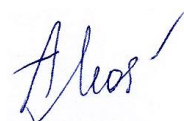


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

МОСКВІТІНА АННА СЕРГІЇВНА



УДК 697.329

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ СЕЗОННЕ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОТИ В
СИСТЕМАХ СОНЯЧНОГО ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО
ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

Спеціальність 05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Київському національному університеті будівництва і архітектури.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
ЛЮБАРЕЦЬ ОЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ
доцент кафедри теплогазопостачання і
вентиляції Київського національного
університету будівництва та архітектури

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ВОЗНЯК ОРЕСТ ТАРАСОВИЧ
професор кафедри теплогазопостачання і
вентиляції Інституту будівництва та інженерних
систем Національного університету «Львівська
політехніка»

кандидат технічних наук, доцент
АНТИПОВ ЄВГЕН ОЛЕКСІЙОВИЧ
в.о. завідуючого кафедри теплоенергетики
Національного університету біоресурсів і
природокористування України (м. Київ)

Захист дисертації відбудеться «___» _____ 2021 р. о 11⁰⁰
годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07 при Київському
національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м.
Київ, Повітрофлотський просп., 31, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського
національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м.
Київ, Повітрофлотський просп., 31.

Автореферат розісланий «___» _____ 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.056.07
доктор технічних наук, професор



Ткаченко Т.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. 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 значенні 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 теплоакумулююча система, яка складається з резервуару для зберігання теплоти, акумулюючого середовища (робочого тіла) та рідинного робочого тіла (проміжного теплоносія), що передає теплоту як для її акумулювання, так і для її використання. Тому проблема найбільш ефективного акумулювання є, безсумнівно, актуальною. Оскільки, застосування АТ дозволяє підвищити на 30 - 50% ефективність використання поновлюваних джерел енергії і, в першу чергу, сонячної енергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана згідно з Державною “Програмою підтримки енергоефективності в Україні” і безпосередньо пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ держаної реєстрації 0120U101132).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування енергоефективних систем сонячного децентралізованого теплопостачання з сезонним акумулюванням теплоти на основі твердого та рідинного теплоакумулюючих матеріалів.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких **завдань**:

- провести аналіз літературних джерел і патентні дослідження сонячних систем теплопостачання із сезонними акумуляторами теплоти на основі твердих і рідинних теплоакumuлюючих матеріалів;
- розробити енергоефективну систему сонячного децентралізованого теплопостачання із сезонним акумулюванням теплоти;
- створити фізико-математичну модель акумулятора теплоти з твердим та рідинним теплоакumuлюючими матеріалами на основі реологічно-динамічних особливостей тепломасообміну нелінійно-в'язких середовищ у вертикальних трубах (каналах) в межах моделі Оствальда – де Віля та розробити енергоефективну конструкцію акумулятора теплоти;
- виконати експериментальні дослідження роботи акумулятора теплоти з твердим та рідинним теплоакumuлюючими матеріалами з метою верифікації результатів теоретичних та експериментальних досліджень;
- розробити методичку інженерного розрахунку теплотехнічних та гідравлічних характеристик сезонного акумулятора теплоти з твердим та рідинним теплоакumuлюючими матеріалами;
- здійснити техніко-економічне обґрунтування від впровадження розробленої енергоефективної системи сонячного децентралізованого теплопостачання із сезонним акумулятором теплоти на основі твердого і рідинного теплоакumuлюючих матеріалів.

Об'єкт дослідження – Система сонячного децентралізованого теплопостачання з сезонним акумулюванням теплоти.

Предмет дослідження – тепломасообмінні та гідродинамічні процеси накопичення та віддачі теплоти під час роботи сезонного акумулятора теплоти.

Методи дослідження. Вирішення поставлених завдань здійснювалось сучасними методами аналітичного, математичного та комп'ютерного моделювання. Зокрема, математичне моделювання на підставі k-ε моделі використано для зменшення кількості експериментальних досліджень та для перевірки результатів в окремих випадках, для яких виконання дослідів ускладнене через фізичні обмеження. Сучасні методи експериментальних лабораторних досліджень використовувалися разом з застосуванням методів планування повного факторного експерименту та статистичної обробки даних.

Наукова новизна роботи.

Вперше:

- на основі теоретичних та експериментальних досліджень визначено особливості тепломасообмінних процесів в об'ємі теплоємнісного акумулятора з рідинним та твердим теплоакumuлюючими матеріалами.
- визначені теплофізичні характеристики акумулятора теплоти з рідинним та твердим теплоакumuлюючими 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 теплоакumuлюючими 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.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблена система теплопостачання на основі відновлюваних джерел та акумулятора теплоти з рідинним та твердим теплоакumuлюючими матеріалами дозволяє ефективно використовувати нестационарні теплонадходження. Запропонована методика дозволяє проектувати енергоефективні системи децентралізованого теплопостачання від відновлюваних джерел енергії. Методика визначення ефективного теплоакumuлюючого 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 теплоакumuляторі (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 проєктах ТОВ «ІКБ «Панорама» (м. Київ). Запропоновані рекомендації впроваджено з метою забезпечення автономного теплопостачання пасивних будівель.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем обґрунтовані методики техніко-економічного порівняння теплоакumuлюючих матеріалів (ТАМ) та розрахунку об'єму АТ. Розроблена конструкція АТ з рідинним та твердим ТАМ і для порівняння проведене чисельне моделювання роботи розробленої конструкції АТ та інших варіантів конструкцій АТ. Проведена оцінка точності чисельних розрахунків у порівнянні з аналітичними підходами до розв'язку задач теплообміну при граничних умовах першого та третього роду, а також досліджені реологічно-динамічні особливості нелінійно-в'язких середовищ у довгих трубах в межах моделі Оствальда – де Віля при заданому тепловому потоці на стінці. Розроблені методика розрахунку конструктивних елементів АТ з твердим та рідинним ТАМ та методика техніко-економічного порівняння опалювальних приладів.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідалися: на міжнародних науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури в 2013 - 2015, 2018, 2020 р.; Міжнародній науково-технічній конференції

"Інноваційні технології в будівництві (2018)" (м. Вінниця, 2018); The international and practical conference «The development of technical sciences: golems and solutions» (Brno, 2018); International scientific conference «Scientific development of new Eastern Europe» (Riga, 2019); International Scientific Conference «Relevant Issues of the Development of Science in Central and Eastern European Countries» (Riga, 2019); The XI International Science Conference «Theoretical approaches of Fundamental Sciences. Theory, Practice and prospects», (Geneva, 2021).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковані 10 друкованих праць, в т. ч. 7 статей у фахових виданнях України, 2 – у міжнародних виданнях, одержано 1 патент України на винахід.

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

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та основні завдання досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, викладено наукову новизну та практичну цінність результатів роботи, особистий внесок автора, відомості про апробацію досліджень та публікації.

У першому розділі представлено існуючі системи акумулювання теплоти, а також різні типи сезонних АТ. Визначені основні переваги організованих теплоємнісних АТ. Описані 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 ньютонівською рідиною.

Проблемами систем акумулювання теплової енергії займалися такі вчені: Н.Г. Бекман, В.Д. Левенберг Г. М. Забарний, Н.В. Харченко, Р.Р. Аверзов, А.І. Накорчевський, Б.І. Басок, Т.Г. Беляєва, Є.О. Антипов.

Але, незважаючи на значне число експериментальних сезонних АТ сонячної теплоти економічна ефективність їхнього застосування не завжди очевидна. Для вирішення питання про доцільність їхнього спорудження необхідно, щоб витрати на пристрій й експлуатацію АТ були істотно менше вартості запасеної енергії.

Аналіз літературних джерел дозволив визначити вимоги до ТАМ: висока теплоємність і ентальпія фазового переходу, при досить високій теплопровідності; висока щільність матеріалу і його хімічна стабільність; безпека й не токсичність матеріалу; низька вартість. Показано, що система акумулювання теплової енергії характеризується наступними параметрами:

теплоакумулюючою здатністю або питомою енергоємністю; діапазоном робочих температур; швидкістю підведення й відводу теплоти при заряджанні й розрядженні АТ, тобто, при оптимізації цих параметрів отримаємо найкращі економічні та експлуатаційні показники.

