

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

НЕДБАЙЛО ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 536.24.02:628.89+628.87+697.1

**ТЕПЛОФІЗИЧНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ
ПРИ ВИКОРИСТАННІ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ СИСТЕМ ЇЇ
ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ
ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Басок Борис Іванович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
завідувач відділу теплофізичних основ
енергоощадних технологій

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Рєзцов Віктор Федорович,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
заступник директора з наукової роботи

доктор технічних наук, професор
Приймак Олександр Вікторович,
Київський національний університет будівництва і
архітектури МОН України,
декан факультету інженерних систем та екології

доктор фізико-математичних наук, професор
Гаврюшенко Дмитро Анатолійович,
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка МОН України,
професор кафедри молекулярної фізики

Захист відбудеться «10» жовтня 2018 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03164, м. Київ, вул. Булаховського, 2, корп. 2.

Автореферат розісланий «06» вересня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,
доктор технічних наук



Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Світові тенденції з підвищення ефективності будівель різного призначення, в основному, спрямовані на поліпшення теплозахисної здатності оболонки будинку та використання в інженерних системах життєзабезпечення природних відновлювальних джерел енергії, скидних вторинних енергоресурсів, децентралізацію постачання теплоти, а також впровадження низькотемпературних опалювальних систем. Окрім цього, можливою є оптимізація теплового ефекту інсоляції і впливу навколишнього середовища на будівлі шляхом поліпшення їх конструктивних і теплотехнічних показників.

Важливою причиною, наразі актуального тренду щодо підвищення теплоізоляційних можливостей зовнішніх огорожувальних конструкцій (ОК) та зменшення питомого енергоспоживання будівель, є дефіцит енергоносіїв. Розв'язання таких проблем має особливу важливість для України в зв'язку з тим, що в країні наявні обмежені запаси нафти і природного газу, різко скоротився видобуток вугілля, спостерігається значне підвищення вартості всіх видів енергоносіїв, а також недостатньо впроваджуються нові і прогресивні методи щодо теплового захисту будівель.

При застосуванні теплонасосних установок у складі систем теплозабезпечення перевага зазвичай надається низькотемпературним системам водяного підлогового опалення. Це пов'язано з тим, що при такому виді опалення площа теплообміну між теплоносієм та повітрям в приміщенні значно більша в порівнянні з іншими системами і, відповідно до цього, температурний потенціал теплоносія можна знижувати. Крім того, підлогове опалення забезпечує найбільш фізіологічно комфортні санітарно-гігієнічні умови для перебування людини в приміщенні.

Також слід відмітити незавершеність формування вітчизняної нормативно-регуляторної документальної бази щодо технічних регламентів з проектування, проведення проектно-монтажних і пуско-налагоджувальних робіт, технічного обслуговування і експлуатації низькотемпературних систем теплозабезпечення на основі водяного підлогового опалення. Гармонізація і уніфікація запропонованих методик розрахунку теплотехнічних параметрів таких об'єктів із методиками відомих на закордонному ринку фірм, що мають власні центри досліджень і розробки, є вкрай актуальними для їх подальшого широкого впровадження на вітчизняному просторі.

Вивчення питань, що пов'язані з організацією ефективного теплозабезпечення приміщень на основі низькотемпературних систем опалення із залученням відновлювальних джерел енергії 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Наукові дослідження дисертаційної роботи увійшли до складу науково-дослідних робіт, що виконувались у відділі теплофізичних основ енергоощадних

технологій Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України: бюджетної теми із шифром 6.08.1 «Створення експериментальної установки та теплонасосної технології теплопостачання промислових приміщень з використанням теплоти ґрунту» (2008 - 2009 рр., 0108U007829); інноваційного проекту «Комплексна модернізація типової системи теплопостачання будівлі на базі автономного використання теплового насосу типу "повітря-рідина" потужністю до 30 кВт» (2009 р., 0109U003649); державного замовлення ДЗ/477-2009 «Створення та впровадження експериментального індивідуального теплового пункту потужністю 250 кВт для автоматизованого теплопостачання типового будинку» (2009 - 2010 рр.; 0109U007233); відомчої теми «Аеродинамічна та теплова взаємодія будівлі з зовнішнім середовищем» (2011 - 2012 рр., 0111U000350); проекту №Ф53.7/045 «Спряжені задачі зовнішньої та внутрішньої аеродинаміки і теплофізики енергоефективних будівель» (2013 р.; 0113U005323); інноваційного проекту №27 «Різноваріантна термореновація огорожувальних конструкцій (стіл, вікон, стиків панелей тощо) частини поверху існуючої адміністративної будівлі та моніторинг тепловтрат при її тривалій експлуатації» (2011 р., 0111U002957); державного замовлення ДЗ/501-11 «Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу» (2011 - 2012 рр., 0111U008782); державного замовлення ДЗ/476-13 «Створення комбінованої системи енергоресурсозабезпечення типу «нуль енергії» для експериментального пасивного будинку» (2013 р., 0113U008041).

Мета роботи і завдання дослідження. Основною метою роботи є подальший розвиток науково-обґрунтованих підходів, що описують теплову взаємодію будівлі через її оболонку з довкіллям, а також вивчення особливостей практичного підвищення енергоефективності цивільних будівель при застосуванні комбінованих систем теплозабезпечення із використанням відновлювальних джерел енергії.

Для досягнення поставленої мети розв'язанню підлягали наступні наукові завдання дослідження:

- розробити математичну модель складного теплообміну через багат шарову ОК в нестационарному режимі з урахуванням впливу цілорічної інсоляції на оболонку будівлі;

- розробити інженерну методику визначення параметрів системи активного теплового бар'єру (ТБ), що призначений для підвищення ефективного опору теплопередачі ОК будівлі та компенсації теплових втрат або теплоприпливів через оболонку будівлі, відповідно, у теплий та холодний періоди року;

- дослідити характерні особливості підвищення енергоефективності будівлі шляхом термомодернізації її світлопрозорих ОК;

- провести комп'ютерне числове моделювання гідродинаміки і теплообміну в низькотемпературних системах водяного підлогового і повітряного опалення типового приміщення;

- розробити інженерну номограмну методику визначення теплотехнічних параметрів водяної підлогової системи опалення різних способів укладання, що дозволяє визначити оптимальну конфігурацію її елементів та параметри теплоносія для створення належного теплового режиму приміщення;

- обґрунтувати науково-технічні положення створення енергоефективної

будівлі та провести низку експериментальних досліджень теплового режиму її типового приміщення при опаленні низькотемпературними системами;

- оцінити енергетичну, ексергетичну і економічну ефективності впровадження і експлуатації низькотемпературних систем із використанням теплового насосу (ТН) в порівнянні з іншими системами для підтримання належного теплового режиму приміщення, а також розрахувати характерні експлуатаційні витрати типових будинків в залежності від джерела тепlopостачання, теплотехнічних параметрів ОК та витрати первинної енергії.

Об'єкт дослідження – тепловий режим приміщень будівель (в т.ч. енергоефективного будинку) із різними типами ОК і урахуванням впливу на них цілорічної інсоляції.

Предмет дослідження – нестационарні та квазістационарні процеси складного теплообміну в ОК і низькотемпературних системах тепलोзабезпечення.

Методи дослідження. Розв'язання поставлених наукових завдань здійснювалось сучасними методами фізичного та математичного моделювання (в т.ч. в спеціальному прикладному програмному пакеті Ansys 14.0). Використовувались експериментальні лабораторні установки і стенди із залученням автоматизованого вимірювального комплексу для подальшої обробки та аналізу експериментальних даних.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються, є наслідком використання загальнозвживаних методик, а також порівняння отриманих експериментальних і розрахункових даних із результатами інших досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше, на основі числових розрахунків за математичною моделлю процесів нестационарного складного теплообміну з урахуванням впливу цілорічної інсоляції на оболонку будівлі, були визначені теплові характеристики різноваріантних ОК та оцінена радіаційна енергетична складова їхньої взаємодії з довкіллям;

- в результаті виконаних розрахунків за розробленою інженерною методикою визначення параметрів системи тепло(холодо)постачання ТБ ОК, вперше оцінені енергетичні показники його експлуатації з ТН в холодний та теплий періоди року;

- вперше, за допомогою числового моделювання при сумісному розв'язанні рівнянь теплопереносу і відповідних граничних умов в стаціонарному режимі, визначені значення конвективної і радіаційної складових теплообміну через типові світлопрозорі конструкції з одно- та двохкамерним склопакетами, а також значення їхнього термічного опору;

- 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;

- вперше проведений порівняльний аналіз ексергетичної ефективності експлуатації низькотемпературних і традиційних систем енергоефективного будинку із різними опалювальними приладами.

Практичне значення одержаних результатів:

- на основі проведених комплексних досліджень розроблена інженерна номограмна 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);

- в результаті проведення техніко-економічного аналізу ефективності впровадження і експлуатації низькотемпературних систем із використанням ТН, в порівнянні з іншими системами опалення для підтримання належного теплового режиму приміщення, оцінені основні економічні показники таких технічних рішень;

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

Результати роботи впроваджені в декількох робочих проектах: ТОВ "Завод енергообладнання "ДАН" (м. Київ), ТОВ "Центр Водочищення" (м. Київ), СВПП «Факел» (м. Сміла), ТОВ «Компанія ВДЕ» (м. Бровари), ТОВ «Досконалий будинок» (м. Чернівці).

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується 5 патентами України на корисну модель, що одержані здобувачем у складі авторського колективу.

Особистий внесок здобувача полягає в створенні математичної моделі процесів складного теплообміну через багат шарову ОК (в т.ч. світлопрозору [3, 6 – 9]) в нестационарному режимі з урахуванням впливу цілорічної інсоляції на оболонку будівлі [1, 2]; розробці проектів та створенні (проектно-монтажні, пуско-налагоджувальні роботи) експериментальних установок і стенду для вивчення теплового режиму приміщень при різних експлуатаційних режимах [10, 14 – 17, 31 – 33]; розробці експериментальних методик теплофізичних досліджень і статистичної обробки отриманих результатів [38]; проведенні натурних експериментів, обробці та аналізі отриманих експериментальних даних [13, 37]; створенні в програмному пакеті Ansys 14.0 тривимірної математичної моделі квазістационарного теплообміну та аеродинаміки повітря в типовому приміщенні з системою водяного підлогового, також повітряного опалення [11 – 13]; розробці методик визначення параметрів системи теплохолодопостачання теплового бар'єру в огорожувальній конструкції [4, 5] та номограмної методики визначення теплотехнічних параметрів водяної підлогової системи опалення; проведенні техніко-економічного аналізу ефективності впровадження і експлуатації низькотемпературних систем із використанням теплового насоса [14, 15, 25, 26, 30, 34, 35, 41, 43]; розробки концепції створення енергоефективного будинку ІТТФ НАН України [18, 19, 20, 21 – 25, 27 – 29, 36, 37, 39, 40, 44 – 46]; у впровадженні та патентуванні [42 – 46] власних розробок.

Вибір напрямів досліджень, постановка завдань, розроблення основних наукових положень здійснювались у рівноправному співавторстві з науковим консультантом, чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. Б.І. Баском.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи і її основні положення доповідались і обговорювались на: VI Міжнародній конференції «Комунальна та промислова теплоенергетика» (м. Київ, 2009 р.), Міжнародних науково-технічних конференціях «Технічні і технологічні гази. Енергоефективне обладнання і установки для альтернативної енергетики» (м. Суми, 2010, 2011 рр.), VII - X Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки» (м. Київ, 2011 - 2016 рр.), Науково-практичній конференції «Теплонасосні технології в Україні. Стан та перспективи впровадження» (м. Київ, 2012 р.), Міжнародній конференції «Модернізація житлово-комунального господарства на принципах державно-приватного партнерства» (Запоріжжя, 2012 р.); I Міжнародній науково-технічній конференції «Енергозбереження у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання» (м. Київ, 2013 р.), Міжнародній конференції «Тепловые насосы в странах СНГ» (АР Крим, м. Алушта, 2013 р.), Міжнародній конференції «Украина – Россия – Сколково. Единое инновационное пространство» (м. Київ, 2013 р.), 8-th International Green Energy Conference (м. Київ, 2013 р.), II Міжнародній конференції «Тепловые насосы в странах СНГ. Тепловые насосы в бюджетных зданиях и городских коммунальных хозяйствах» (м. Київ, 2014 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Энергоэффективность – 2014» (Беларусь, м. Мінськ, 2014 р.), II Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (м. Київ, 2014 р.), V - VIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Енергоінтеграція. Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві» (м. Київ, 2015 – 2018 рр.); III Конференції «Теплові насоси в будівлях та містах України» (м. Київ, 2015 р.), XVI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (м. Одеса, 2016 р.), Міжнародній науково-практичній конференції "Підвищення ефективності теплоенергетики на основі використання теплових насосів" (м. Київ, 2016 р.), XVII Міжнародній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2016 р.), X Міжнародній конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (м. Київ, 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання» (м. Київ, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Теплові насоси та їх місце в енергетичній стратегії» (м. Київ, 2017 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковані 46 наукових робіт, в т.ч. 27 статей у фахових виданнях України, 1 стаття у іноземному виданні, 4 статті у міжнародних виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, 9 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях, одержані 5 патентів України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, вісьмох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел з 243 найменувань та 2 додатків на 16 сторінках. Робота викладена на 376 сторінках основного тексту, містить 143 рисунки та 22 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи; сформульовані мета і завдання роботи; розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; визначені об'єкт, предмет і методи дослідження; відображені наукова новизна і практична цінність результатів, особистий внесок здобувача; наведені дані щодо апробації і впровадження результатів роботи, а також про наукові публікації та структуру дисертації.

Перший розділ присвячений аналізу сучасних світових тенденцій щодо розвитку наукових досліджень, що спрямовані на підвищення ефективності будівлі при належному тепловому режимі в приміщеннях та в умовах її складного теплообміну із довкіллям. Науковою основою в цьому напрямку теплофізики є видатні праці В.Н. Богословського, І.Ф. Лівчака, Н.М. Беляєва, А.І. Леонтева, К.Ф. Фокіна, В.П. Ісаченка, О.М. Сканаві, В.Г. Гагарина, Ю.А. Табунщикова, Е.К. Боронбаєва, А. Міссенара, Н. Адамса, В. Лизе, О. Фангера, В. Файста, Н.М. Фіалко, Л.Ф. Черних, Е.С. Малкіна, Д.Й. Розинського, А.І. Накорчевського, П.Г. Круковського, Б.В. Давиденка та інших відомих вчених.

Літературний огляд та аналіз інформаційних джерел показав, що наразі існують проблеми достовірного та оперативного розрахункового аналізу енергетичної ефективності будівлі при визначенні її тепловтрат. Різноманітність існуючих методик розрахунку параметрів теплового режиму приміщень з великою кількістю емпіричних коефіцієнтів є наслідком складності вирішення даної задачі в аналітичному вигляді. Це пояснюється нестационарністю двовимірного температурного поля в ОК, квазістационарністю процесів термостатування (кліматизації) приміщень, неізотермічністю поверхні низькотемпературних опалювальних систем, а також впливом великої кількості фізичних факторів на результати розрахунку окремих значень теплотехнічних параметрів. Розбіжність в результатах, що отримані за проаналізованими існуючими методиками, досягає майже 40%.

