$), де і занадто теплі, і занадто прохолодні умови погіршували результати тесту Струпа і творчих завдань [7].

Вплив температури не можна розглядати окремо від вологості. В роботі [7] чітко це продемонстровано шляхом порівняння трьох умов: базових (26 °C, вологість 70 %), спека та вологості (39 °C, вологість 70 %), спека та сухості (39 °C, вологість 50 %). Перехід від базових до вологих умов значно знизив точність когнітивних тестів. Однак, при тій самій екстремальній температурі (39 °C), перехід від вологих до сухих умов значно підвищив когнітивну точність. Це доводить, що вологість є ключовим медіатором. Когнітивний спад при високій температурі значною мірою спричинений не самою температурою, а нездатністю тіла до ефективного охолодження шляхом потовиділення у вологому середовищі.

Існує наукова дискусія щодо точної форми кривої «температура-продуктивність». Класична модель «перевернута U» припускає наявність єдиного оптимального піку продуктивності. Натомість новіша модель «розширена U» постулює широке плато оптимальної продуктивності, з погіршенням лише в екстремальних умовах [5]. Швидше за все, для помірного середовища модель «розширена U» є більш коректною. Це дозволяє розширити зону оптимальних температур у системах нагріву, вентиляції та кондиціонування (HVAC) без втрат у продуктивності.

Погана якість повітря є однією з головних причин поганого самопочуття людей в будівлях [26]. Це явище отримало назву синдрому поганої будівлі і характеризується набором нейрофізіологічних симптомів, включаючи головний біль, сонливість, млявість, розумову втому та погану концентрацію уваги. Концентрація вуглекислого газу (CO_2) є ключовим індикатором у цьому процесі. Підвищення рівня CO_2 позитивно та статистично значимо асоціюється зі зростанням симптомів синдрому поганої будівлі, включаючи головний біль та втому [7]. Більшість досліджень будівель з механічною вентиляцією виявили значимий зв'язок між CO_2 та симптомами синдрому поганої будівлі [7]. Ризик розвитку синдрому виявився у 2,1 рази вищий при підвищеній концентрації CO_2 [2]. Діоксид карбону у типових концентраціях (3000 ppm) не є прямим токсином для людини, але є важливим індикатором. Високий рівень CO_2 у приміщенні майже виключно генерується диханням людей і вказує на два фактори: недостатню вентиляцію приміщення на людину та накопичення інших забруднювачів, що генеруються людьми (біоефлюенти, запахи, леткі речовини) [5].

Проблема полягає не в самому вуглекислому газі, а в застоному повітрі, на яке він вказує. Саме тому в наукових роботах часто пов'язують симптоми синдрому поганої будівлі з $d\text{CO}_2$ – різницею між внутрішньою та зовнішньою концентрацією вуглекислого газу, що є прямим показником ефективності вентиляції [6].

Тепловий комфорт та якість повітря характеризуються взаємозалежністю. В роботі [7] було виявлено сильні кореляції між суб'єктивними відповідями щодо теплового середовища та відповідями щодо якості повітря. Збільшення концентрації вуглекислого газу призводило до підвищення теплового відчуття (TSV). Іншими словами, в умовах поганої вентиляції (високий рівень CO_2) люди відчували себе тепліше при тій самій фактичній температурі. Вищі рівні вуглекислого газу (понад 1500 ppm) були пов'язані зі зниженням сприйнятого контролю над тепловим середовищем. Вища відносна вологість була пов'язана зі зниженням сприйнятої якості повітря. Цей синергетичний ефект є фундаментальним

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

викликом для інженерії HVAC. Він доводить, що не можна проектувати систему опалення/охолодження окремо від системи вентиляції [5]. «Погане повітря» змушує людей відчувати тепловий дискомфорт, навіть якщо термостат налаштований правильно. Це підкреслює необхідність інтегрованого підходу до якості повітря у приміщенні [5].

