

## СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЧИННИКІВ ФІЗИЧНОГО КОМФОРТУ В АРХІТЕКТУРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

**Анотація.** У статті здійснено системний аналіз фізичного комфорту як складової якості внутрішнього середовища у приміщеннях. Враховано, що комфорт людини формується не лише органами чуттів, а й під впливом чинників, які не завжди усвідомлюються, зокрема метеорологічних та техногенних. Узагальнено сучасні підходи до оцінювання теплового, світлового, акустичного комфорту, якості повітря, кліматичних та погодних умов, а також впливу електромагнітних полів, інфразвуку та аероіонного складу повітря. Порівняно вітчизняні та міжнародні стандарти, виявлено ключові показники, методи вимірювання та критерії оцінювання. У роботі представлено узагальнену таблицю складових фізичного комфорту, яка структуровано подає елементи середовища, фактори впливу, нормативні документи та можливі проєктні рішення. Отримані результати становлять основу для подальших досліджень у сфері комфортності архітектурного середовища, що враховуватимуть формоутворювальні фактори та граничні допустимі значення кожного з параметрів.

**Ключові слова:** фізичний комфорт, тепловий комфорт, світловий комфорт, акустичний комфорт, якість повітря, метеорологічні умови, техногенні чинники, якість повітря, нормативи оцінювання середовища, архітектурне проєктування.

**Ставлення проблеми.** Фізичний комфорт у будівлях традиційно розглядається через призму температурних, світлових, акустичних та вентиляційних умов, які прямо сприймаються органами чуттів. Проте в процесі проєктування та експлуатації часто ігноруються менш очевидні параметри, як-от мікрокліматичні коливання, які не мають негайного сенсорного відгуку, але суттєво впливають на самопочуття людини. До них належать метеорологічні умови та чинники техногенного походження (електромагнітне випромінювання, вібрації, інфразвук тощо). Відсутність комплексного врахування цих чинників призводить до порушення теплового балансу, зниження продуктивності, хронічного дискомфорту і навіть до ризиків для здоров'я користувачів будівель.

**Актуальність дослідження.** Сучасні вимоги до енергоефективності та екологічної сталості будівель стимулюють використання інноваційних

інженерних рішень у сферах вентиляції, освітлення та теплогазопостачання. Проте технологічний прогрес не завжди супроводжується підвищенням реального комфорту. Окремі технічні системи можуть створювати нові загрози – від мікрокліматичних порушень до прихованих техногенних навантажень. У зв'язку з цим виникає потреба в переосмисленні концепції фізичного комфорту, яка має базуватися не лише на нормативних показниках, а й на інтегративному підході до суб'єктивного сприйняття середовища. Актуальність посилюється сучасними викликами, пов'язаними зі зміною клімату, урбанізацією та підвищеними очікуваннями користувачів щодо якості середовища.

**Останні дослідження та публікації.** У попередній статті автора структуровано поняття «комфорт» та виділено чотири складових комфорту – фізичний, психологічний, соціальний та емоційний комфорт.

Фізичний комфорт давно є темою наукових досліджень – його зв'язок із такими параметрами, як температура, вологість, шум, освітлення та якість повітря, широко розкрито у працях українських і зарубіжних вчених. У статті [1] представлено розширений огляд літератури щодо попередніх дослідницьких внесків у вивчення різних аспектів фізичного комфорту людини в приміщенні.

Однак більшість публікацій зосереджуються саме на тих параметрах, які доступні органам відчуття, наприклад, температура, шум або освітленість. Натомість менш очевидні умови – атмосферний тиск, рівень вібрацій, концентрація CO<sub>2</sub>, електромагнітне випромінювання – часто ігноруються при проектуванні, хоча вони теж мають значний вплив на самопочуття та працездатність людини. Вплив електромагнітних полів, деіонізації повітря, низькочастотного звуку та інфразвуку на людину у приміщеннях закладів вищої освіти досліджено у роботі [2].

**Формулювання цілей статті.** Метою дослідження є здійснення комплексного аналізу фізичного комфорту в архітектурному середовищі з урахуванням як безпосередньо відчутних, так і латентних (невідчутних) факторів – метеорологічних і техногенних. Зокрема, в роботі розширюватиметься поняття «фізичний комфорт», аналізуватимуться всі складові фізичного комфорту людини в середовищі, а також критерії оцінювання фізичного комфорту та методи збирання даних щодо якості фізичного комфорту.

**Фізичний комфорт** – це передусім відчуття фізичної якості середовища, яке безпосередньо впливає на самопочуття та здоров'я людини. У світовій практиці це поняття систематизовано через термін Indoor Environmental Quality (IEQ) – якість внутрішнього середовища. До його складу входять чотири основні параметри:

1. Тепловий комфорт,

2. Світловий комфорт,
3. Акустичний комфорт,
4. Якість повітря (IAQ – Indoor Air Quality).