На основі проведеного аналізу відомих даних теоретичних та експериментальних досліджень зроблено висновок про необхідність розроблення енергоефективного сезонного АТ з твердим та рідинним ТАМ. Враховуючи сучасний стан розглянутої проблеми, сформульовані основні завдання, що виконані у цій роботі.

У другому розділі, спираючись на існуючі розробки в системах сонячного теплопостачання була розроблена принципова схема теплопостачання з сонячними тепловими колекторами (СТК) та сезонним АТ (рис.1). В схемі теплопостачання з СТК та сезонним АТ: 1 – система СТК; 2 – насосний вузол системи СТК; 3 – гідравлічна стрілка; 4 – розподільчий колектор; 5 – насос на буферну ємність системи опалення; 6 – насос на сезонний АТ; 7 – двохпозиційний клапан; 8 – насос бойлера гарячого водопостачання (ГВП); 9 – термічний датчик вмикання/вимикання насоса по температурі; 10 – бойлер ГВП; 11 – термозмішувальний клапан системи ГВП (для отримання постійної температури гарячої води); 12 – до споживачів системи ГВП; 13 – буферна ємність системи опалення; 14 – контур системи радіаторного опалення; 15 – сезонний АТ з рідинним та твердим ТАМ (детальна конструкція наведена нижче); 16 – насос теплопостачання систем ГВП та опалення від сезонного АТ; 17 – трьохходовий клапан підтримання температури зворотної лінії; 18 – завантажувальні насоси буферної ємності та бака ГВП; 19 – розподільчі колектори з функцією гідрострілки; 20 – запобіжний клапан; 21 – розширювальний бак; 22 – тепловий насос; 23 – перемикаючий трьохходовий клапан.

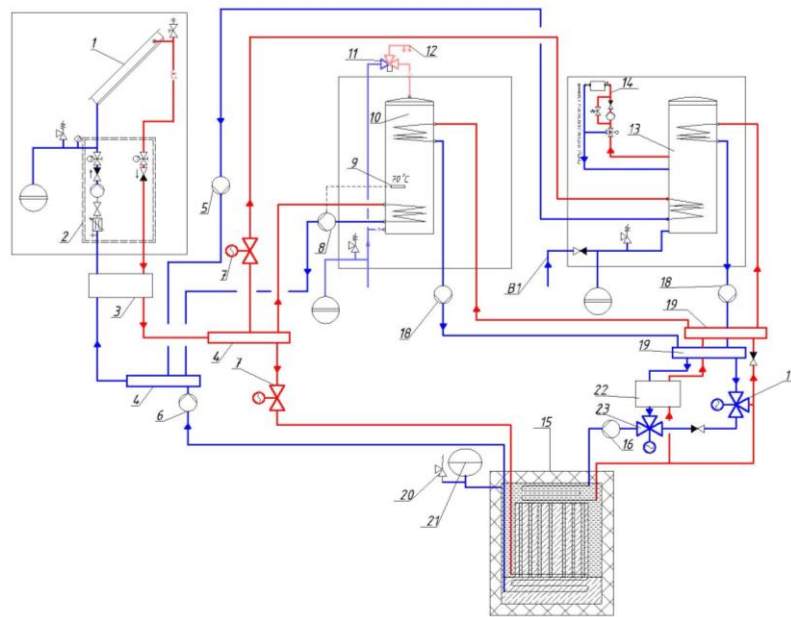


Рис.1. Принципова схема теплопостачання з СТК та сезонним АТ.

Існує три режими роботи системи: 1-й травень – серпень покриття теплових навантажень ГВП за рахунок системи СТК та зарядження АТ надлишковою теплотою від СТК; 2-й режим вересень-жовтень покриття теплових навантажень ГВП (та теплових навантажень на систему опалення на початку опалювального сезону) за рахунок СТК та, при відсутності сонячних теплонадходжень, використання закумульованої теплоти з АТ; 3-й режим листопад-лютий покриття теплових навантажень ГВП та системи опалення за рахунок закумульованої теплоти в АТ, а при падінні температури в АТ нижче необхідної для системи опалення – підключення теплового насосу для підвищення температури теплоносія. З аналізу літературних джерел відомо, що в червні місяці на ГВП використовується 65% теплоти з СТК, в липні – 50%, а в серпні – 60%, а надлишки теплоти з СТК йдуть на зарядження АТ.

Баланс теплоти для баку ГВП/буферної ємності, теплообмінника зарядки АТ та самого АТ:

$$\begin{cases} Q_{СК} - Q_B^{TB} - Q_B = 0; & (1) \\ \dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot \Delta T_{11} - k_{21} \cdot (T_{11} - T_{22}) \cdot F_{21} = 0; & (2) \\ 0 = Q_{СК} - Q_{АТ}^{TB} - Q_{ТАМ}^P - Q_{ТАМ}^T. & (3) \end{cases}$$

де $Q_{СК}$ – тепловий потік від системи СТК, Вт; Q_B^{TB} – тепловтрати від баку ГВП/буферної ємності в навколишнє середовище, Вт; Q_B – тепловий потік на нагрів води в баці ГВП/буферній ємності, Вт; $Q_{АТ}^{TB}$ – тепловтрати від АТ в навколишнє середовище, Вт; $Q_{ТАМ}^P$ – тепловий потік на нагрів рідинного ТАМ в АТ, Вт; $Q_{ТАМ}^T$ – тепловий потік на нагрів твердого ТАМ в АТ, Вт; ΔT_{11} – різниця температур теплоносія на вході та виході з теплообмінника зарядження АТ, °С; \dot{m}_1 – масова витрата теплоносія, кг/с; c_1 – теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К); T_{11} – локальна, миттєва температура гріючого середовища, °С; T_{22} – середня температура ТАМ, які нагріваються в АТ, °С; k_{21} – коефіцієнт теплопередачі для теплообмінника в АТ, Вт/(м²·К); F_{21} – площа поверхні теплообмінника, яка передає теплоту, м².

- (1) рівняння збереження енергії для води, що нагрівається як в баці ГВП так і в буферній ємності;
- (2) рівняння теплового балансу теплообмінника з урахуванням того, що поверхня нагрівача АТ також має вигляд трубчастого теплообмінника, який закладається в твердий ТАМ;
- (3) рівняння збереження енергії при нагріві ТАМ в АТ.

Для обґрунтування математичної моделі процесів тепломасообміну в об'ємі АТ з твердим та рідинним ТАМ проведено техніко-економічне обґрунтування різних видів ТАМ на підставі запропонованого факторного критерію оптимізації:

$$K_o = \frac{6}{c \cdot \rho \cdot (T_{зар} - T_{роз})}, \text{ грн / кДж}; \quad (4)$$

де $T_{роз}$ – температура розрядження АТ, °С; c – питома теплоємність ТАМ,

Дж/(кг·К); ρ - густина ТАМ, кг/м³; $T_{зар}$ - температура заряджання АТ, приймаємо в залежності від робочих температур ТАМ, залежить від фізичних характеристик ТАМ, °С; $c \cdot \rho$ – об'ємна теплоємність ТАМ, Дж/(м³·К); v – питома вартість 1м³ АТ, яка враховує загальну вартість АТ з урахуванням вартості ТАМ, вартості матеріалів для резервуару та вартості робіт по його спорудженню, грн/м³.

За допомогою факторного критерію оптимізації встановлено, що для систем теплопостачання з джерелом теплоти в межах 100-200 °С в якості ТАМ доцільно використовувати гліцерин та бетон.