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ

Для кількісної оцінки та прогнозування теплового комфорту були розроблені математичні моделі, які лягли в основу глобальних стандартів проектування приміщень. Найвідомішою є модель Повла Оле Фангера. Модель прогнозованої середньої оцінки (PMV) була розроблена у 1970-х роках на основі експериментів у контрольованих кліматичних камерах [3]. Це статична модель теплового балансу, а її фундаментальне припущення полягає в тому, що людина відчуває тепловий комфорт (нейтральність), коли її внутрішня теплопродукція дорівнює тепловтратам у навколишнє середовище, тобто тепловий баланс тіла дорівнює нулю. Модель розроблена для усереднення теплових відчуттів великої групи людей [5]. Точність моделі PMV повністю залежить від шести вхідних змінних, які необхідно виміряти або оцінити [3] – чотири параметри середовища і два персоналізовані параметри (табл. 1). Саме складність точного вимірювання параметрів людини є одним з головних недоліків моделі [7].

Таблиця 1 – Вхідні параметри моделі прогнозованої середньої оцінки (PMV) [3]

Категорія	Параметр (змінна)	Опис параметра	Одиниці вимірювання
Середовище	Температура повітря (T_a)	Температура сухого повітря	°C
Середовище	Середня випромінювана температура (T_{mrt})	Середньозважена температура поверхонь, що оточують тіло	°C
Середовище	Відносна вологість (RH)	Вміст водяної пари у повітрі (або P_a – парціальний тиск)	% (Па)
Середовище	Швидкість руху повітря (V_a)	Відносна швидкість руху повітря біля тіла	м/с
Людина	Рівень метаболізму (M)	Тепло, що виділяється тілом внаслідок активності	мет (1 met = 58,2 Вт/м²)
Людина	Теплоізоляція одягу (Icl)	Ізоляційна здатність одягу	clo (1 clo = 0.155 м²K/Вт)

Індекс прогнозованої середньої оцінки PMV прогнозує середнє значення оцінок за 7-бальною шкалою ASHRAE (від -3 до +3) [2]. Він розраховується на основі теплового навантаження (L) на тіло людини – різниці між теплопродукцією та тепловтратами. Індекс розраховується емпірично як

$$PMV = (0,303 e^{-0,036M} + 0,028) (H - L), \quad (1)$$

де M – рівень метаболізму (Вт/м²);

L – теплове навантаження на тіло (в Вт/м²), яке є складною функцією всіх 6 змінних. Воно розраховується як різниця між метаболічною теплопродукцією ($L=M-W$, де W – виконана механічна робота) та сумою тепловтрат [5]: тепловтрати через дихання (конвективні та латентні), тепловтрати через випаровування зі шкіри (дифузія та піт), сухий теплообмін зі шкіри (конвекція та радіація).

На основі PMV Фангер ввів індекс PPD (прогнозований відсоток незадоволених), який кількісно визначає відсоток людей, що, за прогнозами, будуть незадоволені тепловим середовищем (тобто оберуть відповіді -3, -2, +2 або +3 за шкалою теплового відчуття TSV) [6], який розраховується як

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

Графік PPD має U-подібну форму. Важливою особливістю є те, що навіть при «ідеальному» $PMV = 0$ (нейтрально), PPD дорівнює 5 %. Це фундаментальне визнання Фангером факту індивідуальної різноманітності [7]. Модель з самого початку визнає, що неможливо задовольнити 100 % людей, а показник 5 % є теоретичним мінімумом незадоволеності.

На протипагу лабораторній моделі PMV, у 1990-х роках а основі польових досліджень у тисячах реальних будівель було розроблено адаптивний підхід [7]. Його ключовий принцип полягає в тому, що

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

люди не є пасивними об'єктами теплопередачі; а виступають активними агентами, які адаптуються до свого середовища. Механізми адаптації включають такі дії [7]: поведінкові (зміна одягу, відкриття/закриття вікон, зміна положення тіла, вживання гарячих/холодних напоїв), психологічні (зміна очікувань, тобто людина, яка входить до приміщення з природною вентиляцією влітку, очікує, що там буде тепліше, і тому толерує вищі температури), фізіологічні (сезонна акліматизація організму).

