

РЕФЕРАТ
наукової роботи
«Науково-методологічні засади забезпечення енергоефективності будівель
шляхом впровадження ефективних систем тепlopостачання й
теплового захисту»

д.т.н. Чейлитка Андрія Олександрович, д.т.н. Кошлак Ганни Володимирівни,
д.т.н. Недбайла Олександра Миколайовича, к.т.н. Білоус Інни Юріївни, що висунута
Запорізьким національним університетом
для участі у конкурсі зі здобуття премії
Президента України для молодих вчених 2020 року

***ЧЕЙЛИТКО Андрій Олександрович** – д.т.н., доц., завідуючий кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Запорізького національного університету;*

***КОШЛАК Ганна Володимирівна** – д.т.н., доц., професор кафедри будівництва та енергоефективних споруд Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу;*

***НЕДБАЙЛО Олександр Миколайович** – д.т.н., с.н.с., старший науковий співробітник відділу теплофізичних основ енергозберігаючих технологій Інституту технічної теплофізики НАН України;*

***БІЛОУС Інна Юріївна** – к.т.н., старший викладач кафедри теплотехніки та енергозбереження Інституту енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського.*

Актуальність дослідження, представленого у науковій роботі: В Україні з червня 2017 року набув чинності Закон України "Про енергетичну ефективність будівель" № 2118-VIII. Підвищення рівня енергоефективності житлово-комунального комплексу включає розробку нормативної бази, організаційних, техніко-економічних, технологічних аспектів виробництва, розподілу, транспортування та споживання енергії. Споживання енергії є найбільш впливовим напрямком реалізації комплексу енергозберігаючих заходів. Тому актуальним є розвиток досліджень, які стосуються енергетичних систем комунальної енергетики, спрямований на кінцевого споживача.

Понад 40% світового енергоспоживання припадає на будівлі, зростають вимоги до ефективного використання енергії в них, перш за все на опалення та/або охолодження, одним з ключових показників якого є енергетична потреба. Сучасні тенденції, які знаходять відображення у зміні міжнародних норм і стандартів, розглядають будівлі як складні енергетичні системи в комплексі огорожувальних конструкцій та інженерних систем, з джерелами енергопостачання, внутрішнім та зовнішнім середовищем.

Адекватність оцінки рівня енергоефективності будівель, деталізація показників енергетичного стану у значній мірі залежать від використання математичних

моделей будівлі, складність яких визначається задачами, що вирішуються при проектуванні, модернізації, сертифікації та експлуатації будівель. Незважаючи на постійний розвиток математичних моделей енергетичного стану будівель, науковий досвід і досягнення в даному напрямку, постійної уваги потребують проблеми удосконалення та застосування сучасних методів енергетичного оцінювання будівель, враховуючи кліматичні умови, поточні завдання в сфері енергоефективності, експлуатаційний стан та технологічний рівень національного фонду будівель.

Вивчення питань, що пов'язані з організацією ефективного теплозабезпечення та теплового захисту приміщень на основі низькотемпературних систем опалення із залученням відновлювальних джерел енергії та сучасних теплоізоляційних матеріалів, відповідно, є важливим науковим завданням сьогодення, а поширена практична реалізація останнього може значно покращити стан житлово-комунального господарства країни, звільнивши його від необхідності монопольного використання первинних органічних енергоресурсів, а також поліпшити екологічні показники впливу на довкілля.

Ключова ідея дослідження представленої наукової роботи: створення науково-методичних засад забезпечення енергоефективності будівель шляхом впровадження ефективних систем теплопостачання та теплового захисту, включаючи поглиблення методів та засобів аналізу енергетичної ефективності будівель та їх інженерних систем. Особлива увага приділяється створенню науково-методологічних засад для створення високоякісних елементів теплового захисту будівель та екологічно безпечних теплоізоляційних структур різного призначення. Що у свою чергу забезпечить проектування та експлуатацію будівель нового покоління та є важливим кроком у напрямку переходу країни до енергоефективності та енергонезалежності.

Значимість одержаних результатів у порівнянні з кращими вітчизняними та світовими аналогами: Розгляд будівлі як енергетичної системи на основі міжнародних підходів передових країн та відсутність подібних аналогів в Україні в поєднанні з системним підходом до питань ефективного використання досягається шляхом розробки наукових основ синергетичного поєднання енергетичних, екологічних та економічних параметрів систем теплопостачання й теплового захисту будівель. Також отримані наукові результати забезпечують розвиток існуючого рівня наукових досліджень теплового стану будівель, що проведені з використанням новітніх наукових технологій у програмному середовищі EnergyPlus та авторських моделей.