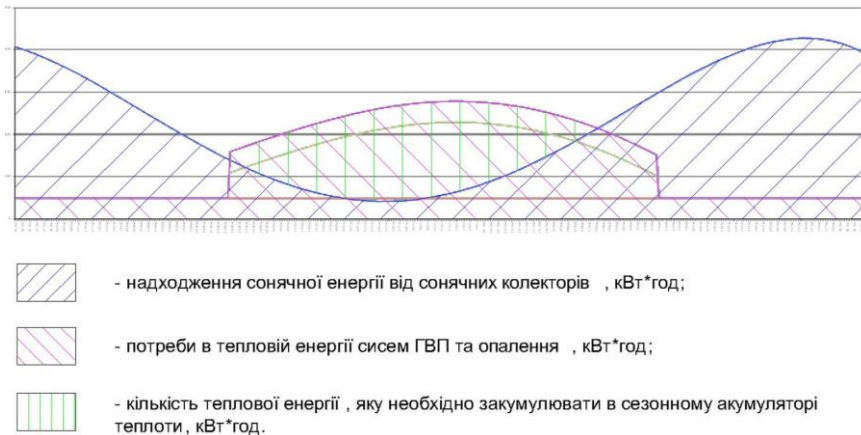


Рис.2. Графіки річного споживання теплоти системами опалення та гарячого водопостачання і річного надходження теплоти від СТК.

Для зменшення питомої вартості 1ГДж закумуляованої теплоти ефективна конструкція АТ повинна мати мінімальні тепловтрати в навколишнє середовище. При виборі форми АТ в плані потрібно намагатися максимально спростити його форму. Показано, що на форму АТ впливає місце його розміщення, що потрібно враховувати при проектуванні сезонних АТ. Кількість теплоти, яку необхідно закумуляувати, з урахуванням надходження теплоти від СТК продовж року для котеджу площею 300 м², з тепловим потоком на опалення $Q_{CO}=8080,09$ Вт та розрахунковим навантаженням на гаряче водопостачання 1235 Вт, становить 46,33ГДж, рис.2. Розміри АТ прийнято з урахуванням того, що розміри будівлі в плані 10х9м і АТ розміщено під будівлею: 8х8х3,36(h)м.

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

$$P = (P_i + E_n) \cdot K_i + C_{mn} = \min \quad (5)$$

де 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, грн; P – приведені затрати, грн; C_{mn} – річна вартість тепловтрат, для визначення яких враховані тепловтрати при різних товщинах теплової ізоляції та вартість 1кДж закумуляованої теплоти,

грн.

Також місце розміщення АТ впливає на оптимальну товщину теплової ізоляції АТ. При такому варіанті розміщення під будівлею оптимальна товщина теплової ізоляції становить 1300мм, а об'єм сезонного АТ дорівнює 237,67 м³, отже прийнято розміри сезонного АТ 8,1х8,1х3,65м, а кількість теплоти, яку необхідно закумуляувати, з урахуванням тепловтрат в навколишнє середовище – 54,29ГДж.

Розроблена математична модель АТ з рідинним та твердим ТАМ (рис.3) для дослідження тепломасообмінних процесів при роботі АТ та щоб дослідити розподіл температур в об'ємі ТАМ.

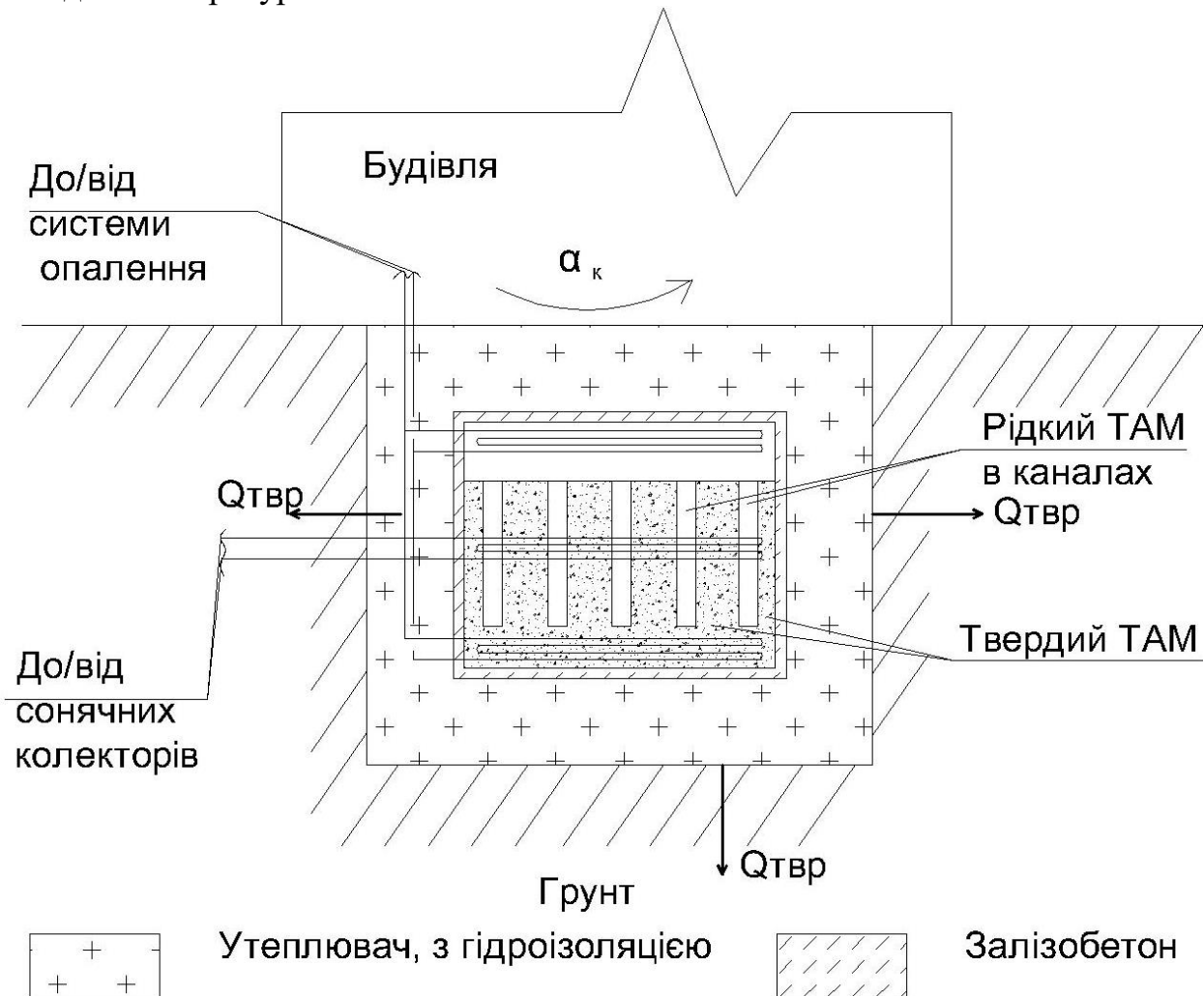


Рис. 3. Конструкція АТ.

Теплообмін з навколишнім середовищем описується рівнянням [74]:

$$\frac{\rho_a \cdot c_a}{\lambda_a} \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z^2} + \frac{\partial T_a}{\partial y^2}, \quad (6)$$

де ρ_a , - густина, кг/м³; λ_a , - теплопровідність, Вт/(м·К); c_a - теплоємність масиву конструкції АТ, Дж/(кг·К); $T_{\text{пов}}$ – температура повітря в приміщенні над АТ, °С. $T_a = T(t, z, y)$, °С; початкова умова (температура на поверхні конструкції АТ):

$$T_a = T(t, z, y)|_{t=0} = \text{const} = T_0 \quad (7)$$

Гранична умова:

$$z > 0 \quad -\lambda_a \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z} \Big|_{t=0} = \alpha_k [T_a(t, o, y) - T_{ноб}(t)] + \frac{1}{R_m} [T_a(t, o, y) - T_{zp}^c(t)]. \quad (8)$$

$$-\lambda_a \cdot \frac{\partial T_a}{\partial t} \Big|_{t=0} = \alpha_k \cdot T_a(t, o, y) + \left\{ -\alpha_k \cdot T_{ноб}(t) - \frac{1}{R_m} \cdot T_{zp}^c(t) \right\} + \frac{1}{R_m} \cdot T_a(t, o, y). \quad (9)$$

Розподіл температури на внутрішній поверхні металевій труби, яка контактує з теплоносієм:

$$\frac{\partial T_{вн}}{\partial t} = \bar{a} \cdot \left\{ \frac{\partial^2 T_{вн}}{\partial \tau^2} + \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\partial T_{вн}}{\partial \tau} + \frac{1}{\tau^2} \cdot \frac{\partial^2 T_{вн}}{\partial \varphi^2} \right\}, \quad r = \sqrt{y^2 + z^2}, o \leq \varphi \leq 2\pi. \quad (10)$$

де $\bar{a} = \frac{\lambda_n}{\rho_n \cdot c_n}$, м²/с.