Стандарт ASHRAE 55 (Температурні умови середовища для людської діяльності) включає адаптивну модель як альтернативу індексу PMV, але з дуже суворими умовами застосування [4]. Така модель застосовується лише до просторів з природною вентиляцією, що контролюється людьми [6] Вона не застосовується, якщо в просторі є механічне охолодження (кондиціонер) або якщо система опалення увімкнена. Модель використовує один вхідний параметр – переважаючу середню зовнішню температуру, яка зазвичай є середнім арифметичним щоденних середніх температур за попередні 7–30 днів [7]. Модель представлена у стандарті у графічному вигляді, який пов'язує переважаючу зовнішню температуру з діапазоном прийнятних внутрішніх робочих температур. Чим вища середня зовнішня температура, тим тепліше середовище в приміщенні люди вважають прийнятним [7]. Стандарт визначає зони комфорту для 80 % та 90 % прийнятності [7].

Європейський стандарт EN 16798-1 використовує аналогічний адаптивний підхід для будівель без механічного охолодження [7]. Головна відмінність полягає в розрахунку вхідної змінної. Замість простого середнього арифметичного, EN 16798-1 використовує експоненційно зважену середню зовнішню температуру. Це надає більшої ваги останнім дням, що краще відображає короткострокову адаптацію людини. Формула має вигляд

$$Tim = (1 - \alpha)[T_{e(d-1)} + \alpha T_{e(d-2)} + \alpha^2 T_{e(d-3)} + \alpha^3 T_{e(d-4)} + \dots], \quad (3)$$

де $T_{e(d-i)}$ – середня добова температура i днів тому;

α – ваговий коефіцієнт, $\alpha \leq 1$.

4. КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Дві домінуючі моделі, які застосовуються в оцінюванні мікрокліматичного комфорту (PMV та адаптивна), не є взаємозамінними. Вони представляють різні підходи до проектування таких систем та призначені для різних типів приміщень (табл. 2).

Таблиця 2 – Порівняння моделі прогнозованої середньої оцінки та адаптивної моделі для оцінювання теплового комфорту в приміщенні

Характеристика	Модель PMV (Фангера)	Адаптивна модель (ASHRAE 55 / EN 16798-1)
Наукова база	Тепловий баланс, лабораторні дослідження	Адаптація, польові дослідження
Тип приміщення	Будівлі з механічним опаленням/охолодженням	Будівлі з природною вентиляцією, що контролюється людьми
Підхід	Статичний, детермінований («один розмір для всіх»)	Динамічний, регресійний (залежить від зовнішнього клімату)
Ключові вхідні параметри	6 змінних: 4 характеризують середовище, 2 – людину	1 змінна: середня зовнішня температура
Контроль	Припускає, що люди поведуться пасивно	Припускає, що люди здійснюють контроль (наприклад, відкрити вікно)
Результат	Точкове прогнозування (PMV) та частка незадоволених (PPD)	Діапазон прийнятних температур у приміщенні

Незважаючи на широке впровадження цих моделей у чинні стандарти, обидві моделі мають фундаментальні обмеження.

Розглянемо обмеження моделі прогнозованої середньої оцінки PMV. Вона часто є поганим предиктором фактичного теплового відчуття у польових дослідженнях, особливо в приміщеннях з природною вентиляцією, де вона систематично недооцінює теплову толерантність людей. Модель не враховує жодного з механізмів адаптації (поведінкових, психологічних та ін.). Вона розглядає людину як пасивний об'єкт.: Точність PMV залежить від індивідуальних характеристик людини та різко падає через

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

недостовірність у вимірюванні двох персональних змінних: ізоляції одягу та рівня метаболізму. Крім того, модель не призначена для високих рівнів метаболізму (наприклад, для спортзалів, де $M > 2.0 \text{ met}$). Модель припускає, що всі люди в світі реагують на середовище однаково, що спростовується численними дослідженнями [3].

