

ВІДГУК

офіційного опонента,

чл. - кор. НАН України, доктора технічних наук, професора

Резцова Віктора Федоровича

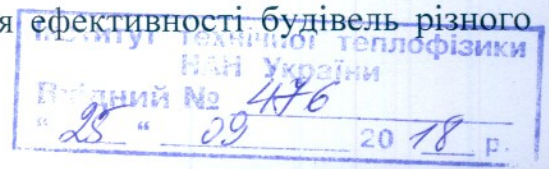
на дисертаційну роботу кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Недбайла Олександра Миколайовича "Теплофізичні аспекти підвищення ефективності будівлі при використанні низькотемпературних систем її теплозабезпечення та термомодернізації огорожувальних конструкцій", що подана до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Теплоізоляційна спроможність огорожувальних і світлопрозорих конструкцій переважної більшості вітчизняних будівель, що експлуатуються понад 50 років, є такою, що не відповідає сучасним вимогам щодо енергоефективності. Енергозбереження за рахунок підвищення ефективності використання енергії, а також залучення в енергетичний баланс відновлювальних низькопотенційних джерел є одним з найважливіших завдань для комунальної теплоенергетики України. Загально визнаним є те, що низькотемпературні комбіновані системи теплозабезпечення мають високий рівень енергетичної ефективності, екологічної безпеки та автономності.

Робота Недбайла О.М. присвячена розв'язанню важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності будівель на стадіях проектування і будівництва нових, а також термомодернізації та експлуатації існуючих, що розглядається в рамках будівельної теплофізики із дослідженнями технологічних особливостей сучасних низькотемпературних систем теплозабезпечення.

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасні світові заходи щодо підвищення ефективності будівель різного



призначення, в більшості випадків, спрямовані на покращення теплозахисної здатності оболонки та використання в інженерних системах життєзабезпечення природних відновлювальних джерел енергії, скидних вторинних енергоресурсів, децентралізацію постачання теплоти, а також використання низькотемпературних опалювальних систем. Необхідною є оптимізація використання теплового ефекту інсоляції і впливу чинників довкілля на будівлі шляхом поліпшення їх конструктивних і теплотехнічних показників.

Дослідження наукових проблем, що пов'язані з організацією ефективного теплозабезпечення приміщень на основі низькотемпературних систем опалення із залученням відновлювальних джерел енергії є важливим технічним 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. Величезний резерв енергоощадження є в будівлях в країнах, що розвиваються, а також в країнах із перехідною економікою, в тому числі, і в Україні, де наразі діє енергетична стратегія на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність", деякі тези якої набули наукового розвитку в дисертаційній роботі.

2. Коротка характеристика змісту роботи

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Робота складається із вступу, вісьмох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел із 243 найменуваннями та 2 додатків на 16 сторінках. Робота викладена на 376 сторінках основного тексту, містить 143 рисунки та 22 таблиці.

Актуальність дисертаційної роботи обґрунтована у *вступі*. В ньому також 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 роботи в основному присвячений аналізу сучасних світових тенденцій щодо розвитку наукових досліджень, що спрямовані на підвищення ефективності будівлі при відповідному тепловому режимі в приміщеннях та в умовах її складного теплообміну із довкіллям.

При цьому автором відмічається відсутність в вітчизняних нормативних документах, що регламентують особливості технологій будівництва та експлуатації, прямого врахування теплової дії цілорічної інсоляції на оболонку будівлі. Крім того зазначається, що перспективними є точні методики розрахунку параметрів опалювальних систем, завдяки яким створюється тепловий режим приміщень різного призначення. Автор вважає, ці методики 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 розкриті в дисертаційній роботі.

В другому розділі наведена методика розрахунку теплотехнічних параметрів багатошарової огороджувальної конструкції, що базується на використанні математичної моделі нестационарного складного теплообміну будівлі із довкіллям, а також проаналізований вплив основних внутрішніх та зовнішніх факторів, що визначають інтенсивність теплопередачі через огороджувальні конструкції. Розглядається вертикальна тришарова огороджувальна конструкція. Постійна зміна граничних умов обумовлює перманентний процес перерозподілу значень температури по її товщині, що значно ускладнює його параметричне визначення в певний момент часу. Тому пропонується використання комбінованого методу дослідження крайових задач теплопереносу, що базується на основі поєднання елементів аналітичного і числового розв'язків. 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). При досить великому значенні часу процесу теплопередачі в конструкції формується стаціонарний розподіл температур, дані якого використовуються для розрахунку значення термічного опору.

Розроблена автором математична модель дозволяє вирішити таке завдання, як розрахунок нестационарного поля температур в складних, в конструктивному відношенні, багатошарових конструкціях, наприклад, коли розташування шарів дискретне.

В третьому розділі визначений тепловий вплив інсоляції на питомі теплові втрати будівлі із різними типами огорожувальної конструкції в різні періоди року. На основі розв'язання рівнянь математичної моделі нестационарного складного теплообміну методом прогонки для багатошарової комбінованої огорожувальної конструкції з повітряним прошарком розраховані теплові та енергетичні інтегральні характеристики для таких конструкцій при їх різній орієнтації за сторонами світу.