Початкова умова: $T_{вн}(r, \varphi, t) \Big|_{t=0} = f(r, \varphi), \quad (11)$

Гранична умова: $-\lambda_n \cdot \frac{\partial T_{вн}}{\partial r} \Big|_{r=R_{mp}} - \alpha_m \cdot T_{вн} = -\alpha_m \cdot T_m, \quad (12)$

де R_{mp} – внутрішній радіус труби, м; ρ_n – густина, кг/м³; λ_n – теплопровідність, Вт/(м·К); c_n – теплоємність теплоносія в теплообміннику заряджання, Дж/(кг·К); t – час, с; T_m – температура теплоносія в теплообміннику заряджання, °С; $T_{вн}$ – температура ділянки на внутрішній поверхні труби, °С;

Розподіл температури на зовнішній поверхні труби змієвика (теплообмінника), яка контактує з масивом бетону .

$$\frac{\rho_n \cdot c_n}{\lambda_n} \cdot \frac{\partial T_{зовн}}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{зовн}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T_{зовн}}{\partial y^2}; \quad T_m(t, z, y) = T_{зовн}(t) \quad (13)$$

Початкова умова: $T_{зовн}(t, z, y) \Big|_{t=0} = T_{зовн}(o, z, y) = \bar{f}(z, y). \quad (14)$

$$T_{\bar{o}}(t, x, y, z) \Big|_{t=0} = T_{\bar{o},0}.$$

Граничні умови: $-\lambda_n \cdot \frac{\partial T_{зовн}}{\partial z} = -\lambda_{\bar{o}} \cdot \frac{\partial T_{\bar{o}}}{\partial z}; \quad -\lambda_n \cdot \frac{\partial T_{зовн}}{\partial y} = -\lambda_{\bar{o}} \cdot \frac{\partial T_{\bar{o}}}{\partial y}. \quad (15)$

де $r = R_{mp}^{зовн}$ – зовнішній радіус труби, м; $\rho_{\bar{o}}$ – густина, кг/м³; $\lambda_{\bar{o}}$ – теплопровідність, Вт/(м·К); $c_{\bar{o}}$ – теплоємність бетону в АТ, Дж/(кг·К); $T_{\bar{o}}$ – температура бетону (твердий ТАМ), °С; $T_{зовн}$ – температура на зовнішній поверхні труби змієвика (теплообмінника) заряджання, °С.

Задача розподілу температури у масиві бетону, в обмеженій області $0 \leq x \leq l_1; 0 \leq y \leq l_2; 0 \leq z \leq l_3$, вирішується розв'язком рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T_{\bar{o}}}{\partial t} = a_{\bar{o}} \cdot \left(\frac{\partial^2 T_{\bar{o}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\bar{o}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\bar{o}}}{\partial z^2} \right), \quad (16)$$

де $a_{\bar{o}}$ – температуропровідність бетону, м²/с.

Початкова умова: $T_{\bar{o}}(t, x, y, z) \Big|_{t=0} = T_{1,\bar{o}}. \quad (17)$

$$T_{\bar{o}}(t, x, y, z) \Big|_{x=0} = T_{\bar{o}}(t, x, y, z) \Big|_{x=l_1} = T_{\bar{o}}(t, y, z) = T_{\bar{o},1}; \quad (18)$$

Граничні умови: $T_{\bar{o}}(t, x, y, z) \Big|_{y=0} = T_{\bar{o}}(t, x, y, z) \Big|_{y=l_2} = T_{\bar{o}}(t, x, z) = T_{\bar{o},1}; \quad (19)$

$$T_{\bar{o}}(t, x, y, z) \Big|_{z=0} = T_{\bar{o}}(t, x, y, z) \Big|_{y=l_3} = T_{\bar{o}}(t, x, y) = T_{\bar{o},1}; \quad (20)$$

при цьому $T_{\bar{o},0} < T_{\bar{o},1}$, та є деякими константами.

Розподіл температури в каналах з рідинним ТАМ – гліцерином. $0 \leq r \leq R_l$;
 $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; $0 \leq z \leq l$.

$$\frac{\partial T_r}{\partial t} = a_r \cdot \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_r}{\partial z^2} \right], \quad (21)$$

де R_l – радіус каналу, м; l – довжина каналу вздовж вісі циліндра Oz , м.

Початкова умова: $T_r(r, \varphi, z, t) \Big|_{t=0} = T_{r,0}$. (22)

$$\frac{\partial T_r}{\partial r} + \tilde{k}_1 \cdot T_r = \tilde{k}_1 \cdot T_o(x, y, z, t), \quad (23)$$

Граничні умови:

при $r = R_l$

$$\frac{\partial T_r}{\partial r} - \tilde{k}_2 \cdot T_r = -\tilde{k}_2 \cdot T_o(x, y, z, t), \quad (24)$$

при $z=0$

при $z=l$

$$\frac{\partial T_r}{\partial z} + \tilde{k}_3 \cdot T_r = \tilde{k}_3 \cdot T_o(x, y, z, t), \quad (25)$$

де $\tilde{k}_1 = \frac{\alpha_{1r}}{\lambda_{1r}}$, α_{1r} - коефіцієнт тепловіддачі гліцерину, Вт/(м²·К), на поверхні $r = R_l$, м; λ_{1r} - коефіцієнт теплопровідності гліцерину, Вт/(м·К); a_r - коефіцієнт температуропровідності гліцерину, м²/с; $\tilde{k}_2 = \frac{\alpha_{2r}}{\lambda_{2r}}$, α_{2r} - коефіцієнт тепловіддачі гліцерину, Вт/(м²·К), на поверхні $z = 0$; $\tilde{k}_3 = \frac{\alpha_{3r}}{\lambda_{3r}}$, α_{3r} - коефіцієнт тепловіддачі гліцерину, , Вт/(м²·К), на поверхні $z = k$.

Оскільки гліцерин та теплоносій СТК (нанорідина на основі пропіленгліколю) є неньютонівськими рідинами, то проведено дослідження неізотермічного руху нелінійно-в'язкої рідини (у межах моделі Оствальда – де Віля) у плоскому каналі із заданим тепловим потоком на стінці, оскільки зі зміною температури відбувається різка зміна реологічних властивостей. Проаналізована ситуація, коли температура змінюється вздовж каналу, причому ця зміна доволі слабка по відношенню до зміни температури вздовж стінок каналу (у поперечному напрямку, тобто у площині симетрії). Аналітичним шляхом отримані місцеві значення N_{uk} (загальне число Нуссельта), яке залежить від критерію Біо (Bi), для розв'язування задачі про теплообмін у трубі круглого перерізу за граничних умов третього роду, з урахуванням ролі неньютонівських властивостей вказаних рідин.

У третьому розділі для зменшення кількості натурних дослідів для визначення оптимальної конструкції АТ проведено математичний експеримент за допомогою моделювання процесів роботи АТ з рідинним та твердим ТАМ за допомогою к-ε моделі.