Метою роботи є підвищення рівня ефективності енерговикористання будівель шляхом удосконалення існуючих і розробки нових наукових та управлінських методів оцінювання енергоефективності; урахування взаємозв'язку джерел енергії, теплового захисту та екологічних показників; розробки динамічних моделей теплового стану будівлі як енергетичної системи.

Об'єкт дослідження – процеси теплообміну в будівлях, енергоспоживання і енергозбереження та оцінювання ефективності енерговикористання об'єктами громадської сфери в умовах динамічної зміни характеристик середовища.

Предмет дослідження – методи і способи оцінювання показників енергоспоживання та енергетичної ефективності елементів та в цілому громадських будівель із використанням математичних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів роботи. У представленій роботі розвинені теоретичні та технологічні основи енергетичної та екологічної ефективності систем тепlopостачання, а також теплового захисту будівель на прикладі громадських об'єктів; запропоновано наукові принципи створення технологій виробництва будівельних та теплоізоляційних матеріалів з прогнозованими теплофізичними характеристиками; запропоновані методологічні основи та створені тривимірні нестационарні математичні моделі для визначення енергетичних характеристик будівель як енергетичних систем.

Найбільш вагомими результатами роботи, які відзначаються науковою новизною, є такі:

- вперше запропоновані методологічні основи та створені математичні моделі для визначення енергетичних характеристик будівель, які відрізняються поєднанням сучасних комп'ютерних методів енергетичного моделювання будівлі як складної системи, регресійного аналізу, історії зміни і групування сукупності внутрішніх та зовнішніх факторів впливу, що дозволяє прогнозувати та регулювати опалення з урахуванням інерційності будівель до зміни погодних умов та умов експлуатації;

- удосконалено нестационарну сіткову модель визначення теплового стану будівель за рахунок уточнення розділення теплоінерційних характеристик огорожень будівлі, що дозволяє зменшити розбіжність визначення енергопотреби будівлі у режимах опалення та/або охолодження в умовах країн з різкоконтинентальним кліматом;

- розвинено підхід до аналізу режимів переривчастого опалення шляхом визначення надбавки навантаження на опалення в робочі години для оптимальних глибин пониження температури в неробочі години, що дозволило забезпечити комфортний рівень температури в приміщенні в робочі години і визначити показники ефективності переривчастого опалення громадських будівель в нестационарних режимах;

- вперше були розраховані параметри процесів теплообміну та аеродинаміки повітря в типовому приміщенні з системою низькотемпературного водяного підлогового, також повітряного опалення в квазістационарному тепловому режимі на основі тривимірної математичної моделі в програмному пакеті Ansys 14.0;

- розвинуто теоретичні уявлення щодо впливу комплексних показників пористої структури на ефективний коефіцієнт теплопровідності матеріалу та отримано нове рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності пористого матеріалу, яке враховує градієнт температури вздовж пори, теплопровідність матеріалу без пір,

розмір пори вздовж теплового потоку, розмір пори перпендикулярний тепловому потоку та кількість пір на одиницю об'єму, що дозволило розробити метод прогнозування теплофізичних параметрів для закритої пористої структури;

- отримало подальший розвиток наукове обґрунтування процесів формування замкнутої сферичної пори під час термообробки сировинної суміші та визначено термодинамічні параметри газу у ній, що дало змогу побудувати модель, яка описує зміну пористості в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему;

- вперше визначена залежність ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих структур із відкритою пористістю від коефіцієнта теплової проникності та геометричних характеристик пористої структури.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в тому, що запропоновані підходи дозволяють підвищити енергоефективність управління енергоспоживанням у будівлях, підвищувати рівень енергетичної ефективності шляхом впровадження новітніх теплоізоляційних матеріалів та низькотемпературних джерел тепlopостачання будівель, зокрема:

- розроблені математичні моделі для аналізу енергетичного стану будівлі дозволяють прогнозувати температурний стан приміщень та/або рівень опалення в приміщеннях з врахуванням динамічних особливостей огорожень та часової зміни погодних та експлуатаційних особливостей. В цілому для громадського сектору будівель України застосування режимів переривчастого опалення протягом опалювального сезону з врахуванням динаміки зміни умов середовища дозволить досягти економії - до 3,6 млн. Гкал.

- розроблено метод формування оптимального коефіцієнта теплопровідності пористих матеріалів завдяки зміні пористої структури під час підведення теплової енергії до сировинної суміші.