Також, окремим чином, слід відмітити відсутність в вітчизняних нормативних документах, що регламентують особливості технологій будівництва та експлуатації будівель, прямого врахування теплової дії цілорічної інсоляції на ОК.

Окрім цього зазначається, що перспективні точні методики розрахунку параметрів опалювальних систем, завдяки яким створюється тепловий режим приміщень різного призначення, повинні засновуватись на аналітичному і оптимізаційному аналізі даних, що отримані розв'язанням спряженої задачі складного теплообміну в приміщенні за допомогою спеціального комп'ютерного програмного забезпечення, а також проведенні низки експериментальних

досліджень для верифікації розроблених математичних моделей теплообміну і подальшого зіставлення результатів.

На основі виконаного аналізу стану розглянутих проблем сформульовані мета та основні наукові завдання, що опрацьовані в дисертаційній роботі.

В другому розділі наведена методика розрахунку теплотехнічних параметрів багат шарової ОК, що базується на використанні математичної моделі нестационарного складного теплообміну будівлі із доквіллям [1, 2], а також проаналізований вплив основних внутрішніх та зовнішніх факторів, що визначають інтенсивність теплопередачі через ОК.

Постійна зміна граничних умов обумовлює перманентний процес перерозподілу значень температури по товщині ОК, що значно ускладнює його параметричне визначення в певний момент часу.

Розглядається вертикальна тришарова ОК (рис. 1). На ліву (внутрішню) площину I шару 1 подається тепловий потік q . Права площина IV шару 3 (зовнішня) умовно межує з доквіллям. Завдання полягає у визначенні зміни температури $T(x, \tau)$ і теплового потоку $q(x, \tau)$ в часі τ і в просторі по товщині огорожі x .

Точність інженерних розрахунків параметрів будівельних конструкцій суттєво залежить від правильності обраних значень теплофізичних властивостей матеріалів. Для лінійного рівняння теплопровідності коефіцієнти, відповідно, теплопровідності λ і об'ємної теплоємності $c\rho$ приймаються сталими. При цьому, коефіцієнт температуропровідності $a = \lambda/c\rho = \text{const}$.

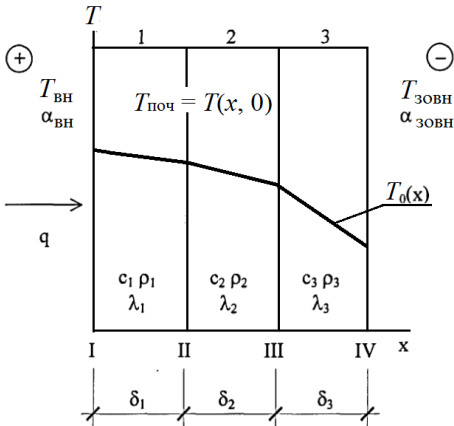


Рис. 1. Теплофізична постановка задачі

У загальному випадку рівняння початкових умов має вигляд $T = T(x, 0)$, а рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right]. \quad (1)$$

Для розглянутої задачі зручно записати систему лінійних диференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами. Кожне рівняння для окремого шару з

Для розв'язання такої задачі необхідно, щоб були задані:

- початкові умови, що визначають розподіл температури по товщині і на границях ОК в початковий момент часу;
- рівняння енергії, що описує процес теплопровідності через товщину конструкції;
- граничні умови, що визначають умови теплообміну на всіх характерних площинах.

Початкові умови можуть бути задані у вигляді рівняння, таблиці або графіка розподілу температури в момент початку процесу (при $\tau = 0$).

додатковими граничними умовами на стиках шарів має вигляд

$$\text{шар 1: } c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}; \text{ шар 2: } c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}; \text{ шар 3: } c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}. \quad (2)$$

В площині II (між 1 і 2 шарами), виходячи з рівності значень теплових потоків і температур, задаються умови четвертого роду

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{\text{II}} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{\text{II}} \text{ або } q_1 = q_2; T_1|_{\text{II}} = T_2|_{\text{II}}. \quad (3)$$

Аналогічно записуються граничні умови в площині III

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{\text{III}} = \lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{\text{III}} \text{ або } q_2 = q_3; T_2|_{\text{III}} = T_3|_{\text{III}}. \quad (4)$$

Граничні умови теплообміну на площинах I і IV, тобто на внутрішній і зовнішній поверхнях ОК, що контактують, відповідно, з внутрішнім і зовнішнім повітрям, а також оточені іншими поверхнями: внутрішнє повітря з температурою $T_{\text{вн}}$, зовнішнє з температурою $T_{\text{зовн}}$. Внутрішня поверхня ОК має температуру T_R . Якщо враховувати конвективну і радіаційну складові теплообміну, то в розрахунок вводяться, відповідно, коефіцієнти $\alpha_{\text{конв}}$ і $\alpha_{\text{рад}}$. При наявності джерела теплоти, його радіаційна складова, що поглинається площиною I, визначається виразом

$$q_{\text{рад}} = \varepsilon q, \quad (5)$$

де ε - коефіцієнт поглинання поверхні ОК для теплового випромінювання, q - інтенсивність, падаючого на ОК, випромінювання від джерела (довідкові дані, інтенсивність інсоляції для даної місцевості за метеоспостереженнями), Вт/м².

Якщо розглядати загальний випадок, то на поверхні огорожень відбувається складний теплообмін, що визначається граничними умовами другого роду (задана інтенсивність теплового потоку) і третього роду (задані умови теплообміну з атмосферним повітрям). З огляду на це, граничні умови на площині I мають вигляд

$$\alpha_{\text{вн, конв}} (T_{\text{вн}} - T_1|_I) + \alpha_{\text{вн, рад}} (T_R - T_1|_I) = -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_I. \quad (6)$$

Граничні умови на площині IV записуються як

$$\alpha_{\text{зовн, конв}} (T_3|_{\text{IV}} - T_{\text{зовн}}) + \alpha_{\text{зовн, рад}} (T_3|_{\text{IV}} - T_{R \text{ зовн}}) + \varepsilon_{\text{зовн}} q_{\text{зовн}} = -\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{\text{IV}}. \quad (7)$$

Для приміщень умови радіаційно-конвективного теплообміну, в практиці будівельного проектування, враховуються єдиним коефіцієнтом теплообміну $\alpha_{\text{вн}}$. Тоді умова (6) набуде вигляду

$$\alpha_{\text{вн}} (T_{\text{вн}} - T_1|_I) = -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_I. \quad (8)$$

Для холодного періоду року в натурних дослідженнях, а також в лабораторних умовах при відсутності в приміщенні джерел теплоти (відсутність опалення в теплий період року), можна ввести аналогічне спрощення і для зовнішньої поверхні досліджуваного об'єкту. Тоді (7) записується як

$$\alpha_{\text{зовн}}(T_3|_{\text{IV}} - T_{\text{зовн}}) = -\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{\text{IV}}. \quad (9)$$

Цілорічно, при натурних дослідженнях, необхідно враховувати величину інсоляції, а при лабораторних, в холодний період – величину випромінювання опалювальних приладів.

Наступний вираз представляє змішані граничні умови другого і третього родів, що можна перетворити, використовуючи умовну температуру зовнішнього середовища $T_y = T_{\text{зовн}} + \epsilon_{\text{зовн}} q_{\text{зовн}} / \alpha_{\text{зовн}}$, у вигляді

$$\alpha_{\text{зовн}}(T_y - T_3|_{\text{IV}}) = -\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{\text{IV}}. \quad (10)$$

Розв'язання поставленого завдання викликає математичні складності, оскільки система рівнянь є нелінійною. Тому пропонується використання комбінованого методу дослідження крайових задач теплопереносу, що базується на основі поєднання елементів аналітичного і числового розв'язків. Суть методу полягає в розгляді процесу теплопереносу на ряді малих часових інтервалів. У кожному проміжку часу допускається, що значення температури постійні в площинах II і III, а також стала густина теплового потоку через дотичні поверхні, тобто має місце ідеальний тепловий контакт.

Загальна задача розбивається на три автономні, але взаємопов'язані між собою, складові частини:

1. Теплоперенос в шарі 1 з граничними умовами третього роду, що враховують конвективний теплообмін на площині I, і першого роду, що характеризують сталість температури в площині II між шарами 1 і 2.

2. Теплоперенос в шарі 2 з граничними умовами другого роду, що характеризують сталість густини теплового потоку через площину II, і першого роду, що характеризують сталість температури в площині III.

3. Теплоперенос в шарі 3 з граничними умовами другого роду в площині III і граничними умовами третього роду, що характеризують теплообмін між поверхнею шару 3 на площині IV з навколишнім середовищем за законом Ньютона - Рихмана.

Кожне з цих завдань розв'язується аналітично. Розв'язок загальної задачі нестационарної теплопровідності можна отримати в результаті сполучення аналітичних розв'язків на кожному часовому інтервалі. Це дозволяє перейти від граничних умов четвертого роду до граничних умов першого і другого родів на поверхнях поділу шарів 1 і 2, 2 і 3, що взагалі полегшує розв'язання завдання.

При досить великому значенні часу процесу (теоретично при $\tau \rightarrow \infty$) в конструкції формується стаціонарний розподіл температур, дані якого використовуються для розрахунку значення термічного опору R ОК [3].

Для розглянутої модельної системи це буде виражатися співвідношенням

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{T_0 - T_{\text{зовн}}}{q}, \quad (11)$$

де T_0 – температура зовнішньої поверхні першого шару, К; $T_{\text{зовн}}$ – температура зовнішнього повітря, К.

Математично задача теплопровідності для шару 1 може бути записана наступним чином

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq \delta_1. \quad (12)$$

Початкова умова $T(x, 0) = T_0(x)$. Граничні умови: $T(\delta, \tau) = T_\delta$; $-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_{\text{вн}} [T_{\text{вн}} - T(0, \tau)]$. Перша показує, що площина II розділу шарів 1 і 2 має постійну температуру T_δ . Друга характеризує конвективний теплообмін на зовнішній площині I. Для зручності перетворень постановку задачі можна привести до безрозмірного вигляду

$$\frac{\partial T(\bar{x}, \text{Fo})}{\partial \text{Fo}} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, \text{Fo})}{\partial \bar{x}^2}; \quad T(\bar{x}, 0) = T_0(\bar{x}); \quad T(1, \text{Fo}) = T_\delta; \quad \frac{\partial T(0, \text{Fo})}{\partial \bar{x}} = \text{Bi} \cdot T(0, \text{Fo}), \quad (13)$$

де $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$ - безрозмірна координата, $\text{Fo} = a\tau/\delta^2$ - число Фур'є, $\text{Bi} = \alpha_{\text{вн}} \delta/\lambda$ - число Біо.

Розв'язок задачі в безрозмірній формі має вигляд

$$T(\bar{x}, \text{Fo}) = T_\delta \left(\frac{\text{Bi} \cdot \bar{x} + 1}{\text{Bi} + 1} \right) - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{Bi} \cdot \sin \mu_n (\bar{x} - 1)}{\text{Bi} + \cos^2 \mu_n} \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}) \left[\int_0^1 T_0(\xi) \sin(\mu_n (1 - \xi)) d\xi - \frac{T_\delta}{\mu_n} \right], \quad (14)$$

де $T(\bar{x}, \text{Fo}) = \frac{T(x, \tau) - T_{\text{вн}}}{T_0 - T_{\text{вн}}}$, μ_n - корені характеристичного рівняння $\mu_n = -\text{Bi} \text{tg} \mu_n$,

ξ - безрозмірна поточна координата.

Математично задача теплопровідності для шару 2 може бути записана як

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \delta_1 \leq x \leq \delta_1 + \delta_2. \quad (15)$$

Початкова умова $T(x, 0) = T_0(x)$. Граничні умови: $-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q_2$, $T(\delta, \tau) = T_\delta$.

Тоді з цього можна отримати

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{T(x, \tau) - T_{\text{вн}}}{T_0 - T_{\text{вн}}} \right) = a \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{T(x, \tau) - T_{\text{вн}}}{T_0 - T_{\text{вн}}} \right), \quad \frac{\partial T(\bar{x}, \text{Fo})}{\partial \text{Fo}} = a \frac{\partial^2 T(\bar{x}, \text{Fo})}{\partial \bar{x}^2}, \quad (16)$$

При приведенні до безрозмірного вигляду граничних умов вийде

$$-\frac{\partial T(0, \text{Fo})}{\partial \bar{x}} = \text{Ki}, \quad (17)$$

де $\text{Ki} = \frac{q_2 \delta_2}{\lambda_2 T_\delta}$, $T(1, \text{Fo}) = 0$.

Розв'язок задачі у безрозмірній формі має вигляд

$$T(\bar{x}, Fo) = Ki \left[(1 - \bar{x}) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8 \cos(\mu_n \bar{x})}{\pi^2 n^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2}{4} Fo\right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cos(\mu_n \bar{x}) \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2}{4} Fo\right) \int_0^1 T_0(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi. \quad (18)$$

Математично задача теплопровідності для шару 3 може бути записана далі як

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \delta_1 + \delta_2 \leq x \leq \delta_1 + \delta_2 + \delta_3. \quad (19)$$

Початкова умова $T(x, 0) = T_0(x)$. Граничні умови: $-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q_3$,

$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_{\text{зовн}} [T(\delta, \tau) - T_{\text{зовн}}].$$

В безрозмірному вигляді початкова та граничні умови

$$T(\bar{x}, 0) = T_0(\bar{x}) = \frac{T(x, \tau) - T_{\text{зовн}}}{T_{\text{зовн}}} \quad (20)$$

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}, \quad -\frac{\partial T(0, Fo)}{\partial \bar{x}} = Ki, \quad -\frac{\partial T(0, Fo)}{\partial \bar{x}} = Bi \cdot T(0, Fo), \quad (21)$$

де $Ki = \frac{q_3 \delta_3}{\lambda_3 T_{\delta}}$; $Bi = \alpha_{\text{зовн}} \delta / \lambda_3$.

Розв'язок задачі в безрозмірній формі має вигляд

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}} = Ki \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi \mu_n \sin(\mu_n \bar{x})}{\mu_n^2 (Bi + \sin^2 \mu_n)} \exp(-\mu_n^2 Fo) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi \mu_n \sin(\mu_n \bar{x})}{\mu_n^2 (Bi + \sin^2 \mu_n)} \exp(-\mu_n^2 Fo) \int_0^1 T_0(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi. \quad (22)$$

Надалі, відповідним чином, відбувається сполучення отриманих розв'язків на кожному часовому інтервалі. З теоретичної точки зору, однією зі сторін аналізу розв'язків виду (14), (18) і (22) є визначення часу і послідовності настання регулярного теплового режиму.