За даними розрахунків, виконаних в другому розділі, виконана якісна оцінка процесів розподілу температур в об'ємі АТ з твердим та рідинним ТАМ рис. 4. Критерієм оптимізації був найменший градієнт температур в об'ємі АТ, порівняння проводились з бетонним АТ. Задачу рівномірного розподілу температур в об'ємі АТ вирішено за рахунок системи каналів, заповнених

рідинним ТАМ, що знаходяться в середині твердого ТАМ. Діаметр каналів, відстань між ними приймалися з розрахунку того, що рідинним ТАМ має велику вартість, кількість його в конструкції потрібно мінімізувати. Результати розподілу температур в об'ємі АТ наведені на рис.5. Для перевірки правильності розрахунків об'єму АТ та роботи системи з сезонним АТ з рідинним та твердим ТАМ, виконано моделювання процесу розрядження АТ, використавши розрахункові навантаження з розрахунків з другого розділу. Як видно з рис. 6 мінімальна температура в АТ в кінці періоду розрядження становить 54,8 °С, але при цьому середня температура в об'ємі АТ становить 55,7 °С, що задовольняє початкові умови заданих робочих температур АТ, оскільки після розрядження середня температура в зоні теплообмінників розрядження не опустилася нижче 55 °С.

Визначено еквівалентні теплофізичні характеристики $\rho_{\text{екв}}$, $c_{\text{екв}}$, $\lambda_{\text{екв}}$ розробленої конструкції АТ:

$$c_{\text{екв}} = \frac{c_{\text{Г}} \cdot V_{\text{Г}} + c_{\text{Б}} \cdot V_{\text{Б}}}{V_{\text{Г}} + V_{\text{Б}}} = \frac{2,79 \cdot 33,39 + 1,13 \cdot 182,14}{215,53} = 1,39 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (26)$$

$$\rho_{\text{екв}} = \frac{\rho_{\text{Г}} \cdot V_{\text{Г}} + \rho_{\text{Б}} \cdot V_{\text{Б}}}{V_{\text{Г}} + V_{\text{Б}}} = \frac{1208 \cdot 33,39 + 2242 \cdot 182,14}{215,53} = 2082 \text{ кг}/\text{м}^3 \quad (27)$$

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\lambda_{\text{Г}} \cdot V_{\text{Г}} + \lambda_{\text{Б}} \cdot V_{\text{Б}}}{V_{\text{Г}} + V_{\text{Б}}} = \frac{0,289 \cdot 33,39 + 1,4 \cdot 182,14}{215,53} = 1,23 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) \quad (28)$$

де об'єм гліцерину та бетону в конструкції АТ, виходячи з математичного моделювання, має співвідношення 1,1:6.

Експериментальні дослідження проводились на дослідній моделі, габарити якої розраховані за теорією подібності. Схема принципової установки експериментального стенду наведена на рис. 7. Схема розміщення датчиків температури (1 шт) в об'ємі АТ, та конструкція АТ наведені на рис.8.

Дослідження проводились на основі планування повного факторного експерименту, вихідними факторами якого були: температура теплоносія $x_1 = T$, °С, час заряджання АТ $x_2 = t$, хв. Функцією відгуку є температура ТАМ в середині АТ. За результатами регресійного аналізу апроксимуючий поліном набув вигляду:

$$y = 106,52 \cdot x_0 + 1,43 \cdot x_1 + 6,25 \cdot x_2 + 0,7 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (29)$$

На експериментальному стенді, зображеному на рис.7 проведено дослідження розподілу температур в об'ємі АТ при його заряджанні теплоносієм з температурами 110 °С, 115 °С, 120 °С. На рис.9 зображені експериментальні дані та результати апроксимованих даних для т.1 в об'ємі АТ при заряджанні теплоносієм з температурою 110 °С.

Рівняння апроксимації залежності температури від часу зарядження АТ:

$$T = \left(\frac{\text{arctg} \left(\left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right)}{\pi/2} \right)^n, \quad (30)$$

де T – значення температури в об'ємі АТ, °С; t – час заряджання АТ, хв.

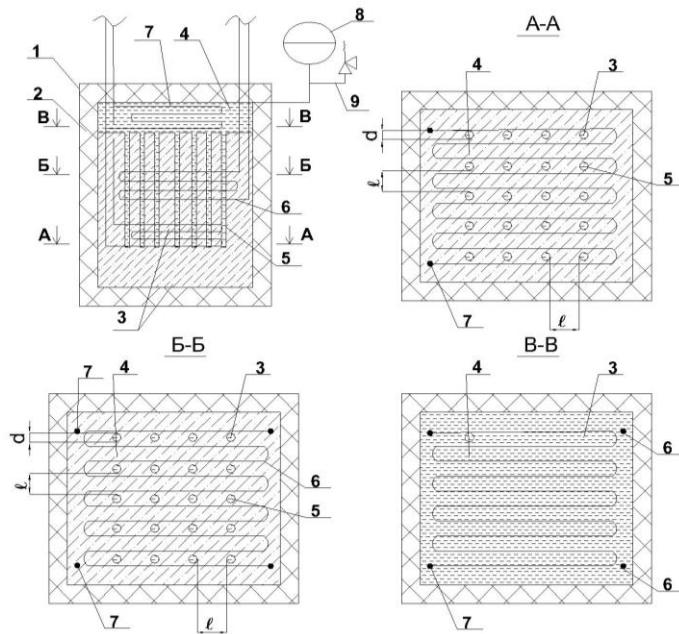


Рис.4. Конструкція АТ з твердим та рідинним ТАМ.

1 – корпус;
 2 – теплоізоляція;
 3 – твердий ТАМ (бетон);
 4 – рідинним ТАМ (гліцерин);
 5 – канали з рідинним ТАМ в об'ємі твердого;
 6 – теплообмінник зарядження АТ;
 7 – теплообмінник розрядження;
 8 – мембранний розширювальний бак;
 9 – запобіжний клапан;
 Δ – товщина прошарку з рідинним ТАМ; d – діаметр каналу, заповненого рідинним ТАМ; l – відстань між каналами.

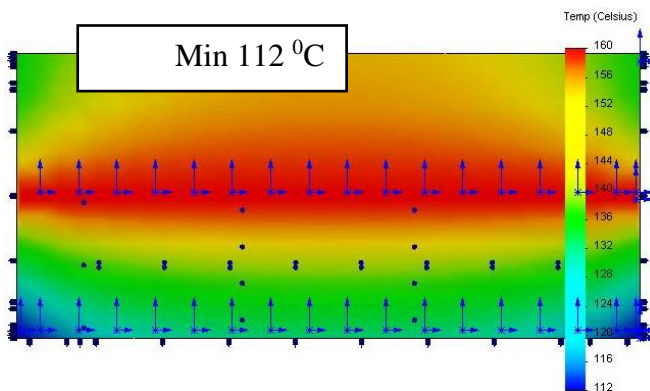


Рис. 5. Конструкція АТ з твердим та рідинним ТАМ, діаметр каналів 100мм, відстань 500мм, результати розрахунку.

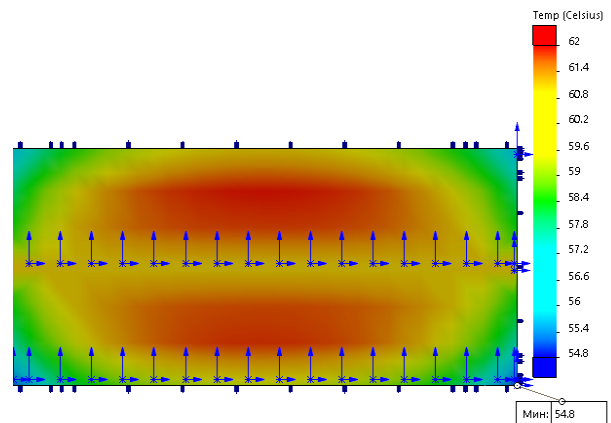
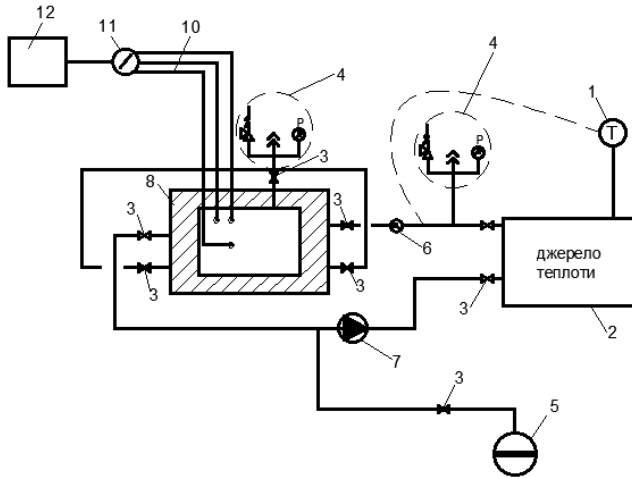


Рис. 6. Конструкція АТ з твердим та рідинним ТАМ, діаметр каналів 100мм, відстань 500мм, результати розрахунку після зарядження АТ.