Адаптивні моделі, хоч і вирішують проблему урахування адаптації, мають власну критичну ваду, особливо актуальну для сучасної архітектури. Їхня фундаментальна проблема – це нездатність моделювати будівлі змішаного (гібридного) типу. Стандарти створюють жорстку бінарну логіку: будівля або повністю механізована (слід використовувати PMV), або повністю природна (слід використовувати адаптивну модель). Однак сучасні енергоефективні будівлі працюють у змішаному режимі: вони використовують природну вентиляцію, коли це можливо, і вмикають кондиціонер лише під час пікових навантажень [1]. Адаптивні моделі не дають раціональної основи для визначення, коли яку модель застосовувати у перехідні сезони. Це питання, яке ще не вирішене і є головною прогалиною в сучасних стандартах.

Найбільша помилка обох відомих стандартних моделей (PMV і адаптивної) полягає в тому, що вони працюють з усередненими значеннями і не враховують величезну індивідуальну різноманітність у сприйнятті [7].

Проведений аналіз літератури показує, що при одній і тій самій температурі (наприклад, 24°C) діапазон позначок за шкалою TSV може бути від «занадто холодно» (-2) до «занадто тепло» (+2). Модель PMV, прогностуючи усереднене значення (напр., +0.5), є статистично коректною, але практично марною, оскільки це середнє не репрезентує реальний досвід більшості людей. Моделі, що базуються на усередненні, зазнають невдачі, тому що вони ігнорують так звані драйвери різноманітності [7]. Узагальнюючи проаналізовані дослідження, можна виділити основні індивідуальні фактори з різним ступенем впливу (чітким і неоднозначним).

Чіткий вплив:

- 1) будова тіла – люди з вищим індексом маси тіла мають нижчу бажану температуру комфорту [6];
- 2) метаболізм – суттєво впливають індивідуальні відмінності в рівні метаболізму;
- 3) сприйнятий контроль – наявність контролю над середовищем (навіть уявний) робить людей значно толерантнішими до умов середовища [5].

Неоднозначний вплив: вік та стать – дослідження щодо впливу віку та статі дають суперечливі результати. Ця неоднозначність, ймовірно, виникає тому, що вони є лише поверхневими оболонками для справжніх фізіологічних драйверів (будова тіла та метаболізм). Наприклад, було показано, що жінки мають більшу теплову чутливість [7] та відмінне теплове сприйняття, особливо влітку [3], що, ймовірно, пояснюється усередненими відмінностями у будові тіла та метаболізмі.

Недоліки усереднених моделей стимулюють розвиток трьох ключових напрямків удосконалення моделей теплового комфорту: персоналізація за допомогою машинного навчання, використання натільних датчиків для збору даних та інтегровані підходи до якості середовища.

Рішенням проблеми індивідуальної різноманітності може бути перехід від усереднених моделей до персоналізованих. Цей підхід використовує алгоритми машинного навчання для створення моделей, специфічних для кожної окремої людини [4]. При цьому найперспективнішим є використання алгоритмів Random Forest, K-Nearest Neighbors, Support Vector Machine, а також штучні нейронні мережі.

Замість того, щоб покладатися на узагальнене фізичне представлення (як у моделі PMV), моделі машинного навчання навчаються на індивідуальних даних конкретної людини (збір фізіологічних показників середовища) та її індивідуальних суб'єктивних відгуках. Ефективність цього підходу може бути значно вищою за класичні моделі, які часом показують медіанну точність 51 % [7], що є на рівні вгадування. Моделі машинного навчання є настільки ефективними, тому що вони відмовляються від пошуку універсального рівняння і натомість створюють індивідуальне рішення для кожної людини.