Це ті умови, які людина сприймає через органи чуттів: відчуває тепло або прохолоду, бачить світло, чує звуки, вдихає повітря. Усі ці складові добре вивчені, для них розроблено нормативні показники, існують підходи до їхнього контролювання та регулювання відповідно до національних і міжнародних стандартів.

Проте існують інші важливі фактори, які не сприймаються безпосередньо, але мають не менший вплив на фізичний стан людини. Йдеться про значну кількість параметрів якості повітря (вміст CO<sub>2</sub>, речовин, пилу), метеорологічні умови (атмосферний тиск, вологість, вітер, геофізичні явища) та фізичні чинники техногенного походження, наприклад, електромагнітні поля, вібрації, шум поза межами нормативних значень, іонізація повітря тощо.

Метеорологічні умови здатні впливати на самопочуття людини: викликати головний біль, втоми, дратівливість. У публікації [2] з посиланням на сучасних гігієністів акцентується увага на негативному впливі деіонізованого повітря, тривалого впливу електромагнітних полів і підвищеного шуму на стан здоров'я населення.

З огляду на це, важливо розглядати фізичний комфорт як багатокomпонентну систему, що містить як безпосередньо відчутні параметри, так і ті, що діють непомітно, але не менш суттєво (рис. 1).

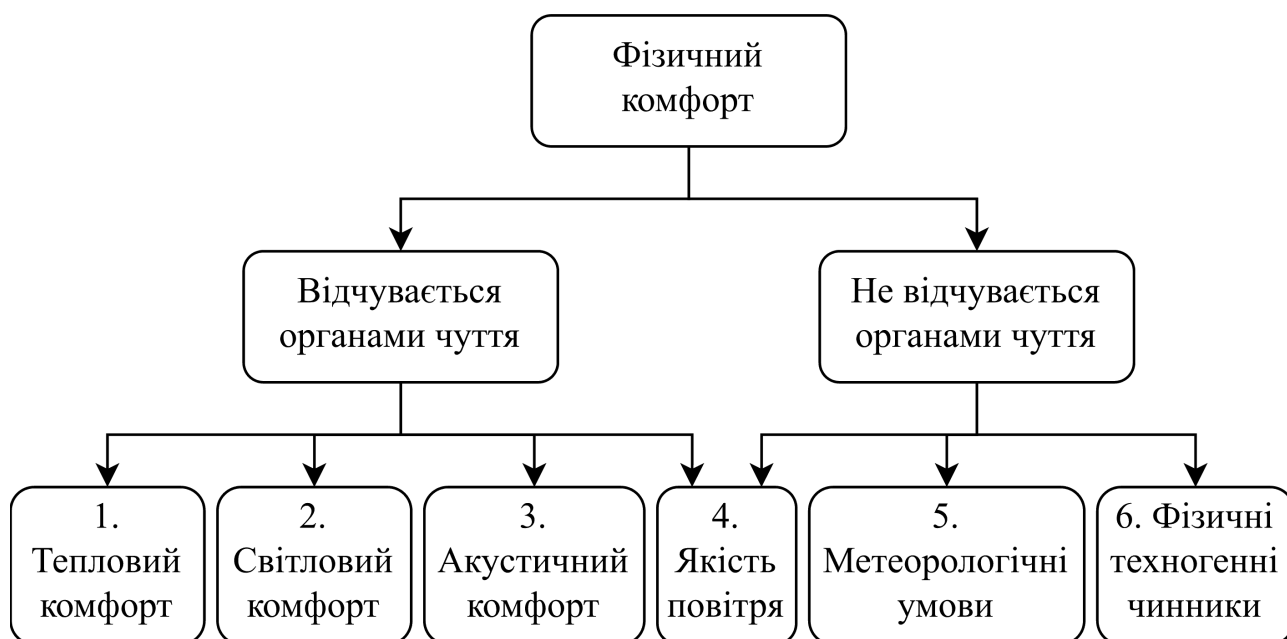


Рис. 1. Складові фізичного комфорту

**Тепловий комфорт** є одним із ключових складових фізичного комфорту в приміщенні. Згідно з дослідженнями [3–6], саме він має найвагоміший вплив на загальне задоволення якістю внутрішнього середовища (IEQ) і випереджає візуальний, акустичний комфорт і навіть якість повітря. Це пояснює, чому більшість рішень у сфері опалення, вентиляції та кондиціонування повітря орієнтовані насамперед на досягнення стабільного теплового балансу.

Людський організм функціонує як терморегульована система, яка постійно намагається зберегти теплову рівновагу із середовищем. Надмірна теплота або її дефіцит викликає фізіологічний дискомфорт, зниження концентрації, працездатності, а в довгостроковій перспективі – порушення здоров'я.

Визначення теплового комфорту сформульоване як «стан розуму, що виражає задоволення тепловим середовищем» відповідно до ISO 7730 та ASHRAE 55 [7]. В Україні діє адаптована версія міжнародного стандарту – ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 [8], що входить до нормативного комплексу В.2.2 «Будинки і споруди».