- для особливих умов експлуатації споруд та енергетичного обладнання запропоновано спосіб створення елемента конструкції теплового захисту з перфорованих металевих листів з ефективним коефіцієнтом теплопровідності конструкції 20,77 Вт/(м·К) та границею міцності на стискання 100,235 МПа.

- запропоновано технологічні процеси для створення пустотної цегли та керамзиту: для цегли, виготовленої набором пластин з заданими структурними характеристиками (температура під час пресування 200 °С; час витримки 10 хв.; обпалювання за температури 1250 °С протягом 2 год.), коефіцієнт теплопровідності виробленої цегли із сіоліту з порами дорівнював 0,45 Вт/(м·К), питома теплоємність 0,93 кДж/(кг·К), міцність на стискання 7,1 МПа; для керамзиту з покращеними теплофізичними властивостями, який використовується як засипка (глиняна суміш підсушується до вологості 38 % та формуються гранули шляхом пресування сіткою з коміркою 6 × 20 мм; сушка та формування структури - 15 хв. за 270 °С; обпалювання за температури 1250 °С протягом 1,5 год.), коефіцієнт теплопровідності (0,038...0,045) Вт/(м·К), питома теплоємність 0,81 кДж/(кг·К), міцність на

стискання (10,6...14,1) МПа; для наповнювачу бетонів та вогнетривких бетонів на основі білої глини (температура термообробки 200 °С, час термообробки 15 хв., початкова вологість суміші 50 %), коефіцієнт теплопровідності 0,035 Вт/(м·К); для вогнетривів, створених шлікерним литтям з раціональною структурою (попередня термообробка у печі протягом 15 хв. за температури 272 °С; основна термообробка - протягом 1,5 год. за температури 1200 °С), коефіцієнт теплопровідності 0,44 Вт/(м·К).

- розроблено та запатентовано установку для вимірювання електронної складової ефективного коефіцієнта теплопровідності металевих та електропровідних пористих конструкцій.

- на основі проведених комплексних досліджень розроблена інженерна номограма методика визначення теплотехнічних параметрів водяної підлогової системи опалення, що здатна забезпечувати тепловий режим приміщення у відповідності до санітарно-гігієнічних вимог;

- обґрунтовані науково-технічні положення створення енергоефективної будівлі із використанням низки теплотехнічних рішень, серед яких є використання ґрунтових теплообмінників із повітряною тепловою завісою фасадів і даху будинку, а також комбінованої системи теплозабезпечення на основі залучення відновлювальних джерел енергії (теплоти ґрунту, інсоляції тощо);

- розраховані характерні експлуатаційні витрати типових будинків в залежності від джерела теплопостачання, теплотехнічних параметрів ОК та витрати первинної енергії.

Зміст роботи.

У роботі наведено науково-методологічні засади забезпечення енергоефективності будівель шляхом впровадження ефективних систем теплопостачання й теплового захисту. Розділі розглянуті сучасні тенденції використання математичного моделювання енергетичного стану та визначення енергоефективності будівель. В загальному енергобалансі країни основним споживачем первинних ресурсів є житлово-комунальний комплекс, а основна частина витрат припадає на споживання теплової енергії. Зниження витрати енергоносіїв на опалення будівель може досягатися шляхом використання сучасних теплоізоляційних матеріалів та технологій на стадіях як проектування так і експлуатації; відновлювальних та альтернативних джерел енергії в системах розосередженої генерації; автоматичного керування системами теплопостачання будівель (локальне керування теплоспоживанням); впливу на соціальний фактор, умови експлуатації, управління поведінкою користувачів.

В роботі будівлі розглядаються як складні теплоенергетичні системи, включають внутрішній мікроклімат, оболонку будівлі, інженерні мережі, зовнішній клімат. Даний підхід дозволяє проводити комплексний аналіз енергетичних характеристик будівель та впроваджувати обґрунтоване енергоефективне використання енергії. Для оцінювання енергоефективності можуть використовуватись математичні моделі на різних етапах життєвого циклу будівлі. В

країнах ЄС енергетичне моделювання будівель використовується як на стадіях проектування, так і експлуатації, для України актуальною є розробка моделей для вже існуючих будівель. Тривалий час енергетичні характеристики будівель визначалися для річних/сезонних інтервалів розрахунку (стаціонарний розрахунок). Сучасні тенденції розвитку математичних моделей для визначення енергетичного стану будівлі спрямовані на зменшення часових інтервалів та в напрямку визначення локалізації характеристик системи і впливу факторів.

