



ISSN 0453-8307 (Print)

ISSN 2409-6792 (Online)

ISO 26324:2012

Том 60 Випуск 1

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ТЕХНОЛОГІЯ

REFRIGERATION ENGINEERING & TECHNOLOGY



2024

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.5. 697.9(477)

Методи розрахунку теплових втрат і теплонадходжень в будівлях. Огляд, нормативні вимоги і практичні підходи в Україні та світі

*М.О. Кривошеєв^{1✉}, Р.В. Грищенко², Н.В. Іващенко³, С.М. Самійленко⁴*¹⁻⁴Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, 01601, Україна✉ e-mail: ¹mk@mkse.com.uaORCID: ¹<https://orcid.org/0009-0008-1021-1051>; ²<https://orcid.org/0000-0002-5150-0107>;³<https://orcid.org/0009-0006-9561-062X>; ⁴<https://orcid.org/0000-0002-2374-4294>

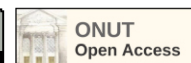
У роботі розглянуто методи розрахунків пікових та сезонних теплових навантажень і тепловтрат, які є критично важливими етапами при створенні нових будівель, реконструкції існуючих та розробці систем тепло-, і холодопостачання. Ці розрахунки дозволяють інженерам-проектувальникам, інвесторам, замовникам, постачальникам, монтажникам та іншим користувачам будівлі оптимізувати капітальні інвестиції, мінімізувати експлуатаційні витрати, зменшити CO² слід будівлі, а також, використовуються як інструмент пошуку оптимальних проєктно-конструктивних рішень. Автори аналізують існуючі методи визначення тепловтрат і теплонадходжень, їх витоки, поширеність та основні відмінності. Продемонстровано переваги, можливі недоліки та потенційні напрямки розвитку з урахуванням українських реалій. На основі стандартів ДСТУ EN ISO 52016-1:2022 та ДСТУ CEN ISO/TR 52016-2:2022, що набули чинності у 2024 році, проводиться порівняння з попередніми нормативними документами, такими як ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Основна увага приділяється розрахункам пікових теплових навантажень, які визначають потужність джерел теплоти та холоду для будівель. Продемонстровано, що традиційні спрощені підходи, які використовуються в Україні, часто не враховують динамічні процеси теплообміну і призводять до помилок у розрахунках. У статті проаналізовано ASHRAE Heat Balance Method, який є найбільш точним, але й найскладнішим методом розрахунку теплових навантажень, а також методи, що базуються на теплових балансах та аналогії з електричними мережами, такі як погодинний метод EN ISO 52016-1. Відзначено, що європейські методи поступово гармонізуються з північноамериканськими, що відкриває нові перспективи для розвитку енергомодельовання в Україні, оскільки для практичного застосування ASHRAE Heat Balance Method необхідне спеціалізоване програмне забезпечення. Стаття підкреслює важливість використання точних методів розрахунків для забезпечення енергоефективності будівель і мінімізації їхнього впливу на довкілля. Приділено увагу практичним аспектам впровадження цих методів в Україні, потенційні переваги для інженерів, інвесторів та інших стейкхолдерів.

Ключові слова: ASHRAE, CIBSE; Heat Balance Method; RTS Method; Теплове навантаження; Холодопостачання; Енергомодельовання; Енергоефективність будівель; Кондиціонування; Опалення

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i1.2897>

© The Author(s) 2024. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

За основу для аналізу і порівняння методик авторами вибрані методики визначення сезонного

споживання енергії на опалення, охолодження будівлі та класу енергоефективності будівлі, що викладені в [2]: ДСТУ EN ISO 52016-1:2022 Енергоефективність будівель. Енергопотреби для опа-

лення та охолодження, внутрішні температури і навантаження за явною та прихованою теплотою. Частина 1. Методи розрахунку (EN ISO 52016-1:2017, IDT; ISO 52016-1:2017, IDT).

ДСТУ CEN ISO/TR 52016-2:2022 Енергоефективність будівель. Енергопотреби для опалення та охолодження, внутрішні температури і навантаження за явною та прихованою теплотою. Частина 2. Пояснення та обґрунтування до стандартів ISO 52016-1 та ISO 52017-1 (CEN ISO/TR 52016-2:2017, IDT; ISO/TR 52016-2:2017, IDT).

До набрання ними чинності у 2024 році, основним нормативним документом виступали ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 Енергоефективність будинків. Розрахунок енергоспоживання на опалення та охолодження (EN ISO 13790:2008, IDT). Детальний огляд серії стандартів (EN) ISO 52000 та необхідності їх запровадження можна знайти в [14–15].

Необхідно зазначити, що окрім розрахунків, щодо сезонного споживання енергії на опалення та охолодження, інженерам-проектувальникам, інвесторам, замовникам, постачальникам, монтажникам та іншим користувачам будівлі також необхідне так зване розрахункове або ж пікове теплове навантаження. Оскільки саме воно визначає потужність джерел теплоти та холоду для будівлі; відповідні капітальні інвестиції, в тому числі: для підключення до електричних мереж, оскільки навантаження на кондиціонування, може складати до третини літнього піку електроспоживання; в певній мірі майбутні експлуатаційні витрати та CO₂ викиди будівлі. В англомовній професійній літературі, щодо таких типів розрахунків використовуються терміни «peak load calculation» та «sizing calculations» тобто розрахунки, що визначають пікове навантаження та потужність або ж «розмір» джерел теплоти та холоду.

Як правило, в розділах проєктної документації систем опалення, вентиляції та кондиціонування, (шифри «ОВ», «ОВiК» або «ХП» Холодопостачання) у розділі «Загальні дані», що виконані у відповідності до українських державних стандартів, зазначають за яких заданих умов обчислюється пікові (максимальні) або ж розрахункові теплові навантаження. Вони визначаються для певного значення температури зовнішнього повітря та його вологості, відповідних розрахункових температур внутрішніх приміщень, для теплого та холодного періодів року.

Сам розрахунок максимального (пікового) теплового навантаження проводять за умов стаціо-

нарного режиму теплообміну, який можна описати в загальному вигляді формулою:

$$Q_{total} = (T_i - T_e) \cdot \sum Fk + Q_v, \quad (1)$$

де Q_{total} – сумарна величина теплового навантаження, Вт, T_i – внутрішня температура термічної зони, К або °С, T_e – температура навколишнього середовища, К або °С, F – площа відповідної огорожуючої конструкції будівлі, м², k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К). Q_v – теплове навантаження на вентиляцію (інфільтрацію), Вт.

З літературних джерел відомо, що припущення щодо умов стаціолярного режиму теплообміну в будівлях були популярні і широко застосовувались інженерами-практиками різних країн, особливо для розрахунків теплового навантаження на системи HVAC&R до 90-х років 20-го сторіччя. Розрахунки, в цілому, відповідали потребам будівельної індустрії, особливо, якщо стіни, перекриття та інші конструкції були масивні, а площа вікон відносно площі інших зовнішніх конструкцій будівлі була невеликою [20]. Подібний підхід, хоча і з меншою релевантністю, також застосовувався для визначення теплового навантаження різноманітних систем кондиціонування та охолодження повітря.

Про тривалий та послідовний пошук інженерів і науковців прийнятного методу проведення розрахунків та визначення холодильних навантажень свідчать обширні літературні джерела. Для США найбільш повний огляд, щодо еволюції методів оцінки пікових та сезонних теплових навантажень із проаналізованих авторами джерел наведений в роботі [9].

Автори у [20] відмічають, що з початку 1930 років, Американське товариство інженерів з опалення та вентиляції (ASHVE) та Інститут інженерів з опалення та вентиляції (IHVE) (сьогодні відомі як ASHRAE (США) та CIBSE (Великобританія), відповідно) проводили та спонсорували дослідження, що описували різноманітні ефекти нестационарного теплообміну у будівлях, з наступною публікацією наукових робіт та рекомендацій. Так, у 1938 році в США були видані методичні рекомендації для інженерів-практиків, які враховували вплив сонячної радіації та нестационарні ефекти пов'язані з цим. Надалі дослідні роботи ASHRAE привели до створення різних методів, що були поширені в США після 1945 року та враховували ефекти нестационарної теплопровідності,

про які більш детально написано нижче.

Автори у [20] зазначають, що після Другої світової війни застосування систем кондиціонування в будівлях у Великобританії не було таким поширеним, як у США, головним чином через різні кліматичні умови та через різні підходи до проектування нових будівель, що склалися історично. Однак, зміни в архітектурі в 1950-х роках у Великобританії призвели до появи будівель зі збільшеним склінням, що, у свою чергу, стимулювало виникнення нового методу визначення теплонаходжень, так званого CIBSE Admittance Method, який був створений та впроваджений у використання на національному рівні за сприяння CIBSE та більш детально описаний далі. Авторів у [20] вказують на те, що термін «admittance» («допуск», «допущення» та «повна провідність») для назви методу був запозичений з теорії електротехнічних контурів. Назва CIBSE Admittance Method, на думку авторів, перекладається як «Метод теплового сприйняття CIBSE».

CIBSE Admittance Method спирається на окремо введenu характеристику будівельних матеріалів, що позначається, як «Y», та отримала назву Thermal Admittance (запропонований нами переклад для величини «Y» – теплове сприйняття), вимірюється в Вт/(м² К) і є мірою здатності матеріалу поглинати теплову енергію із оточуючого середовища та віддавати її протягом певного часу. Чим вище це значення для матеріалу, тим більше такий матеріал може накопичити і, відповідно, вивільнити теплової енергії. Або ж, що Thermal Admittance (теплове сприйняття), це параметр, який визначає ступінь та інтенсивність взаємодії будівельного компонента з оточуючим середовищем через теплообмін і в тому числі вказує, як швидко або ефективно тепло передається через елемент будівлі. Детально CIBSE Admittance Method, та інші застосовані британські методи розрахунків описані в (CIBSE 2006).

