

В І Д Г У К

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора,
професора кафедри «Теплогазопостачання і вентиляція»
Національного університету «Львівська політехніка»

Возняка Ореста Тарасовича

на дисертаційну роботу Москвітіної Анни Сергіївни

на тему: «**Енергоефективне сезонне акумулювання теплоти в системах сонячного децентралізованого теплопостачання**»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.

1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Системи інженерного забезпечення будівель і споруд є одними із значних споживачів паливно-енергетичних ресурсів в Україні. З підписанням Угоди про асоціацію з ЄС Україна прийняла ряд зобов'язань щодо зменшення витрат первинної енергії, у т.ч. і системами опалення. Поряд з цим потребує вирішення і проблема теплового забруднення довкілля, викликана збільшенням викидів парникових газів і забруднюючих речовин у атмосферне повітря. Підвищення енергоефективності будівель і споруд – основний шлях вирішення вищевказаних питань.

Енергетичні системи з використанням сонячної енергії мають багато переваг: невичерпність, безкоштовність їх використання, безпечність експлуатації, мінімальний вплив на навколишнє середовище і достатньо велика естетичність. Однак, цим системам властиві й недоліки, серед яких, перш за все, мінливість у часі. Наприклад, потік сонячної енергії змінюється протягом доби від нуля в нічний час до максимального значення в сонячний полудень. Цей недолік може бути знижений при використанні акумуляторів енергії.

Надійні та ефективні системи акумулювання енергії не тільки забезпечать стабільне енергопостачання споживачів, але і підвищать коефіцієнт використання енергії за рахунок накопичення пікової і низькопотенційної енергії, яка не може бути отримана без відповідних її перетворень. Запас енергії в акумуляторі може бути розрахований на кілька годин або діб при короткостроковому акумулюванні та на кілька місяців - при сезонному акумулюванні. Однією з технологій накопичення, зберігання та використання в опалювальний період теплоти, що утворилася в теплий період року є створення та експлуатація сезонних акумуляторів теплоти (АТ). При цьому під сезонним АТ розуміється теплоакумуюча система, яка складається з резервуару для зберігання теплоти, акумулюючого середовища (робочого тіла) та рідинного робочого тіла (проміжного теплоносія), що передає теплоту як для її

акумулявання, так і для її використання. Тому проблема найбільш ефективного акумулявання є, безсумнівно, актуальною. Оскільки, застосування АТ дозволяє підвищити на 30 - 50% ефективність використання поновлюваних джерел енергії і, в першу чергу, сонячної енергії.

2. Наукова новизна.

Вперше:

- на основі теоретичних та експериментальних досліджень визначено особливості тепломасообмінних процесів в об'ємі теплоємнісного акумулятора з рідинним та твердим теплоакумулюючими матеріалами.
- визначено теплофізичні характеристики акумулятора теплоти з рідинним та твердим теплоакумулюючими матеріалами для роботи в діапазоні температур 100-200 °С, які дозволили розробити його конструкцію.

Вдосконалено:

- математичну модель нестационарного теплообміну на підставі рівнянь теплопровідності Фур'є-Кірхгофа та тепловіддачі Ньютона-Ріхмана для теплоємнісного акумулятора з рідинним та твердим теплоакумулюючими матеріалами.

–

Набула подальшого розвитку:

- математична модель неізотермічного руху нелінійно-в'язкої рідини у каналі із заданим тепловим потоком на стінці з урахуванням неньютонівських властивостей рідини на підставі моделі Оствальда – де Віля для розрахунку трубчастих теплообмінників.

3. Обґрунтованість і достовірність наукових висновків.

Вірогідність отриманих наукових результатів зумовлена використанням фундаментальних законів термодинаміки, теплопередачі та тепломасообміну і підтверджена порівнянням з відомими теоретичними та експериментальними даними, а також з даними авторських дослідів, які виконані з застосуванням сучасних методів виконання та оброблення експерименту, теорії ймовірності та математичної статистики.

4. Практична цінність роботи.

Розроблена система теплопостачання на основі відновлюваних джерел та акумулятора теплоти з рідинним та твердим теплоакумулюючими матеріалами дозволяє ефективно використовувати нестационарні теплонадходження. Запропонована методика дозволяє проектувати енергоефективні системи децентралізованого теплопостачання від відновлюваних джерел енергії. Методика визначення ефективного теплоакумулюючого матеріалу може бути адаптована в залежності від типу та умов експлуатації акумулятора теплоти, а наведена модель Оствальда-де Віля дозволяє розрахувати температурне поле в розробленому теплоакумуляторі (в каналах з гліцерином) та інших

теплообмінниках з неньютонівськими рідинами і може бути в подальшому використана для вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку задач теплообміну у теплообмінниках.