Сучасні підходи енергетичного моделювання будівель (Building Energy Modeling - BEM) використовують комп'ютерні засоби (наприклад EnergyPlus, TRNSYS та інші), що дозволяють прогнозувати та деталізувати показники енергоефективності на основі погодинних даних типового метеорологічного року, а також графіків експлуатації будівель для аналізу проектів та різних енергозберігаючих заходів. BEM аналізує будівлю як енергетичну систему, що дозволяє комплексно оцінювати динамічні процеси в будівлі.

Для оцінки енергоефективності будівель використовують різні моделі в залежності від задач, що вирішуються. Для енергетичного аналізу в інвестиційних проектах - стаціонарні і квазістаціонарні моделі. В умовах керування та детального вивчення енергетичних характеристик об'єкту - динамічні моделі. Створено, досліджено та розвинено математичні моделі: за КТМ-204, міжгалузевими нормами, метод градусо-діб (ГД) за ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007, квазістаціонарний метод ДСТУ Б А.2.2-12:2015, динамічний метод EN 13790 (5R1C), авторські моделі: 1) модифікація динамічної сіткових моделей 5R1C до 8R2C; 2) на базі програмного продукту EnergyPlus; 3) багатофакторні регресійні моделі, які враховують вплив історії зміни вихідних параметрів.

В нормативних кліматологічних даних, що діють в Україні, наведені середньомісячні значення зовнішньої температури повітря та сонячних теплонадходжень на вертикальні та горизонтальну поверхні, що є достатнім при стаціонарному та квазістаціонарному методі розрахунку. При розрахунку енергетичної потреби будівель на опалення та/або охолодження динамічними методами потрібні погодинні кліматичні значення, які, наприклад, можна отримати з міжнародного кліматичного файлу погоди IWEC. Встановлено, що зовнішня температура повітря за двома кліматологічними базами майже не відрізняється. Відмінність сонячних теплонадходжень на вертикальні поверхні становить близько 40% в зимовий період та 30% в літній для Києва; для Одеси - до 50%. Сонячні теплонадходження на горизонтальну поверхню відрізняються на 5-10%. Зроблено висновок про необхідність уточнення та доповнення даних Будівельної кліматології України для динамічного погодинного розрахунку енергопотреб.

Проведено порівняння математичних моделей для визначення енергопотреб для двох міст: м. Київ - I температурна зона, м. Одеса - II температурна зона. В аналізі об'єктом дослідження обрано репрезентативні приміщення ВНЗ, в м. Києві - КПІ ім. Ігоря Сікорського, навчальний корпус № 22, в м. Одесі будівля з аналогічними експлуатаційними та теплофізичними характеристиками. Для м. Києва

енергопотреба будівлі розрахована лише на опалувальний період для м. Одеси передбачено період охолодження.

При порівнянні за еталонну обрано модель побудовану на базі E+. Динамічні моделі за E+ та 5R1C (погодинний розрахунок) дають майже однакове значення потреби для опалення, відмінність до 4-8%, в режимі охолодження – до 16-18% з даними кліматології IWEC. Це пояснюється тим, що модель 5R1C враховує масивність будівлі через один приведений вузол внутрішніх та зовнішніх огорожень на відміну від E+, де вузли огорожень розділені. Для періоду опалення за результатами стаціонарного, ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007, та квазістаціонарного, ДСТУ Б.А.2.2-12:2015, методів розрахунку, відповідно має місце відмінність до 15% та 15-25% (використані дані будівельної кліматології України); до 10% та 10-20% (дані IWEC), а для охолодження за квазістаціонарним методом – 20-30% (дані будівельної кліматології України) та до 10% (IWEC).

Для ефективного управління/регулювання системами теплопостачання енергопотреба повинна розраховуватись для малих інтервалів часу, тобто на базі динамічних моделей, які потребують великої кількості вихідних параметрів та складного підлаштування моделі до фактичних умов. Альтернативним варіантом є застосування регресійних моделей для короткострокових прогнозів поведінки будівлі як енергетичної системи. Аналіз показав, що використання для цього фактичних даних не дозволяє отримати достатньої точності, виділити вагомість впливових параметрів. Для побудови регресійної залежності, яка до того ж може враховувати історію зміни та інерцію впливу параметрів на енергетичний стан будівлі, в роботі використано імітаційне моделювання групи репрезентативних приміщень розташованих на різних поверхах будівлі Пн та Пд орієнтації, виділених на основі аналізу експериментальних досліджень.