Дисертанту вдалося розрахувати тепловий вплив інсоляції на питомі теплові втрати будівлі в холодний період року. З урахуванням її дії для розглянутої південної огорожувальної конструкції вони менші в 1,37 рази. Для північної – в 1,16 разів.

Такі результати демонструють екстенсивні можливості теплоізоляційного напрямку термомодернізації огорожувальної конструкції в будівельній теплотехніці, обмеження якого можуть бути обумовлені, в основному, техніко-економічними чинниками.

В четвертому розділі розглянута доцільність, енергетична та економічна ефективності використання активного теплового бар'єру із водяним контуром у складі огорожувальної конструкції та реверсивного теплового насосу.

Запропонована до впровадження система, що є частиною зовнішніх непрозорих огорожувальних конструкцій і складається з теплоізоляційного шару, бетонного прошарку теплового бар'єру із системою труб, прокладених в ньому, по яких циркулює теплоносій та стіни (наприклад, цегляної).

В опалювальний період, шляхом подачі теплоносія з температурою $5...10^{\circ}\text{C}$ в контур, створюється додатковий термічний опір в огорожувальній конструкції та зменшуються загальні тепловтрати. Таким чином, енергоспоживання будівлі залежатиме, в тому числі, і від різниці температур зовнішнього повітря та теплового бар'єру. 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 теплового насосу. У теплий період року тепловий бар'єр можна використовувати для запобігання теплонадходженням, подаючи при цьому теплоносій з тією ж температурою $5...10^{\circ}\text{C}$.

Запропоноване технічне рішення спрямоване для вилучення профіцитної теплоти інсоляції в теплий період року, акумулювання її в ґрунтовому масиві та використання в холодний період для часткової компенсації теплових втрат будівлі або спрямування її до системи водяного підлогового опалення.

В п'ятому розділі розглянуті особливості теплопереносу через світлопрозорі огорожувальні конструкції із одно- та двокамерними склопакетами. Задача складного теплообміну через склопакети із відповідними висотою, шириною та товщиною розглядається в двовимірній постановці в умовах стаціонарного теплового режиму.

В результаті числового розв'язання задачі отримані поля швидкості і температури у вертикальному перерізі двокамерного склопакета.

З представлених результатів випливає, що для двокамерного склопакета зазначеної геометрії, термічний опір дорівнює $R = 0,33 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. 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 66% від сумарного теплового потоку. Термічний опір однокамерного склопакета зазначеної геометрії складає $R = 0,19 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, що є в 1,7 рази нижчим, ніж у двокамерного склопакета.

Шостий розділ містить результати комп'ютерного моделювання в

прикладному програмному пакеті Ansys 14.0 процесів складного теплообміну і аеродинаміки в квазістаціонарному режимі в повітрі типового приміщення площею 18 м^2 із низькотемпературними системами водяного та повітряного опалення. 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.

Витрата теплоносія в певному діапазоні майже не впливає на зміну температури поверхні покриття підлоги. Це доводить тезу про те, що кількісне регулювання теплопродуктивністю низькотемпературних систем опалення недоцільне. Більш ефективним, в такому випадку, є якісне регулювання тепловим навантаження із зміною температури теплоносія в системі. Отримані результати розрахунків можна представити у вигляді номограм теплового навантаження для окремих конструкцій водяного підлогового опалення. Величина коефіцієнту теплопередачі k дорівнює значенню тангенса кута нахилу номограми теплового навантаження системи опалення до горизонтальної вісі абсцис. 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.

Сьомий розділ присвячений обґрунтуванню науково-технічних положень створення енергоефективної будівлі на прикладі розробленого повномасштабного стенду експериментальної будівлі ІТТФ НАН України, площею 306 м^2 , розрахункові тепловитрати на опалення якої склали менше $14,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$. Розроблена схема комбінованої системи теплозабезпечення енергоефективного будинку, що включає в себе контури системи опалення, контури ґрунтових теплообмінників, теплові сонячні колектори, тепловий насос і твердопаливний котел, може забезпечити надійне ефективне теплозабезпечення із резервуванням джерел енергії. Для підвищення

теплоізоляційних можливостей огорожувальних конструкцій запропонована до використання теплового повітряна завіса фасадів будинку.

Проведені експериментальні дослідження теплового режиму типового приміщення енергоефективного будинку із Г-подібним контуром підлогового опалення та чотирма змійовиковими опалювальними контурами в простінку показали, що найбільш рівномірний розподіл температури повітря по висоті приміщення виявився при експлуатації системи підлогового опалення або одночасному використанні всіх контурів. Це позитивно характеризується із санітарно-гігієнічних міркувань та комфортності перебування людини в приміщенні.

Восьмий розділ містить результати порівняльного енергетичного аналізу ефективності роботи і експлуатаційних параметрів різних систем опалення, а також оцінку основних техніко-економічних показників ефективності будівель на прикладі імітаційної моделі будинку з опалювальною площею 200 м².