Автори у [20] описують методи ASHRAE, що вже були поширені в США після 1945 року та зазначають, що вони спрямовані на забезпечення постійної внутрішньої температури за допомогою роботи систем кондиціонування, і тому роль термічної маси, для підтримки комфортної температури в будівлях в американських методах була допоміжною. CIBSE Admittance Method з самого початку був спрямований на врахування ефектів, пов'язаних із внутрішньою термічною масою будівлі та її впливом на зміни температури всередині. Осно-

вною метою CIBSE Admittance Method було визначення максимальних температур у будівлях з природною чи механічною вентиляцією, але без наявної системи кондиціонування. Оскільки в таких системах було відсутнє джерело холодопостачання, яке могло компенсувати зміни внутрішньої температури, британські інженери намагалися досягти компенсації за рахунок теплової інерції будівлі, поки це було можливим.

Варто зазначити, що застосування припущення, щодо стаціонарності теплообміну та розрахунки по формулі (1) тривалий час були релевантними для інженерів-практиків, особливо в частині визначення тепловтрат та витрат енергії на опалення. Але наразі динамічні ефекти набувають все більшого значення.

У роботі [14] наводиться ілюстративний приклад щодо ролі внутрішніх теплонаходжень та теплонаходжень від сонячного випромінювання в будинках у минулому та в сучасних будинках. На рис. 1 продемонстровано, що в минулому у будинках різниця між тепловтратами та теплонаходженнями була більш значною, а вплив теплонаходжень був меншим. В сучасних будівлях ці величини відрізняються значно менше (синя та зелена криві на рис.1б), вплив теплонаходжень зростає. Відповідно процеси, пов'язані з нестационарним характером теплообміну та тепловою акумуляцією, наразі стали визначальними, що робить спрощені підходи майже незастосованими, а використання динамічних підходів – фактично безальтернативним для сучасних будівель та сучасних інженерних систем, що їх обслуговують.

В українських наукових джерелах цій проблематиці також приділяється значна увага, про що свідчать публікації [1, 4, 5, 13] та інші.

Так, наприклад, у [3] автори описали дві основні методики розрахунку енерго-споживання при опаленні та охолодженні згідно ДСТУ Б EN ISO 13790, а саме:

- квазістаціонарний метод, де ефекти нестационарного теплообміну та інші динамічні ефекти враховуються за допомогою емпірично визначених коефіцієнтів для тривалих проміжків часу (наприклад, відповідний сезон року);
- динамічний метод, за якими тепловий баланс розраховується погодинно і враховується ефект теплової інерції конструкцій будівлі.

Автори також надали рекомендації, щодо доцільності застосування в Україні квазі-стаціонарного спрощеного помісячного методу розрахунку.

В той самий час, наскільки можна визначити з проведеного аналізу вітчизняних літературних джерел, визначенню пікових або максимальних

розрахункових теплових навантажень для систем кондиціювання будівель приділено недостатньо уваги.

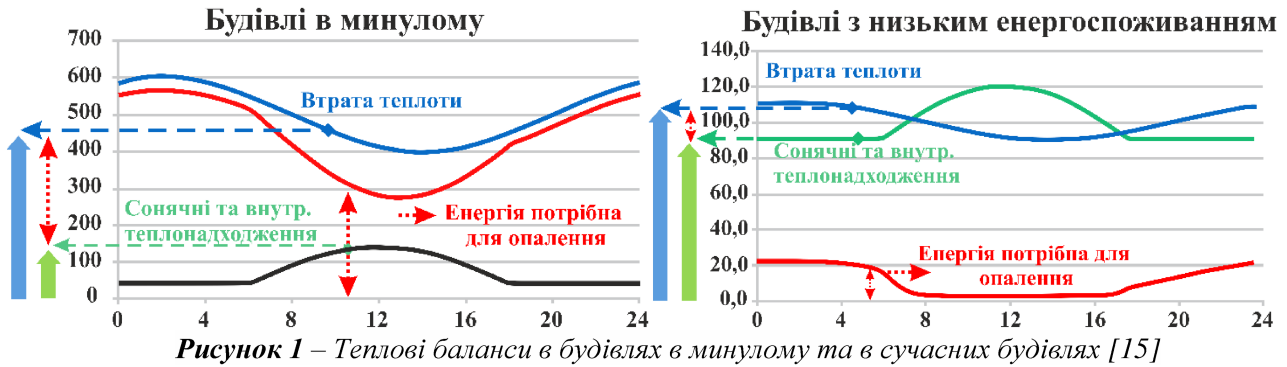


Рисунок 1 – Теплові баланси в будівлях в минулому та в сучасних будівлях [15]

2. Практика в Україні

В умовах сьогодення для визначення теплового навантаження на холодильні системи для літнього піку в офісних будівлях, торговельних центрах та інших типів нежитлових будівель вітчизняні проектувальники проводять розрахунок за цілим рядом припущень (спрощень) щодо реальних теплофізичних процесів, які відбуваються в будівлі і навколишньому середовищі, а саме:

- режим теплообміну між приміщеннями, будівлею в цілому та зовнішнім середовищем приймається як стаціонарний тепловий режим,
- приймається, що різноманітні теплонадходження в приміщеннях, в тому числі теплонадходження із сонячним випромінюванням, дорівнюють відповідному холодильному навантаженню,
- застосовуються різні емпіричні підходи (коефіцієнти), щодо того, як саме визначається сумарне теплове навантаження по всім приміщенням в будівлі (наприклад, такими, що розташовані на фасадах, що орієнтовані на різні сторони світу) та різних компонентів теплонадходження (від освітлення, електроприладів, людей та ін.),
- приймається, що не відбувається теплообмін між поверхами, та між приміщеннями,
- приймається, що якщо в приміщенні наявне природне освітлення, то штучне освітлення в цей час не задіяно і відповідна стаття теплонадходжень не враховується,
- для визначення піку холодильного навантаження використовуються емпіричні коефіцієнти з досвіду проектувальника для врахування ефектів теплової інерції і т.п. (залежить від досвіду і практичних навичок конкретного виконавця та компанії).

Такі припущення не в повній мірі відповідають реальним процесам. Треба зауважити, що для реальної будівлі, розрахункові параметри навколишнього повітря для режиму пікового, розрахункового (максимального) навантаження існують дуже невеликий проміжок часу, а із врахуванням впливу сонячного випромінювання, хмарності, вітру і т.п., можна стверджувати, що умови для стаціонарного теплообміну ніколи або майже ніколи не створюються і це не може не впливати на результати розрахунків.

В результаті застосування спрощених підходів до інженерних розрахунків, які на момент публікації статті, розповсюджені на ринку ОВіК України, та які базуються на вище описаних припущеннях отримується якесь одне, фіксоване чисельне значення пікового навантаження теплонадходжень. Отриманий результат фактично відповідає нетривалому часовому інтервалу розрахункового дня року або, іншими словами, відповідає «розрахунковим параметрам». Але виходячи з фізичної суті процесів нестационарного теплообміну, зрозуміло, що розрахункове пікове навантаження на систему холодопостачання для громадських будівель та, взагалі, для більшості типів будівель, неможливо отримати з достатнім ступенем точності без урахування процесів теплообміну в динаміці і ефектів теплової інерції.

Іншим аспектом застосування розрахунку пікових навантажень, заснованого на припущенні щодо стаціонарного режиму теплообміну в будівлі, стає те, що під час прийняття концептуальних проектних рішень в такому випадку не проводиться ітераційна оптимізація, наприклад, щодо пікової потужності джерела холоду, теплофізичних та оптичних характеристик фасадної системи, мож-

ливого застосування затінювачів, ступеню теплової інерції конструкцій будівлі і т.д.

Це пов'язано з тим, що переваги таких заходів (в т.ч. інвестиційні переваги) стають очевидними лише при застосуванні динамічних методів оцінки теплових навантажень. Беззаперечною перевагою, методів, що застосовують для розрахунку навантажень формулу (1) залишається простота та швидкість їх застосування, мінімальні вимоги до вихідних даних, та відповідно вартість проведення таких обрахунків.

3. Сучасні методи

Розглянемо приклад [21] визначення погодинних теплонадходжень через одну і ту саму стінку двома різними методами.

Перший метод – це квазі-стаціонарний метод, який ігнорує ефекти нестационарного теплообміну, не враховує теплову інерційність стінки та обчислюється за рівнянням (1). Назва методу «квазі-стаціонарний» означає припущення, що в кожний момент часу, для якого проводиться розрахунок, в конструкції миттєво встановлюється режим стаціонарного теплообміну. На рис.2 результат розрахунку квазі-стаціонарного режиму показано чорною суцільною кривою. Другий метод – нестационарний – враховує масу матеріалу стіни та її відповідну теплову інертність і на рис. 2 результат його розрахунку показано сірим кольором.

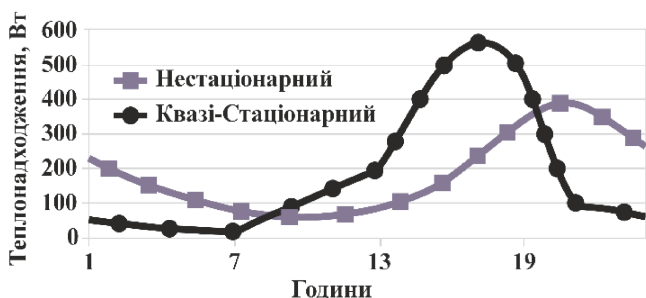


Рисунок 2 – Порівняння теплонадходжень через стіну при стаціонарному та нестационарному режимі теплообміну [21]

Авторами у [21] зазначено, що при порівнянні цих методів спостерігаються два ефекти:

- «ефект затримки в часі пікового навантаження теплонадходжень. Для квазі-стаціонарного методу пік навантажень припадає на 17:00 тоді, як при урахуванні явищ теплової інерції, пік теплонадходжень припадає на 21:00». Тобто, якщо припустити, що це офісна будівля, то в цей час робіт-

ників там не буде і відповідно не має необхідності у роботі системи кондиціонування;

- «ефект демпфірування холодильного навантаження. Пікове навантаження з урахування нестационарного теплообміну та теплової інерції на 30% нижче, ніж у розрахунок коли їх не враховували» (тобто величина холодильного навантаження за квазі-стаціонарним методом більша на 30%).