Для узагальнення регресійної залежності в роботі сформовано чотири, представлені в безрозмірному вигляді, фактори. Для визначення впливовості факторів проводиться параметричний аналіз та встановлюється діапазон зміни кожного з них. Для трьох з них: температури зовнішнього повітря, рівня теплонадходжень від системи опалення та кратності повітрообміну обрано тип зміни на наступну добу, коли для подібного профіля погодинної зміни середнє за добу значення змінюється у межах заданого діапазону. Коефіцієнти в рівнянні регресії показують вагомість впливу факторів. В розглянутому діапазоні зміни параметрів їх вплив на температуру внутрішнього повітря зменшується в ряду: кратність повітрообміну, рівень опалення, зовнішня температура, сонячні теплонадходження.

При введенні пониження рівня опалення в неробочі години для огорожень характерних масовій забудові, стабілізація графіка зміни внутрішньої температури повітря досягається на 6-8 день, при цьому знижується внутрішня температура повітря на 1,5–2 °С. Для забезпечення комфортної температури в робочі години потрібно збільшувати рівень опалення від базового на величину, яка залежить від глибини провалу в неробочі години. При щоденному провалі температури повітря в приміщенні на 2, 3, 4°С заощаджується 2, 6, 8% тепла, відповідно. Для забезпечення

комфортного рівня температури на початок робочих годин (збільшення глибини провалу) вводили форсування системи опалення. При цьому досягається економія 5, 7, 9%, відповідно.

Розроблена експериментальна теплонасосна установка із використанням теплоти ґрунтового масиву дозволила провести низку комплексних експериментальних досліджень теплового режиму приміщень при їх опаленні низькотемпературними системами: водяним підлоговим та із використанням повітряних теплообмінників (фанкойлів).

Використання автоматизованого вимірювального комплексу із високоточними первинними та вторинними приладами призвела до мінімальної відносної похибки вимірювання величин, що не перевищує 3,9%. Отримані експериментальні дані, в подальшому, зіставлялись із результатами комп'ютерного моделювання.

Математична модель квазістаціонарного теплообміну в приміщенні при його опаленні фанкойлом дозволила визначити розподіл температури повітря, а також полів швидкості його руху.

Зіставлення розрахунків із використанням трьох моделей турбулентності та даних експерименту є задовільним та дозволяє стверджувати, що $k - \epsilon$ модель найбільш точно описує розподіл температури по висоті приміщення.

Для визначення параметрів теплового режиму типового приміщення при його підлоговому опаленні аналогічно проведене математичне моделювання в спеціалізованому програмному пакеті Ansys 14.0. В результаті розв'язання спряженої задачі складного теплообміну знайдений розподіл температури в шарах системи підлогового опалення та повітря приміщення. Верифікація моделі з експериментальними даними показала задовільне узгодження розрахункових значень полів швидкості руху повітря та його температури, а також теплових параметрів в шарах підлоги.

Дані тепловізійного обстеження поверхні підлоги якісно задовільно корелюють із результатами моделювання. Аналіз залежностей параметрів системи водяного підлогового опалення показує збільшення густини теплового потоку при збільшенні температури подачі теплоносія до контуру, збільшенні діаметра труби та зменшенні міжосьового кроку укладання труби контуру. На основі проведених комплексних досліджень розроблена інженерна номограма методика (базується на використанні рівняння Пекле), що дозволяє визначити теплотехнічні параметри для різного теплового навантаження системи.

При змінах температури теплоносія або його витрати, система підлогового опалення не може забезпечити тепловідведення до приміщення більше, ніж це дозволяє її конструктивні особливості. Кількісне регулювання теплового навантаження системи підлогового опалення є менш ефективним, ніж якісне.

Інноваційним технічним рішенням є система водяного підлогового опалення сухого монтажу, що має більшу теплову маневреність в порівнянні із заливною стяжкою, а також невисоку теплоакумуляційну здатність.