Американський стандарт ASHRAE 55:2023 [9] є міжнародним еталоном, який враховує широкий спектр параметрів середовища й особистісних характеристик. Він дозволяє оцінювати тепловий комфорт як стаціонарним, так і адаптивним методом, що враховує здатність людини пристосовуватися до змін мікроклімату.

Усі чинники, що впливають на відчуття теплоти, умовно поділяються на дві групи:

1. Особисті фактори: метаболізм, рівень фізичної активності, кількість одягу.
2. Фактори навколишнього середовища: температура повітря, радіаційна температура поверхонь, вологість, швидкість руху повітря.

Сучасні дослідження [3] також підкреслюють психофізіологічні аспекти теплового сприйняття: втома, стрес, настрій та навіть колір інтер'єру можуть змінювати температуру, яку людина вважає «комфортною».

Розрахунок теплового комфорту за ASHRAE 55, ISO 7730 та EN 16798-1 [10] можна виконувати за допомогою:

- CBE Thermal Comfort Tool (web),
- Python-бібліотеки `pythermalcomfort`,
- R-паketу `comf`.

Основні показники:

1. PMV (Predicted Mean Vote) – середня суб'єктивна оцінка теплових умов;
2. PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) – прогнозований відсоток незадоволених.

Окрім цього, в даних пакетах після останнього оновлення враховано

адаптивний підхід до оцінки теплового комфорту. Даний підхід ґрунтується на здатності людини пристосовуватись до змін у довкіллі, з урахуванням зовнішньої температури, звичок мешканців і можливості самостійного регулювання мікроклімату. На відміну від традиційного методу PMV/PPD, що базується на фіксованих фізіологічних параметрах, адаптивна модель визначає комфортний температурний діапазон динамічно – залежно від середньої температури зовнішнього повітря за останні дні [11]. Цей підхід реалізований у розрахункових інструментах, зокрема у CBE Thermal Comfort Tool, бібліотеці Python pythermalcomfort і пакеті R comf, відповідно до стандартів ASHRAE 55 та EN 16798-1. Адаптивна модель вважається особливо ефективною для природно вентильованих приміщень, дозволяючи гнучкіше проектувати системи ОВК і підвищувати комфорт без зайвих витрат енергії.

**1.2. Світловий комфорт** – це не лише достатній рівень освітлення, але й якісне світлове середовище, що впливає на зір, біоритми та загальне самопочуття людини. Він охоплює як природне, так і штучне освітлення й визначає ступінь візуального задоволення користувача простором.

Комфортне освітлення повинно відповідати функціональному призначенню приміщення, не викликати зорової втоми, створювати сприятливу емоційну атмосферу. Недостатній або надмірний рівень яскравості, сліпучі відблиски, нерівномірність освітлення – все це чинники зниження світлового комфорту.

На сьогодні освітлення вважається критично важливим компонентом IEQ, а нові дослідження вказують і на його роль у регулюванні циркадних ритмів – природного добового циклу організму [12–14]. У зв'язку з цим міжнародні стандарти зосереджуються не тільки на освітленості, але й на спектральному складі світла.

Нормативні документи щодо світлового комфорту:

1. В Україні – ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [15];
2. На міжнародному рівні – EN 12464-1:2021 «Light and lighting – Lighting of workplaces – Part 1: Indoor work places» та рекомендації IESNA (Illuminating Engineering Society of North America).

*Ключові параметри світлового комфорту:*

1. Освітленість (люкс);
2. Рівномірність освітлення;
3. Температура кольору світла;
4. Індекс кольоропередачі (CRI);
5. Відсутність сліпіння;
6. Наявність контролю освітлення користувачем.

Згідно з сучасними підходами, система освітлення має бути адаптивною,

тобто враховувати:

1. Зміну часу доби;
2. Наявність природного світла;
3. Функціональну гнучкість простору.

Рекомендується також динамічне освітлення, що імітує природні зміни світла впродовж дня, сприяючи циркадному ритму.

Інструменти оцінювання:

1. Фотометричні вимірювання (освітленість, яскравість),
2. Суб'єктивні опитування користувачів,
3. Комп'ютерне моделювання світлового середовища (Dialux, Relux, Velux Daylight Visualizer).

**Акустичний комфорт** означає здатність приміщення забезпечувати захист від надмірного шуму та створювати звукове середовище, яке відповідає функціональному призначенню простору [14]. Для користувача це означає можливість працювати, відпочивати чи навчатися без відчуття звукового перенавантаження.

В Україні вимоги до акустичного середовища регламентуються кількома нормативними документами. Основним з них є ДСТУ Б EN 12354-1:2014 [16], який тотожний європейському стандарту EN 12354-1:2000 і описує методи розрахунку повітряного шумозахисту між приміщеннями. Також чинними є Державні санітарні норми допустимих рівнів шуму для житлових і громадських будівель та ДБН В.2.6-XX «Будівельна акустика», що встановлюють допустимі рівні шуму, індекси звукоізоляції конструкцій, час реверберації та інші акустичні параметри.