В літературі [6, 17, 21], зазначається, що окрім необхідності вирішення задачі нестационарної теплопередачі та врахування теплової інерції стін, окрему теплофізичну проблему являє собою сонячне випромінювання – способи яким його можна визначити та методи його розрахунку при обчисленні теплонадходжень і холодильного навантаження системи кондиціонування. Частина теплового потоку, що надходить за рахунок сонячного випромінювання (радіаційний теплообмін), не нагріває повітря безпосередньо, проте поглинається підлогою, стінами, перекриттям, меблями, іншими елементами будівлі та інтер'єру приміщень, що призводить до спонтанного ефекту теплової акумуляції, оскільки всі ці елементи під час процесів теплообміну працюють як тепловий акумулятор. Через певний проміжок часу закумуляована теплота повертається у повітряний простір приміщення за рахунок конвективного теплообміну.

Саме тому в сучасних методах розрахунків приймають, що величина теплонадходжень не дорівнює величині теплового навантаження і при визначенні величин теплонадходжень застосовують методи, що враховують ефекти нестационарного теплообміну, як проілюстровано на рис. 2,3,4.

Схожий ефект не співпадіння величини холодильного навантаження і теплонадходжень спостерігається, і при роботі освітлення. Хоча із все більшим розповсюдженням LED освітлення, ми маємо припущення, що даний ефект стає менш вираженим:

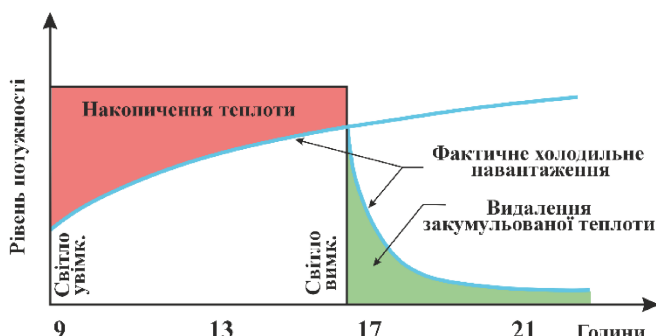


Рисунок 4 – Ефект теплової акумуляції в тепловому навантаженні від освітлення [6]



Рисунок 3 – Походження різниці між величиною миттєвого приросту теплоти та миттєвого охолоджувального навантаження [6]

Доктор Brent Стівенс, PhD з Built Environment Research Group, Відділу цивільного, архітектурного та екологічного інжинірингу Іллінойського технологічного інституту, Чикаго, Іллінойс, США у своїх лекціях, щодо методів розрахунків теплового навантаження на охолодження наводить наступний графік залежності точності розрахунків від складності методів, які рекомендовані ASHRAE:

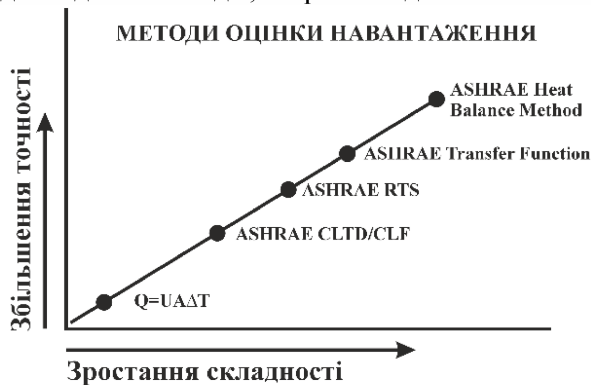


Рисунок 5 – Залежність точності розрахунків навантажень від складності

Як видно з рис. 5, більш точні методи визначення теплових навантажень вважаються одночасно більш складними. Відповідно можна зробити висновок, що із розглянутих методів найбільш достовірним є метод теплових балансів ASHRAE Heat Balance Method, який є одночасно найбільш складним. Вперше ASHRAE Heat Balance Method був представлений в роботі [17] та вже в 2001 році був включений в основні рекомендації ASHRAE та рекомендований до використання.

Зауважимо, що фактичне використання цього методу можливе лише за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, програм з енергомодельовання. Огляд про становлення енергомодельовання, застосування даного методу обчислень та одночасного розвитку комп'ютерних технологій і їх подальші перспективи наведений в [12].

Автори вважають, що назви цих методів можна перекласти так:

Оригінальна назва	Переклад, що пропонується
Instantaneous method $Q=UA\Delta T$	«Миттєвий» метод, що в має в своїй основі припущення, щодо стаціонарного режиму теплообміну. Той самий метод що і наведений формулою (1)
ASHRAE the cooling load temperature difference (CLTD) calculation method	Метод розрахунку потужності охолодження на основі температурних різниць
ASHRAE the cooling load factor (CLF) calculation method	Метод розрахунку потужності холодильного навантаження за допомогою коефіцієнтів
ASHRAE RTS	Метод радіаційних часових рядів (RTS, Radiant Time Series Method)
ASHRAE Transfer Functions	Метод функцій передачі (Transfer Function Method (TFM))
ASHRAE Heat Balance Method	Метод теплових балансів ASHRAE

Відповідно до рис. 5, найменш точним є Instantaneous method – наближений метод з використанням, в основі якого лежить рівняння і яке з урахуванням вентиляції або інфільтрації відповідає рівнянню (1) для визначення потужності об'єкта чи миттєвих теплонадходжень. Його основна перевага – легкість та швидкість використання.

Автори у [18] вказують, що в 1996 році ASHRAE виконали дослідницький проект під назвою «Передові методи розрахунків пікових навантажень для охолодження» та кодом 875-RP. Головною метою проекту була вказана заміна існуючих на той час методів розрахунку на принципово нові методи:

- метод радіаційних часових рядів (RTS, Radiant Time Series Method);

- метод теплових балансів ASHRAE (ASHRAE, Heat Balance Method).

В основних рекомендаціях ASHRAE [6] саме ці два методи вказані, як такі, що рекомендовані до використання при визначенні холодильний навантажень, пікових навантажень та проведення енергетичних розрахунків для нежитлових будівель. При цьому метод радіаційних часових рядів (RTS, Radiant Time Series Method) є спрощеною версією методу теплових балансів ASHRAE (ASHRAE Heat Balance Method).

Автори у [18] зазначають, що метод теплових балансів ASHRAE (ASHRAE Heat Balance Method) був першим методом, що повністю покладався на комп'ютерні обчислення, а основи його методик були використані програмами аналізу споживання енергії TARP та BLAST; метод радіаційних часових рядів (RTS, Radiant Time Series Method) замінив вище описані методи (CLF, CLTD), та може бути застосований для ручних обчислень. Крім того, автори зазначають, що метод теплових балансів ASHRAE (ASHRAE Heat Balance Method) має багато спільних рис з Transfer Function Method (TFM). Але останній ніколи не отримував широкого розповсюдження серед практиків через свою складність.

Метод теплових балансів ASHRAE розв'язує задачу обчислення холодильних навантажень виходячи з умов, максимально наближених до реальних фізичних процесів та максимально уникаючи різноманітних спрощень. Тому оцінка холодильного навантаження за ASHRAE (ASHRAE Heat Balance Method) вимагає визначення складових теплового балансу – теплопровідності, конвекції та випромінювання для кожної поверхні у терміч-

ній зоні і для всіх термічних зон, а також конвективного теплового балансу для повітряного простору в термічних зонах.

Тим не менш ASHRAE Heat Balance Method має основні фізичні припущення, на яких він базується. У [21] показано, основним припущенням даного методу є умова, що повітря в теплових зонах дуже добре перемішано і має одну і ту саму температуру у будь-якій точці. Наступне припущення полягає в тому, що всі поверхні в приміщенні (теплових зонах) можна розглядати як такі, що мають: 1. «Рівномірну температуру поверхні. 2. Рівномірне довгохвильове (ДХ) і короткохвильове (КХ) випромінювання. 3. Дифузний характер випромінювання для поверхонь. 4. Рівномірну теплопровідність поверхонь (тобто не враховується наявність теплових мостів)».