Третій розділ присвячений визначенню теплового впливу інсоляції на питомі теплові втрати будівлі із різними типами ОК в різні періоди року. На основі розв'язання рівнянь математичної моделі нестационарного складного теплообміну методом прогонки для багатошарової комбінованої ОК з повітряним прошарком (рис. 2) вдалося розрахувати теплові та енергетичні інтегральні характеристики для таких ОК при їх різній орієнтації за сторонами світу.

Повітряний прошарок опціонально призначений для підведення (відведення) теплоти, а також виконуватиме теплоізоляційні функції, якщо він конструктивно буде замкненим. Теплофізичні властивості матеріалів шарів взяті як довідкові.

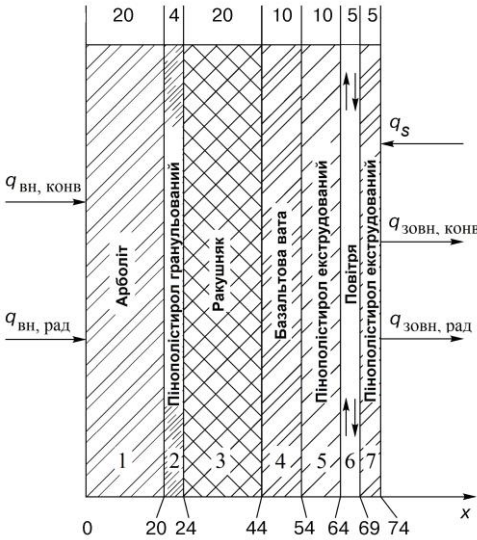
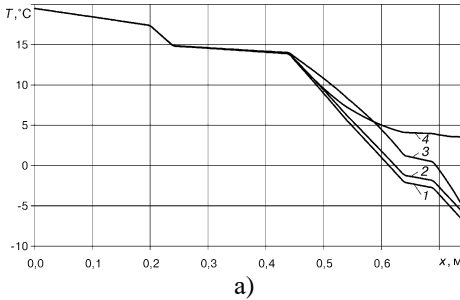
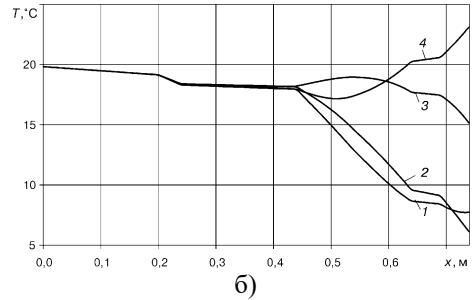


Рис. 2. Розріз багат шарової комбінованої ОК

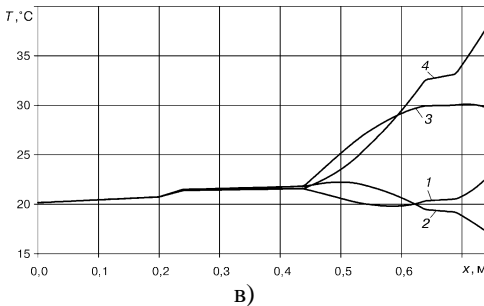
Це корелює з даними для перших трьох шарів, що приведені на рис. 3.



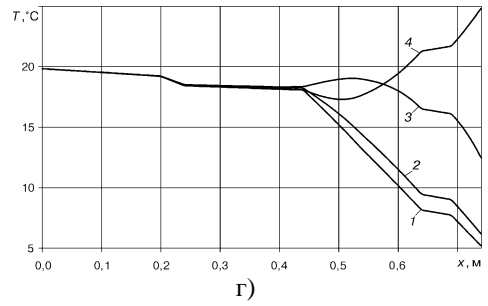
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Розподіл температури по розрізу багат шарової комбінованої ОК на 15 (а), 105 (б), 196 (в) та 289 (г) доби: 1 – в 6 годин, 2 – в 24 години, 3 – в 18 годин, 4 – в 12 годин.

Дія інсоляції призводить до суттєвого коливання значень температури зовнішньої поверхні протягом доби: від 7°C в холодний період року до 14°C в теплий період.

Поява ділянок із позитивними градієнтами температур свідчить про можливе акумулювання теплоти в ОК в будь-який час року.

Нехтування дією сонячної радіації знижує визначальні значення температури внутрішньої і зовнішньої поверхонь, звужує діапазон добових коливань температури зовнішньої поверхні до $1...5^{\circ}\text{C}$, а також спотворює теплосприйняття матеріалу стіни.

Так, завжди в 6 і 7 шарах температура в 12 годин істотно вища за таку в 18 годин. Мінімальні температури, звичайно, приходяться на темний час доби. Якщо взимку вона досягає нульового значення близько 12 годин доби, то в інші години присутня зміна знаку на протилежний протягом тривалого періоду, що спричиняє акумулювання теплоти в ОК.

Основною причиною такої поведінки функцій є вплив сонячної радіації незалежно від часу року. При цьому, якщо навесні і влітку температура зовнішньої поверхні в 6 годин більша за таку в 24 години, то взимку і восени тенденція протилежна.

Розподіл енергетичних параметрів по добах та годинах, що вказані вище, подані на рис. 4. Перш за все, слід відзначити істотний зв'язок між дією сонячної радіації, температурою зовнішньої поверхні $T(t, \delta)$ та густиною теплового потоку на ній $q(t, \delta)$. Її величина починає різко зменшуватися, починаючи зі сходу Сонця.

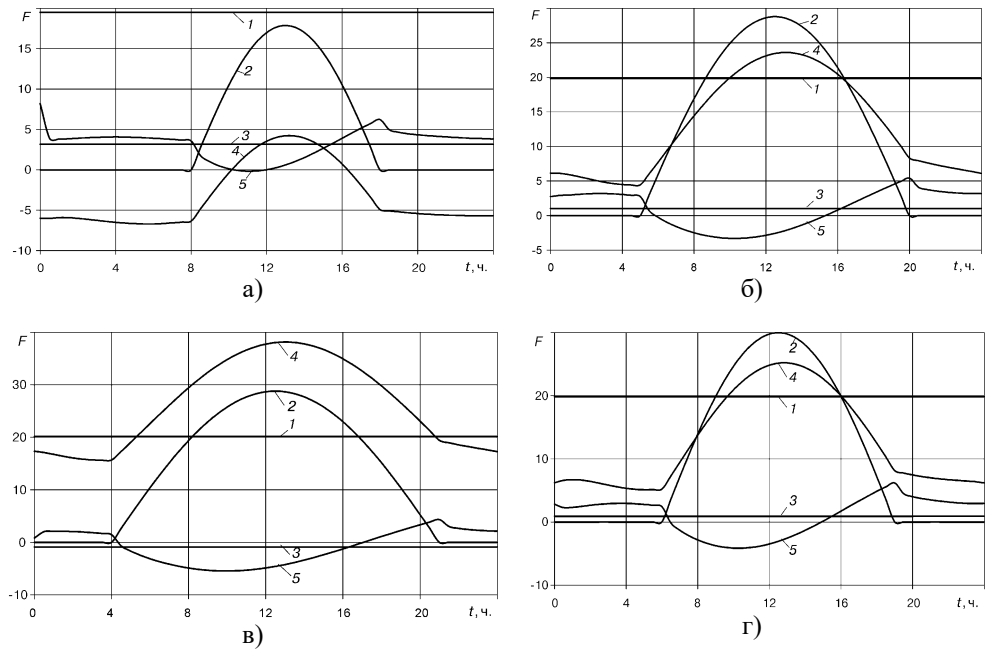


Рис. 4. Теплові характеристики для багатошарової комбінованої ОК при південній орієнтації на 15 (а), 105 (б), 196 (в), 289 (г) доби року F : 1 – T_0 , °C; 2 – $q_{\text{рад}}$, Вт/м²; 3 – q_0 , Вт/м²; 4 – T_δ , °C; 5 – q_δ , Вт/м².

Температура $T(t, \delta)$ майже миттєво реагує на дію сонячної радіації, а внутрішні параметри $T(t, 0)$, $q(t, 0)$ практично не змінюються протягом доби.

Наглядно проявляються теплоізоляційні властивості пінополістиролу (2 шар, $x = 0,20 \dots 0,24$ м). Найбільше різноманіття розподілів $T(x, t)$ характерне для зовнішніх (4, 5, 6, 7) шарів ОК.

Відокремленим чином виражене теплосприяння ($\partial T / \partial x > 0$) зовнішніх шарів

огорожень вранці, влітку і, навіть, восени. Для внутрішніх шарів 1 – 3 характерна теплова стабільність протягом доби, що має позитивно відобразитись на експлуатаційних властивостях цих матеріалів [3].

Розрахункові річні тепловтрати через багатошарову комбіновану ОК: при не врахуванні дії сонячної радіації $e^* = 55 \cdot 10^6$ Дж/м² незалежно від орієнтації поверхонь; при врахуванні сонячної радіації $e^* \approx 40,1 \cdot 10^6$ Дж/м² для південної сторони і $e^* \approx 47,4 \cdot 10^6$ Дж/м² для північної сторони. Таким чином, розрахункові тепловтрати будуть менші приблизно в 1,37 рази для південно орієнтованої ОК і в 1,16 рази – при її північній орієнтації.

Якщо прийняти, що зовнішня ОК, умовно з висотою 3 м, відповідає внутрішньому приміщенню шириною 6 - 7 м, то при неврахуванні сонячної радіації отримаємо річну питому витрату теплоти на опалення приблизно 50 кВт·год/(м²·рік), що відповідає сучасним нормативним показникам у вітчизняному будівництві. При використанні річної теплоти інсоляції можна орієнтуватися на питому витрату до 37 кВт·год/(м²·рік).

В четвертому розділі обґрунтована доцільність, енергетична та економічна ефективності використання активного ТБ з водяним контуром у складі ОК та реверсивного ТН [4, 5].

Запропонована до впровадження система, що є частиною зовнішніх непрозорих ОК і складається з теплоізолятора товщиною $\delta_{із}$ з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{із}$, бетонного прошарку ТБ товщиною δ з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{тб}$ із системою труб, прокладених з кроком h , по яких циркулює теплоносій та стіни (наприклад, з цегли) товщиною $\delta_{ст}$ з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{ст}$.

На рис. 5 показані конструкція ОК із ТБ та розподіли температури в ній в холодний (а) і теплий (б) періоди року.

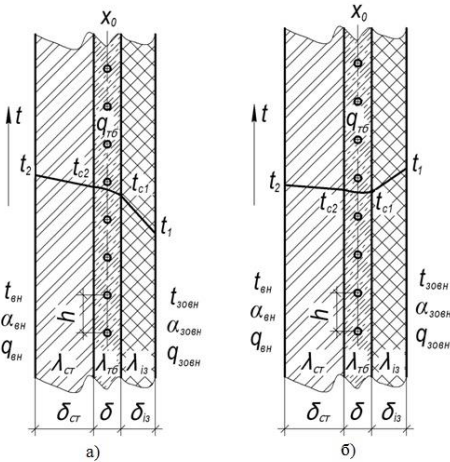


Рис. 5. Розрахункова схема комбінованої ОК із ТБ, відповідно, в холодний (а) і теплий (б) періоди року

В опалювальний період, шляхом подачі теплоносія з температурою 5...10°C в контур, створюється додатковий термічний опір в ОК та зменшуються загальні тепловтрати. Таким чином, енергоспоживання будівлі буде залежати, в тому числі, і від різниці температур зовнішнього повітря та ТБ. Додатково теплота може відбиратися або віддаватися ґрунтовому масиву за допомогою теплообмінників. Для підвищення температурного потенціалу теплоносія необхідне додаткове джерело енергії. Доцільним при цьому є використання ТН. У теплий період року ТБ можна використовувати для запобігання теплонадходженням, подаючи при цьому теплоносій з тією ж температурою 5...10°C.

Математичні залежності, що описують відповідні процеси, побудовані при допущенні, що теплофізичні властивості матеріалів ОК не залежать від температури та не змінюються з часом.

Для розв'язання поставленої задачі складена система рівнянь, що описує тепловий баланс комбінованої ОК з ТБ

$$q_{\text{вн}} = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\delta_{\text{ст}}} (t_2 - t_{\text{c}2}), \quad q_{\text{вн}} = \alpha_{\text{вн}} (t_{\text{вн}} - t_2), \quad q_{\text{зовн}} = \frac{\lambda_{\text{із}}}{\delta_{\text{із}}} (t_{\text{c}1} - t_1), \quad q_{\text{зовн}} = \alpha_{\text{зовн}} (t_1 - t_{\text{зовн}}),$$

$$q_{\text{ТБ}} = \frac{c \cdot G \cdot \Delta t}{h \cdot \delta \cdot l}, \quad q_{\text{зовн}} = q_{\text{вн}} + q_{\text{ТБ}} \cdot \delta_{\text{ТБ}}, \quad x_0 = \frac{q_{\text{ТБ}} \cdot d_{\text{ТБ}} + q_{\text{вн}}}{q_{\text{ТБ}}}, \quad t_1 = \frac{q_{\text{зовн}}}{\alpha_{\text{зовн}}} + t_{\text{зовн}},$$

$$t_{\text{c}1} = t_1 + \frac{q_{\text{зовн}} \cdot \delta_{\text{із}}}{\lambda_{\text{із}}}, \quad t_2 = t_{\text{вн}} - \frac{q_{\text{вн}}}{\alpha_{\text{вн}}}, \quad t_{\text{c}2} = t_2 - q_{\text{вн}} \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}, \quad t_{\text{c}2} - t_{\text{c}1} = \frac{q_{\text{ТБ}} \cdot \delta_{\text{ТБ}}^2}{2 \cdot \lambda_{\text{ТБ}}} + \frac{q_{\text{вн}} \cdot \delta_{\text{ТБ}}}{\lambda_{\text{ТБ}}},$$

$$q_{\text{вн}} = \left[\frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}} - q_{\text{ТБ}} \left(\frac{\delta_{\text{ТБ}}^2}{2 \cdot \lambda_{\text{ТБ}}} + \frac{\delta_{\text{із}} \cdot \delta_{\text{ТБ}}}{\lambda_{\text{із}}} + \frac{\delta_{\text{ТБ}}}{\lambda_{\text{ТБ}}} \right)}{\left(\frac{1}{\alpha_{\text{зовн}}} + \frac{\delta_{\text{із}}}{\lambda_{\text{із}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta_{\text{ТБ}}}{\lambda_{\text{ТБ}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} \right)} \right], \quad x_0 = \frac{t_2 - t_1 + \delta \left(\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{\delta}{2 \lambda_{\text{ТБ}}} \right)}{\frac{1}{\alpha_{\text{зовн}}} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{ТБ}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}},$$

де l – довжина стіни з ТБ, м; $q_{\text{вн}}$, $q_{\text{зовн}}$, $q_{\text{ТБ}}$ – густина теплового потоку, відповідно, від приміщення до стінки, у доквілля, Вт/м² та від ТБ, Вт/м³; G – масова витрата теплоносія, кг/с; t_2 – значення температури, відповідно, на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни, °С; $t_{\text{c}1}$, $t_{\text{c}2}$ – значення температури, відповідно, на зовнішній та внутрішній поверхнях ТБ, °С; $t_{\text{вн}}$, $t_{\text{зовн}}$ – значення температури, відповідно, в приміщенні та зовнішнього повітря, °С; x_0 – площа розташування трубопроводу ТБ; $\alpha_{\text{вн}}$, $\alpha_{\text{зовн}}$ – коефіцієнт тепловіддачі, відповідно, з внутрішньої та зовнішньої поверхонь стіни, Вт/(м²·К); $\Delta t = \text{const}$ – різниця температур пропіленгліколя на вході та виході ТБ, що знаходиться в межах 3...5°С. Підтримується постійною насосом завдяки зміні витрати.