Основні положення і результати проведених досліджень впроваджено в проектах ТОВ «ІКБ «Панорама» (м. Київ). Запропоновані рекомендації впроваджено з метою забезпечення автономного тепlopостачання пасивних будівель.

5. Повнота викладення здобувачем основних результатів.

Матеріали дисертаційної роботи повністю викладено у 10 друкованих наукових працях, зокрема у 7 статтях у фахових виданнях України, 2 – у міжнародних виданнях, одержано 1 патент України на винахід..

6. Особистий внесок здобувача:

Обґрунтовано методики техніко-економічного порівняння теплоакумуюючих матеріалів (ТАМ) та розрахунку об'єму АТ. Розроблено конструкцію АТ з рідинним та твердим ТАМ і для порівняння проведено чисельне моделювання роботи розробленої конструкції АТ та інших варіантів конструкцій АТ. Проведено оцінку точності чисельних розрахунків у порівнянні з аналітичними підходами до розв'язку задач теплообміну при граничних умовах першого та третього роду, а також досліджено реологічно-динамічні особливості нелінійно-в'язких середовищ у довгих трубах в межах моделі Оствальда – де Віля при заданому тепловому потоці на стінці. Розроблено методику розрахунку конструктивних елементів АТ з твердим та рідинним ТАМ та методику техніко-економічного порівняння опалювальних приладів.

7. Оцінка мови, стиль та оформлення дисертації й автореферату.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 160 найменувань, додатків, викладена на 195 сторінках друкованого тексту, у тому числі 159 сторінках основного тексту, 110 рисунків і 16 таблиць.

Застосована в роботі наукова термінологія є загальновизнаною, стиль викладення результатів теоретичних і експериментальних досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їхнього сприйняття. Оформлення дисертації відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України.

8. Відповідність тексту автореферату й дисертації.

Текст автореферату відповідає структурі, змісту та основним положенням, наведеним в дисертації.

9. Аналіз основного змісту роботи.

Всі розділи дисертаційної роботи змістовно підпорядковані меті дослідження та логічно взаємопов'язані. Дисертація та автореферат цілком відповідають паспорту спеціальності 05.23.03 - вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та завдання досліджень, викладено наукову новизну та практичну цінність роботи, особистий внесок автора, відомості про апробацію досліджень та публікації.

У першому розділі проаналізовано та узагальнено сучасний стан проблематики підвищення енергоефективності сезонного акумулювання теплоти в системах сонячного децентралізованого тепlopостачання, представлено існуючі системи акумулювання теплоти, а також різні типи сезонних АТ. Визначено основні переваги організованих теплоємних АТ. Описано процеси тепломасообміну, які відбуваються при акумулюванні теплоти в об'ємі АТ та процеси теплопередачі при ламінарній течії в каналах і трубах, вказано, що в теплообміннику зарядження та розрядження акумулятора теплоти в якості теплоносія використовується нанорідина на основі пропіленгліколю, яка є неньютонівською рідиною.

У другому розділі спираючись на існуючі розробки в системах сонячного тепlopостачання було розроблено принципову схему тепlopостачання з сонячними тепловими колекторами та сезонним акумулюванням теплоти. Для обґрунтування математичної моделі процесів тепломасообміну в об'ємі акумулятора теплоти з твердим та рідинним теплоакумулюючим матеріалом проведено техніко-економічне обґрунтування різних видів теплоакумулюючих матеріалів на підставі запропонованого факторного критерію оптимізації. За допомогою факторного критерію оптимізації встановлено, що для систем тепlopостачання з джерелом теплоти в межах 100 - 200 °С в якості теплоакумулюючого матеріалу доцільно використовувати гліцерин та бетон.

Враховуючи вартість закумульованої енергії в сезонному АТ, при визначенні оптимальної товщини теплової ізоляції, виконано техніко-економічний розрахунок з визначенням мінімальних приведених затрат.

Розроблено математичну модель акумулятора теплоти з рідинним та твердим теплоакумулюючим матеріалом для дослідження тепломасообмінних процесів при роботі акумулятора теплоти та щоб дослідити розподіл температур в об'ємі теплоакумулюючого матеріалу.