За результатами експериментальних досліджень зроблено висновок, що в розробленій конструкції АТ нагрів ТАМ відбувається рівномірно та забезпечується рівномірний розподіл температур в об'ємі АТ.

Розрахунки ТАМ велись для експлуатації при температурі теплоносія для зарядження АТ 150 °С. А температури на виході з СТК можуть досягати 200 °С. Для отримання значень температур в об'ємі АТ при заряджанні теплоносієм з будь-якою температурою в межах 100-200 °С використано метод екстраполяції, базуючись на апроксимованих даних натурних досліджень при заряджанні АТ теплоносієм 110 °С, 115 °С, 120 °С в усіх характерних точках в об'ємі ТАМ. Для порівняння достовірності екстрапольованих даних проведено математичне

моделювання процесу заряджання моделі АТ в лабораторних умовах теплоносієм 110 °С, 115 °С, 120 °С, 150 °С за допомогою к-ε моделі. За результатами верифікації отриманих результатів зроблено висновок про достовірність екстрапольованих даних.



- 1 - термостат для регулювання і подачі теплоносія для заряджання АТ;
- 2 - джерело теплоти для заряджання АТ (електрокотел);
- 3 - кульовий кран;
- 4 - група безпеки;
- 5 - розширювальний бак;
- 6 - лічильник-витратомір;
- 7 – насос;
- 8 - теплова ізоляція;
- 9 - АТ;
- 10 - ТОМ в об'ємі ТА;
- 11 - перемикач терморпар;
- 12 - вольтметр Ф266

Рис.7. Принципова схема дослідної установки.

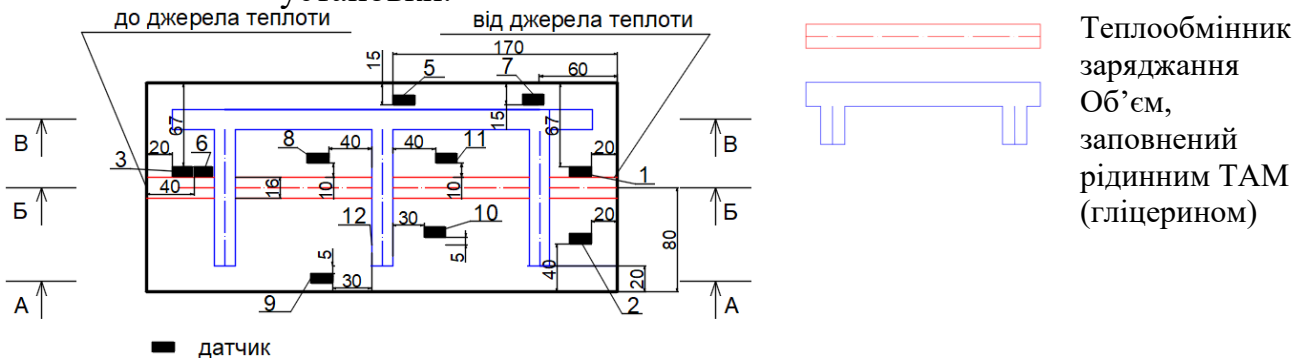


Рис.8 Конструкція АТ і розміщення датчиків температури, вид збоку.

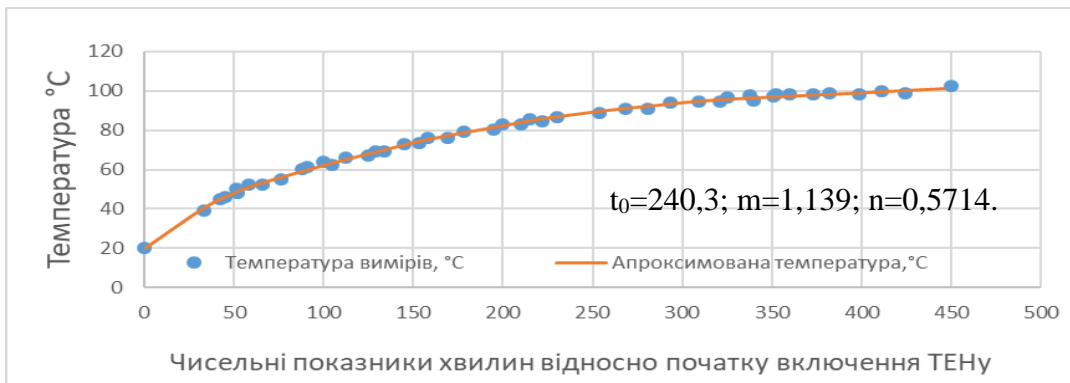


Рис. 9. Процес зміни температури в т.1 АТ при нагріві теплоносієм 110°С.

Розраховано значення еквівалентного коефіцієнту теплопровідності експериментальної установки та математичної моделі експериментальної установки і проведено їх порівняння зі значенням, отриманим по формулі (28) – $\lambda_{\text{екв}}=1,23 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Розрахунок проведено за допомогою закону Фур'є:

$$q_{ij} = \lambda_{i,\text{екв}} \cdot \frac{T_i - T_j}{\Delta x}, \quad (31)$$

де Δx – відстань від теплообмінника заряджання до точки заміру температури, м. Теоретичне $\lambda_{\text{екв}}=1,23$ Вт/(м·К), Експериментальне $\lambda_{\text{екв}}=1,242$ Вт/(м·К), Математичне моделювання $\lambda_{\text{екв}}= 1,252$ Вт/(м·К) похибка складає $(1,252-1,23) \cdot 100/1,23=1,79\%$.

У четвертому розділі описана робота системи децентралізованого теплопостачання з сезонним теплоакумулятором та системою геліоколекторів. Також на основі теоретичних досліджень, проведених в другому розділі представлена методика розрахунку та оптимізації трубчастих теплообмінних апаратів для неньютонівських рідин. Представлено основні вихідні положення та технічні дані, якими необхідно керуватись під час виконання цих розрахунків. Реалізований алгоритм розрахунку трубчастих теплообмінників (рис. 10) на базі програми VISSIM . Для кількісної оцінки введено параметр k_Q , який дорівнює відношенню кількості переданої теплоти до витраченої на це енергії (32).