В даній системі рівнянь невідомими є: $q_{\text{вн}}$, $q_{\text{зовн}}$, $q_{\text{ТБ}}$, t_1 , t_2 , $t_{\text{c}1}$, $t_{\text{c}2}$, x_0 . Параметрами $t_{\text{вн}}$, $t_{\text{зовн}}$, $\lambda_{\text{ст}}$, $\lambda_{\text{із}}$, $\delta_{\text{ст}}$, $\delta_{\text{із}}$, $\delta_{\text{ТБ}}$, h попередньо задаються, виходячи із розрахункових температур, теплофізичних і конструктивних параметрів ТБ. Коефіцієнти $\alpha_{\text{вн}}$, $\alpha_{\text{зовн}}$ – обираються у відповідності до ДБН України В.2.6-31:2006 Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель.

На рис. 6 показаний розподіл температури всередині комбінованої ОК з ТБ при різній температурі навколишнього середовища $t_{\text{зовн}} = -22...8^\circ\text{C}$ і при незмінних значеннях температури в приміщенні $t_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$, конструкції стіни та теплового потоку від ТБ ($\delta_{\text{ст}} = 0,4$ м, $\lambda_{\text{ст}} = 0,8$ Вт/(м·К), $\delta_{\text{із}} = 0,05$ м, $\lambda_{\text{із}} = 0,04$ Вт/(м·К), $\delta_{\text{ТБ}} = 0,1$ м, $q_{\text{ТБ}} = 62$ Вт/м³). З отриманих залежностей видно, що чим вища температура зовнішнього повітря, тим більш полого крива її розподілу.

Вплив товщини ізоляції на розподіл температури всередині комбінованої ОК з ТБ наведений на рис. 7. Графіки наведені при таких же незмінних параметрах матеріалів ОК, а також значеннях температури внутрішнього, зовнішнього повітря і теплового потоку, але при різній товщині теплоізоляції $\delta_{\text{із}} = 0,05; 0,1; 0,2$ м. При

збільшенні δ_{i3} спостерігається підвищення t_{c1} , t_{c2} , t_2 та незначне зменшення t_1 , що пояснюється зменшенням $q_{вн}$ та $q_{зовн}$ при збільшенні δ_{i3} . При товщині ізоляції 0,2 м та температурі теплоносія 20°C , що подається до ТБ, вдається компенсувати значну частину тепловтрат приміщення.

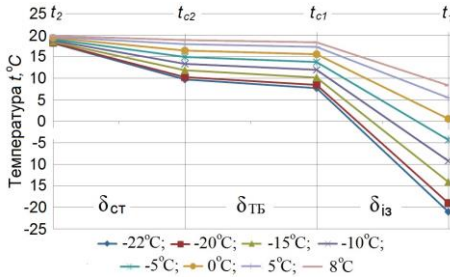
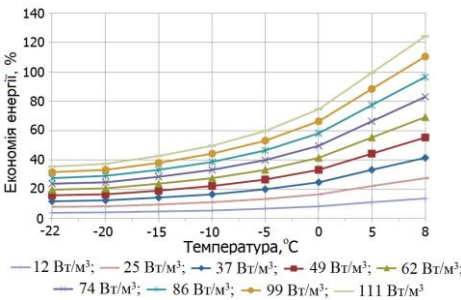


Рис. 6. Розподіл температури всередині комбінованої ОК при різних температурах зовнішнього повітря

У енергетичному еквіваленті економію можна розрахувати як, відповідно, у холодний $E_{хол} = \Delta q_{ТБ} - (q_{ел} + q_{ц})$ та теплий $E_{тепл} = \Delta q_{ТБ} - (q_{ел} - q_{ц})$ періоди, де $\Delta q_{ТБ}$ - економія енергії за рахунок використання ТБ площею 1 м^2 , Вт; $q_{ел}$ - електрична енергія, що споживається компресором ТН, Вт; $q_{ц}$ - електрична енергія, що витрачається на циркуляцію теплоносія, Вт.

На рис. 8 показана економія енергії, відповідно, у холодний (а) і теплий (б) періоди року в залежності від температури зовнішнього повітря при різних значеннях $q_{ТБ}$.



а)

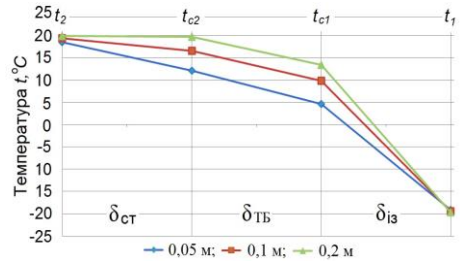
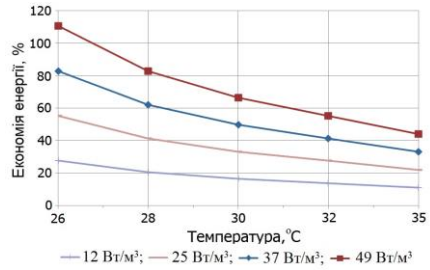


Рис. 7. Розподіл температури всередині комбінованої ОК при різній товщині теплоізоляції



б)

Рис. 8. Економія енергії в залежності від температури зовнішнього повітря в холодний (а) та теплий (б) періоди року при різних значеннях $q_{ТБ}$

Запропоноване технічне рішення надає можливість вилучити профіцитну теплоту інсоляції в теплий період року, закумуляувати її в ґрунтовому масиві та використати в холодний період для часткової компенсації теплових втрат будівлі або спрямувати її до системи водяного підлогового опалення.

У фінансовому еквіваленті економія складас, відповідно, у холодний

$$H_{\text{хол}} = \Delta q_{\text{ТБ}} \Pi_{\text{Г}} - \left(\frac{q_{\text{ТБ}} \delta_{\text{ТБ}} \Pi_{\text{ел}}}{\text{COP}} + q_{\text{ц}} \Pi_{\text{ел}} \right) \text{ та теплий } H_{\text{хол}} = \frac{\Delta q_{\text{ТБ}} \Pi_{\text{ел}}}{\varepsilon_{\text{хол}}} - q_{\text{ц}} \Pi_{\text{ел}} \text{ періоди року,}$$

де $\Pi_{\text{Г}}$ – вартість газу, грн.; $\Pi_{\text{ел}}$ – вартість електроенергії, що використовується для роботи ТН та циркуляційного насосу, грн.; COP, $\varepsilon_{\text{хол}}$ – відповідно, коефіцієнт перетворення ТН та холодильний коефіцієнт.

В п'ятому розділі розглянуті особливості теплопереносу через світлопрозорі ОК із одно- та двокамерними склопакетами [6 – 9]. Задача складного теплообміну через склопакети висотою H , шириною L та товщиною B розглядається в двовимірній постановці в умовах стаціонарного теплового режиму. Схема розрахункової області представлена на рис. 9. Вільноконвективний рух газового середовища в камерах склопакета вважається ламінарним і, при цьому, описується системою рівнянь Нав'є – Стокса

$$\frac{\partial(\rho_{\text{Г}} u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{\text{Г}} v)}{\partial y} = 0, \quad (22)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{Г}} u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{\text{Г}} v^2)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) - \rho_{\text{Г}} g, \quad (23)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{Г}} u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{\text{Г}} u v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right). \quad (24)$$

Конвективний теплоперенос в газовому середовищі описується рівнянням енергії

$$\frac{\partial(c_{p,\text{Г}} \rho_{\text{Г}} u T)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{p,\text{Г}} \rho_{\text{Г}} v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{Г}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{Г}} \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (25)$$

а в склі – рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{скл}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{скл}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0. \quad (26)$$

Система рівнянь (22) - (26) доповнюється рівнянням стану газового середовища $\rho_{\text{Г}} = \rho_{\text{Г}}(p, T)$. Вона складена в системі координат, в якій горизонтальна вісь Ox спрямована від зовнішньої поверхні склопакета $x = 0$ у бік приміщення, а вісь Oy спрямована вертикально вгору. Значення $y = 0$ відповідає нижньому краю склопакета. У розглянутій задачі вплив дистанційних рамок, а також теплоперенос через торці склопакета не враховуються. Теплофізичні властивості скла приймаються постійними, а теплопровідність і в'язкість газового середовища (сухого повітря) вважаються залежними від температури по лінійному закону. Розв'язання поставленої задачі виконується при заданих значеннях температури на зовнішній поверхні зовнішнього скла $t_{\text{зовн}}$ і на зовнішній поверхні внутрішнього скла $t_{\text{внутр}}$.

Граничні умови записуються в вигляді $x = 0: T = t_{\text{зовн}}; x = B: T = t_{\text{внутр}}; t_{\text{внутр}} >$

$t_{\text{зовн}}$); $y = 0$; $H: \partial T / \partial y = 0$. На поверхнях скла всередині склопакета задаються умови четвертого роду, що враховують наявність радіаційних теплових потоків між поверхнями скла

$$-\lambda_{\text{скл}} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_{\text{Л}}-0} = -\lambda_{\text{г}} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_{\text{Л}}+0} - q_{\text{рад,Л}}; \quad -\lambda_{\text{г}} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_{\text{П}}-0} - q_{\text{рад,П}} = -\lambda_{\text{скл}} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_{\text{П}}+0},$$

де $q_{\text{рад,Л}}$ – густина радіаційного теплового потоку, що припадає на внутрішню поверхню лівої (більш холодної) поверхні газового прошарку між склом; $q_{\text{рад,П}}$ – густина радіаційного теплового потоку на правій (більш нагрітій) поверхні газового прошарку.

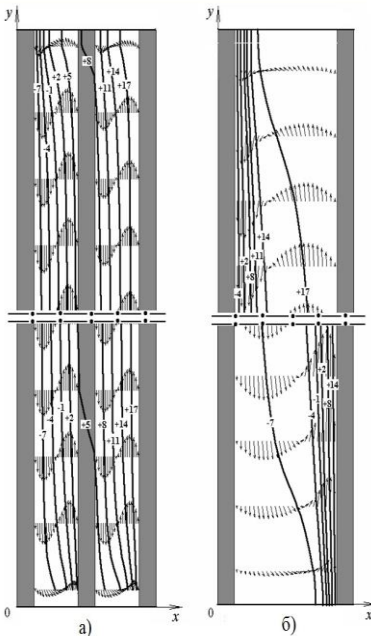


Рис. 9. Температурне поле ($^{\circ}\text{C}$) та вектори швидкості газового середовища у вертикальному перерізі склопакетів:
а – двокамерного;
б – однокамерного

Наведені результати розрахунку параметрів складного теплообміну через двокамерний склопакет висотою $H = 1,08$ м і шириною $L = 0,75$ м. Скло (кожне з трьох) має товщину $\delta_{\text{скл}} = 4$ мм. Відстані між склом $\delta_{\text{г}} = 10$ мм. Коефіцієнт теплопровідності скла $\lambda_{\text{скл}} = 0,74$ Вт/(м·К). Поглинальна здатність (ступінь чорноти) всіх поверхонь скла $\varepsilon_{\text{скл}} = 0,89$. Температура поверхні внутрішнього скла, що повернута в бік приміщення, дорівнює $t_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$, а температура зовнішньої

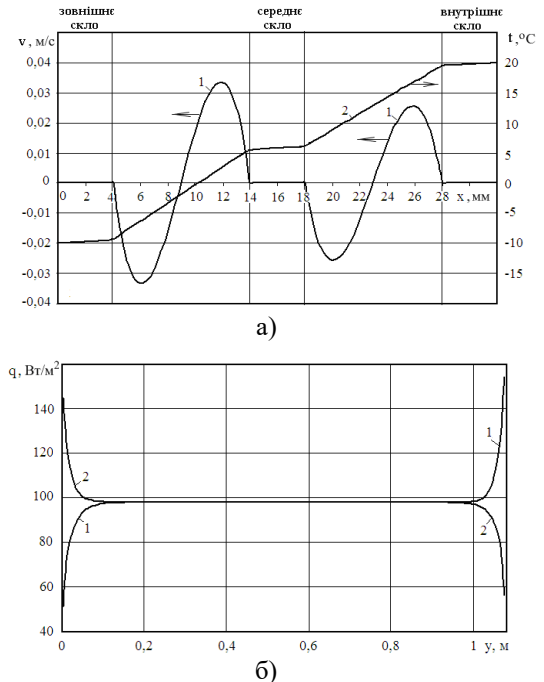


Рис. 10. Розподіл вертикальної швидкості 1 в газових прошарках і температури 2 (а) по товщині та густини теплового потоку (б) на зовнішній 1 і внутрішній 2 поверхнях двокамерного склопакета

поверхні зовнішнього скла складає $t_{\text{зовн}} = -10^{\circ}\text{C}$. Отримані, в результаті числового розв'язання задачі, поля швидкості і температури у вертикальному перерізі двокамерного склопакета представлені на рис. 9а, а в однокамерному на рис. 9б.

Розподіл вертикальної швидкості в повітряному середовищі і температури по товщині двокамерного склопакета в його середньому горизонтальному перетині наведений на рис. 10а та густини теплового потоку на рис. 10б на зовнішній і внутрішній поверхнях двокамерного склопакета.

Як видно з цих рисунків, в обох камерах склопакета відбувається підйомно-опускна вільноконвективна течія повітряного середовища. У камері, що примикає до зовнішнього скла, максимальна вертикальна швидкість складає $0,033$ м/с, а в камері, що примикає до внутрішнього скла $0,025$ м/с.

Внаслідок малості зазначених величин швидкості, конвекція в прошарках між склом двокамерного склопакета несуттєво впливає на теплоперенос. Тому розподіл температури по товщині газового прошарку близький до лінійного. Характерною особливістю такого режиму є також те, що ізотерми у вертикальному перерізі двокамерного склопакета практично паралельні (рис. 9а).

Відхилення від паралельності ізотерм спостерігається лише у верхній і нижній частинах склопакета, де відбувається розвертання потоку повітря, і напрямок течії змінюється від підйомного до опускного. Зміна температури по товщині скла є незначною ($\sim 0,4^{\circ}\text{C}$).