У третьому розділі для зменшення кількості натурних дослідів для визначення оптимальної конструкції акумулятора теплоти проведено математичний експеримент за допомогою моделювання процесів роботи акумулятора теплоти з рідинним та твердим теплоакумулюючим матеріалом за допомогою k-ε моделі.

За даними розрахунків, виконаних в другому розділі, виконана якісна оцінка процесів розподілу температур в об'ємі акумулятора теплоти з твердим та рідинним теплоакумулюючим матеріалом. Критерієм оптимізації був найменший градієнт температур в об'ємі акумулятора теплоти, порівняння проводились з бетонним акумулятором теплоти. Задачу рівномірного розподілу температур в об'ємі акумулятора теплоти вирішено за рахунок системи каналів,

заповнених рідинним теплоакумулюючим матеріалом, що знаходяться в середині твердого теплоакумулюючого матеріалу.

У **четвертому розділі** описано роботу системи децентралізованого теплопостачання з сезонним теплоакумулятором та системою геліоколекторів. Також на основі теоретичних досліджень, проведених в другому розділі, представлено методику розрахунку та оптимізації трубчастих теплообмінних апаратів для неньютонівських рідин. Представлено основні вихідні положення та технічні дані, якими необхідно керуватись під час виконання цих розрахунків. Реалізовано алгоритм розрахунку трубчастих теплообмінників на базі програми VISSIM.

Проведене техніко-економічне порівняння опалювальних приладів по групах, дозволило зробити висновок, що найефективнішим опалювальним приладом з економічної точки зору є конвектор, а якщо розглядати радіатори, то найефективнішими виявилися мідно-алюмінієві.

Наведено результати техніко-економічного порівняння двох систем теплопостачання приватного будинку.

10. В роботі заслуговує уваги:

1. Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.
2. Зв'язок з роботами попередніх дослідників.
3. Використання припущень та спрощень.
4. Деякі результати досліджень отримано вперше.
5. Опубліковано 10 наукових праць.
6. Апробація результатів дисертації на науково-технічних конференціях.
7. Планування факторного експерименту та обґрунтування адекватності теорії експерименту.
8. Застосування потужного математичного апарату та програми SolidWorks.

11. Зауваження до дисертації

1. Відсутність певних речей для підсилення роботи: це стосується статей у НМБД Scopus та Web of Science. Крім того, відсутній регресійний аналіз за результатами планування експерименту.

2. Певні твердження потребують додаткових пояснень, зокрема:

- яка потреба різних позначень величин: час – t і τ , температура – t , τ і T ($^{\circ}\text{C}$) та діаметр D , і d (с.19)?

- на с.61 наведено систему 3 рівнянь, проте слід уточнити, які 3 невідомі величини необхідно було визначити?

3. Наявність некоректностей, зокрема:

- на с.30, табл. 1.1 та с.31, табл.1.2 стверджується: «Об'ємна теплоємність, $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$ », слід було – «Об'ємна **питома** теплоємність», а також: «Питома теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ », слід було – «Питома **масова** теплоємність»;

- на с.64 стверджується про суму «вартості АТ, яка включає в себе вартість спорудження резервуару (повна конструкція резервуара з теплоізоляцією), вартість самого ТАМ, вартості експлуатації АТ», що являє собою суму величин з

різними розмірностями, а саме капітальних затрат (грн) та експлуатаційних (грн /рік);

- на с.69 (табл.2.2) та с.70 (табл.2.3) наведено величини «Ширина і довжина» та «Тепловтрати» з некоректною точністю, відповідно $x = 3,1623$ м та $Q = 20,282$ Вт.

4. Наявність протиріччя: на с.27 вказано « c_p — **питома** ізобарна теплоємність, кДж/(кг·К)», а на с.19 – теплоємність, кДж/(кг·К) за однакової розмірності.

5. В економічній частині:

- на с.78 стверджується: « P_i – річні відрахування від вартості ізоляції складають 0,08; E_n – нормативний коефіцієнт капіталовкладень в ізоляцію, дорівнює 0,12; K_i – капіталовкладення в теплову ізоляцію; C_{mn} – річна вартість тепловтрат; P – приведені затрати», але відсутні розмірності цих величин;

- на с.81 рис.2.7 і 2.8, на с.82 рис.2.9 та на с.83 рис.2.10 як розмірність приведених затрат вказано **грн**, слід було вказати **грн/рік**;

- на с.174 (табл. 4.2) розмірність експлуатаційних затрат вказано **тис.грн**, слід було вказати **тис. грн/рік**; крім того, оскільки відсутні дані по приведених затратах, необхідно пояснити, яким чином визначено термін окупності 9 років, с.176?