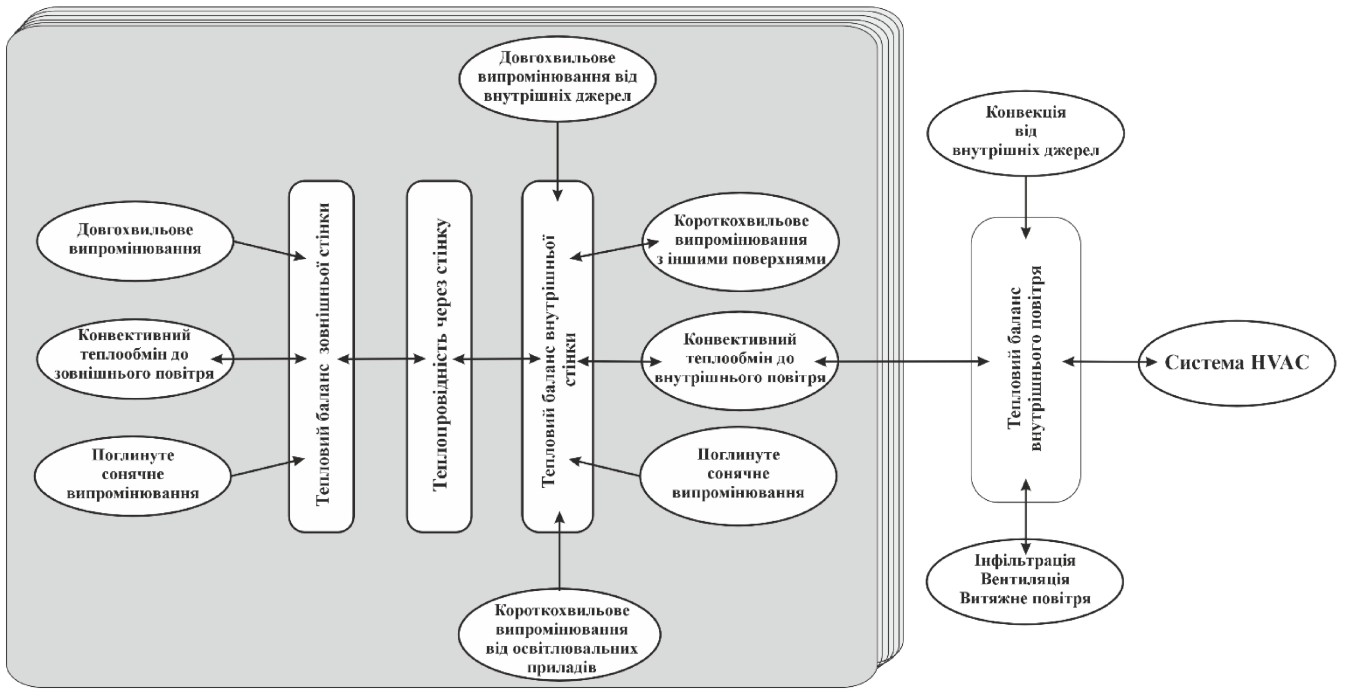
Отримане формулювання має назву Моделі теплового балансу (Heat Balance HB), яке детально описано в [6, 18, 19, 21].

На рис. 6 показано процеси, що складають Моделі теплового балансу, які можна розкласти на чотири компоненти-баланси, узгоджені між собою [6] та [21]: 1. Тепловий баланс для зовнішньої поверхні. 2. Теплопередача крізь багат шарову стінку. 3. Тепловий баланс для внутрішньої поверхні. 4. Тепловий баланс для повітря в приміщенні.

4. RC моделі

Для опису фізичних моделей та подальшого вирішення рівнянь, що стоять за методами розрахунків в тому числі тих, на які спираються ДСТУ Б EN ISO 13790:2011, EN ISO 52000-1, Energy performance of buildings – Overarching EPB assessment – Part 1: General framework and procedures, EN ISO 52016-1, Energy performance of buildings – Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads – Part 1: Calculation procedures, в літературі розповсюдженні використання RC-моделей. Також далі буде показано, що основні методи ASHRAE, та CIBSE можуть бути описані за їх допомогою.

Витоки методу із застосуванням RC-моделей базуються на електротепловій аналогії, що спирається на теорію подібності з її основними трьома теоремами. Відомо, що розповсюдження електричної енергії та теплової енергії описується аналогічними диференціальними рівняннями, оскільки рушійні сили цих фізичних процесів подібні.



*Дублюється для кожної поверхні

Рисунок 6 – Схема методу теплових балансів ASHRAE для термічної зони [6]

Як електричний струм протікає по провіднику, що може мати різний спротив під дією різниці потенціалів, так і тепловий потік виникає у разі наявності різниці температур, а його величина буде залежати від термічного опору матеріалу крізь який проходить цей тепловий потік. У минулому, за відсутності обчислювальних потужностей і від-

повідно через складність вирішення задач теплообміну методами обчислювальної теплофізики, для дослідження теплофізичних процесів створювались електротехнічні моделі. В таких електротехнічних моделях, «R» опір провідника – моделював термічний опір елемента (наприклад, стіни), а «C», електрична ємність контуру – теплову інерцію.

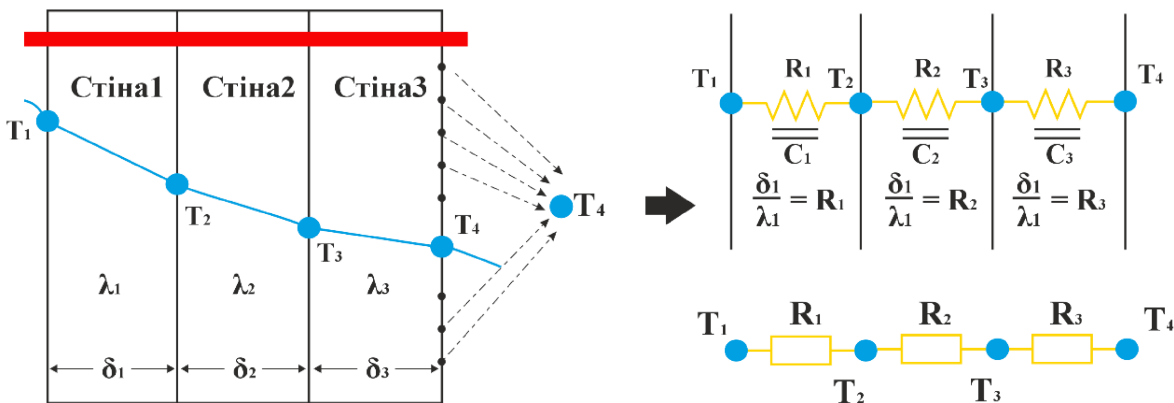


Рисунок 7 – Створення RC-моделі багат шарової стінки

Ілюстрація щодо RC-моделі багат шарової стінки наведена на рис. 7. В роботі [16] продемонстровано як саме конструкція багат шарової стінки може бути змодельована RC-мережою. Так, для вирішення задач теплопровідності за допомогою методів чисельного розв’язку багат шарова стіна поділяється на скінчено-елементні розміри, де для кожного елемента зводиться тепловий баланс за

умови, що вся теплова ємність елемента зосереджується в одній точці. Теплопередача між такими точками суміжних елементів лінійно залежить від температури. Таким чином, для багат шарової конструкції з однорідними шарами та одновимірним тепловим потоком мережа стає серією опорів і ємностей. Кожен шар поділяється на один або більше підшарів, які представлені еквівалентною

RC-мережею відповідно до рис. 7.

В [16] наведені формули, для визначення величин теплової ємності C та термічного опору R (обидві величини віднесені до площі 1 м^2):

$$C = \Delta x \rho c, \quad (2)$$

$$R = \Delta x / \lambda \quad (3)$$

де Δx – товщина будівельної конструкції, м, ρ – густина, кг/м^3 , c – теплоємність, $\text{Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$, λ – теплопровідність, $\text{Вт/м} \cdot \text{К}$.

Розглянемо RC-модель прозорої віконної/фасадної конструкції. На рис. 8 для ілюстрації даного підходу зазначені температура зовнішнього середовища T_{out} , та температура в середині приміщення T_{in} . Прозора віконна конструкція описується моделлю 1R0C – один термічний опір та нуль теплової ємності. В прикладі з прозорою конструкцією термічний опір має зовсім інше фізичне значення у порівнянні з багат шаровою стінкою, але тим не менш позначається однаково, як R . Таким чином, позначення R в RC-моделях використовується як термічний опір елементів для теплопередачі теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням.

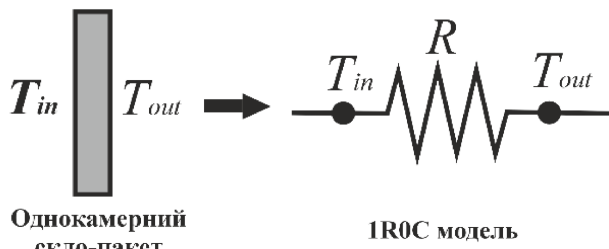


Рисунок 8 – RC-модель прозорої віконної/фасадної конструкції

Іншими важливими елементами на схемах RC-моделей є так зване чисте (ідеальне) джерело температури (pure temperature source) та чисте (ідеальне) джерело теплоти (pure heat source).



Рисунок 9 – Позначення джерел «чистої» температури та теплоти в RC-моделях

Під чистим або ж ідеальним джерелом температури (pure temperature source) мається на увазі таке джерело теплової енергії, досить потужне, для підтримки заданої температури на виході незалежно від споживаного системою теплового потоку. У наведеному вище прикладі з прозорою фасадною конструкцією/вікном (рис. 8) таким ідеальним джерелом теплової енергії з достатнім ступнем точності можна вважати теплову енергію, що надходить з навколишнього середовища і позначається значенням параметра температурного вузла T_{out} .

Подібно до визначення ідеального джерела температури під ідеальним джерелом теплоти (pure heat source) мається на увазі таке джерело теплової енергії, досить потужне, для підтримки заданого теплового потоку, що забезпечує задану кількість теплоти у вузлі, що розглядається.

Прикладами, таких ідеальних джерел можуть бути випромінювання від сонця, що поглинається поверхнею, теплонадходження від освітлення та інші джерела теплонадходжень (з різним поділом на конвективну та випромінювальну компоненту). Таке ідеальне джерело теплового потоку позначається або як (б) за допомогою кіл, що перетинаються або як (а) для спрощення сприйняття.

5. Сучасні методи у вигляді вузлових мереж RC-моделей

Вище розглянутий метод теплових балансів ASHRAE для розрахунку теплонадходжень представлений у [18] на прикладі вузлових схем (рис. 10 та 11).

На мережеві вузловій діаграмі представлено вузли, в яких мають бути розраховані значення температури та /або враховані додаткові теплонадходження і пов'язані з цими вузлами термічні опори. У своїй праці [18] автори додатково зазначають, що хоча такий спосіб представлення найпростіший, але він максимально сприйнятий для представлення методики у вигляді мережі пов'язаних компонентів та факторів. В той самий час існують певні схематичні обмеження: наприклад, поверхню теплообміну (стінку) було б більш точно представити як послідовність резистивних елементів з розподіленою ємністю (рис. 10 а), але фактично вона позначається на діаграмі модифікованим позначенням (рис. 10 б).