У розглянутому випадку сумарний тепловий потік через двокамерний склопакет становить $Q = 73,6$ Вт. При цьому на радіаційну складову припадає 59% сумарного теплового потоку в камері, що примикає до зовнішнього скла ($Q_{\text{рад}}=43,6$ Вт) і 62% – у внутрішній камері ($Q_{\text{рад}}=45,6$ Вт).

Для характеристики теплоізоляційних властивостей віконних конструкцій, зазвичай, використовується величина його термічного опору. У даному випадку для розрахунку термічного опору використовується величина, що визначається за

$$R = \frac{(t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}) \cdot H \cdot L}{Q}$$

З представлених результатів випливає, що для двокамерного склопакета зазначеної вище геометрії, термічний опір дорівнює $R = 0,33$ м²·К/Вт.

Однак, на відміну від двокамерного, в однокамерному склопакеті область, на якій значення густини теплового потоку практично постійні, в даному випадку відсутня, що може свідчити про помітний вплив природної конвекції на процес теплопереносу. Величина сумарного теплового потоку через однокамерний склопакет за аналогічних температурних умов значно перевищує величину теплового потоку через двокамерний склопакет і становить $Q = 127,5$ Вт. Хоча конвективний теплоперенос в однокамерному склопакеті виявляється більш інтенсивним, ніж в двокамерному, його частка в сумарному тепловому потоці становить лише 34% від загального теплового потоку. Радіаційний же тепловий потік складає $Q_{\text{рад}} = 84,7$ Вт (тобто 66% від сумарного теплового потоку). Термічний опір однокамерного склопакета зазначеної геометрії складає $R = 0,19$ м²·К/Вт, що є в 1,7 рази нижчим, ніж у двокамерного склопакета.

Шостий розділ присвячений комп'ютерному моделюванню в прикладному програмному пакеті Ansys 14.0 процесів складного теплообміну і аеродинаміки в квазістаціонарному режимі в повітрі приміщення площею 18 м² із низькотемпературними системами водяного та повітряного опалення [10 - 12]. На основі виконаних досліджень запропонована інженерна номограмна методика, що дозволяє визначити теплотехнічні параметри системи водяного підлогового опалення для різних значень теплового навантаження та окремих конструктивних параметрів. Окрім цього, було проведено математичне (числове) моделювання теплового режиму того ж приміщення при експлуатації корпусного повітряного теплообмінника (фанкойла) як опалювального приладу [13].

Основною метою даної частини роботи було числове дослідження теплового режиму приміщення із низькотемпературним водяним підлоговим опаленням різних конструкцій. Розрахункова модель типового приміщення (рис. 11) представляє собою паралелепіпед з розмірами 5,9 x 3,0 x 3,0 м, що складається з двох зон: повітря 3 і елементів системи підлогового опалення 4.

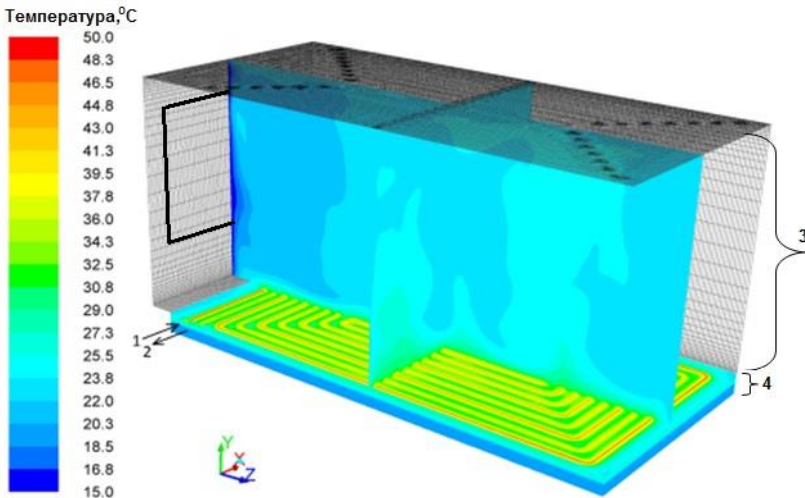


Рис. 11. Схема моделі теплового режиму приміщення із системою водяного підлогового опалення:

1 – вхід теплоносія, 2 – вихід теплоносія; 3 – повітря в приміщенні; 4 – система водяного підлогового опалення.

Система підлогового опалення складається з таких шарів: поверхневий фінішний шар (керамічна плитка) товщиною 8 мм; монолітна нагрівальна плита (панель) (бетон із домішкою пластифікатора) 50 мм, всередині якої розташований опалювальний контур у вигляді біфілярної спіралі (металопластикова труба $\varnothing 16 \times 3$ мм), теплоізоляція (екструдований пінополістирол) 50 мм, основа підлоги (бетон) 150 мм [14].

Математично змодельовані чотири різних конструкції системи підлогового опалення із кроками укладання опалювального контуру 0,125; 0,150; 0,175; 0,200 м.

Розрахунок виконаний для стаціонарного режиму роботи системи опалення. Числове моделювання проводилось при ламінарному режимі течії теплоносія (води) в трубі.

Рівняння нерозривності в загальному вигляді представляє собою залежність

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (27)$$

Рівняння збереження кількості руху

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right], \\ \rho \left(\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \right) &= -\rho g - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \\ \rho \left(\frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Рівняння збереження енергії для повітря в приміщенні і теплоносія

$$c_p \rho \left(\frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (29)$$

Рівняння теплопровідності для i -го шару системи опалення

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z_i^2} = 0. \quad (30)$$

Умова сполучення параметрів шарів підлоги $-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x}$, де $i, i + 1$ – сусідні шари. На поверхні підлоги умова сполучення параметрів $-\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_{\text{пов}} \frac{\partial T}{\partial n} + q_{\text{рад}}$, де n – нормаль до поверхні; $q_{\text{рад}}$ – радіаційний тепловий потік (за законом Стефана - Больцмана).

На поверхнях стін, стелі і в шарах підлоги приміщення задавалися граничні умови першого роду, сталі середні значення яких визначені експериментальним шляхом за допомогою пірметра Testo 845, термометрів опору TCM-205 та цифрових вторинних приладів УКТ38. На вході до опалювального контуру 1 (рис. 11) масова витрата теплоносія (води) приймалась 0,03 кг/с, а температура теплоносія $t_r = 30; 35; 40; 45; 55^\circ\text{C}$ [37].

Зміна густини повітря в приміщенні в залежності від температури визначалась за формулою $\rho = \rho_0(1 - \beta \Delta T)$ у наближенні Бусінеска - Обербека. Густина води приймалась постійною, що дорівнює $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$. Теплофізичні властивості повітря і матеріалів шарів підлоги, що застосовувались при моделюванні, відповідали таким, що використані в експериментальних дослідженнях (довідникові значення). Представлена система диференціальних рівнянь, із зазначеними граничними умовами, була розв'язана числовим способом із використанням методу

контрольного об'єму. При розв'язанні системи рівнянь (27) – (30) визначались поля значень швидкості і температури. Верифікація даної моделі проводилась за допомогою експериментальних даних, що отримані на установці в ІТТФ НАН України для кроку укладання труби 0,175 м.

Зіставлення результатів моделювання з експериментальними даними приведене на рис. 12 і 13. Як видно з графіків результати розрахунків і експериментів задовільно узгоджуються. Зниження температури поблизу поверхні підлоги спостерігається із-за природної конвекції повітря в приміщенні, що обумовлено збільшенням швидкості повітря (для наочності знехтувано причинно-наслідковим зв'язком фізичних величин, значення яких відкладені по осях графіків). Такий розподіл температури і швидкості повітря спостерігається на відстані приблизно до двох метрів від зовнішньої (холодної) стіни приміщення (рис. 11).

В шарах системи водяного підлогового опалення також отримане задовільне узгодження (рис. 13). Відмінність розрахункових і експериментальних даних не перевищує $1,0^{\circ}\text{C}$, що пояснюється загальною похибкою експерименту. На кривій 4 розрахунковий температурний максимум ($34,7^{\circ}\text{C}$) відповідає визначеній фактичній температурі теплоносія в трубі.

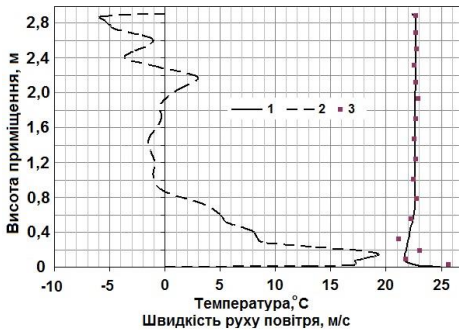


Рис. 12. Розподіли температури і швидкості по висоті приміщення: 1, 2 – розрахункові, відповідно, температура і швидкість руху повітря; 3 – експериментальні значення температури повітря

З розгляду, наведених на рис. 14, графіків можна зробити висновок, що при збільшенні кроку укладання труби в системі водяного підлогового опалення тепловий потік з поверхні підлоги до приміщення знижується незначно, проте при збільшенні температурного потенціалу теплоносія на вході до опалювального контуру теплопродуктивність підлоги суттєво збільшується.

З математичного моделювання теплового режиму приміщення із водяним підлоговим опаленням визначені середні по площі коефіцієнти тепловіддачі з поверхні підлоги, що залежать від її температури, і знаходяться в діапазоні від 3,7 до $6,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ [12].

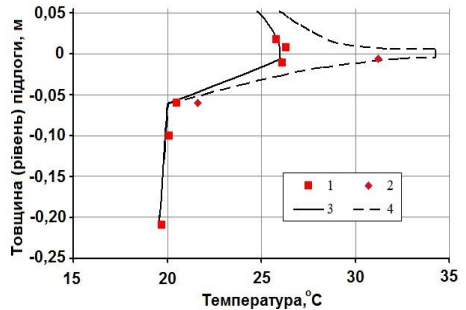


Рис. 13. Розподіл температури по товщині підлоги: 1, 2 – експериментальні значення, відповідно, посередині між трубами і по осі труби; 3, 4 – розрахункові значення, відповідно, посередині між трубами і по осі труби

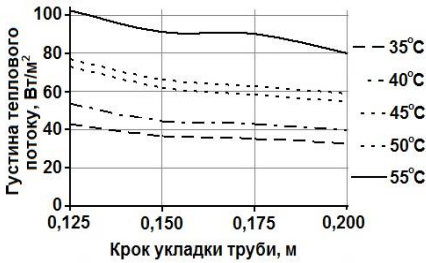


Рис. 14. Густина теплового потоку з поверхні підлоги в залежності від кроку укладання труби для різних значень температури теплоносія на вході до опалювального контуру

Якщо приміщення із низькотемпературним водяним підлоговим опаленням розглядати як теплообмінник між теплоносієм в опалювальному контурі і повітрям в приміщенні, то можна записати рівняння теплопередачі Пеклє для цієї системи

$$Q = kF \overline{\Delta t}, \quad (31)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі системи підлогового опалення, Вт/(м²·К) (враховує значну кількість чинників, що пов'язані з конструкцією підлогового опалення); F – площа поверхні теплообміну, м².

При цьому, середня різниця значень температури теплоносія та повітря (температурний напір) розраховується за формулою

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}}, \quad (32)$$

де Δt_{\max} – різниця температур води на вході в контур опалення та повітря в приміщенні; Δt_{\min} – різниця температур води на виході з контуру опалення та повітря в приміщенні, °С.

Питомий тепловий потік з поверхні підлоги, що може забезпечити система водяного підлогового опалення певної конструкції, прямопропорційний середній різниці температур теплоносія в системі та повітря в опалювальному приміщенні

$$q = k \overline{\Delta t}. \quad (33)$$

Вищенаведений коефіцієнт k враховує термічні опори трубки опалювального контуру і монолітної нагрівальної плити (панелі), в якій змонтований контур опалення, фінішного шару підлоги, шарів теплоізоляції під опалювальним контуром, а також геометричні параметри системи: крок укладання труби та її діаметр. У зв'язку з цим виникають розрахункові складнощі з аналітичним визначенням коефіцієнту теплопередачі k в системі (31) – (33).

Різна витрата теплоносія в певному діапазоні майже не впливає на зміну температури поверхні покриття підлоги. Це доводить тезу про те, що кількісне

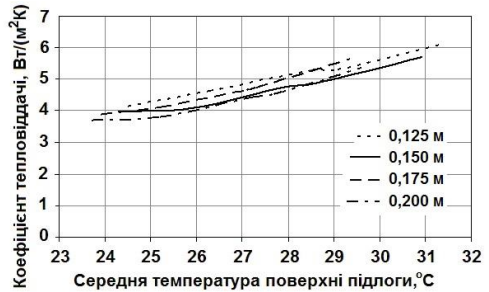


Рис. 15. Залежність середнього по площі поверхні підлоги коефіцієнта тепловіддачі від температури поверхні підлоги для різних кроків укладання труби

регулювання теплопродуктивністю низькотемпературних систем опалення недоцільне. Більш ефективним, в такому випадку, є якісне регулювання тепловим навантаженням із зміною температури теплоносія в системі [15 – 17].

Отримані результати розрахунків можна представити у вигляді номограм теплового навантаження для окремих конструкцій водяного підлогового опалення, що показані на рис. 16 і 17. Величина коефіцієнту теплопередачі k дорівнює значенню тангенса кута нахилу номограми теплового навантаження системи опалення до горизонтальної вісі абсцис.

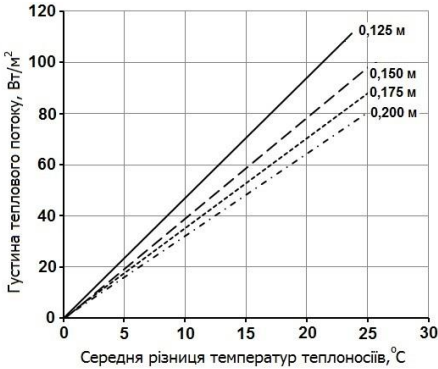


Рис. 16. Номограми теплового навантаження системи водяного підлогового опалення для різних кроків монтажу труби опалювального контуру

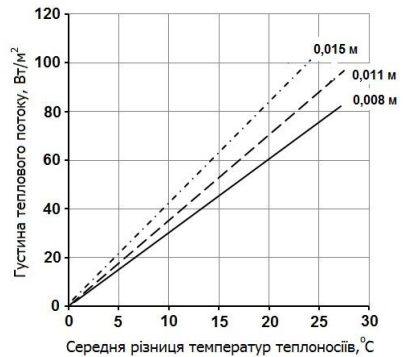


Рис. 17. Номограми теплового навантаження системи підлогового опалення для різних значень внутрішнього діаметра труби опалювального контуру

Дані номограми є основою інженерної методики розрахунку теплотехнічних параметрів низькотемпературних водяних підлогових опалювальних систем, і можуть бути покладені в основу розробки ДБН України, що регламентують використання таких технічних рішень [37].