6. Наявність нераціональних вирішень, дубляжу, зокрема:

- на с.69 стверджується: «тепловтрати в навколишнє середовище повинні бути мінімальні: $Q_{\text{бал}} = 2,33 x^2 + 16,11 \cdot x \cdot y \rightarrow \min$ і наводиться розв'язок у табличній формі (табл.2.2). Натомість слід було продемонструвати диференціювання вказаної функції 2 незалежних змінних, обчислити детермінант Якобіан та визначити або її стаціонарну точку або найменше значення функції в 4 точках за відсутності стаціонарної точки; аналогічне стосується табл.2.3 на с.70;

- на с.73 стверджується: «в результаті отримуємо многочлен 4 степеня» та наведено коефіцієнти: $A_0 = 8,287241$; $A_1 = - 0,2041129$; $A_2 = - 1,072438 \cdot 10^{-4}$; $A_3 = 1,049703 \cdot 10^{-5}$; $A_4 = -2,047809 \cdot 10^{-8}$. Доцільно знехтувати незначимими коефіцієнтами A_3 (показник степеня -5) та A_4 (показник степеня -8) та спростити вираз до полінома 2 степеня, що є значно раціональніше; аналогічне стосується виразу на с.75, де відповідно показники степеня -6 та -9;

- на с.19 коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м²· К) проставлено двічі.

7. Редакційно-стилістичні зауваження щодо помилкових виразів, слів, букв, цифр, розділових знаків, дужок, індексів, тощо, зокрема:

- стилістика виразів: «перемикаючий трьохходовий клапан» (с.57), слід було **триходовий**, «двохпозиційний клапан» (с.57) – **двопозиційний**, «найменшу площу поверхні має шар» (с.68) – **куля**, «шаровидної форми» (с.68) – **кулеподібної**, «По результатам» (с.103) – По **результатах**, «По цим даним» (с.144) – По **цих даних**, «вхідні величини, котрі отримано» (с.114) – **які** отримано, «блок схема подана» (с.157) – блок **схему подано**, «Вибрані сонячні колектори WATT (Польща)» (с.173) – **Вибрано** сонячні колектори, «Обґрунтована методика» (с.175) – **Обґрунтовано методика**;

- тавтологія: «Розглянемо **залежність** форми АТ в **залежності** від його розміщення» (с.68);

- помилкові індекси: « $Y=A_0+A_1 \cdot x+A_2 \cdot x_2+A_3 \cdot x_3+A_4 \cdot x_4$ » (с.73), $T_{нав}$ – температура навколишнього середовища, °C (с.48).

ВИСНОВОК

Наведені зауваження не є суттєвими і не знижують наукової цінності дисертаційної роботи, яка виконана на належному рівні, а її результати можуть мати практичне застосування у будівництві.

Дисертаційна робота Москвітінної Анни Сергіївни «Енергоефективне сезонне акумулювання теплоти в системах сонячного децентралізованого теплопостачання» є завершеною науковою роботою, що містить нові наукові положення, які вирішують важливу задачу найбільш ефективного акумулювання теплоти в системах сонячного децентралізованого теплопостачання

Дисертація Москвітінної А. С. відповідає паспорту спеціальності 05.23.03 "Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання" і профілю Спеціалізованої вченої ради Д.26.056.07. Вона відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 року (зі змінами та доповненнями), які висуваються до кандидатських дисертацій, і може бути рекомендована до розгляду на засіданні спеціалізованої вченої ради щодо присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 - вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.

З урахуванням обґрунтованості наукових положень та висновків, наведених у дисертації, наукової та практичної цінності отриманих автором наукових результатів, вважаю, що її автор, Москвітінна Анна Сергіївна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 "Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання".

Офіційний опонент,

Доктор технічних наук, професор,

Професор кафедри «Теплогазопостачання і вентиляції»

Національного університету «Львівська політехніка

О.Т.Возняк

Підпис доктора технічних наук, професора,

професора кафедри «Теплогазопостачання і вентиляції»

Національного університету «Львівська політехніка»

О.Т.Возняка засвідчую:

Вчений секретар



Р.Б.Брилинський