На рис. 11 наведено мережеву діаграму, яка одночасно є ілюстрацією ASHRAE, Heat Balance Method [6], що також описано авторами в роботі [18].

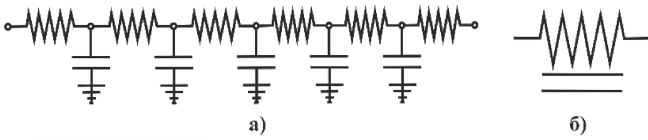


Рисунок 10 – Апроксимація стінки з тепловою масою як ряд зосереджених ємностей (ліворуч) та її представлення (праворуч) на діаграмах вузлової мережі для методів теплового балансу та RTS-методу [18]

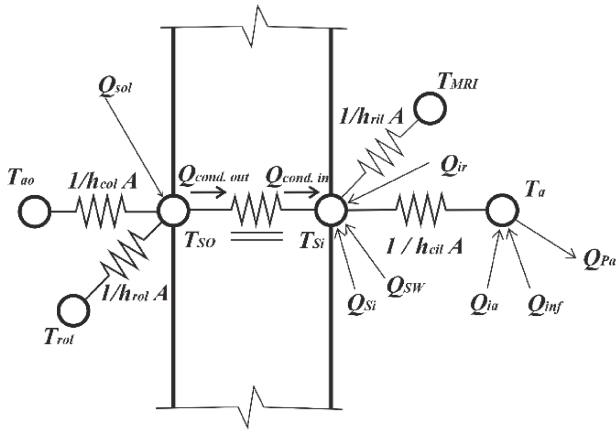


Рисунок 11 – ASHRAE, HBM для розрахунку навантаження на охолодження, представлений у вигляді вузлової мережі. Наведена одна стіна із зовнішньою поверхнею ліворуч [18]

Метод ASHRAE Heat Balance заснований на рівняннях теплового балансу для термічної зони та кожної її внутрішньої і зовнішньої поверхонь. У своїй роботі автори дають пояснення, що у вузлах (nodes), зображених на діаграмі, розраховуються теплові баланси для відповідних температурних вузлів і які позначаються T_{si} , T_{so} на внутрішніх і зовнішніх поверхнях відповідно, а тепловий баланс для внутрішнього повітря зводиться у вузлі T_a . При цьому на окреме обчислення зовнішнього і внутрішнього випромінювання та конвекції вказують наявність двох термічних опорів, з'єднаних із вузлами T_{si} та T_{so} . Також висновку дійшли автори у своїй роботі [18].

Підхід методу ASHRAE Heat Balance можна виразити у вигляді рівнянь теплового балансу. Так, для кожної зовнішньої поверхні:

$$Q_{SOL} + Q_{OLW} + Q_{co} - Q_{cond.out} = 0, \quad (4)$$

де Q_{co} – конвективний тепловий потік, Q_{OLW} – тепловий потік випромінюванням, Q_{SOL} – поглинута сонячна енергія, $Q_{cond.out}$ – тепловий потік теплопровідністю.

Аналогічно для внутрішньої поверхні стіни:

$$Q_{Si} + Q_{ir} + Q_{SW} + Q_{iLW} - Q_{ci} + Q_{cond.in} = 0, \quad (5)$$

де Q_{ci} – конвективна тепловіддача до внутрішнього повітря в приміщенні, Q_{iLW} – теплообмін випромінюванням стіни з іншими поверхнями, Q_{ir} – променеві теплові потоки від внутрішніх джерел, Q_{SW} – теплонадходження від освітлення, Q_{Si} – розподілені теплові потоки, які надійшли через скління, світлові ліхтарі та інші прозорі огорожувальні конструкції за рахунок багаторазового відбивання від внутрішніх поверхонь.

Променевий теплообмін стін з іншими поверхнями в термічній зоні розраховується за алгоритмом, де в обчисленні використані середні значення температури поверхонь. У відповідності до цього алгоритму кожна поверхня пов'язана з вузлом середнім значенням температури на поверхні. Це пояснює єдине підключення до вузла, позначеного TMR1 на діаграмі (рис.11).

Температури T_{si} і T_{so} , що розраховуються на відповідних поверхнях, також можуть бути використані для розрахунку змінних, що залежать від температури, наприклад таких як коефіцієнт конвекції. Внутрішні перегородки вирішуються шляхом з'єднання внутрішньої і зовнішньої поверхонь таким чином, щоб вони мали однакові граничні умови і, отже, температуру [18].

Автори у [18] особливу увагу звертають на припущенні методу ASHRAE Heat Balance, що повітря в термічній зоні добре переміщується та має незначну теплову ємність, якою можна знехтувати.

Тепловий баланс для повітря термічної зони може бути виражений наступним рівнянням:

$$\sum_{i=1}^n Q_{ci} + Q_{ia} + Q_{inf} + Q_{Pa} = 0, \quad (6)$$

де $\sum Q_{ci}$ – конвективний тепловий потік з поверхонь (кі-сть яких визначається показником n) термічної зони, внутрішні конвективні теплові потоки, Q_{ia} – внутрішні конвективні теплові потоки, Q_{inf} – теплонадходження від інфільтрації (вважаємо, що вони дорівнюють теловому потоку на охолодження повітря), Q_{Pa} – навантаженням системи кондиціонування.

Рівняння теплового балансу для зовнішньої поверхні (4) пов'язано з рівняннями теплових балансів для внутрішньої поверхні (5) та процесами теплопередачі, а рівняння балансу теплових потоків для повітря (6) пов'язане з усіма рівняннями

внутрішнього теплового балансу через конвективний теплообмін на поверхнях. Тому для цього набору рівнянь є необхідним їх одночасний розв'язок для кожного розрахункового часового проміжку, що дорівнює одній годині, і таким чином розрахунки необхідні для кожної години дня.

Метод радіаційних часових рядів (RTS, Radiant Time Series Method), який буде більш детально розглянуто далі – у порівнянні з вище описаним методом ASHRAE Heat Balance, є спрощеним для виконання розрахунків холодильного навантаження, але отриманий на основі методу теплового балансу (HB, the heat balance method). ASHRAE рекомендує використовувати RTS метод замість інших спрощених методів, які були рекомендовані ASHRAE до 2021 року [6].

Автори у [18] наводять наступне вузлове представлення RTS методу.

Якщо порівняти вузлову мережу RTS методу з вузловою мережею ASHRAE Heat Balance, то можна звернути увагу на наступні спрощення:

- для опису внутрішньої та зовнішньої конвекції, а також радіаційного теплообміну використовується комбінований термічний опір;
- передача теплонадходжень через стіну будівлі розраховується за допомогою коефіцієнтів реакції (*response factor*), що залежать від різниці між сонячно-повітряної температури (*sol-air temperature TSA*) та температурою повітря в кімнаті (T_a), яка вважається постійною. Таким чином, немає необхідності в розрахунку та зведенні теплового балансу на поверхнях.

У своїй праці [22] автори дають визначення, що «сонячно-повітряна температура, є гіпотетичним параметром, який відображає зовнішнє багатифакторне та взаємозалежне теплове середовище за допомогою температури повітря, із врахуванням сонячного та довгохвильового випромінювання».

В RTS методі не розраховуються жодні теплові баланси, це можна побачити на рис. 12. На ньому видно, що у вузлі T_a теплонадходження сумуються для отримання кінцевого теплового навантаження. Такий підхід робить процес обчислень дуже простим, але в той же час вимагає спеціалізованого підходу до врахування теплонадходжень від променевого теплообміну. Враховуючи вище зазначене, RTS метод доцільно розглядати у два етапи. Перший етап базується на розрахунку всіх променистих та конвективних теплонадходжень до так званої термічної зони. Другий етап – це перет-

ворення променистих та конвективних складових у значення теплового потоку, що впливає на температуру повітря в термічній зоні. Відповідно, дані теплонадходження сумуються для отримання погодинного навантаження.

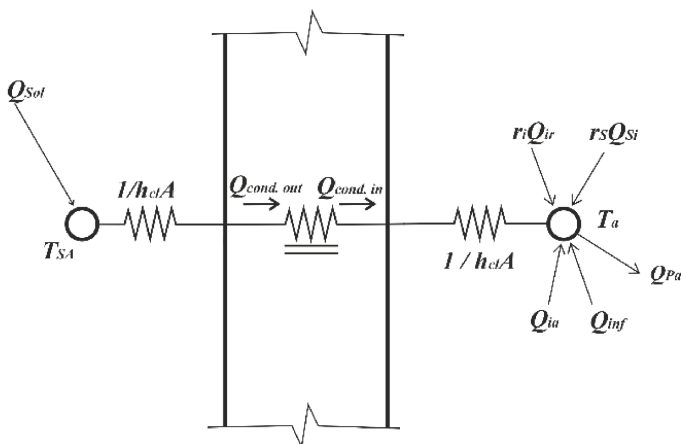


Рисунок 12 – Розрахунок холодильного навантаження за допомогою RTS методу, представленого у вигляді вузлової мережі. Показана одна стіна із зовнішньою поверхнею ліворуч [18]

Вузлове представлення CIBSE Admittance Method [10] показано на рис. 13. Розрахунок теплового навантаження для систем HVAC&R за допомогою цього методу є також двоетапним процесом. Стационарні (постійні) складові теплонадходжень та навантажень обчислюються окремо від коливальних (змінних) складових і, таким чином, необхідна побудова двох вузлових діаграм. Діаграми даного методу додатково відрізняються тим, що параметри теплопровідності включають властивості всієї зони, а не окремих поверхонь.