Персоналізовані моделі потребують безперервного потоку персоналізованих даних. Цю проблему вирішують натільні датчики (браслети, годинники, медичні пластирі) [4]. Вони ідеально підходять для цього завдання, оскільки збирають два потоки даних одночасно: дані про середовище, параметри мікроклімату (температуру, вологість) безпосередньо біля тіла людини та фізіологічні дані, об'єктивні показники (температуру шкіри, варіабельність серцевого ритму (через фотоплетизмографію), шкірно-гальванічну реакцію тощо).

Поєднання машинного навчання та натільних датчиків створює повний замкнений цикл персоналізованого керування мікрокліматом, відомий як «людина в контурі» [6].

Узагальнений алгоритм роботи таких систем може виглядати таким чином:

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

- 1) натільний датчик збирає фізіологічні дані в реальному часі;
- 2) дані передаються на обробку в персоналізовану модель машинного навчання;
- 3) модель машинного навчання прогнозує стан людини, наприклад: «Виходячи з отриманих фізіологічних даних, ця людина зараз відчує дискомфорт і хотітиме прохолоди»;
- 4) цей прогноз надсилається до системи HVAC;
- 5) система HVAC локально коригує мікроклімат (наприклад, вмикає персональний вентилятор) для цієї людини.

Майбутнє вдосконалення стандартів полягає не лише в персоналізації, але й в інтеграції підходів. Майбутні моделі та системи управління повинні відмовитися від диференційованих підходів (окремо тепло, окремо якість повітря) і одночасно враховувати ці параметри, а також акустичні та світлові умови. Це вимагає визнання та моделювання складних перехресних ефектів впливу. Також можна розширювати кількість параметрів, які контролюються, доповнюючи їх, наприклад, сенсомоторними реакціями [5] та визначенням стресових станів [3].

ВИСНОВКИ

Оцінка впливу мікроклімату на функціональний стан людини пройшла тривалий шлях еволюції. Вона почалася зі статичної лабораторної моделі теплового балансу (PMV/PPD), заснованої на усереднених даних про середню людину. В подальшому виникла динамічна польова адаптивна модель, яка визнала роль психологічної та поведінкової адаптації у приміщеннях з природною вентиляцією. Обидва ці підходи, що лежать в основі сучасних стандартів, виявилися нездатними вирішити дві фундаментальні проблеми: моделювання сучасних приміщень змішаного типу та врахування величезної індивідуальної різноманітності у сприйнятті тепла.

Сучасний передовий рубіж – це персоналізований, керований даними підхід, що використовує машинне навчання для створення індивідуальних моделей комфорту та використовує натільні датчики для збору фізіологічних параметрів та даних про середовище у реальному часі. Цей підхід демонструє потенційно значно вищу точність прогнозування порівняно зі стандартними моделями.

Для подальшого розвитку цієї галузі необхідні дослідження, зосереджені на розробленні надійних та валідованих моделей для приміщень змішаного типу, що є головною прогалиною в поточних стандартах; проведенні довгострокових досліджень з використанням натільних датчиків для навчання та валідації персоналізованих моделей машинного навчання у реальних життєвих та робочих умовах; подальшому вивченні синергетичного впливу якості повітря та теплового комфорту на когнітивні функції людини; дослідженні етичних аспектів та питань приватності, пов'язаних із безперервним збором персональних фізіологічних даних у робочому середовищі.

Отже, перспективи цієї галузі полягають у створенні адаптивних, персоналізованих та інтегрованих середовищ, які здатні реагувати на унікальний фізіологічний та психологічний стан кожного окремого мешканця в режимі реального часу, забезпечуючи справжній комфорт та максимальну когнітивну продуктивність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мікроклімат та його вплив на працездатність людини (2018). *Головне управління Держпродспоживслужби в Хмельницькій області*. <https://consumerhm.gov.ua/956-mikroklimat-ta-jogo-vpliv-na-pratsezdatnist-lyudini>
2. Elantary, A. R. (2025). Microclimate Dynamics in Residential Spaces: Analyzing Humidity and Temperature for Improved Indoor Comfort. *Civil Engineering and Architecture*. 13(3A), 2288-2300. https://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=15067
3. Yau, Y. H., & Chew, B. T. (2014). A review on predicted mean vote and adaptive thermal comfort models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(1), 23-35. https://doi.org/10.1177/0143624412465200?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
4. Brink, H. W., Loomans, M. G., Mobach, M. P., & Kort, H. S. (2022). A systematic approach to quantify the influence of indoor environmental parameters on students' perceptions, responses, and short-term academic performance. *Indoor Air*, 32(10), e13116. <https://doi.org/10.1111/ina.13116>
5. Grasso-Cladera, A., Arenas-Perez, M., Wegertseder-Martinez, P., Vilina, E., Mattoli-Sanchez, J., & Parada, F. J. (2025). Neuroscientific Insights into the Built Environment: A Systematic Review of Empirical Research on Indoor Environmental Quality, Physiological Dynamics, and Psychological