Оцінювання акустичного комфорту здійснюється шляхом вимірювання таких показників, як рівень звукового тиску, індекс звукоізоляції, тривалість реверберації, акустичний фон, а також оцінка акустичної приватності. Вимірювання проводяться за допомогою акустичних аналізаторів і шумомірів згідно з ISO 3382 та іншими міжнародними протоколами.

У новітніх дослідженнях особливу увагу приділяють персоналізованому акустичному комфорту, що враховує тип діяльності в просторі (концентрація, спілкування, відпочинок), зонуванню акустичних сценаріїв та психоакустичним аспектам. В архітектурному дизайні це виражається в активному використанні звукопоглинальних матеріалів, створенні буферних зон, акустичному зонуванні планувальних рішень.

Зазначені аспекти дозволяють не лише зменшити небажаний шум, а й створити позитивне, психологічно комфортне звукове середовище, що відповідає потребам мешканців.

**Респіраторний комфорт** безпосередньо пов'язаний з IAQ, яка

визначається рівнем забруднень, ефективністю вентиляції та тривалістю дії шкідливих речовин у просторі [17]. Погана якість повітря викликає респіраторні симптоми, алергії, головний біль, знижує концентрацію уваги та впливає на загальне самопочуття й працездатність мешканців. До найпоширеніших забруднювачів належать: пасивний тютюновий дим, чадний газ, леткі органічні сполуки, озон, формальдегід, радон, пил, цвіль, легіонели та інші бактерії.

Основними заходами покращення IAQ є контроль джерел забруднення, фільтрування, налаштування вентиляції та використання очищувачів повітря – особливо в умовах зовнішнього забруднення [18]. Джерелами забруднення можуть бути: неякісні будівельні та оздоблювальні матеріали, меблі, килими, офісне обладнання, побутова активність (готування їжі, прибирання тощо), а також некоректно обслуговувані системи вентиляції [19].

Універсальний міжнародний стандарт IAQ не існує, але ВООЗ публікує рекомендації щодо гранично допустимих концентрацій окремих речовин. Крім того, існує відкрита база даних ISIAQ (STC34) з порівнянням стандартів і нормативів різних країн [20]. Американська організація ASHRAE створила добровільний стандарт «Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality» [7].

Найбільш поширеним індикатором IAQ є рівень CO<sub>2</sub>, який змінюється пропорційно до кількості людей у приміщенні. За стандартами ASHRAE вважається, що повітря стає несвіжим при концентрації вище 1500 ppm, оптимально – до 1000 ppm. Датчики CO<sub>2</sub> активно використовуються для управління вентиляцією в «розумних» будинках [21]. У деяких дослідженнях ці дані інтегруються до систем автоматичного регулювання опалення, вентиляції та кондиціонування повітря для адаптування вентиляції до кількості мешканців.

Сучасні системи комфорту передбачають розміщення давачів, які в реальному часі вимірюють IAQ, кількість людей, рівень CO<sub>2</sub>, вологість і температуру, передаючи ці дані системам ОВК для оптимального налаштування середовища проживання.

**Метеорологічні умови** – це сукупність елементів та явищ атмосфери, які формують погоду й клімат у певній місцевості. До ключових метеоелементів належать: температура, вологість, атмосферний тиск, напрям і швидкість вітру, хмарність, сонячна радіація, електричний стан атмосфери, видимість, опади, а також інтенсивність сонячної та геомагнітної активності.

З огляду на вплив на людину, метеорологічні фактори можуть зумовлювати геліометеотропні реакції – фізіологічні або психоемоційні зміни, спричинені погодними збуреннями. Типовими симптомами є погіршення сну, головний біль, нестабільний тиск, втома, зниження концентрації та підвищена дратівливість. Особливо чутливі до змін метеоумов діти, літні люди та особи з

хронічними захворюваннями [22].

Для оцінювання впливу метеоумов на самопочуття використовуються медичні класифікації погоди (зокрема класифікація В. Овчарової), які враховують динаміку атмосферної циркуляції, комплекс змін метеоелементів і погодні градієнти. Проте ці моделі зазвичай не враховують геомагнітні фактори, як-от магнітні бурі, які визначаються за Kp-індексом (0–9) та G-індексом NOAA (від G1 до G5).

Важливо враховувати також вплив сонячної активності (ультрафіолетове випромінювання, сонячні спалахи) та геофізичних чинників (геомагнітне поле, атмосферна електрика). Усі ці явища мають значення як для фізичного, так і для психоемоційного стану мешканців, особливо в умовах щільної міської забудови, де ефект міського мікроклімату може посилювати реакцію організму на зовнішні фактори.

Сучасна архітектура та інженерія враховують метеоумови при проектуванні будівель – шляхом оптимізування орієнтації споруд, використання вітрозахисних рішень, теплоізоляції, світлозахисту, сонцезахисного скління та регулювання мікроклімату за допомогою систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (табл. 1).