У продовження досліджень особливостей експлуатації енергоефективних низькотемпературних систем опалення було проведено математичне (числове) моделювання теплового режиму приміщення при експлуатації фанкойла як єдиного опалювального приладу в лабораторному приміщенні площею 18 м² (рис. 18). Побудована розрахункова область представляє собою паралелепіпед із розмірами 5,9 x 3,0 x 3,0 м. Фанкойл розташований на внутрішній бічовій стіні на висоті 2,43 м до нижнього зрізу його корпусу і на відстані 0,2 м від правої бічної поверхні корпусу до зовнішньої стіни із вікном розмірами 2,40 x 1,65 м. Всі геометричні розміри побудовані у відповідності до існуючого лабораторного приміщення. На виході з фанкойла задавались: температура повітря 31,0°C і його витрата 410 м³/год (паспортне значення). Кут нахилу плоского повітряного струменя із дефлектора по відношенню до стіни становив 45°. Забирання повітря фанкойлом здійснювалось через верхню і фронтальну площини корпусу. Вентиляція в приміщенні була відсутня. В якості граничних використовувались умови першого роду, тобто

здавались постійні середні значення температури на внутрішніх поверхнях підлоги, стелі, стін і вікна, що визначались експериментально за допомогою пірометра Testo 845 (за значеннями в декількох точках вимірювань).

Моделювання квазістаціонарних процесів тепломасопереносу всередині об'єму приміщення проводилось в прикладному програмному пакеті Ansys 14.0. Математично, методом контрольного об'єму, розв'язувалась система диференціальних рівнянь, що включала рівняння нерозривності, збереження кількості руху і енергії. Для врахування турбулентності використовувались стандартна $k - \varepsilon$ модель, її ренормгрупова модифікація RNG і модель $k - \omega$, з наступним порівнянням результатів розрахунків. Тобто додатково розв'язувались ще два рівняння для кінетичної енергії k і швидкості дисипації ε специфічної ω . У розрахунках густина повітря залежала від температури згідно наближенню Буїнеска - Обербека.

Результати зіставлення розрахункових і експериментальних даних щодо розподілу температури повітря по висоті приміщення наведені на рис. 19 [13]. Експеримент тривав протягом 10 діб із відповідними до розрахункових параметрами теплоносія. Квазістаціонарність процесів теплообміну досягалась в періоди майже незмінних тепловтрат через ОК, що визначались сталими погодними умовами. В ці проміжки здійснювалось порівняння результатів розрахунку і експерименту. Використання автоматизованого вимірювального комплексу із високоточними первинними та вторинними приладами призвела до мінімальної відносної похибки вимірювання величин, що не перевищує 3,9%.

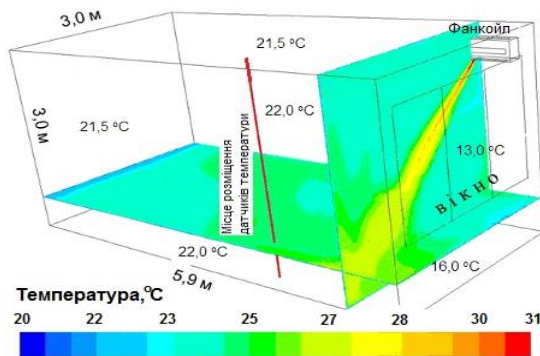


Рис. 18. Схема моделі теплового режиму приміщення із системою повітряного опалення корпусним теплообмінником (фанкойлом)

Розрахункові значення з $k - \varepsilon$ моделі найкраще узгоджуються з даними експерименту (з урахуванням похибки вимірювання температури). Отримані результати розрахунків дозволяють з достатньою, для досліджуваних процесів, точністю отримувати поля значень температури і швидкості в будь-якому місці приміщення, аналіз яких дає змогу визначити оптимальне місце розташування

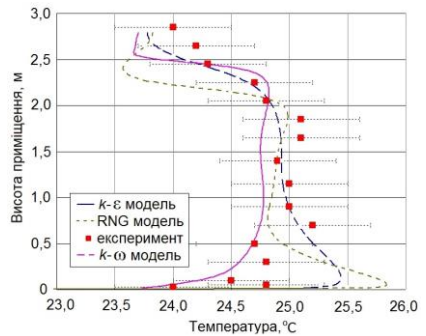


Рис. 19. Локальний розподіл температури по висоті приміщення (порівняння значень розрахунків)

фанкойла і раціональні параметри його експлуатаційних режимів для даного приміщення (кут нахилу струменя, його спрямування і швидкість руху повітря).

Сьомий розділ присвячений розробці науково-технічних положень створення енергоефективної будівлі [18 - 29]. На прикладі розробленого повномасштабного стенду експериментальної будівлі ІТТФ НАН України в 2016 р. вона була доведена до розрахункового рівня будинку пасивного типу (площа 306 м², розрахункові тепловитрати на опалення склали менше 14,8 кВт·год/(м²·рік)) (рис. 20).



Рис. 20. Загальний вигляд енергоефективного будинку після теплоізоляції ОК

Експериментальний енергоефективний будинок пасивного типу спроектований таким чином, щоб не активно (за допомогою інженерного обладнання), а пасивно (тобто за допомогою архітектурно-планувального рішення щодо оболонки будівлі та інших допоміжних об'єктів) поглинати, акумулювати і зберігати максимальну кількість теплоти (або влітку холоду) з навколишнього середовища. Тому базовим критерієм пасивного будинку є створення оболонки з підвищеною теплоізоляцією та ефективним середнім коефіцієнтом теплопровідності $< 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

При будівництві експериментального енергоефективного будинку були використані доступні вітчизняні будівельні матеріали. Кожна ОК окремого приміщення будинку складалась із власної композиції будматеріалів: керамічна дірчаста цегла, пінобетон, газобетон, ракушняк, деревина, арболіт, гіпсоблок, дірчаста цегла, керамічні блоки.

Особливості конструкції будинку: наявність цокольного поверху (заглиблення в ґрунт до 2,1 м); орієнтація за сторонами світу (з півночі на південь); односкатний дах із нахилом на південь під кутом 33°; з півночі ОК без вікон і дверей; вхід зі сходу через тамбурну прибудову; повітряний тепло(холодо)захист ділянок фасадів та даху. З урахуванням перспективного розвитку функціоналу будинку, для теплозабезпечення і кондиціонування приміщень, передбачене активне використання низькопотенційних відновлювальних джерел теплоти [33].



Рис. 21. Теплообмінники типу «ґрунт – повітря» системи повітряної завіси фасадів енергоефективного будинку

При розвитку енергоефективного будинку до рівня пасивного, тепловий комфорт досягається переважно пасивними заходами: посиленою зовнішньою ізоляцією ОК (повне утеплення всіх елементів будівлі: фундаменту, стін, даху, стиків; відсутність містків холоду, виступів, виносів не утеплених фрагментів конструкцій); використанням спеціальних (подвійних в проїмі) енергоефективних вікон із двокамерними склопакетами з низькоемісійним селективним покриттям скла (4i-8-4i-8-4) та віконних профілів із приведеним коефіцієнтом теплопровідності $< 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; рекуперацією теплоти вентиляційних викидів (система примусової охолодження в пасивному будинку може бути єдиним джерелом опалення і охолодження будівлі); використанням сонячних фотовольтаїчних панелей і теплових колекторів [30 – 32, 39, 40].

В основу способу зменшення тепловтрат (теплоприпливів), у відповідні періоди року, покладена ідея організації повітряної завіси стін шляхом вилучення теплоти ґрунту за допомогою горизонтальних трубних теплообмінників (рис. 21) неглибокого залягання в ґрунтовому масиві [36]. Така конструкція забезпечує умови для руху повітря завдяки природній конвекції за рахунок різниці значень температури (густини нагрітого і холодного повітря, сили Архімеда), рухається вгору по, організованому в тепловій ізоляції, прошарку товщиною 50 мм. Надалі повітря проходить вздовж ОК і самоплинно виходить через щілинні отвори під дахом до відкритої атмосфери. При цьому, ґрунтовий теплообмінник розташований нижче глибини сезонного промерзання ґрунту і, для уникнення втрат теплоти через поверхню ґрунту, теплоізований зверху захисним шаром пінополістиролу товщиною 100 мм. Всього були змонтовані 4 теплообмінники типу «ґрунт – повітря» на глибині 2,6 м. Всі вони виконані з полівінілхлоридної труби $\varnothing 110 \times 2,7 \text{ мм}$. 2 з них, багатолодкові з розподільчим і збиральним колекторами, і 2 однолодкові, що розміщені по периметру траншеї на, прилеглий до енергоефективного будинку, території. Слід зазначити, що вищезгадані теплообмінники мають різне технологічне призначення. Так, водночас, в холодний період року, багатолодкові підігрівають зовнішнє повітря для повітряної теплової завіси будинку, а однолодкові підігрівають повітря, що потім надходить до рекуператора системи вентиляції будинку.

Восьмий розділ містить результати порівняльного ексергетичного аналізу ефективності роботи і експлуатаційних параметрів різних систем опалення [41], а також оцінку основних техніко-економічних показників ефективності будівель на прикладі імітаційної моделі будинку з опалювальною площею 200 м^2 .

Введення до розгляду такого теплофізичного поняття як ексергія дозволяє проаналізувати ступінь термодинамічної досконалості системи або її елемента, що не вимагає розгляду експлуатаційних особливостей установки в цілому.

Результати теоретичних розрахунків ексергетичного ККД за наведеними в роботі формулами і порівняння їх із значеннями ексергетичного і енергетичного ККД, що визначені з експериментальних досліджень, виконаних на експериментальній установці в ІТТФ НАН України, представлені на рис. 22 [38]. Видно, що зменшення температури теплоносія в опалювальному приладі призводить до збільшення ексергетичного ККД.

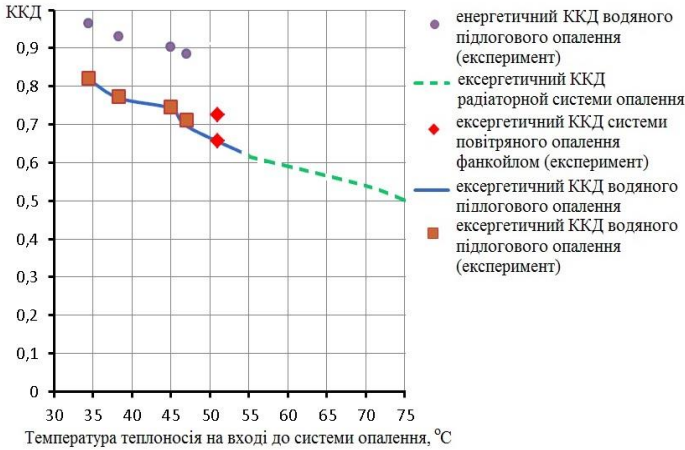


Рис. 22. Порівняння розрахункових і експериментальних значень ексергетичного і енергетичного ККД різних систем опалення

Директива 2010/31/EU передбачає, що мінімальні вимоги до енергетичних характеристик будівель встановлені при досягненні економічно оптимальних рівнів для будівель, будівельних виробів і елементів. Основною характеристикою, що визначає економічно оптимальний рівень енергетичної ефективності є витрата первинної енергії. Враховуючи весь життєвий цикл будівлі, експлуатаційні витрати енергії є вищими, ніж витрати на будівництво і модернізацію.

Для визначення оптимальних енергетичних та економічних показників на першому етапі в якості імітаційної моделі дослідження вибраній типовий індивідуальний житловий будинок. Зниження споживання енергії будівлі тісно пов'язане з теплоізоляцією зовнішніх ОК і застосуванням сучасних технологічних установок. Для аналізу вибрано три типи будинків: стандартний, термомодернізований та енергоефективний із відповідними характеристиками ОК.

Потреба в первинній енергії, в залежності від типу палива і способу вентиляції для будинків, що характеризуються різними параметрами зовнішніх ОК, показана на рис. 23.

Графічний аналіз впливу змінних факторів на величину експлуатаційних витрат будинків з використанням механічної рекуперативної вентиляції показано на рис. 24. Звідси видно, що мінімальні значення експлуатаційних витрат досягаються для енергоефективного будинку з величиною первинної енергії на рівні 40...45 кВт·год/(м²·рік). В той же час, при переході до пасивного будинку, спостерігається зростання експлуатаційних витрат на 30%.

Економічна ефективність впровадження енергоощадних технічних та інженерно-конструктивних рішень залежить від потреби енергії на опалення будинку, величини вкладених інвестицій, а також в значній мірі від вартості енергоносіїв.

Тобто, важливим є те, що використання низькотемпературних опалювальних систем (в т.ч. систем водяного підлогового опалення) зменшує ексергетичні втрати при передачі теплоти від теплоносія до об'єму опалювального приміщення, що підтверджує ефективність створення належного теплового режиму останнього.

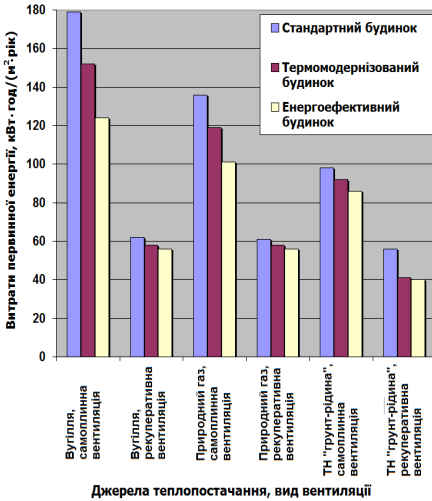


Рис. 23. Енергетичні характеристики умовних індивідуальних будинків із використанням самоплинної та рекупративної вентиляції і різних видів палива

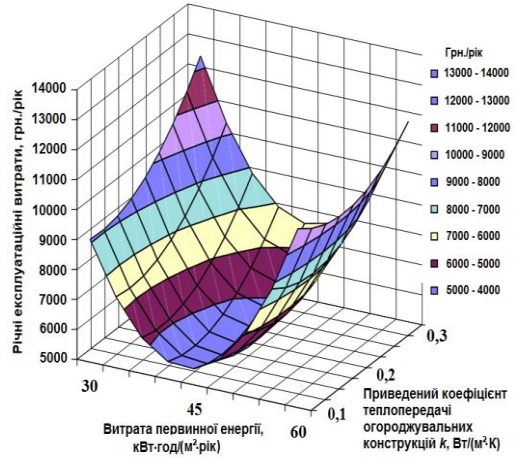


Рис. 24. Значення експлуатаційних витрат будинків з рекупративною вентиляцією в залежності від теплотехнічних параметрів непрозорих ОК та витрати первинної енергії

ВИСНОВКИ

1. В дисертаційній роботі розв'язана важлива науково-прикладна проблема підвищення енергетичної ефективності будівель на стадіях проектування і будівництва нових, а також термомодернізації існуючих, що включає в себе поєднання архітектурних прийомів в рамках будівельної теплофізики із технологічними аспектами сучасних систем теплозабезпечення. Такий, концептуальний підхід, є актуальним та затребуваним в умовах існуючого енергодефіциту в країні, а також стрімкого розвитку технологій кліматизації приміщень.