Науково-технічні результати та впровадження. Практичну цінність підтверджено відповідними актами впровадження, наданими Державним підприємством «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (м. Київ); Українським фондом соціальних інвестицій (м. Київ); Міністерством освіти та науки України (м. Київ), Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ), Сумським державним університетом (м. Суми), ТОВ Завод енергетичного обладнання «ДАН» (м. Київ), ТОВ «Центр водоочищення» (м. Київ), СВПП «Факел» (м. Сміла), ТОВ «Компанія ВДЕ» (м. Бровари), ТОВ «Досконалий будинок» (м. Чернігів), ВАТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), ТОВ «Екסקавація» (м. Запоріжжя), ТОВ «Тера-Гарант» (м. Запоріжжя), ЗМЗ ім. В.І.Омельченко АТ «МОТОР СІЧ» (м. Запоріжжя), ПАТ «МК Запоріжсталь» (м. Запоріжжя), Теоретичні та експериментальні результати роботи впроваджені також у навчальному процесі кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Практичне значення результатів роботи підтверджується 8 патентами України на корисну модель, 1 свідоцтвом авторського права.

Економічний та соціальний ефект, що мають та будуть мати результати роботи. Впровадження сучасних низько потенціальних комбінованих систем опалення будівель, застосування сучасних теплоізоляційних матеріалів та використання динамічних моделей будівель для ефективного управління енергоспоживання дозволяє підвищити рівень енергетичної ефективності будівель (забезпечити економію коштів при оплаті за спожиті енергоносії) та забезпечити належні умови мікроклімату в приміщеннях (забезпечити соціальний ефект). Оптимізація переривчастих режимів роботи систем опалення будівель, на основі динамічного імітаційного моделювання теплового стану будівель, дозволяє заощадити до 10% енергії на потреби опалення.

Виходячи з результатів порівняльного техніко-економічного аналізу, можна зробити висновок, що найбільш рентабельними проектами забезпечення комфортного теплового стану в приміщеннях у відношенні до теплонасосних установок з водяним підлоговим опаленням (дисконтований термін окупності складає приблизно 5,7 року) є системи тепlopостачання на основі електродкотлів з підлоговим опаленням.

Реалізація матеріалів роботи у промисловості дозволила отримати очікуваний сумарний економічний ефект в розмірі більше 12 млн. грн на рік.

Висновки. Авторами розвинуто науково-методологічні засади забезпечення енергоефективності будівель шляхом впровадження ефективних систем тепlopостачання та теплового захисту; створено динамічні моделі теплового стану будівлі; розроблено багатофакторні регресійні моделі для прогнозування теплового стану будівель; надано рекомендації щодо оптимальних глибин пониження температури повітря в приміщенні шляхом впровадження переривчастих режимів опалення будівель;

Проведені комплексні теоретичні та експериментальні дослідження щодо визначення параметрів нестационарного і квазістационарного теплових режимів типового приміщення, що створювались за допомогою систем водяного підлогового і повітряного опалення. Обчислення, що виконані за розробленими математичними моделями теплообміну у програмному пакеті Ansys 14.0 задовільно корелюють (максимальне відхилення до 8%) із даними власних експериментів. Такі моделі рекомендуються для розрахунку параметрів теплового режиму приміщень із невисоким ступенем турбулізації руху повітря (насамперед адміністративні і побутові приміщення тощо).

Дослідження процесів складного теплообміну у системі водяного підлогового опалення дозволили розробити номограмну інженерну методику розрахунку теплотехнічних параметрів такої системи для різних режимів її експлуатації. Дана методика може бути рекомендована для проектування систем водяного підлогового опалення в широкому діапазоні теплової потужності при значенні густини теплового потоку на поверхні від 20 до 120 Вт/м², при витраті теплоносія від 0,001 до 0,012 м³/с, монтажному кроці між осями труб від 125 до 200 мм і внутрішньому діаметрі труби контуру від 0,008 до 0,015 м.

Розроблено методологію формування теплофізичних властивостей елементів теплового захисту та теплоізоляційних матеріалів будівель, за рахунок зміни градієнту температури в пористих структурах. Запропоновано до виробництва, а також наведено практичні рекомендації для створення теплоізоляційних матеріалів.

За результатами досліджень захищено три докторські та одну кандидатську дисертації. Основні результати відображено у 186 наукових працях, з яких 17 – монографії, 107 – в періодичних спеціалізованих фахових виданнях (з них 29 – у виданнях, що включені до науково-метричної бази Scopus й 25 – у іноземних виданнях), отримано 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір та 8 патентів на корисну модель. Загальна кількість цитувань: 101 згідно баз даних Scopus та 341 згідно Google Scholar. h-індекс = 7 згідно Scopus та 7 згідно Google Scholar (за найвищими показниками одного автора).

_____	/ А.О. Чейлитко/
(підпис)	
_____	/ Г.В. Кошлак/
(підпис)	
_____	/О.М. Недбайло/
(підпис)	
_____	/І.Ю. Білоус/
(підпис)	