**Чинники техногенного походження.** У сучасних умовах урбанізованого середовища техногенні фактори відіграють дедалі помітнішу роль у формуванні фізичного (дис)комfortу людини. Зростає використання електроніки, мобільного зв'язку, бездротових технологій та іншої інфраструктури супроводжується підвищенням електромагнітного навантаження як у побуті, так і на виробництві. Особливе занепокоєння викликає вплив електромагнітних полів (ЕМП), які у надмірних концентраціях можуть мати біологічний ефект – впливати на функціонування нервової, серцево-судинної систем та спричинювати зміни на клітинному рівні [2, 23].

Не менш значущим є низькочастотний шум, який, хоч і часто не фіксується суб'єктивно, може викликати хронічне подразнення, порушення сну, зниження концентрації та загальне нервове напруження. Результати досліджень [2] демонструють негативний вплив такого типу шуму на психофізіологічний стан людини, зокрема на рівень тривожності та працездатності.

Ще одним важливим, хоча малопомітним для органів чуття, є аероіонний склад повітря. Доведено, що у приміщеннях із деіонізованим (електрично "мертвим") повітрям спостерігаються зниження тону, погіршення самопочуття, головний біль та зменшення продуктивності праці. Це особливо актуально в умовах надмірної фільтрації повітря або використання штучного кондиціонування без компенсації аероіонного складу [23].

Таблиця 1.

**Метеорологічні умови та комфорт у приміщенні**

Фактор	Критерії оцінювання	Вплив на людину	Можливі проектні рішення
Температура повітря	Середньодобова, мінімальна, максимальна, амплітуда	Гіпотермія або перегрів, підвищена втома	Ізоляція, системи ОВК, матеріали з високою теплоємністю
Вологість повітря	Середньорічна, мінімальна, максимальна, кількість вологих днів	Проблеми з диханням, подразнення слизових	Вентиляція, осушувачі/зволожувачі, обробка матеріалів
Атмосферний тиск	Середній, амплітуда змін, частота різких перепадів	Порушення кровообігу, головний біль, слабкість	Зонування, буферні приміщення, стабільне мікросередовище
Швидкість і напрям вітру	Роза вітрів, середньорічна і максимальна швидкість	Охолодження тіла, шум, вплив на вентиляцію	Аеродинамічне моделювання, вітрозахист, оптимальне орієнтування будівель
Сонячна радіація	Річна кількість сонячних днів, рівень освітлення та інсоляції	УФ-опіки, перегрів, депресія через нестачу світла	Світлозахист, планування отворів, сонцезахисні екрани
Хімічний склад атмосфери	Рівень CO <sub>2</sub> , пилу, алергенів, газів	Алергії, захворювання дихальних шляхів	Фільтрація, зелена інфраструктура, вибір оздоблювальних матеріалів
Геліофізичні та геомагнітні явища	K-індекс, G-індекс, кількість магнітних бур	Зміни тиску, серцево-судинні та психоемоційні реакції	Уникнення надмірної стимуляції, біоритмічне освітлення, контрольоване середовище

З метою попередження негативного впливу техногенних чинників у сучасному проектуванні передбачаються відповідні проєктні рішення (табл. 2), зокрема:

1. Екранування або розміщення джерел ЕМП на безпечній відстані;
2. Упровадження шумоізоляційних конструкцій та антивібраційних матеріалів;
3. Застосування іонізаторів повітря в приміщеннях із замкненим повітрообміном;
4. Моніторинг рівнів ЕМП і шуму за допомогою сертифікованих приладів;
5. Використання натуральних матеріалів, що не спричиняють надмірної деіонізації повітря.

У роботі [2] також представлений огляд чинної нормативно-правової бази України, яка регламентує допустимі рівні фізичних чинників у виробничому та громадському середовищі, а також підходи до їх контролю і нормалізації.

Таблиця 2

**Чинники техногенного походження та фізичний комфорт**

Чинник	Критерії оцінювання	Можливий вплив на людину	Можливі проєктні рішення
Електромагнітні поля (ЕМП)	Вимірювання рівня електромагнітного поля (за допомогою спеціалізованих приладів)	Порушення сну, головний біль, зниження концентрації, можливі зміни на клітинному рівні	Екранування джерел випромінювання, розміщення на безпечній відстані, контроль рівнів ЕМП
Низькочастотний шум	Оцінка частоти і амплітуди низькочастотного шуму, порівняння з нормативними межами	Психоемоційне напруження, підвищена тривожність, порушення сну, втома	Звукоізоляційні матеріали, конструктивне зонування, антивібраційні екрани
Деіонізація повітря	Вимірювання концентрації аероіонів у повітрі, порівняння з оптимальними значеннями	Зниження працездатності, головний біль, порушення самопочуття, зниження імунітету	Встановлення аероіонізаторів, контроль повітрообміну, використання натуральних матеріалів

Узагальнена таблиця (табл. 3) систематизує ключові елементи фізичного комфорту в приміщеннях, поділяючи їх на шість основних груп: теплові, світлові, акустичні чинники, якість повітря, метеорологічні умови та чинники техногенного походження.