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Well-Being in Real-Life Contexts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(6), 824. <https://doi.org/10.3390/ijerph22060824>

6. Shtofel, D., Kostishyn, S., Navrotska, K., Zlepko, S., & Tymchyk, S. (2018). Reaction parameter and modified sensorimotor reaction method for assessment of functional potential of nervous system. *Biomedical engineering and electronics*, 1 (20), 68-78.
7. Злепко, С. М., Мінцер, О. П., Сергєєва, В. В., Азархов, О. Ю., & Костішин, С. В. (2011). *Сучасні методи і засоби для визначення і діагностування емоційного стресу: монографія*. ВНТУ. 228 с.

REFERENCES

1. Microclimate and its impact on human performance (2018). *Main Department of the State Service for Food and Consumer Protection in Khmelnytskyi Region*. <https://consumerhm.gov.ua/956-mikroklimat-ta-jogo-vpliv-na-pratsezdatsnist-lyudini>
2. Elantary, A. R. (2025). Microclimate Dynamics in Residential Spaces: Analyzing Humidity and Temperature for Improved Indoor Comfort. *Civil Engineering and Architecture*. 13(3A), 2288-2300. https://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=15067
3. Yau, Y. H., & Chew, B. T. (2014). A review on predicted mean vote and adaptive thermal comfort models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(1), 23-35. https://doi.org/10.1177/0143624412465200?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
4. Brink, H. W., Loomans, M. G., Mobach, M. P., & Kort, H. S. (2022). A systematic approach to quantify the influence of indoor environmental parameters on students' perceptions, responses, and short-term academic performance. *Indoor Air*, 32(10), e13116. <https://doi.org/10.1111/ina.13116>
5. Grasso-Cladera, A., Arenas-Perez, M., Wegertseder-Martinez, P., Vilina, E., Mattoli-Sanchez, J., & Parada, F. J. (2025). Neuroscientific Insights into the Built Environment: A Systematic Review of Empirical Research on Indoor Environmental Quality, Physiological Dynamics, and Psychological Well-Being in Real-Life Contexts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(6), 824. <https://doi.org/10.3390/ijerph22060824>
6. Shtofel, D., Kostishyn, S., Navrotska, K., Zlepko, S., & Tymchyk, S. (2018). Reaction parameter and modified sensorimotor reaction method for assessment of functional potential of nervous system. *Biomedical engineering and electronics*, 1 (20), 68-78.
7. Zlepko, S. M., Mintser, O. P., Sergeeva, V. V., Azarkhov, O. Y., & Kostishyn, S. V. (2011). *Modern methods and tools for identifying and diagnosing emotional stress*. VNTU. 228 p.

Надійшла до редакції 20.10.2025 р.

ПАНТЕЛЕЙЧУК ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.
e-mail: vindims@gmail.com

СОРОЧИНСЬКИЙ ВАДИМ ВАЛЕНТИНОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.
e-mail: vsorochynskiy@vntu.edu.ua

D.O. PANTELEICHUK, V.V. SOROCHYNSKYI ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO ASSESSING THE INFLUENCE OF MICROCLIMATE ON HUMAN FUNCTIONAL STATE

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine