

# **ВІДГУК**

## **офіційного опонента**

кандидата технічних наук, доцента,

в.о. завідувача кафедри теплоенергетики

Національного університету біоресурсів і природокористування України

**Антипова Євгена Олексійовича**

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 досліджень.**

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.

## **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;
- визначені 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.**

Достовірність отриманих автором дослідним шляхом результатів підтверджується використанням класичних методів досліджень (зокрема логічного аналізу літературних джерел та існуючих нормативно-правових документів, систематизації інформації, розробленні спрощених математичних моделей і т.п.); коректністю постановки задач, що розв'язуються; задовільною збіжністю

результатів теоретичних розрахунків досліджуваних процесів, а також порівнянням експериментальних даних з відомими теоретичними та дослідними даними інших авторів. Достовірність висновків і рекомендацій практичного характеру підтверджується використанням апробованих методик та обґрунтованим обсягом аналітичних та експериментальних досліджень.

У процесі детального аналізу дисертаційної роботи та автореферату не виявлено висновків та тверджень, що викликають сумніви, оскільки, найбільш важливі наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі, пройшли відповідну апробацію, опубліковані в спеціалізованих наукових виданнях і обговорювалися на наукових конференціях та семінарах провідними фахівцями по даній проблематиці.

#### **4. Практична цінність роботи.**

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

#### **5. Повнота викладення здобувачем основних результатів.**

Матеріали дисертації викладено у 10 друкованих працях, у тому числі: 7 статтях у фахових виданнях України, 2 – у міжнародних виданнях, одержано 1 патент України на винахід. Основні положення дисертації доповідалися на міжнародних і національних науково-практичних конференціях. Це дає право зробити висновок про те, що у науково-технічних виданнях є повна інформація про результати дисертаційної роботи.

## **6. 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 проведено 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.

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

Дисертаційна робота має вступ, чотири розділи основної частини, загальні висновки, список використаних літературних джерел з 160 найменувань та додатки. Робота викладена на 195 сторінках друкованого тексту, у тому числі 159 сторінках основного тексту, містить 110 рисунків і 16 таблиць.

Застосована в роботі наукова термінологія є загальноновизнаною, стиль викладення результатів теоретичних і експериментальних досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їхнього сприйняття. Автор демонструє вміння стисло і логічно викладати суть проблеми, грамотно пояснювати запропоновані рішення. Оформлення дисертації відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України.

## **8. Відповідність тексту автореферату й дисертації.**

Зміст, результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також основні висновки, які наведені в авторефераті, відповідають основним положенням дисертації і повністю їх відображають.

## **9. Аналіз основного змісту роботи.**

Всі розділи дисертаційної роботи змістовно підпорядковані меті дослідження, 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 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 неньютонівською рідиною.

**У другому розділі**, спираючись на існуючі розробки в системах сонячного теплопостачання була розроблена принципова схема теплопостачання з сонячними тепловими колекторами (СТК) та сезонним АТ.

Проведено техніко-економічне обґрунтування різних видів ТАМ на підставі запропонованого факторного критерію оптимізації. Встановлено, що для систем теплопостачання з джерелом теплоти в межах 100-200 °С в якості ТАМ доцільно використовувати гліцерин та бетон. Показано, що на форму АТ впливає місце його розміщення, яке, в свою чергу, впливає на оптимальну товщину теплової ізоляції АТ, що потрібно враховувати при проектуванні сезонних АТ.

Розроблена математична модель АТ з рідинним та твердим ТАМ для дослідження тепломасообмінних процесів та розподілу температур в об'ємі ТАМ. Аналітичним шляхом отримані місцеві значення  $Nu_k$  (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 k-ε моделі.

Виконана якісна оцінка процесів розподілу температур в об'ємі АТ з твердим та рідинним 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 k-ε моделі. Розраховано значення еквівалентного коефіцієнту теплопровідності експериментальної установки та математичної моделі експериментальної установки і проведено їх порівняння.

**У четвертому розділі** описана робота системи децентралізованого теплопостачання з сезонним теплоакумулятором та системою геліоколекторів. Також на основі теоретичних досліджень 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 на базі програми VISSIM.

Для кількісної оцінки введено параметр  $k_Q$ , який дорівнює відношенню кількості переданої теплоти до витраченої на це енергії. Запропоновано показник техніко-економічної ефективності роботи опалювального приладу.

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

### **10. В роботі заслуговує уваги:**

- наукові результати, які були здобуті вперше;
- зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами;
- практично орієнтоване направлення;
- апробація та впровадження отриманих результатів.

### **11. Зауваження до дисертації:**

1. У першому розділі дисертації описано різні системи акумуляції з акумуляторами теплоти на основі рідких або твердих ТАМів, а також ті, що використовують теплоту фазового переходу та хімічні реакції для акумулювання теплоти. Описано їх переваги та недоліки, однак, на нашу думку, варто також було б більш детально звернути увагу на фазоперехідні органічні матеріали, зокрема евтектики, які по своїм теплофізичним властивостям значно переважають чисті органічні та описані рідкі й тверді ТАМ.