Таблиця 3

**Чинники техногенного походження та фізичний комфорт**

Елементи фізичного комфорту	Складові елементи	Критерії оцінювання	Нормативні документи
Тепловий комфорт	Температура, вологість, швидкість повітря, кількість одягу, метаболічна активність	PMV/PPD (ISO 7730, ASHRAE 55), CBE Tool, pythermalcomfort	ISO 7730:2005, ASHRAE 55:2023, ДСТУ Б EN ISO 7730:2011
Світловий комфорт	Освітленість, відблиски, передача кольору, денне світло	Освітленість (EN 12665), денне світло (ДБН В.2.5-28:2006)	EN 12665:2011, ДСТУ EN 12665:2015, ДБН В.2.5-28:2006
Акустичний комфорт	Рівень шуму, реверберація, звукоізоляція	ДСТУ Б EN 12354-1:2014, ДБН В.2.6-XX:201X	EN 12354-1:2000, ДСТУ Б EN 12354-1:2014, ДБН В.2.6-XX:201X
Якість повітря (IAQ)	CO <sub>2</sub> , ЛОС, пил, мікробіологічні забруднювачі, вентиляція	Рівень CO <sub>2</sub> (ASHRAE ≤ 1000 ppm), концентрації забруднень (BOO3, ISIAQ)	ANSI/ASHRAE «Ventilation for Acceptable IAQ», ISIAQ, BOO3
Метеорологічні умови	Температура, тиск, вологість, напрямок вітру, геофізичні та геліофізичні характеристики	Медична класифікація погоди, індекси Кр, G, показники атмосфери	НАКАЗ №813 (2024), класифікація В. Овчарової
Чинники техногенного походження	Електромагнітні поля, інфразвук, аероіони	ДСН, європейські директиви (2013/35/EU, 2003/10/EC), SBM-2015	Directive 2013/35/EU, ДСН 3.3.6.037-99, SBM-2015, ДСНтаП

Для кожного з елементів подано складові параметри, які впливають на самопочуття людини, вказано наявні національні та міжнародні критерії оцінювання, що використовуються для контролю і нормування умов середовища [7, 24–27]. Такий структурований підхід дозволяє не лише комплексно аналізувати фізичний комфорт у будівлях, а й урахувати вплив кожного чинника під час проектування архітектурного середовища.

**Висновки.** Проведений аналіз дозволив подати фізичний комфорт як багаторівневу характеристику якості внутрішнього середовища, що формується під впливом комплексу взаємопов'язаних чинників. Показано, що фізичний комфорт не обмежується традиційними параметрами Indoor Environmental Quality (IEQ) – тепловими, світловими, акустичними та вентиляційними умовами, – а враховує також метеорологічні та техногенні фактори, які можуть діяти приховано, але суттєво впливати на фізіологічний і психоемоційний стан людини. Фізичний комфорт доцільно розглядати як систему, у якій окремі компоненти не діють ізольовано, а перебувають у взаємодії та формують інтегральний ефект середовища. Виявлено, що недооцінка мікрокліматичних коливань, електромагнітних навантажень, аероіонного складу повітря та інших техногенних чинників може призводити до накопичувального дискомфорту, зниження працездатності та погіршення здоров'я користувачів будівель навіть за формального дотримання нормативних показників. Узагальнення національних і міжнародних стандартів дозволило структурувати критерії оцінювання фізичного комфорту та визначити ключові параметри, що підлягають контролю на етапах проектування й експлуатації будівель. Запропонована класифікація складових фізичного комфорту створює методологічну основу для поєднання інженерних, архітектурно-планувальних і гігієнічних підходів у процесі формування комфортного середовища. Таким чином, фізичний комфорт доцільно розглядати як динамічну багатофакторну систему, що потребує комплексного аналізу, міждисциплінарної координації та впровадження адаптивних стратегій у проектуванні. Отримані результати можуть бути використані як теоретичне підґрунтя для подальшого кількісного моделювання параметрів середовища та розроблення критеріїв їхнього оптимізування в умовах сучасних вимог енергоефективності та сталого розвитку.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальші дослідження доцільно спрямувати на поглиблений кількісний аналіз кожного з компонентів фізичного комфорту з визначенням порогових, оптимальних та гранично допустимих значень показників для різних типів архітектурного середовища. Особливо актуальним є встановлення меж переходу між відчутним, латентним і кумулятивним впливом факторів середовища на організм людини.

Перспективним напрямом є розроблення інтегральної моделі оцінювання фізичного комфорту, що враховуватиме взаємозв'язки між тепловими, світловими, акустичними, метеорологічними та техногенними параметрами. Така модель може базуватися на принципах системного аналізу, багатокритеріальної оцінки та адаптивного підходу до проектування. Важливим є також дослідження нелінійного характеру впливу факторів та їх синергетичних ефектів у реальних умовах експлуатації будівель. Особливої уваги потребує інтеграція даних моніторингу в режимі реального часу з архітектурно-планувальними рішеннями. Це дозволить перейти від нормативно-статичного підходу до динамічного управління середовищем з урахуванням змін кліматичних умов, кількості користувачів і функціонального сценарію простору.