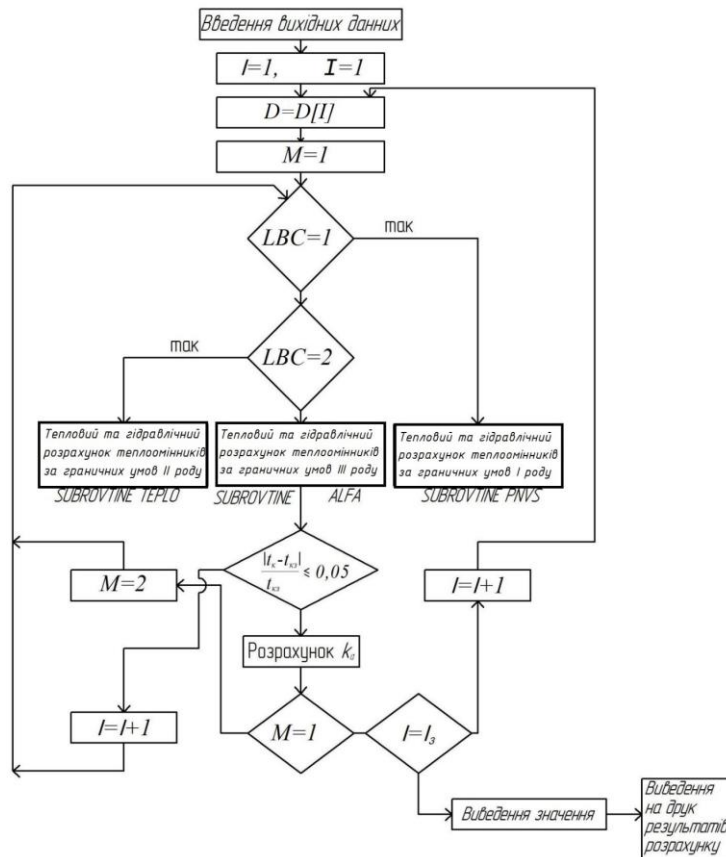


Рис.10. Схема алгоритму розрахунку трубчастих теплообмінників.

$$k_Q = \frac{Pe \cdot \frac{D}{L} \cdot (1 - \bar{\theta})}{32 \cdot (\bar{C}_f^{nis} / \bar{C}_{fo}^{nis}) \cdot Br_0^*} \quad (32)$$

де Pe – критерій Пекле; D – діаметр теплообмінника, м; L – довжина труби теплообмінника, м; $\bar{\theta}$ – середня безрозмірна температура рідини; $\bar{C}_f^{nis} / \bar{C}_{fo}^{nis}$ – параметр стійкості течій; Br_0^* – число Брінкмана.

Розроблена методика розрахунку конструктивних елементів АТ з рідинним

та твердим ТАМ, яка враховує місце розміщення АТ, у разі розміщення під будівлею площу цієї будівлі, граничне значення зминання ґрунтового масиву у місці будівництва АТ, відношення об'ємів гліцерину та бетону, розраховані в третьому розділі. Для визначення оптимального співвідношення d (діаметрів каналів з рідинним ТАМ) та k (кількість каналів) введено залежності:

$$k = m^2, L = \frac{X^*}{m-1}, \quad (33)$$

які визначають число каналів у бетонному масиві m на лінійному розмірі X^* , м (довжина або ширина АТ), загальне число каналів k та відстань між каналами L , м. Варіюючи значеннями $d=100\dots200$ мм встановлюються прийнятні значення величин k , m та L .

Для ефективного використання закумульованої теплоти система опалення має реагувати на будь-які зміни параметрів навколишнього середовища в часі найкоротший термін, підлаштовуючи витрату теплоти під відповідні параметри, щоб уникнути непродуктивних втрат теплоти системою. Для цього було запропоновано показник техніко-економічної ефективності роботи опалювального приладу, який визначається як середньозважена величина питомого грошового еквіваленту теплової інерційності (C_i^p , грн/(кВт·рік)) та питомої вартості 1 кВт встановленої теплової потужності опалювального приладу (C , грн/(кВт·рік)).

$$E = \sqrt{C_i^p \cdot C}, \text{ грн} / (\text{кВт} \cdot \text{рік}). \quad (34)$$

Проведене техніко-економічне порівняння опалювальних приладів по групам, дозволило зробити висновок, що найефективніший опалювальний прилад з економічної точки зору – конвектор, а якщо роздивлятися радіатори, то найефективнішими виявилися мідно-алюмінієві.

Наведено результати техніко-економічного зіставлення двох систем теплопостачання приватного будинку. До порівняння приймалась: варіант 1 – розроблена система з сезонним АТ з твердим та рідинним ТАМ та системою СТК (рис.1); варіант 2 - забезпечення теплопостачання за допомогою електрокотла. Термін окупності розробленої системи з сезонним АТ з твердим та рідинним ТАМ та системою СТК становить 8,97 років.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ:

1. Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено енергоефективність розробленої сонячної системи децентралізованого теплопостачання із сезонним акумулюванням теплоти на основі твердого і рідинного теплоакумулюючих матеріалів.

2. Встановлено, що сезонні акумулятори теплоти на основі твердих і рідинних теплоакумулюючих матеріалів необхідно і можливо створити шляхом використання комбінації твердого та рідкого акумулюючого матеріалу.

3. Розроблена математична модель акумулятора теплоти з рідинним та твердим теплоакумулюючими матеріалами в межах моделі Оствальда – де Віля

дозволяє описати три випадки теплообміну з навколишнім середовищем при зміні температури вздовж труби (каналу).

4. Отримані аналітичним шляхом місцеві значення числа Нуссельта, які залежить від числа Біо, дозволяють розв'язувати задачі теплообміну у трубі круглого перерізу за граничних умов третього роду. Показано, що для ньютонівських рідин, в межах моделі Оствальда – де Віля, вже при числі Біо 40 задача з граничними умовами третього роду може бути зведена до задачі з граничними умовами першого роду.

5. Розроблена на основі реалізації математичної моделі нестационарного теплообміну конструкція сезонного акумулятора теплоти з рідинним і твердим теплоакumuлюючими матеріалами дозволяє в діапазоні 100-200 °С досягти підвищення ефективності використання сонячної теплової енергії зі зменшенням об'єму акумулятора теплоти в 1,28 разів порівняно з бетонним акумулятором теплоти і у 1,52 разів у порівнянні з водяним.

6. Виконані експериментальні дослідження роботи акумулятора теплоти з твердим та рідинним теплоакumuлюючими матеріалами показали відхилення отриманих теоретичних та експериментальних даних у межах 2,03 %. Тепловий акумулятор з твердим та рідинним теплоакumuлюючими матеріалами дозволяє отримати в об'ємі акумулятора на 3,8% вищі температурні показники, аніж бетонний.

7. Створена методика інженерного розрахунку основних параметрів акумулятора теплоти з рідинним та твердим теплоакumuлюючими матеріалами дозволяє підібрати та розрахувати елементи розробленої системи децентралізованого теплопостачання задля максимальної утилізації нестационарних надходжень енергії вторинних та відновлюваних джерел.

8. На підставі техніко-економічного порівняння термін окупності системи децентралізованого теплопостачання з СТК і сезонним АТ з рідинним і твердим ТАМ становить 8,97 років. Це підтверджує економічну доцільність спорудження таких систем. Основні положення і результати проведених досліджень впроваджено в проєктах ТОВ «ІКБ «Панорама», м. Київ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Любарець О.П., Москвітіна А.С. Техніко-економічне обґрунтування використання теплоакumuлюючих матеріалів для систем міжсезонного сонячного теплопостачання. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. збірник*. 2014. № 17. С.115-119. (Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні методики техніко-економічного порівняння теплоакumuлюючих матеріалів).

2. Любарець О.П., Москвітіна А.С. Аналіз конструкцій сезонних теплоакumuляторів для забезпечення систем гарячого водопостачання та опалення в котеджному будівництві. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. збірник*. 2015 № 18. С. 61-69. (Особистий

внесок здобувача полягає в чисельному моделюванні роботи вибраної конструкції теплового акумулятору).

3. Любарець О.П., Москвітін А.С. Порівняння конструкцій теплових акумуляторів з твердим теплоакumuлюючим матеріалом та комбінованим теплоакumuлюючим матеріалом. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. збірник*. 2016. №19. С. 101-111. (Особистий внесок здобувача полягає в чисельному моделюванні роботи різних конструкцій теплового акумулятору)

4. Любарець О.П., Москвітін А.С. Вибір форми і розрахунок об'єму сезонного акумулятора теплоти. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. збірник*. 2016. № 20. С. 24-38. (Особистий внесок здобувача полягає обґрунтуванні методики розрахунку об'єму теплового акумулятора).

5. Москвітін А. С. Розрахунок оптимальної товщини теплової ізоляції сезонного акумулятора теплоти. *Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. зб.* 2018. №. 67. - С. 298-307.