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.

Для визначення оптимальних енергетичних та економічних показників на першому етапі в якості імітаційної моделі дослідження вибраний типовий індивідуальний житловий будинок. Зниження споживання енергії будівлі тісно пов'язане з теплоізоляцією зовнішніх огорожувальних конструкцій і застосуванням сучасних технологічних установок. Для аналізу вибрано три типи будинків: стандартний, термомодернізований та енергоефективний із відповідними характеристиками огорожувальних конструкцій. Розрахована потреба в первинній енергії, в залежності від типу палива і способу вентиляції для будинків, що характеризуються різними параметрами зовнішніх огорожувальних конструкцій.

У *висновках* наводяться матеріали науково-практичних результатів, що містяться в дисертаційній роботі.

Наукова новизна і значимість наукових результатів полягає в тому, що в роботі вперше:

- на основі виконаних 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 теплохолодопостачання теплового бар'єру огорожувальної конструкції оцінені енергетичні показники його експлуатації з тепловим насосом в холодний та теплий періоди року;

- за допомогою чисельного 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;

- 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 енергетичної ефективності експлуатації низькотемпературних і традиційних систем енергоефективного будинку із різними опалювальними приладами.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- автором 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 будинку і комбінованої системи теплозабезпечення на основі залучення відновлювальних джерел енергії (теплоти ґрунту, інсоляції тощо);

- розраховані характерні експлуатаційні витрати типових будинків в залежності від джерела тепlopостачання, теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій та витрати первинної енергії.

Наукові дослідження та результати дисертаційної роботи увійшли до складу низки науково-дослідних робіт, що виконувались у відділі теплофізичних основ енергоощадних технологій Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

Достовірність і обґрунтованість основних положень дисертації.

Основні наукові положення, результати та висновки базуються на результатах теоретичних та експериментальних досліджень із використанням методів системного аналізу, розв'язання диференціальних рівнянь математичної фізики та порівнянні значень розрахунків із експериментальними даними.

Повнота викладення наукових положень і висновків.

В роботі відсутні матеріали та висновки кандидатської дисертації здобувача. В дисертаційній роботі не виявлені ознаки плагіату або запозичень ідей, результатів і текстів інших авторів без посилання на відповідне джерело.

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.

Матеріали дисертаційної роботи та її основні положення доповідались і обговорювались на 23 міжнародних науково-практичних конференціях та 8 наукових семінарах.

Оформлення дисертації.

Автореферат дисертації в повній мірі відображає зміст, матеріали та положення роботи. Стиль викладення матеріалу забезпечує його однозначне розуміння та тлумачення.

Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді рукопису, що відповідає вимогам п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від

24.07.2013 р. №567 (зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р.), що їх пред'являють до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Основні зауваження до дисертаційної роботи стосуються наступного:

1. В розділі 5 дисертації, а також у висновках (дививсь автореферат п. 4), наведене твердження про те, що основна частина тепловтрат приміщень припадає на світлопрозорі конструкції, але не надана інформація про те, для якого періоду року і яке співвідношення цих тепловтрат з величиною таких при вентиляції приміщень.

2. У висновку 5 дисертації і автореферату вказана цифра 8% розходження даних теорії та експерименту по режимам теплообміну, але не вказано яких конкретно параметрів це стосується, і за рахунок чого це відхилення має місце (недосконалість математичних моделей або похибок експерименту?).

3. В дисертації в запропонованих математичних моделях не враховується термічний опір між шарами теплоізоляції. Безумовно, вплив цього фактору є позитивним для збільшення загального термічного опору будівельних конструкцій, але, з точки зору адекватності моделі реальної ситуації, було б доцільно цей фактор врахувати.

4. Розділи в дисертації представлені нерівномірно. Так, наприклад, розділ 1 можна скоротити, а розділ 4 (обсягом 17 стор.) та розділ 5 (обсягом 15 стор.) об'єднати.

5. Загальні висновки в дисертації доцільно сформулювати більш конкретно. Наприклад, в пунктах 5 і 6 можна без втрати змісту виключити перші абзаци.

Зазначені зауваження, в цілому, не впливають на загальну позитивну оцінку роботи та не зменшують цінності основних наукових результатів, положень та висновків дисертації.

3. Висновок

Дисертаційна робота Недбайла Олександра Миколайовича «Теплофізичні аспекти підвищення ефективності будівлі при використанні низькотемпературних систем її теплозабезпечення та термомодернізації огорожувальних конструкцій» виконана на сучасному науковому рівні та містить нові наукові результати в галузі будівельної теплофізики і енергоефективного будівництва, має актуальність і практичну значимість, що спрямовані на вирішення важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності будівель.

На підставі вищенаведеного вважаю, що дисертація відповідає вимогам п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р.), а її автор Недбайло Олександр Миколайович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,
чл. - кор. НАН України,
доктор технічних наук, професор,
заст. директора з наукової роботи
Інституту відновлюваної енергетики
НАН України



25.09.2018

В.Ф. Резцов