### References

1. Song, Ying, Fubing Mao, Qing Liu. “Human Comfort in Indoor Environment: A Review on Assessment Criteria, Data Collection and Data Analysis Methods.” *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 119774–86. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937320>
2. Burdeina, Nataliia. *Scientific principles of monitoring and normalization of levels of physical factors in institutions of higher education*. 2024, Kyiv National University of Construction and Architecture, Doctoral thesis. <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0524U000217/>
3. Frontczak, Monika, Pawel Wargocki. “Literature Survey on How Different Factors Influence Human Comfort in Indoor Environments.” *Building and Environment*, vol. 46, no. 4, Apr. 2011, pp. 922–37. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>
4. Steemers, Koen. “Daylighting Design: Enhancing Energy Efficiency and Visual Quality.” *Renewable Energy*, vol. 5, nos. 5–8, Aug. 1994, pp. 950–58. DOI.org (Crossref), [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90116-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90116-3)
5. Rocca, M. “Health and Well-Being in Indoor Work Environments: A Review of Literature.” *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)* [Milan], 2017, pp. 1–6. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2017.7977516>
6. Fisk, William J., Arthur H. Rosenfeld. “Estimates of Improved Productivity and Health from Better Indoor Environments.” *Indoor Air*, vol. 7, no. 3, Sept. 1997, pp. 158–72. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1997.t01-1-00002.x>
7. ASHRAE. *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. ANSI/ASHRAE 62.1-2013, ASHRAE, 2013.

8. SE NDIBK. *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 (EN ISO 7730:2005, IDT)*. DSTU B EN ISO 7730:2011, Kyiv.
9. “ANSI/ASHRAE Standard 55-2020. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.” ASHRAE, 2020.
10. “EN 16798-1:2019. Energy Performance of Buildings – Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance.” CEN, 2019.
11. de Dear, R., G. Brager. “Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference.” *ASHRAE Transactions* [Peachtree Corners, GA], vol. 104, no. 1, 1998, <https://web.archive.org/web/20230604013055/https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>, pp. 145–67, <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>
12. Zomorodian, Zahra S., Mohammad Tahsildoost. “Assessing the Effectiveness of Dynamic Metrics in Predicting Daylight Availability and Visual Comfort in Classrooms.” *Renewable Energy*, vol. 134, Apr. 2019, pp. 669–80. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.072>
13. Kar, Pushpendu, Arish Shareef, Arun Kumar, Koh Tsy Harn, Balaji Kalluri, Sanjib Kumar Panda. “ReViCEE: A Recommendation Based Approach for Personalized Control, Visual Comfort & Energy Efficiency in Buildings.” *Building and Environment*, vol. 152, Apr. 2019, pp. 135–44. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.035>
14. Day, Julia K., Benjamin Futrell, Robert Cox, Shelby N. Ruiz, Armin Amirazar, Amir Hosseinzadeh Zarrabi, Mona Azarbayjani. “Blinded by the Light: Occupant Perceptions and Visual Comfort Assessments of Three Dynamic Daylight Control Systems and Shading Strategies.” *Building and Environment*, vol. 154, May 2019, pp. 107–21. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.037>
15. *Natural and Artificial Lighting*. DBN V.2.5-28:2018, Kyiv, 1 Mar. 2019, [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3879665444646291006](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3879665444646291006)
16. *Building Acoustics - Estimation of Acoustic Performance of Buildings from the Performance of Elements - Part 1: Airborne Sound Insulation Between Rooms (EN 12354-1:2000, IDT)*. 23.12.2014, DSTU B EN 12354-1:2014, Kyiv.
17. Bentayeb, Malek, Dan Norback, Micha Bednarek, Alfred Bernard, Guihong Cai, Sonia Cerrai, Konstantinos Kostas Eleftheriou, Christina Gratziou, Gitte Juel Holst, François Lavaud, Jacek Nasilowski, Piersante Sestini, Giuseppe Sarno, Torben Sigsgaard, Gunilla Wieslander, Jan Zielinski, Giovanni Viegi, Isabella Annesi-Maesano. “Indoor Air Quality, Ventilation and Respiratory Health in Elderly Residents Living in Nursing Homes in Europe.” *European Respiratory*