У CIBSE Admittance Method застосовано підхід, схожий до ASHRAE Heat Balance Method в тому, що теплове навантаження розраховують шляхом вирішення рівнянь теплового балансу. Однак моделі, що використовуються для представлення термічної зони, на основі яких формуються рівняння теплового балансу, а також розгляд процесів теплообміну, у CIBSE Admittance Method помітно спрощені. Варто зазначити, що особливість даного методу полягає у припущенні, що граничні умови (сонячна радіація, зміна температури повітря і т.д.) коливаються синусоїдально з періодом в 24 години.

Автори у [18] зазначають, що американські методи використовують температуру повітря термічної зони, як основу для визначення внутрішніх умов. В той час як британські методи для розраху-

нку комбінованого променевого та конвективного теплообміну з поверхнями в приміщенні обирають температуру середовища, що розраховується наступним чином:

$$T_e = 1/3 T_a + 2/3 T_m, \quad (7)$$

де T_m – середня температура поверхонь, T_a – температура повітря.

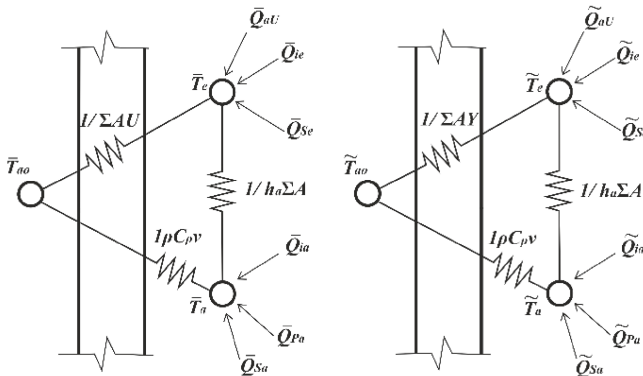


Рисунок 13 – Розрахунок холодильного навантаження за допомогою методу CIBSE, представлений у вигляді вузлової мережі. Для стаціонарних складових теплонадходжень і теплових навантажень (ліворуч), та коливальних (праворуч). Стіна із зовнішньою поверхнею ліворуч [18]

Детальна методика обчислення температури середовища наведена авторами [18] у Додатку А.

Також автори у [18] зазначають, що тепловий процес між вузлами T_e та T_a позначається як SA_{ha} , де SA – сума площ поверхонь термічної зони, а $h_a = 4,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ і враховує конвекційний та радіаційний теплообмін.

CIBSE рекомендує для обчислень використовувати значення T_c (comfort temperature) – внутрішньої розрахункової температури, що визначається:

$$T_c = 1/4 T_a + 3/4 T_e, \quad (8)$$

Ця особливість є важливою, коли приміщення обігрівается або охолоджується приладами з відносно великим променистим компонентом, але менш важливою, коли використовується система повітряного охолодження [18].

В роботі [7] наводиться опис RC-мережі, що використовується ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 Енергоефективність будинків. Розрахунок енергоспоживання на опалення та охолодження (EN ISO 13790:2008, IDT), який хоча і не діє більше на момент написання даної статті, але представляє інтерес для дослідження розвитку методів розрахунку навантажень для теплонадходжень та тепловтрат. Методика даного EN основана на термоелектричній аналогії між зоною будівлі, що розглядається та еквівалентною RC-мережею 5R1C (5 термічних спротивів та одна ємність).

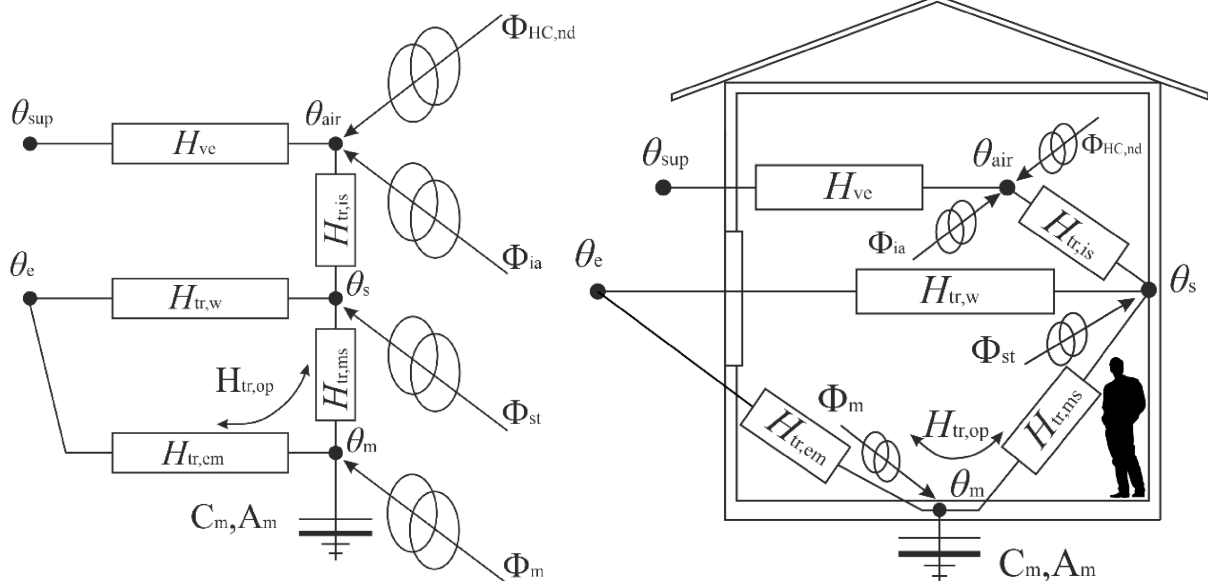


Рисунок 14 – Еквівалентна електрична мережа 5R1C спрощеного погодинного методу EN ISO 13790 та його візуальна репрезентація для однієї термічної зони будівлі [7]

Автори у [7] зазначають, що на рис. 14 «5 термічних опорів представлені відповідними коефі-

цієнтами теплопередачі, зокрема такими, що визначаються вентиляцією H_{ve} , теплопередачею $H_{tr, is}$,

передачею теплоту крізь вікна $H_{tr,w}$ і крізь непрозорі компоненти $H_{tr,op}$, які, в свою чергу, діляться на $H_{tr,em}$ та $H_{tr,ms}$. Ефективною теплоємністю оболонки будівлі приймається C_m , зосереджена в єдиній ємності еквівалентної термо-електричної мережі. Вузли мережі відображають температуру повітря в приміщенні θ_{air} , температуру припливного повітря θ_{sup} , температуру зовнішнього повітря θ_e , температуру поверхні θ_s і температура маси будівлі θ_m (температури всіх масивних конструкцій будівлі, таких як стіни, підлога, стеля та інші матеріали).

Теплове або холодинне навантаження $\Phi_{HC,nd}$ безпосередньо впливає (застосовується) на вузол (node) температури повітря, при цьому враховуються теплові надходження за рахунок сонячного випромінювання та внутрішніх джерел, що поділяються на частки Φ_{ia} , Φ_m та Φ_{st} , які враховуються в температурних вузлах θ_{air} , θ_s та θ_m відповідно».

Також автори у [7] зазначають, що дана RC-мережа може бути розв'язана застосовуючи схему кінцевих різниць Кранка-Нікельсона, що вперше описана в [11] та наводять наступне вирішення даної 5R1C мережі з дискретизацією у часі в одну годину:

«Для кожного часового кроку температура повітря θ_{air} визначається наступним чином:

$$\theta_{air} = \frac{H_{tr,is} \cdot \theta_s + H_{ve} \cdot \theta_{sup} + \Phi_{ia} + \Phi_{H/C,nd}}{H_{tr,is} + H_{ve}} [^{\circ}\text{C}] \quad (9)$$

Розрахунок температури повітря повторюєть-

ся двічі для кожного часового кроку, перша ітерація розраховується для вільних умов (тобто коли $\Phi_{HC,nd} = 0$) та таким чином обчислюється $\theta_{air,0}$, а друга ітерація – за умови навантаження на обігрів/охолодження, що дорівнює 10 Вт/м² ($\Phi_{HC,nd,10} = 10$) та отримання $\theta_{air,10}$. Фактичне значення $\Phi_{HC,nd}$, необхідне для досягнення заданої температури повітря ($\theta_{air,HC,nd}$), розраховується наступним чином:

$$\Phi_{H/C,nd} = \Phi_{10,nd,10} \frac{\theta_{air,H/C,nd} - \theta_{air,0}}{\theta_{air,10} - \theta_{air,0}} [W] \quad (10)$$

В оглядовій роботі [15] присвяченій вступу в силу в ЄС нової серії стандартів EN ISO 52000 автор вказує на недосконалість методики розрахунку EN ISO 13790, які з часом і призвели до його заміни, а саме виділяє 2 принципові особливості. По-перше, в методології EN ISO 13790 різні непрозорі елементи будівлі, такі як стіни, покрівля, підлога об'єднувалися через обчислення одного середнього коефіцієнту теплопередачі. Те саме стосувалося і прозорих конструкцій. Всі конструкції об'єднувалися, для них обчислювали середні значення коефіцієнтів теплопередачі, що не могло не знизити точність результатів обрахунків.

По-друге погодинний та помісячний обрахунки EN ISO 13790 потребували різних даних для використання погодинного та помісячного методів розрахунку, що обмежувало тих користувачів, які б могли б при інших умовах схилитися до використання більш точного погодинного методу. Це недолік був усунений в ISO 52016-1.