6. Любарець О.П., Предун К.М., Москвітін А. С. Методика техніко-економічного порівняння опалювальних приладів для застосування в сучасних динамічних системах водяного опалення. *Управління розвитком складних систем: зб. наук. Праць. Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури*. 2019. № 37. С. 210-218. (Особистий внесок здобувача полягає в розробці методики для техніко-економічного порівняння опалювальних приладів).

7. Chovniuk Y., Moskvitina A. Numerical and analytical solution of the heat exchange problem. *Innovative solutions in modern science. New York*. 2020. Vol. (8) 44. P.12-23. (Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, CORE, BASE) (Особистий внесок здобувача полягає в розробці оцінки точності чисельних розрахунків у порівнянні з аналітичними підходами до розв'язку задач теплообміну при граничних умовах першого та третього роду.)

8. Brovatets O., Chovniuk Y., Moskvitina A. Rheodynamics non-viscous medium in long (cylindrical) pipes: using the Ostwald-De Ville model. *ECONTECHMOD: An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes, Polish Academy of Sciences, Branch in Lublin*. 2020 Vol. 9, № 2 p.19-22. (Google Scholar) (Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні й аналізі реологічно-динамічних особливостей нелінійно-в'язких середовищ у довгих трубах в межах моделі Оствальда – де Віля при заданому тепловому потоці на стінці.)

9. Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Москвітін А.С., Шишина М.О. Розрахунок конструктивних елементів акумулятору теплоти з рідким та твердим теплоакumuлюючим матеріалом. *Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. Збірник*. 2021. № 77. С. 371-378. (Особистий внесок здобувача полягає в розробці методики розрахунку конструктивних елементів акумулятора теплоти з твердим та рідким теплоакumuлюючими матеріалами.)

10. Тепловий акумулятор. пат. 112097 Україна: F24H 7/02, F28D 20/02. № а201407690; Любарець О.П., Москвітіна А.С.; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 25. 4 с. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробленні конструкції теплового акумулятора з рідинним та твердим теплоакumuлюючими матеріалами).*

АНОТАЦІЯ

Москвітіна А.С. Енергоефективне сезонне акумулювання теплоти в системах сонячного децентралізованого теплопостачання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.03 «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання» (192 –Будівництво та цивільна інженерія). – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми – розробці енергоефективної системи децентралізованого теплопостачання від вторинних та відновлюваних джерел з використанням теплоємнісного акумулятора з твердим і рідинним теплоакumuлюючими матеріалами.

На підставі проведеного аналізу означено ряд недоліків існуючих акумуляторів теплоти та розроблено принципову схему децентралізованого теплопостачання з сонячними тепловими колекторами та сезонним акумулятором теплоти з рідинним та твердим теплоакumuлюючими матеріалами. Акумулятор теплоти складається з корпусу з теплоізоляцією, в якому розташований твердий теплоакumuлюючий матеріал, бетон, у формі куба, з вертикальними круглими каналами, заповненими рідинним теплоакumuлюючим матеріалом, гліцерином, а також в верхній частині є прошарок, заповнений рідинним теплоакumuлюючим матеріалом.

На основі математичного моделювання та експериментальних дослідів виконано комплекс досліджень щодо визначення теплофізичних характеристик розробленої конструкції акумулятора теплоти, а також співвідношення об'ємів твердого та рідинного теплоакumuлюючих матеріалів.

На основі результатів проведених досліджень розроблено алгоритм роботи системи децентралізованого теплопостачання з системою сонячних теплових колекторів і сезонного акумулятора теплоти з твердим та рідинним теплоакumuлюючими матеріалами. Розроблено методику інженерного розрахунку конструктивних елементів акумулятора теплоти з рідинним і твердим теплоакumuлюючими матеріалами. А для уникнення непродуктивних втрат закумуляованої теплоти системою опалення було запропоновано показник техніко-економічної ефективності роботи опалювального приладу.

Результати роботи впроваджено в проєктах ТОВ «ІКБ «Панорама» (м.Київ).

Ключові слова: сезонний акумулятор теплоти, теплоакumuлюючий матеріал, акумулювання теплової енергії, конструкція сезонного акумулятора теплоти, децентралізоване теплопостачання.

АННОТАЦИЯ

Москвитина А.С. Энергоэффективное сезонное аккумулирование теплоты в системах солнечного децентрализованного теплоснабжения. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.23.03 «Вентиляция, освещение и теплогазоснабжения» - Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной проблемы - разработке энергоэффективной системы децентрализованного теплоснабжения от вторичных и возобновляемых источников с использованием теплоёмкостного аккумулятора с твердым и жидким теплоаккумулирующими материалами.

На основании проведенного анализа отмечен ряд недостатков существующих аккумуляторов теплоты и разработана принципиальную схему децентрализованного теплоснабжения с солнечными тепловыми коллекторами и сезонным аккумулятором теплоты с жидкостным и твердым теплоаккумулирующими материалами. Аккумулятор теплоты состоит из корпуса с теплоизоляцией, в котором расположен твердый теплоаккумулирующий материал, бетон, в форме куба с вертикальными круглыми каналами, заполненными жидкостным теплоаккумулирующим материалом, глицерином, а также в верхней части есть прослойка, заполненная жидким теплоаккумулирующим материалом.

На основе математического моделирования и экспериментальных исследований выполнен комплекс исследований по определению теплофизических характеристик разработанной конструкции аккумулятора теплоты, а также соотношение объемов твердого и жидкостного теплоаккумулирующих материалов.

На основе результатов проведенных исследований разработан алгоритм работы системы децентрализованного теплоснабжения с системой солнечных тепловых коллекторов и сезонным аккумулятором теплоты с твердым и жидким теплоаккумулирующими материалами. Разработана методика инженерного расчета конструктивных элементов аккумулятора теплоты с жидкостным и твердым теплоаккумулирующими материалами. А во избежание непроизводительных потерь аккумулированной теплоты системой отопления было предложено показатель технико-экономической эффективности работы отопительного прибора.

Результаты работы внедрены в проектах ООО «ИКБ «Панорама» (г.Киев).

Ключевые слова: сезонный аккумулятор теплоты, теплоаккумулирующий материал, аккумулирование тепловой энергии, конструкция сезонного аккумулятора теплоты, децентрализованное теплоснабжение.

ANNOTATION

Moskvitina A.S. Energy efficient seasonal accumulation of heat in solar decentralized heating systems. - Manuscript.

Dissertation for the degree of technical sciences candidate, specialty 05.23.03 – «Ventilation, lighting, heat and gas supply»– Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to solving an urgent problem - the development of an energy efficient system of decentralized heat supply from secondary and renewable sources using a heat storage with solid and liquid heat accumulating materials.

Based on the analysis, a number of disadvantages of the existing heat accumulators were noted and a schematic diagram of decentralized heat supply with solar thermal collectors and a seasonal heat accumulator with liquid and solid heat accumulating material was developed. The heat accumulator consists of a body with thermal insulation, in which there is a solid heat-accumulating material, concrete, in the form of a cube with vertical round channels filled with a liquid heat-accumulating material, glycerin, and also in the upper part there is an interlayer filled with a liquid heat-accumulating material.

On the basis of mathematical modeling and experimental studies, a set of studies was carried out to determine the thermophysical properties of the developed construction of the heat accumulator and the ratio of the volumes of solid and liquid heat accumulating materials.

Based on the results of the research, an algorithm for the operation of a decentralized heat supply system with a system of solar thermal collectors and a seasonal heat accumulator with solid and liquid heat accumulating materials has been developed. A method of engineering calculation of structural elements of a heat accumulator with liquid and solid heat accumulating materials has been developed. And in order to avoid unproductive losses of accumulated heat by the heating system, an indicator of the technical and economic efficiency of the heater was proposed.

The results of the work have been implemented in the projects of EDB Panorama LLC, Kyiv.

Key words: seasonal heat accumulator, heat accumulating material, accumulation of thermal energy, seasonal heat accumulator design, decentralized heat supply.