- Journal*, vol. 45, no. 5, May 2015, pp. 1228–38. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1183/09031936.00082414>
18. Belias, Evangelos, Dusan Licina. “Outdoor PM<sub>2.5</sub> Air Filtration: Optimising Indoor Air Quality and Energy.” *Buildings and Cities*, vol. 3, no. 1, Apr. 2022, p. 186. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.5334/bc.153>
  19. Adamkiewicz, Gary, World Health Organization, editors. *WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants*. World Health Organization, Regional Office for Europe, 2010.
  20. “Air Quality: UK Guidelines for Volatile Organic Compounds in Indoor Spaces.” Guidelines. Public Health England, 13 Sept. 2019, <https://web.archive.org/web/20260216025409/https://www.gov.uk/government/publications/air-quality-uk-guidelines-for-volatile-organic-compounds-in-indoor-spaces>, <https://www.gov.uk/government/publications/air-quality-uk-guidelines-for-volatile-organic-compounds-in-indoor-spaces>
  21. “Achieving Healthy Indoor Air.” *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 156, no. 3, Sept. 1997, pp. S33–64. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1164/ajrccm.156.3.rccm1563.suppl>
  22. Bardov, V. *Hihiiena ta ekolohiia*. Nova Knyha, 2020, <https://web.archive.org/web/20250411060232/https://emed.library.gov.ua/wp-content/uploads/tainacan-items/18405/67853/Hihiiena-ta-ekolohiia-1.pdf>, <https://emed.library.gov.ua/wp-content/uploads/tainacan-items/18405/67853/Hihiiena-ta-ekolohiia-1.pdf>
  23. Marchenko, V. “Research of the Temperature and Humidity Processes in the Air Conditioning Apparatus Varying Air Ion Concentration.” *Problemele Energeticii Regionale*, vol. 3, no. 29, 2015, [https://web.archive.org/web/20240517183532/https://journal.ie.asm.md/assets/files/10\\_03\\_29\\_2015.pdf](https://web.archive.org/web/20240517183532/https://journal.ie.asm.md/assets/files/10_03_29_2015.pdf), pp. 86–91, [https://journal.ie.asm.md/assets/files/10\\_03\\_29\\_2015.pdf](https://journal.ie.asm.md/assets/files/10_03_29_2015.pdf)
  24. On the Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents (Electromagnetic Fields) (20th Individual Directive within the Meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and Repealing Directive 2004/40/EC. DIRECTIVE 2013/35/EU, 26 June 2013, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj/eng>
  25. On the Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents (Noise) (Seventeenth Individual Directive within the Meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). Directive 2003/10/EC, 6 Feb. 2003, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32003L0010>

26. *Sanitarni normy vyrobnychoho shumu, ultrazvuku ta infrazvuku*. DSN 3.3.6.037-99, The Ministry of Health of Ukraine, 1 Dec. 1999, <https://web.archive.org/web/20260523024356/https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text>, <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text>
27. Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN GmbH. *Standard of Building Biology Testing Methods*. SBM-2024, Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN GmbH, 2024, <https://buildingbiology.com/building-biology-standard/>

UDC 697.1:699.86

PhD, Assoc. Prof. **Natalia Bolharova**

[Bolgarova.nm@knuba.edu.ua](mailto:Bolgarova.nm@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0003-4274-7703,

*Kyiv National University of Construction and Architecture*

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.6-22>

## SYSTEMIC ANALYSIS OF PHYSICAL COMFORT FACTORS IN THE ARCHITECTURAL ENVIRONMENT

**Abstract.** *The article presents a systematic analysis of the concept of physical comfort in the context of the indoor environment. Based on global and Ukrainian standards, the work explores the main elements that determine the physical quality of the built environment, which in turn affects human well-being, productivity, and health. The research identifies six key components of physical comfort: thermal comfort, visual (lighting) comfort, acoustic comfort, indoor air quality, meteorological influences, and anthropogenic (technogenic) physical factors. Each of these elements is characterised by its own set of parameters, methods of measurement, and regulatory frameworks. The article provides a comparative overview of national and international standards, including ISO, ASHRAE, EN, and national sanitary norms. Special attention is given to adaptive approaches in assessing thermal comfort, as well as to the use of smart technologies for real-time monitoring of environmental conditions. Meteorological and geophysical parameters are considered not only as external influences but also as factors that significantly affect the psychophysiological state of individuals indoors. In addition, the article highlights the growing role of technogenic influences such as electromagnetic fields, low-frequency noise, and air ion composition, which are often overlooked in traditional models of comfort assessment. A comprehensive classification table summarises the components of physical comfort, their sub-elements, evaluation criteria, and the relevant standards. This systematisation aims to facilitate future interdisciplinary research and practical application in architectural design, construction, and urban planning. The article serves as a theoretical and*

*methodological basis for further research aimed at determining threshold values and formative factors of each component of comfort in accordance with both human needs and sustainable development goals.*

**Keywords:** *physical comfort, thermal comfort, lighting comfort, acoustic comfort, air quality, meteorological conditions, technogenic factors, Indoor Environmental Quality (IEQ), regulations for environmental assessment, architectural design.*

Received/Надійшла до редакції 24.07.2025

Accepted/Прийнято 21.01.2026

Issued/Опубліковано 29.05.2026

 Distributed under the license / Розповсюджується за ліцензією:

[Creative Commons Attribution 4.0 International License](#)