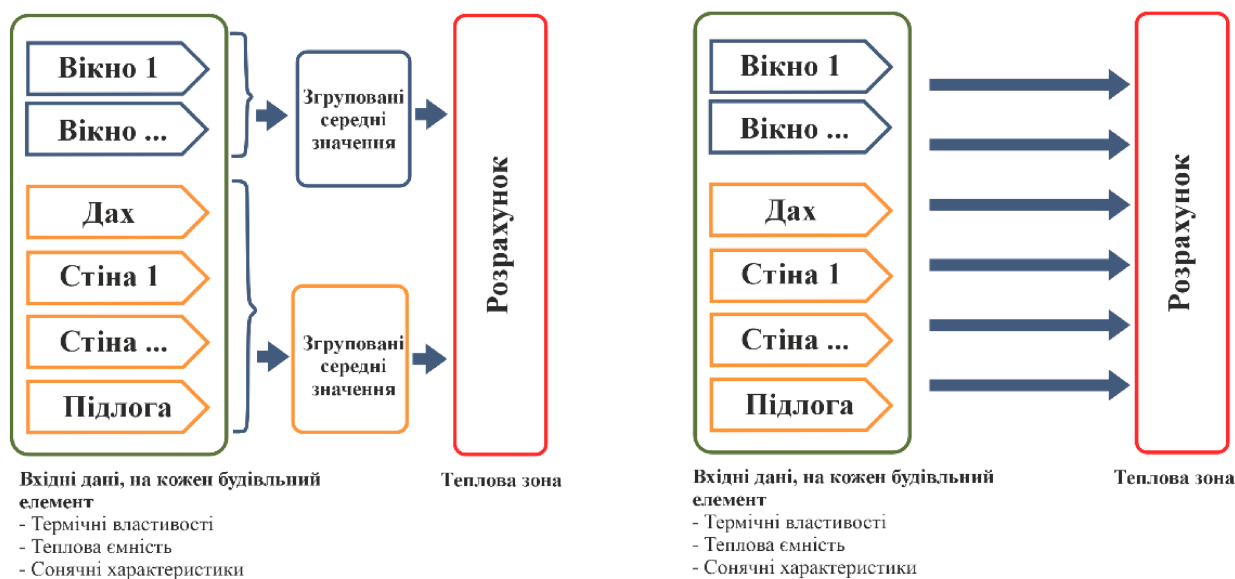


Рисунок 15 – Ілюстрація, щодо спрощеного погодинного методу в ISO 13790:2008 та вдосконаленого погодинно-го методу в ISO 52016-1:2017 [15]

Як вказує автор в [15], із введенням в дію нового стандарту, для використання більш точного погодинного методу не були потрібні додаткові дані у порівнянні з помісячним методом розрахунку.

Різниця між новим та старим методом у частині осереднення коефіцієнтів теплопередачі проілюстрована на рис. 15.

Автори у [7] наводять «RC»-модель для кожного непрозорого елемента будівлі, яка використовується в EN ISO 52016-1, що прийшов на заміну EN ISO 13790 в країнах ЄС, а також тепер і в Україні. (рис. 16).

Автори у [7] наводять «RC»-модель для кожного непрозорого елемента будівлі, яка використовується в EN ISO 52016-1, що прийшов на заміну EN ISO 13790 в країнах ЄС, а також тепер і в Україні. (рис. 16).

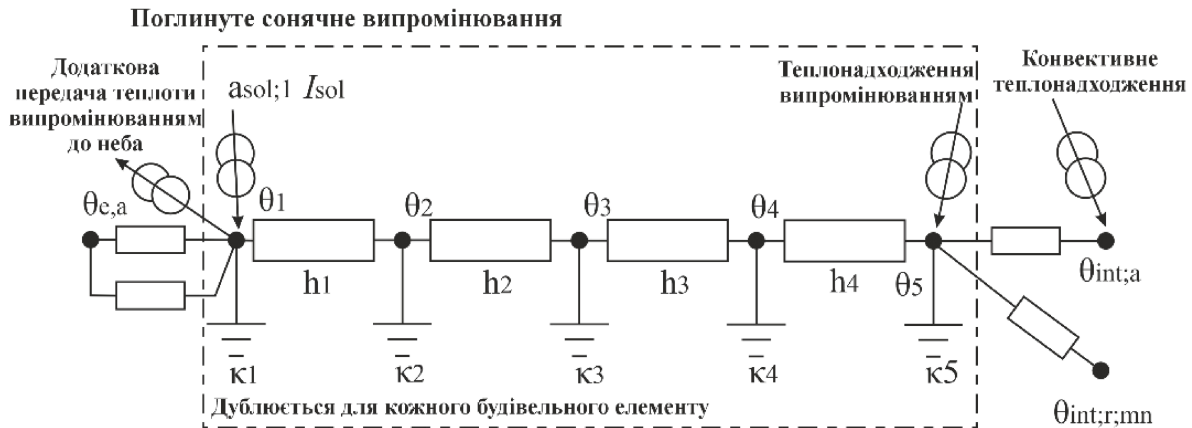


Рисунок 16 – RC-модель для кожного непрозорого елемента будівлі, викор. в EN ISO 52016-1

Погодинний метод EN ISO 52016-1 так само базується на термоелектричній аналогії між тепловою зоною і еквівалентною електричною мережею (RC-моделлю) і в цьому схожий на погодинний метод EN ISO 13790. На відміну від моделі EN ISO 13790, що враховує лише одну теплову ємність для всіх конструкцій і п'ять термічних опорів для теплопередачі у термічній зоні, метод EN ISO 52016-1 використовує кілька вузлів для кожного конструктивного елемента. Зокрема, для кожного непрозорого компонента передбачено до п'яти теплоємностей і чотири термічних опори, а для кожного вікна чи дверей – по два вузли.

Якщо порівняти дану модель з вище наведеною методологією ASHRAE, рис. 11, то можна помітити велику схожість та констатувати, що європейські методи наразі подібні до північно-американських методів ASHRAE, що були запроваджені значно раніше ніж відповідні європейські методики. Цікаво, що тенденція до гармонізації методів розрахунків була зазначена ще в 1998-2000 роках [18, 19].

Щодо точності та різниці між вище описаними методами, то в [8] зазначається, що погодинний метод EN ISO 52016-1 займає проміжне положення між детальною динамічною моделлю метода теплових балансів ASHRAE та спрощеним погодинним методом EN ISO 13790. Автори у [8] вказують, що хоча метод EN ISO 52016-1 використовує дуже схожий до АНВ ASHRAE підхід для розрахунку теплового навантаження, але методологія в EN ISO 52016-1 передбачає деякі спрощення фізичних процесів, а саме: «1. Спрощений розподіл маси в зовнішній огорожуючій конструкції, 2. Постійні коефіцієнти конвективного теплообміну, 3. Постійні коефіцієнти довгохвильової теплопередачі, 4. Прийнято, що теплонаходження від сонячного випромінювання передається за допомогою короткохвильового випромінювання».

В рамках даного оглядового дослідження здійснено комплексний аналіз методів розрахунків теплових втрат і теплонаходжень у будівлях. Проведено порівняння українських та міжнародних стандартів (ДСТУ, ISO, CEN, ASHRAE, CIBSE), що дає змогу зробити ключові висновки.

6. Висновки

Встановлено суттєві відмінності у підходах до визначення навантажень на системи тепло- та холодопостачання між українськими стандартами і практиками, і міжнародними аналогами (CEN, ASHRAE, CIBSE). Зазначено, що розповсюджені в Україні квазі-стаціонарні методи розрахунку пікових та сезонних навантажень на системи кондиціювання та тепlopостачання дають велику похибку для сучасних будівель. Це призводить до похибок в розрахунках та створює бар'єр для втілення більш економних та енергоефективних рішень, оскільки їх переваги стають очевидними при динамічних методах розрахунків.

Для підвищення енергоефективності будівель

Для підвищення енергоефективності будівель

в Україні, рекомендується використовувати сучасні динамічні методи – ASHRAE Heat Balance, ASHRAE RTS, CIBSE Admittance, методи серії стандартів EN ISO 52000, та забезпечувати гармонізацію українських стандартів з міжнародними, без запровадження національних спрощень. Це дозволить підвищити конкурентоспроможність вітчизняних спеціалістів та проєктів на світовому ринку.

Розвиток методів розрахунку теплових втрат і теплонадходжень у будівлях відбувається у напрямку підвищення точності та адаптивності моделей, а також їх гармонізації. Перехід від спрощених до більш детальних методів забезпечує кращу адаптацію до сучасних вимог енергоефективності. Це особливо важливо в умовах зростаючої уваги до сталого розвитку та оптимізації енергоспоживання в будівлях. Додатково очікується більш ефективне використання капітальних інвестицій.

Особистий внесок авторів CRediT

Кривошеєв М.О.: ресурси, програмне забезпечення, адміністрування. **Грищенко Р.В.:** концептуалізація, формальний аналіз, написання – оригінальний проєкт. **Іващенко Н.В.:** дослідження, методологія, курація даних, написання – перегляд і редагування. **Самійленко С.М.:** візуалізація, перевірка.