2. Нарощування товщини теплоізоляції ОК має екстенсивні можливості, обмеження яких можуть бути обумовлені техніко-економічними факторами. Урахування впливу інсоляції в створеній математичній моделі нестационарних процесів теплообміну внутрішнього повітря через багат шарову ОК будівлі з оточуючим середовищем є суттєвим уточнюючим внеском в кількісну оцінку величини тепловтрат приміщень.

В кліматичних умовах місцевості м. Києва розрахункові річні тепловтрати через ОК із урахуванням теплової дії сонячної радіації будуть менше приблизно в 1,37 рази для південно орієнтованої вертикальної стіни будівлі та в 1,16 рази при її північній орієнтації.

3. В якості конкретної інтерпретації вичерпної вищенаведеної тези наводяться результати чисельних розрахунків, що показують економічно обґрунтовану можливість використання теплоти інсоляції в холодний період року для активного підвищення ефективного термічного опору ОК із застосуванням теплонасосних технологій.

Запропоноване використання активного теплового бар'єру з водяним контуром у складі ОК та реверсивного ТН. Таке технічне рішення надає можливість вилучити профіцитну теплоту інсоляції в теплий період року, закумулявати її в ґрунтовому масиві та використати в холодний період для часткової компенсації теплових втрат будівлі або спрямувати її до системи водяного підлогового опалення.

4. Оскільки основна частина тепловтрат приміщень припадає на світлопрозорі конструкції, величина їх приведеного термічного опору відіграє суттєве значення у енергоефективності будівлі в цілому.

При цьому, величина сумарного теплового потоку через однокамерний склопакет значно перевищує величину теплового потоку через двокамерний склопакет за аналогічних температурних умов. Хоча конвективна складова теплообміну в однокамерному склопакеті виявляється більшою, ніж в двокамерному, її частка в сумарному тепловому потоці становить лише 34% від загального теплового потоку. Радіаційний же тепловий потік складає понад 66% від сумарного теплового потоку. Термічний опір однокамерного склопакета зазначеної геометрії є майже в 1,7 рази нижчим, ніж у двокамерного склопакета.

5. 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 методика 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.

6. В ході роботи були розроблені основні положення щодо створення енергоефективного будинку, що пройшли апробацію в реалізованому проєкті Інституту технічної теплофізики НАН України при спорудженні будинку «пасивного» типу із розрахунковим рівнем енергетичних витрат менше 15 кВт·год/(м²·рік).

Розроблена та впроваджена комбінована (як за джерелами низькопотенційної теплоти, так і за опалювальними приладами) теплонасосна система теплопостачання енергоефективного будинку. У ході проведення експериментальних досліджень відокремленої та спільної роботи різних за конструктивним виконанням (в т.ч. вмонтованих в будівельні конструкції) низькотемпературних опалювальних систем експериментально доведена їх висока ефективність при створенні відповідних комфортних санітарно-гігієнічних умов в приміщенні.

Розрахункове значення сезонного коефіцієнту перетворення ТН типу «грунт – рідина» в режимі його постійного повного навантаження, виходячи з балансу кількості переданої теплоти, склало COP = 3,62.

7. Виконаний порівняльний ексергетичний аналіз ефективності роботи і експлуатаційних параметрів різних систем опалення дозволяє стверджувати, що, в загальному випадку, використання низькотемпературних систем опалення (особливо водяного підлогового, що має найбільше значення ексергетичного коефіцієнту корисної дії) значно зменшує ексергетичні втрати при транспортуванні та передаванні теплоти від теплоносія до опалювального приміщення. Але такі технічні рішення є доцільними лише у випадку зменшення внутрішніх ексергетичних втрат в джерелі корисної теплоти.

8. 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 теплопостачання на основі електродкотлів з підлоговим опаленням.

Наразі мінімальні значення експлуатаційних витрат досягаються для термомодернізованого будинку з механічною рекуперативною вентиляцією при величині первинної енергії на рівні понад 40 кВт·год/(м² рік).

9. Результати роботи впроваджені в робочих проектах: ТОВ "Завод енергообладнання "ДАН" (м. Київ), ТОВ "Центр водоочищення" (м. Київ), СВПП «Факел» (м. Сміла), ТОВ «Компанія ВДЕ» (м. Бровари), ТОВ «Досконалий будинок» (м. Чернігів).

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується 5 патентами України на корисну модель, що одержані здобувачем у складі авторського колективу.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ІНДЕКСИ

a – коефіцієнт температуропровідності, м/с²; c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); d – діаметр, м; e – енергія, Дж; F – площа, м²; функція; g – прискорення вільного падіння, м/с²; h – висота, м; k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); L, l – довжина, м; n – кількість, шт.; p – тиск, Па; Q – тепловий потік, Вт; q – густина теплового потоку, Вт/м²; T, t – температура, К, °С; u, v, w – складові швидкості теплоносія, відповідно по x, y, z , м/с; x, y, z – координати декартової системи, м; α –

коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); β – кут, град.; коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹; δ – товщина, м; λ – теплопровідність, Вт/(м·К); μ – динамічна в'язкість, Па·с; ν – кінематична в'язкість, м²/с; ρ – щільність, кг/м³; ε – значення приведеної результуючої ступені чорноти поверхонь; холодильний коефіцієнт; Bi – число Біо; Fo – число Фур'є; K_i – число Кирпичова; vn – внутрішня; $zovn$ – зовнішня; iz – ізоляція; p – підлога; $conv$ – конвективний; rad – радіаційний; ККД – коефіцієнт корисної дії; ОК – огорожувальна конструкція; ТБ – тепловий бар'єр; ТН – тепловий насос; Ц – вартість; COP – коефіцієнт перетворення теплового насосу; RNG – ренормгрупова модель турбулентності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Недбайло А.Н. Особенности теплопередачи через многослойную ограждающую конструкцию в нестационарном режиме. *Керамика: наука и жизнь*. №1(22). 2014. С. 4 – 9.

(Наукове фахове видання України, CrossRef, Research Bible, Scientific Indexing Services, Journal Factor, Eurasian Scientific Journal Index, General Impact Factor, World Catalogue of Scientific Journals, Google Scholar, Cosmos Impact Factor)

(Особистий внесок автора полягає у обґрунтуванні положень для задавання граничних умов в математичній моделі процесів нестационарної теплопровідності в огорожувальній конструкції)

2. Недбайло А.Н., Калинина М.Ф., Божко И.К., Новицкая М.П., Гончарук С.М., Кужель Л.Н., Лысенко О.Н. Математическая модель нестационарного процесса теплопереноса в многослойной ограждающей конструкции. *Керамика: наука и жизнь*. №2(23). 2014. С. 14 – 29.

(Наукове фахове видання України, CrossRef, Research Bible, Scientific Indexing Services, Journal Factor, Eurasian Scientific Journal Index, General Impact Factor, World Catalogue of Scientific Journals, Google Scholar, Cosmos Impact Factor)

(Особистий внесок автора полягає у опрацюванні граничних умов, що характеризують вплив теплової дії інсоляції на зовнішню поверхню огорожувальної конструкції)

3. Опекунов В.В., Рева В.И., Ободович А.Н., Недбайло А.Н. Теплоизоляционные и стеновые материалы для энергоэффективного строительства. *Керамика: наука и жизнь*. 2011. № 4(14). С. 8 – 11.

(Наукове фахове видання України, CrossRef, Research Bible, Scientific Indexing Services, Journal Factor, Eurasian Scientific Journal Index, General Impact Factor, World Catalogue of Scientific Journals, Google Scholar, Cosmos Impact Factor)

(Особистий внесок автора полягає у формулюванні заключних положень щодо сфери використання теплоізоляційних стінових матеріалів)

4. Соломаха Є.С., Новаківський Є.В., Недбайло О.М. Метод розрахунку теплового бар'єра для потреб тепло- та холодопостачання. *Пром. теплотехника*. 2014. Т. 36. №3. С. 89 – 93.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у внесенні додаткових складових до балансових співвідношень, що описують енергетичну складову теплообміну в огорожувальній конструкції)

5. Соломаха Є.С., Новаківський Є.В., Недбайло О.М. Розподіл температури в стіні з тепловим бар'єром. Холодильна техніка та технологія. №5(151). 2014. С. 37 – 42. DOI: 10.15673/0453-8307.5/2014.28702

(Наукове фахове видання України, CrossRef, Research Bible, EBSCOhost, EBSCO, Google Scholar, Ulrich's, WorldCat, ROAD, Open Academic Journals Index, Bielefeld Academic Search Engine)

(Особистий внесок автора полягає у формулюванні прикінцевих положень щодо можливості впровадження даних технічних рішень із використанням активного теплового бар'єру)

6. Накорчевский А.И., Недбайло А.Н. Теплопередача через многослойные оконные стеклопакеты с учетом действия солнечной радиации. Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86. №6. С. 1282 – 1287. DOI: 10.1007/s10891-013-0961-5

(SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Compendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest)

(Особистий внесок автора полягає у формулюванні заключних висновків щодо імплементації результатів роботи в прикладному використанні в складі світлопрозорих огорожувальних конструкцій)

7. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Новицкая М.П., Гончарук С.М., Недбайло А.Н. Влияние толщины газовой прослойки на термическое сопротивление однокамерного стеклопакета. Пром. теплотехника. 2012. Т. 34. №1. С. 100 – 108.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у формулюванні рекомендацій щодо практичного використання зазначених склопакетів у світлопрозорих віконних конструкціях)

8. Баштовой А.А., Багрийчук А.С., Недбайло О.М. Методика определения термического сопротивления строительных стеклопакетов. Пром. теплотехника. 2013. Т. 36. №2. С. 51 – 55.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у обґрунтуванні методики проведення експериментальних досліджень та обробці отриманих експериментальних даних)

9. Накорчевский А.И., Недбайло А.Н. Влияние климатических факторов на теплопередачу через вентилируемые двухкамерные окна. Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. №3. С. 690 – 696. DOI: 10.1007/s10891-015-1241-3

(SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Compendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest)

(Особистий внесок автора полягає у проведенні аналізу впливу швидкості руху повітря у вентильованому прошарку склопакету на інтенсивність конвективного теплообміну в конструкції)

10. Ткаченко М.В., Лунина А.А., Недбайло А.Н. Экспериментальная

низкотемпературная водяная система отопления типа «теплый пол». Пром. теплотехника. 2009. Т. 31. №7. С. 81 – 84.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у аналізі, отриманих в ході роботи, експериментальних даних)

11. Басок Б.І., Недбайло О.М., Новіцька М.П., Ткаченко М.В. Моделирование теплового стану приміщення з системою водяного підлогового опалення. Пром. теплотехника. 2012. Т. 34. №7. С. 65 – 73.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у зіставленні експериментальних даних із результатами комп'ютерного моделювання та формулюванні загальних висновків щодо цього)

12. Басок Б.И., Недбайло А.Н., Новицкая М.П., Ткаченко М.В., Гончарук С.М. Численное моделирование теплообмена между теплоносителем и воздухом в помещении при напольном отоплении. Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86. №2. С. 394 – 399. DOI: 10.1007/s10891-013-0850-y

(SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Compendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest)

(Особистий внесок автора полягає у зіставленні експериментальних даних із результатами комп'ютерного моделювання та формулюванні загальних висновків щодо доцільності використання певної моделі турбулентності для розрахунку основних теплових параметрів об'єкта)

13. Ткаченко М.В., Новіцька М.П., Недбайло О.М., Божко І.К. Квазістаціонарний тепловий режим приміщення при низькотемпературному повітряному опаленні фанкойлом. Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. 2013. Випуск 77. С. 338 – 342.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у формулюванні наукових положень щодо створення належного теплового режиму при повітряному опаленні об'єкта)

14. Долинский А.А., Басок Б.И., Накорчевский А.И., Недбайло А.Н. и др. Научно-технический центр теплонасосных технологий ИТТФ НАН Украины. Пром. теплотехника. 2011. Т. 33. № 7. С. 89 – 91.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у описанні параметрів експериментальної установки із ґрунтовим колектором і системою водяного підлогового опалення)

15. Басок Б.І., Беляєва Т.Г., Коба А.Р., Ткаченко М.В., Недбайло О.М. та інш. Комплексна модернізація типової системи теплопостачання будівлі на основі використання теплового насосу типу «повітря-вода». Пром. теплотехника. 2009. Т. 31. №7. С. 19 – 21.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у аналізі енергетичної ефективності впровадженого технічного рішення)

16. Недбайло О.М. Використання теплового насосу типу «повітря-рідина» в

існуючій централізованій системі опалення. Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2010. №2(20). С. 32 – 36.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у розробці гідравлічної схеми та підбиранні енергетичного устаткування для її комплектації)

17. Басок Б.І., Недбайло О.М., Ткаченко М.В., Божко І.К., Лисенко О.М., Луїна А.О. Модернізація системи опалення будівлі з використанням теплового насоса типу «повітря-рідина». Пром. теплотехника. 2015. Т. 37. №5. С. 68 – 74. DOI:10.31472/ihe.5.2015.08

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у опрацюванні окремих експлуатаційних режимів роботи системи опалення)

18. Долінський А.А., Басок Б.І., Недбайло О.М., Беляєва Т.Г., Хибина М.А., Ткаченко М.В., Новіцька М.П. Концептуальні основи створення експериментального будинку типу «нуль енергії». Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. 2013. Випуск 77. С. 222 – 227.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у описанні технічних способів мінімізації теплових втрат в холодний період року)

19. Опекунов В.В., Ободович О.М., Недбайло О.М. Вирішення задач ресурсозбереження в будівництві шляхом використання якісних виробів із пористих бетонів. Керамика: наука и жизнь. 2010. № 2(8). С. 45 – 57.

(Наукове фахове видання України, CrossRef, Research Bible, Scientific Indexing Services, Journal Factor, Eurasian Scientific Journal Index, General Impact Factor, World Catalogue of Scientific Journals, Google Scholar, Cosmos Impact Factor)

(Особистий внесок автора полягає у формулюванні висновків щодо ефективності впровадження запропонованих технологій)

20. Божко І.К., Калинина М.Ф., Гончарук С.М., Недбайло А.Н. Теплофизическая лаборатория для исследования особенностей энергоэффективности зданий. Керамика: наука и жизнь. №3(24). 2014. С. 74 – 83.