2. Із системи рівнянь 2.14-2.16, які представлені на с.62, не зовсім зрозуміло чи враховуються теплові втрати трубопроводом, який, як правило, знаходиться або в некондиціонованому об'ємі, або ззовні приміщення і з'єднує СТК та бак ГВП/буферну ємність, чи їх враховано у загальних тепловтратах від баку ГВП/буферної ємності в навколишнє середовище?

3. В якості теплової ізоляції корпусу (стін) акумулятора теплоти пропонується використовувати базальтову вату, яка, наскільки це зрозуміло з тексту на с.67, покривається руберойдом. Однак, враховуючи умови експлуатації та розміщення самого акумулятора теплоти, яке передбачено під будівлею в землі, на нашу думку, доцільніше використовувати ЕППС або утеплювачі з полімерних матеріалів, які мають значно кращі теплофізичні характеристики та адаптовані для використання безпосередньо у ґрунті. Чи враховувався показник механічної стійкості (міцності) базальтової вати під час проведення досліджень/розрахунків?

4. З рис.2.12, на с.99, не зовсім зрозумілим є пояснення «радіус (поточний), який відраховується від вісі Oz циліндричної труби», на нашу думку, варто було б графічно зобразити межу/ї його поширення.

5. При визначенні оптимального місця положення циліндричних каналів заряджання/розряджання, незрозуміло чи визначався вплив величини так званого граничного радіуса поширення теплоти в масиві акумулюючого матеріалу?

6. На рис. 3.13, 3.15 та 3.16 показано наявність зон із низькою температурою теплоакumuлюючого матеріалу (синій колір) у кутових місцях корпусу акумулятора, що вказує на можливе зниження значення коефіцієнту корисного використання маси ТАМ акумулятора теплоти запропонованої конструкції, чи враховувався цей факт при розрахунку потужності акумулятора теплоти?

7. З отриманих у розділі 3 результатів, незрозуміло чи впливає багатократність циклів «заряджання/розряджання» на теплофізичні властивості акумулюючого матеріалу при тривалій експлуатації акумулятора.

8. Для відображення повноти картини «протікання» процесів тепло- і масообміну, які відбуваються під час сезонної роботи акумулятора теплоти, на нашу думку, варто було б також графічно представити зміну температури у контрольних точках в об'ємі теплоакumuлюючого матеріалу під час «розряджання» АТ запропонованої конструкції?

9. Під час розрахунку терміну окупності системи прийнято досить наближені дані по вартості робіт та обладнання, не врахована ставка дисконту.

10. Певні твердження потребують додаткових пояснень, зокрема не зрозуміло використання умовних позначень величин, яким надано подвійне значення: «Т, t, τ – температура, °С», а також «τ, t – час, с»?

11. У роботі наявні окремі описи та неточності, зокрема:

- на с.27 зазначено: «...великих пластикових аркушів.», варто було б – «...великих пластикових **листів.**»;

- на с.46 зазначено: «...вводиться параметр...», варто було б – «...вводиться **параметр...**»;

- на с.62 спостерігається невідповідність умовних позначень до відповідних текстових підписів системи рівнянь 2.14-2.16, наприклад: « $Q_{ск}$  – тепловий потік від системи СТК»;

- на с.100 зазначено: «...струменевої течії...», варто було б – «...**струменевої** течії...»;

- на с.145, рис.4.2 підписано: «Температурний графік системи опалення 80-60 С<sup>0</sup>» хоча самі залежності знаходяться в інтервалі температур **40-60 °С** та ін.

## ВИСНОВОК

Наведені зауваження не носять принципового характеру та суттєво не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

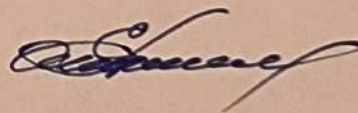
Дисертаційна робота Москвітіної Анни Сергіївни «Енергоефективне сезонне акумулювання теплоти в системах сонячного децентралізованого теплопостачання» є завершеною науковою роботою, в якій на підставі виконаних автором на сучасному рівні експериментальних і теоретичних досліджень вирішено важливі наукові й практичні задачі та отримано нові науково



обґрунтовані результати. Зазначене є суттєвим доробком для подальшого розвитку актуальних напрямків у галузі енергетики та технічної теплофізики, зокрема дозволяє скоротити енергетичні затрати та підвищити стабільність і надійність процесу енергозабезпечення споживачів тепловою енергією.

Дисертаційна робота Москвітної А. С. відповідає паспорту спеціальності 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання і профілю Спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07. За своєю актуальністю, новизною, глибиною досліджень, достовірністю та практичною цінністю, об'ємом та змістом дисертаційна робота повністю відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор, Москвітніна Анна Сергіївна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.

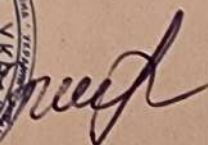
Офіційний опонент,  
кандидат технічних наук, доцент,  
в.о. завідувача кафедри  
теплоенергетики  
Національного університету  
біоресурсів і природокористування  
України



Є.О. Антипов

Підпис кандидата технічних наук, доцента,  
в.о. завідувача кафедри  
теплоенергетики  
Національного університету  
біоресурсів і природокористування  
України Є.О. Антипова засвідчую:

Вчений секретар Вченої ради  
Національного університету  
біоресурсів і природокористування  
України



О.Д. Барановська