Література

1. Дешко В.І., Суходуб І.О., Сердечний П.Ю. Використання енергетичного моделювання будівель при розробці проєктів з підвищення енергоефективності // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. – 2019. – Т. 136. – № 4. – С. 86-96. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4.9>.
2. Національний орган стандартизації державне підприємство «Український Науково-Дослідний і Навчальний Центр проблем стандартизації, сертифікації та якості». НАКАЗ від 09 жовтня 2023 р.: Про прийняття національних стандартів та скасування національного стандарту. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», № 266, 2023. Режим доступу URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0266774-23#Text> (дата звернення 21.02.2024)
3. Колесник Є.С., Білоус О.М. Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні. – 2012. – Вип. 8.
4. Солод Л.В., Адегов О.В., Волошко В.М. Порівняльний аналіз українських та європейських правил розрахунків потужності систем теплопостачання // Енергорода. – 2015. – Вип. 09.
5. Суходуб І.О., Сердечний П.Ю. Аналіз сценаріїв підвищення рівня енергетичної ефективності громадських будівель з інтеграцією ВДЕ // Технології та інжиніринг. – 2024. – Вип. 2. – С. 44-56. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.5>.
6. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE handbook. Fundamentals. – 2021. – 986 p.
7. Ballarini I., Costantino A., Fabrizio E., Corrado V. The dynamic model of EN ISO 52016-1 for the energy assessment of buildings compared to simplified and detailed simulation methods // Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA. – 2019. – P. 3847-3854. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210431>.
8. Ballarini I., Costantino A., Fabrizio E., Corrado V. A methodology to investigate the deviations between simple and detailed dynamic methods for the building energy performance assessment // Energies. – 2020. – Vol. 13 (23). <https://doi.org/10.3390/en13236217>.
9. Mao C., Jeff S. Haberl, J.-C. Baltazar. Peak heating/cooling load design methods: How we got to where we are today in the U.S // Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28. – 2013. – P. 143-151.
10. CIBSE. Environmental design. – CIBSE Guide A, 2006. – 335 p.
11. Crank J., Nicolson P. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of heat conduction type // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. – 1947. – Vol. 43 (1947). – P. 50-67.
12. Crawley, Drury B. Musings on more than 40 years in building performance simulation // Building Services Engineering Research and Technology. – 2019. – Vol. 40, Issue 5. <https://doi.org/10.1177/0143624419859702>.
13. Deshko V.I., Bilous I.Yu. Mathematical Models for Determination of Specific Energy Need for Heating and Cooling of the Administrative Building // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7. – No. 4.3. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19826>
14. Dick van Dijk. EPB standards: Why choose hourly calculation procedures // REHVA Journal. – 2018. – Vol. 1. – P. 6-12.

15. **Dick van Dijk, Jaap Hogeling.** The new EN ISO 52000 family of standards to assess the energy performance of buildings put in practice // E3S Web Conf. CLIMA 2019 Congress. – 2019. – Vol. 111. – P. 04047. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911104047>
16. **Jóhannesson G.** Active heat capacity: models and parameters for the thermal performance of buildings // Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Physics. – Byggnadsfysik LTH, Lunds Tekniska Högskola, 1981. – 169 p.
17. **Pedersen C.O., Fisher D.E., Spitler J.D., Liesen R.J.** Cooling and Heating Load Calculation Principles. – Atlanta: ASHRAE, 1998.
18. **Rees, Simon J., Jeffrey D. Spitler, Morris G. Davies, Philip Haves.** Qualitative comparison of North American and U.K. Cooling load calculation methods // HVAC and R Research. – 2000. – Vol. 6 (1). – P. 75-99. <https://doi.org/10.1080/10789669.2000.10391251>.
19. **Rees, Simon J, Jeffrey D Spitler, Philip Haves.** Quantitative Comparison of North American and U.K. Cooling Load Calculation Procedures – Results // Conference Proceeding by ASHRAE. – 1998.
20. **Simmonds P.** Heat loss: A comparison of four European calculation methods // Building Services Engineering Research and Technology. – 1992. – Vol. 13(2). – P. 85-94.
21. **Splitter D. Jeffrey.** Load Calculation Application Manual, Second Edition. – ASHRAE, 2014.
22. **Xiao Guofeng, Naping He, Kaili Yin, Xiaojing Zhang, Jingchao Xie.** Comparative study of sol-air temperature models in the tropical island based on measured data // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 396. – P. 05009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339605009>.

Отримана в редакції 21.02.2024, прийнята до друку 28.03.2024

Methods of calculating heat losses and heat supply in buildings. Overview, regulatory requirements and practical approaches in Ukraine and the world

Maksym Kryvosheiev¹✉, Roman Gryshchenko², Nataliia Ivashchenko³, Sergii Samiilenko⁴

¹⁻⁴National University of Food Technologies, Volodymyrska str., 68, Kyiv, 01601, Ukraine

✉ e-mail: ¹mk@mkse.com.ua

ORCID: ¹<https://orcid.org/0009-0008-1021-1051>; ²<https://orcid.org/0000-0002-5150-0107>;

³<https://orcid.org/0009-0006-9561-062X>; ⁴<https://orcid.org/0000-0002-2374-4294>

The work considers methods of calculating peak and seasonal heat loads and heat losses, which are critically important stages in the creation of new buildings, reconstruction of existing ones, and development of heating and cooling supply systems. These calculations allow design engineers, investors, customers, suppliers, installers and other users of the building to optimize capital investments, minimize operating costs, reduce the CO₂ footprint of the building, and are also used as a tool for finding optimal design and construction solutions. The authors analyze the existing methods of determining heat losses and heat gains, their origins, prevalence and main differences. The advantages, possible disadvantages and potential directions of development, taking into account Ukrainian realities, are demonstrated. Based on the DSTU EN ISO 52016-1:2022 and DSTU CEN ISO/TR 52016-2:2022 standards, which entered into force in 2024, a comparison is made with previous normative documents, such as DSTU B EN ISO 13790:2011. The main attention is paid to the calculations of peak heat loads, which determine the capacity of heat and cold sources for buildings. It has been demonstrated that the traditional simplified approaches used in Ukraine often do not take into account the dynamic processes of heat exchange and lead to errors in calculations. The article analyzes the ASHRAE Heat Balance Method, which is the most accurate, but also the most complicated, method of calculating heat loads, as well as methods based on heat balances and analogies with electrical networks, such as the hourly method of EN ISO 52016-1. It is noted that the European methods are gradually being harmonized with the North American ones, which opens up new perspectives for the development of energy modeling in Ukraine, since the practical application of the ASHRAE Heat Balance Method requires specialized software. The article emphasizes the importance of using accurate calculation methods to ensure the energy efficiency of buildings and minimize their impact on the environment. Attention is paid to practical aspects of the implementation of these methods in Ukraine, potential advantages for engineers, investors and other stakeholders.

Keywords: ASHRAE; CIBSE; Heat Balance Method; RTS Method; Heat load; Cold supply; Energy modeling; Energy efficiency of buildings; Conditioning; Heating

References

1. **Deshko, V.I., Sukhodub, I.O., Serdechny, P.Yu.** (2019) The use of energy modeling of buildings in the development of energy efficiency improvement projects. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Technical sciences series*, 136, 4, 86-96.
2. (2023) National standardization body state enterprise "Ukrainian Scientific Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality Problems". ORDER dated October 9, 2023: On the adoption of national standards and cancellation of the national standard. Kyiv: SE "UkrNDNC", No. 266. Retrived February 21, 2024 from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0266774-23#Text>.
3. **Kolesnyk, E.S., Bilous, O.M.** (2012) Energy efficiency of buildings. Calculation of energy consumption during heating and cooling, 8.
4. **Solod, L.V., Adegov, O.V., Voloshko, V.M.** (2015) Comparative analysis of Ukrainian and European rules for calculating the power of heat supply systems. *Energorada*, 09.
5. **Sukhodub, I.O., Serdechny, P.Yu.** (2024) Analysis of scenarios for increasing the level of energy efficiency of public buildings with the integration of RES. *Technologies and Engineering*, 2, 44-56.
6. (2021) American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE handbook. *Fundamentals*, 986.
7. **Ballarini, I., Costantino, A., Fabrizio, E., Corrado, V.** (2019) The dynamic model of EN ISO 52016-1 for the energy assessment of buildings compared to simplified and detailed simulation methods. *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*, 3847-3854.
8. **Ballarini, I., Costantino, A., Fabrizio, E., Corrado, V.** (2020) A methodology to investigate the deviations between simple and detailed dynamic methods for the building energy performance assessment. *Energies*, 13 (23).
9. **Mao, C., Jeff S. Haberl, Baltazar, J.-C.** (2013) Peak heating/cooling load design methods: How we got to where we are today in the U.S. *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28*, 143-151.
10. (2006) CIBSE. Environmental design. *CIBSE Guide A*, 335.
11. **Crank, J., Nicolson, P.** (1947) A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of heat conduction type. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 43 (1947), 50-67.
12. **Crawley, Drury B.** (2019) Musings on more than 40 years in building performance simulation. *Building Services Engineering Research and Technology*, 40, 5.
13. **Deshko, V.I., Bilous, I.Yu.** (2018) Mathematical Models for Determination of Specific Energy Need for Heating and Cooling of the Administrative Building. *International Journal of Engineering & Technology*, 7, 4.3.
14. **Dick van Dijk** (2018) EPB standards: Why choose hourly calculation procedures. *REHVA Journal*, 1, 6-12.
15. **Dick van Dijk, Jaap Hogeling.** (2019) The new EN ISO 52000 family of standards to assess the energy performance of buildings put in practice. *E3S Web Conf. CLIMA 2019 Congress*, 111, 04047.
16. **Jóhannesson G.** (1981) Active heat capacity: models and parameters for the thermal performance of buildings. *Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Physics. Byggnadsfysik LTH, Lunds Tekniska Högskola*, 169.
17. **Pedersen, C.O., Fisher, D.E., Spitler, J.D., Liesen, R.J.** (1998) Cooling and Heating Load Calculation Principles. *Atlanta: ASHRAE*.
18. **Rees, Simon J., Jeffrey D. Spitler, Morris, G. Davies, Haves, P.** (2000) Qualitative comparison of North American and U.K. Cooling load calculation methods. *HVAC and R Research*, 6 (1), 75-99.
19. **Rees, Simon J, Jeffrey D Spitler, Haves, P.** (1998) Quantitative Comparison of North American and U.K. Cooling Load Calculation Procedures – Results. *Conference Proceeding by ASHRAE*.
20. **Simmondsn P.** (1992) Heat loss: A comparison of four European calculation methods. *Building Services Engineering Research and Technology*, 13(2), 85-94.
21. **Splitter D. Jeffrey** (2014) Load Calculation Application Manual, Second Edition. *ASHRAE*.
22. **Guofeng, X., He, N., Yin, K., Zhang, X., Xie, J.** (2023) Comparative study of sol-air temperature models in the tropical island based on measured data. *E3S Web of Conferences*, 396, 05009.