(Наукове фахове видання України, CrossRef, Research Bible, Scientific Indexing Services, Journal Factor, Eurasian Scientific Journal Index, General Impact Factor, World Catalogue of Scientific Journals, Google Scholar, Cosmos Impact Factor)

(Особистий внесок автора полягає у висвітленні механізмів теплової взаємодії оболонки будівлі із довкіллям)

21. Басок Б.И., Недбайло А.Н., Божко И.К., Ткаченко М.В. Технические аспекты системы энергообеспечения пассивного дома. Энергоэффективность в строительстве та архітектурі. 2016. Випуск 8. С. 3 – 9.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у обґрунтуванні пропозицій використання певного енергетичного обладнання у складі системи теплозабезпечення об'єкта)

22. Басок Б.І., Недбайло О.М., Ткаченко М.В., Божко І.К., Новіцька М.П. Схемні рішення оснащення енергоефективного будинку системою теплозабезпечення. Пром. теплотехника. 2013. Т. 35. №1. С. 50 – 56.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у обґрунтуванні доцільності використанні окремих схемотехнічних рішень)

23. Божко І.К., Недбайло А.Н., Ткаченко М.В., Засецкий І.Г. Комбинированная система теплоснабжения высокоэнергоэффективного дома. Энергоэффективность в строительстве та архітектурі. 2014. Випуск 6. С. 14 – 22.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у визначенні внеску в підвищення загальної енергоефективності будинку системи водяного підлогового опалення окремих приміщень)

24. Божко І.К., Недбайло А.Н., Ткаченко М.В. Поливалентная система теплообеспечения пассивного дома. Энергоэффективность в строительстве та архітектурі. 2015. Випуск 7. С. 22 – 29.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у визначенні окремих заходів задля переходу від стандарту енергоефективного будинку до пасивного)

25. Басок Б.И., Божко І.К., Недбайло А.Н., Лысенко О.Н. Поливалентная система теплообеспечения пассивного дома на основе возобновляемых источников энергии. Инженерно-строительный журнал. №6. 2015. С. 32 – 43. DOI: 10.5862/MCE.58.4

(SCOPUS, CrossRef, Ei-Compendex, EBSCO, Google Scholar, Index Copernicus, ProQuest, Russian Science Citation Index, Thomson Reuters, Ulrich's Serials Analysis System)

(Особистий внесок автора полягає у визначенні внеску в підвищення загальної енергоефективності будинку системи водяного підлогового опалення окремих приміщень, а також опрацюванні її експлуатаційних параметрів)

26. Недбайло А.Н., Ляшенко Н.Е. Использование солнечного коллектора для отопления помещения. Пром. теплотехника. 2010. Т. 32. №5. С. 66 – 70.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у розробці гідравлічної схеми системи опалення типового приміщення із використанням сонячного колектора)

27. Басок Б.И., Коба А.Р., Беляева Т.Г., Недбайло О.М. та інші. Створення ґрунтових водо-водяних теплообмінників для теплонасосних технологій тепlopостачання приміщень. Наука та інновації. 2012. Т. 8. №1. С. 67 – 76. DOI: 10.15407/scin8.01.067

(Наукове фахове видання України, Ulrich's Serials, DOAJ, CrossRef)

(Особистий внесок автора полягає у опрацюванні теплотехнічних параметрів водо-водяного теплообмінника у колодязі)

28. Б.І. Басок, І.К. Божко, Т.Г. Беляева, С.М. Гончарук, О.М. Недбайло, М.П. Новицька, М.В. Ткаченко, М.А. Хибина. Поливалентна система теплозабезпечення експериментального будинку пасивного типу (площею 300 м²) на основі використання відновлюваних та альтернативних джерел енергії. Наука та інновації. 2014. Т.10. №6. С. 34 - 52. DOI: 10.15407/scin10.06.034

(Наукове фахове видання України, Ulrich's Serials, DOAJ, CrossRef)

(Особистий внесок здобувача полягає у розробці схемних рішень полівалентної системи теплозабезпечення експериментального пасивного будинку)

29. Недбайло О.М., Божко І.К. Аналіз енергетичних параметрів роботи системи теплопостачання енергоефективного будинку. Енергоефективність в будівництві та архітектурі. 2017. Випуск 9. С. 179 – 182.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у розрахунку значення середньосезонного коефіцієнта перетворення теплового насосу на основі вихідних експериментальних даних)

30. Ляшенко Н.Е., Недбайло А.Н., Рутенко А.А. Анализ экономической эффективности работы комбинированной гелиогрунтовой аккумуляционной системы теплоснабжения. Пром. теплотехника. 2011. Т. 33. №4. С. 82 – 86.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у заданні вихідних параметрів роботи системи, що характеризують витрати первинної енергії)

31. Басок Б.И., Недбайло О.М., Ряснова Е.В., Божко І.К. Анализ мирового рынка комбинированных гелиотеплонасосных систем. Пром. теплотехника. 2014. Т. 36. №1. С. 32 – 40.

(Наукове фахове видання України)

(Особистий внесок автора полягає у аналізі ринкових пропозицій теплових насосів типу «грунт-рідина»)

32. Басок Б.И., Бородуля В.А., Недбайло А.Н. Особенности использования теплонасосных технологий в системах теплоснабжения административных зданий. Энергоэффективность. №3. 2014. С. 18 – 23.

(Наукове видання, Республіка Беларусь)

(Особистий внесок автора полягає у описанні наявних схемотехнічних рішень опалення адміністративної будівлі на основі відновлювальних джерел енергії)

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

33. Басок Б.И., Недбайло А.Н., Накорчевский А.И. и др. Научно-технический центр теплонасосных технологий ИГТФ НАН Украины. Тезисы докладов XVII Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники». Киев. 2011. С. 89 - 90. Усна доповідь.

(Особистий внесок автора полягає у описанні параметрів експериментальної установки із ґрунтовим колектором і системою водяного підлогового опалення)

34. Недбайло А.Н., Ляшенко Н.Е. Использование солнечного коллектора для отопления помещения. Тезисы докладов XVII Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники». Київ. 2011. С. 84 - 85. Усна доповідь.

(Особистий внесок автора полягає у описанні параметрів системи теплозабезпечення)

35. Басок Б.И., Недбайло О.М., Божко І.К., Ткаченко М.В. Система опалення на основі теплового насоса та горизонтального ґрунтового колектора. Збірник праць XVI Всеукраїнської конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології». Київ. 2016. С. 4 – 6. Усна доповідь.

(Особистий внесок автора полягає у описанні параметрів системи теплозабезпечення та її основних елементів)

36. Басок Б.И., Недбайло О.М., Божко І.К., Ткаченко М.В. Система

енергозабезпечення пасивного будинку. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Київ. 2016. С. 222 – 225. Усна доповідь.

(Особистий внесок автора полягає у описанні окремих параметрів системи теплозабезпечення, а саме системи водяного підлогового опалення)

37. Недбайло А.Н., Ткаченко М.В., Нежута В.П., Новицкая М.П. Исследование теплообменных процессов в низкотемпературной водяной системе отопления типа «теплый пол». Тезисы докладов XVII международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники». Киев. 2011. С. 94 – 95. Усна доповідь.

(Особистий внесок автора полягає у описанні параметрів складного теплообміну у шарах системи водяного підлогового опалення в окремих теплових режимах)

38. Недбайло А.Н., Ткаченко М.В. Высокоэффективные низкотемпературные теплонасосные системы теплоснабжения. Сборник тезисов международной конференции «Украина – Россия – Сколково». Киев. 2013. С. 62 – 64. Усна доповідь.

(Особистий внесок автора полягає у формулюванні положень, що характеризують енергетичну ефективність низькотемпературних систем опалення)

39. Басок Б.И., Недбайло А.Н., Хибина М.А., Беляева Т.Г. Дом «ноль энергии» на основе использования альтернативных и возобновляемых источников энергии. Сборник тезисов международной конференции «Украина – Россия – Сколково». Киев. 2013. С. 99 – 100. Усна доповідь.

(Особистий внесок автора полягає у розробленні наукових положень мінімізації теплових втрат енергоефективної будівлі)

40. Basok B., Nedbailo A., Novitska M., Khibina M., Goncharuk S. Creating of experimental passive house in the Institute of engineering Thermophysics. Proceedings of 8-th International Green Energy Conference. Monograph. NAU. Kyiv. 2013. P. 234 – 237. Усна доповідь.

(Особистий внесок автора полягає у описанні теплової взаємодії оболонки будинку із довкіллям)

41. Ряснова Е.В., Недбайло А.Н. Эксергетический метод оценки эффективности теплонасосных систем. Тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2014. С. 56. Усна доповідь.

(Особистий внесок автора полягає у заключному аналізі та зіставленні значень ексергетичного коефіцієнта корисної дії окремих систем теплопостачання)

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

42. Патент на корисну модель № 55181. (UA) Україна, МПК (2006.01), F24J 2/42. Установка для автономного опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання. Басок Б.І., Луніна А.О., Авраменко А.О., Беляева Т.Г., Тесля А.І., Нежута В.П., Недбайло О.М., Ткаченко М.В., опубл. 10.12.2010, бюл. №23.

(Особистий внесок автора полягає у розробленні елементів гідравлічної схеми системи опалення)

43. Патент на корисну модель № 68592. (UA) Україна, МПК (2006.01), F24J 2/42.

Акумуляційна геліогрунтова теплонасосна система теплопостачання. Долінський А.А., Басок Б.І., Недбайло О.М., Ляшенко Н.Є., Ткаченко М.В., опубл. 26.03.2012, бюл. №6.

(Особистий внесок автора полягає у розробленні гідравлічної схеми технічного рішення)

44. Патент на корисну модель № 82399. (UA) Україна, МПК (2013.01), F24D 3/00, F24J 3/00. Система теплопостачання будинку на основі геліоустановки та теплового насоса Басок Б.І., Недбайло О.М., Ткаченко М.В., Божко І.К., опубл. 25.07.2013, бюл. №14.

(Особистий внесок автора полягає у опрацюванні параметрів контуру теплового насоса гідравлічної схеми системи)

45. Патент на корисну модель № 88791. (UA) Україна, МПК (2014.01) F24F 1/00. Спосіб забезпечення повітряно-теплової завіси теплотою ґрунту. Басок Б.І., Кужель Л.М., Божко І.К., Недбайло О.М., Ткаченко М.В., Гончарук С.М., опубл. 25.03.2014, бюл. №6.

(Особистий внесок автора полягає у визначенні напірно-витратних характеристик ґрунтових теплообмінників)

46. Патент на корисну модель № 104468. (UA) Україна, МПК (2016.01), F24D 3/14, F28D 15/04. Теплообмінник типу капілярна тепла підлога. Долінський А.А., Басок Б.І., Недбайло О.М., Божко І.К., Ткаченко М.В., Засецький І.Г., опубл. 10.02.2016 р., бюл. №3.

(Особистий внесок автора полягає у визначенні оптимального діаметра трубки системи)

АНОТАЦІЯ

Недбайло О.М. Теплофізичні аспекти підвищення ефективності будівлі при використанні низькотемпературних систем її теплозабезпечення та термомодернізації огорожувальних конструкцій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика (144 - Теплоенергетика). – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена розв'язанню науково-прикладної проблеми підвищення енергетичної ефективності будівель шляхом впровадження теоретично та експериментально обґрунтованих новітніх технічних рішень в огорожувальних конструкціях будівлі та комбінованих низькотемпературних системах теплозабезпечення.

На основі числових розрахунків за математичною моделлю процесів нестационарного складного теплообміну з урахуванням впливу цілорічної інсоляції на оболонку будівлі були визначені теплові характеристики різноваріантних огорожувальних конструкцій та оцінена радіаційна енергетична складова їхньої взаємодії з довкіллям. В результаті виконаних розрахунків за розробленою інженерною методикою визначення параметрів системи активного теплового бар'єру огорожувальної конструкції вперше оцінені енергетичні показники його

експлуатації з тепловим насосом в холодний та теплий періоди року. За допомогою числового моделювання при сумісному розв'язанні рівнянь теплопереносу і відповідних граничних умов в стаціонарному режимі, визначені значення конвективної і радіаційної складових теплообміну через типові світлопрозорі конструкції з одно- та двокамерним склопакетами, а також значення їхнього термічного опору. Окрім цього розраховані параметри процесів теплообміну та аеродинаміки повітря в типовому приміщенні з системою низькотемпературного водяного підлогового, також повітряного опалення в квазістаціонарному тепловому режимі на основі тривимірної математичної моделі в програмному пакеті Ansys 14.0. Проведений порівняльний аналіз ексергетичної ефективності експлуатації низькотемпературних і традиційних систем енергоефективного будинку із різними опалювальними приладами.

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 комбінованої системи теплозабезпечення на основі залучення відновлювальних джерел енергії (теплоти ґрунту, інсоляції тощо). В результаті проведення техніко-економічного аналізу ефективності впровадження і експлуатації низькотемпературних систем із використанням теплового насосу, в порівнянні з іншими системами опалення для підтримання належного теплового режиму приміщення, оцінені основні економічні показники таких технічних рішень. Розраховані характерні експлуатаційні витрати типових будинків в залежності від джерела теплопостачання, теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій та витрати первинної енергії.

Ключові слова: огорожувальна конструкція, низькотемпературна система опалення, водяне підлогове опалення, енергоефективна будівля, система теплозабезпечення.

SUMMARY

Nedbailo O.M. Thermophysical aspects of increasing the efficiency of the building with use of low-temperature heating systems and thermo-modernization of fencing structures. – Manuscript.

The dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in the specialty 05.14.06 - technical thermophysics and industrial heat engineering (144 - thermal power engineering). - Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to solving the problem of increasing the energy efficiency of buildings by introducing scientifically grounded newest technical solutions in fencing constructions of a building and combined low-temperature heat supply systems.

On the basis of numerical calculations on the mathematical model of processes of non-stationary composite heat transfer taking into account the influence of year-round insolation on the shell of the building, thermal characteristics of the different-variant fencing structures were determined and the radiation energy component of their interaction with the environment was estimated. As a result of the calculations performed for the developed engineering methodology for determining the parameters of the thermal and thermal supply system of the thermal barrier fencing structures, for the first time, energy indicators of its operation with a heat pump in cold and warm periods of the year were estimated. Using numerical simulation with the consistent solution of heat transfer equations and corresponding boundary conditions in stationary mode, the values of the convective and radiation components of heat transfer through the typical translucent structures with single- and double-chamber windows are determined, as well as the value of their thermal resistance. In addition, the parameters of the heat transfer and aerodynamics of air in the typical room with the system of low-temperature water floor, as well as air heating in the quasi-stationary thermal regime based on the three-dimensional mathematical model in the Ansys 14.0 software package are calculated. A comparative analysis of exergic efficiency of operation of low-temperature and traditional systems of energy efficient houses with different heating devices is carried out.

On the basis of the conducted complex researches, an engineering nomogram method for determining the heat engineering parameters of the water floor heating system, which is capable of providing the thermal regime of the premises in accordance with sanitary and hygienic requirements, has been developed. The scientific and technical provisions of building an energy efficient building with the use of a number of heat engineering solutions are grounded, among which is the use of soil heat exchangers with an air heat curtain of the facades of the building and a combined heat supply system based on the use of renewable energy sources (soil heat, insolation, etc.). As a result of the feasibility study of the implementation and operation of low-temperature systems with the use of a heat pump, in comparison with other heating systems to maintain the proper heating conditions of the premises, the main economic indicators of such technical solutions are estimated. The typical operating costs of typical buildings are calculated, depending on the source of heat supply, the heat engineering parameters of the fencing structures and the costs of primary energy.

Key words: fencing structure, low temperature heating system, water floor heating, energy efficient building, heat supply system.