

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

**д. т. н., с. н. с. Горобця Валерія Григоровича**

на дисертаційну роботу **Шаповала Степана Петровича**

**«Системи теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову»,** представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.

### **Актуальність теми дисертаційної роботи.**

Використання традиційних енергетичних ресурсів пов'язане із споживанням природних паливних ресурсів, які є вичерпними, мають високу вартість та негативно впливають на екологію навколишнього середовища. Відповідно до енергетичної стратегії розвитку України пріоритетними напрямками розвитку енергетики є енергозбереження в існуючих системах виробництва теплової і електричної енергії, впровадження енергоефективних технологій та перехід до альтернативних джерел енергії. Останній напрямок нерозривно пов'язаний з розробкою енергозберігаючих будівель, у яких основними джерелами енергії являється сонячна енергія, тепла енергія ґрунту та повітря.

В той же час розроблені конструкції сонячних колекторів для отримання теплової енергії мають високу вартість та потребують значних затрат на їх монтаж та обслуговування. Тому актуальною є задача розробки інженерно-технологічних рішень по створенню нових конструктивних і архітектурних елементів будівель та споруд, які одночасно є енергозберігаючими і використовують енергію сонячного випромінювання для теплозабезпечення будівель, що сприяє покращенню екології та знижує матеріальні і трудові витрати для підтримання в них оптимального мікроклімату.

Виходячи з вищесказаного, дисертаційна робота Шаповала С.П., мета якої полягає у науковому обґрунтуванні та розробленні систем теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову (ЗОПСЕТ), є важливою та актуальною.

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

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до закону України "Про енергетичну ефективність будівель" № 2118-VIII і енергетичної

стратегії України на період до 2035 року (затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України 18 серпня 2017 р. № 605-р) та відповідає науковому напрямку кафедри теплогазопостачання і вентиляції Національного університету "Львівська політехніка" – "Енергоощадність систем теплогазопостачання і вентиляції". Роботи виконувались відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) № 0115U000439, НДР № 0115U004698; № 0112U006213; 0115U004698; 0115U000448 та в межах виконання держбюджетних НДР двох грантів Національного університету «Львівська політехніка» № 0112U001201; № 0116U008628.

### **Структура та обсяг дисертації.**

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою. Роботу Шаповала С.П. виконано у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України. Дисертаційна робота викладена на 378 сторінках, складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел. Основний текст роботи викладений на 297 сторінках, має 15 таблиць, 334 рисунки. Список використаних бібліографічних джерел містить 434 найменування.

### **Оформлення дисертації, стиль викладу та мова дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота оформлена відповідно до стандарту ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки й техніки. Структура і правила оформлення». Матеріал дисертації викладено в послідовності, що відповідає поставленим в роботі завданням, текст дисертаційної роботи написано у науковому стилі. Обсяг і структура роботи відповідають вимогам, які встановлено АК МОН України.

Стиль висловлювання та подача матеріалу досліджень є логічними, послідовними і зв'язаними єдиною цільовою спрямованістю. Стиль викладу матеріалу дисертації, висновків, наукових положень є притаманним науковим дослідженням. Мова дисертації лаконічна, термінологічно відповідає сучасним нормам, коректна та зрозуміла.

**Зміст дисертації, об'єкт і предмет дослідження** відповідають паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

## **Основний зміст роботи.**

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, вказано на її зв'язок з науковими програмами, планами та темами Національного університету «Львівська політехніка», сформульовано мету і основні завдання досліджень, розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів. Наведено відомості про особистий внесок автора, апробацію, опубліковані результати,

*В першому розділі «Аналіз сучасного стану технологій теплозабезпечення енергоефективних будівель із використанням сонячної енергії»* розглядається стан проблеми, якій присвячена дисертаційна робота. Виконано аналіз потенціалу сонячної енергетики та існуючих систем сонячного теплопостачання. Проаналізовано переваги та недоліки різних конструкцій сонячних колекторів, методи їх досліджень. Проведено аналіз основних напрямків підвищення ефективності сонячних колекторів та систем сонячного теплопостачання в цілому.

Критичний аналіз існуючих систем сонячного теплопостачання енергоефективних будівель та споруд показав, що перспективними є системи з геліоколекторами, що інтегровані в зовнішні огороження, оскільки вони дозволяють ефективно використовувати поверхню будівлі для одержання сонячної енергії навіть в умовах щільної забудови.

Описано питання розвитку проектування об'єктів енергоефективного будівництва, що використовують активні та пасивні системи сонячного теплопостачання.

Аналіз сучасних літературних джерел показав, що з метою зменшення капітальних затрат при встановленні систем сонячного теплопостачання перспективним є поєднання геліоколектора та архітектурних конструкцій будівель. Встановлено, що на сьогодні не достатньо вивчені комбіновані геліоколектори з архітектурними конструкціями будівель, які потребують їх вдосконалення та необхідність проведення подальших теоретичних і експериментальних досліджень.

Проблема теплозабезпечення енергоефективних будівель комбінованими системами теплопостачання з геліоколекторами, що поєднані з конструкціями зовнішніх огорожень, може бути вирішена шляхом розвитку теоретичних і експериментальних досліджень та розробкою нових систем теплопостачання, які інтегровані в зовнішні огороження. Вказані системи можуть бути розроблені на основі новітніх технічних рішень із застосуванням рідинних теплоносіїв, а саме – виконання

зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову: геліовікна, геліостіни та геліопокриття.

**У другому розділі «Аналітичні дослідження зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову енергоефективних будівель»** автором здійснено аналіз потенціалу сонячної енергії, що надходить на територію України, складено загальний тепловий баланс надходження енергії Сонця з врахуванням відбитої радіації та проведено моделювання теплових процесів в елементах системи тепlopостачання із зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову.

У результаті аналітичних досліджень та обробки статистичних даних узагальнено кліматичні дані районів України щодо надходження сонячної радіації за умов середньої хмарності з врахуванням відбитої складової, що дало змогу отримати графоаналітичні залежності. Встановлено, що в опалювальний період сумарна сонячна енергія є більшою, ніж в зимовий період на 60% і є достатньою для часткового зменшення потужності використаних традиційних джерел енергії. Середньомісячна розсіяна сонячна радіація в опалювальний період, яка надходить на горизонтально-орієнтовану поверхню є більшою ніж пряма радіація в 1,2–1,6 рази. Отримано залежність для повної середньомісячної сонячної радіації на вертикальну поверхню південної орієнтації за умов середньої хмарності.

Відповідно до отриманих результатів запропоновано конструкції геліопокриття, геліостіни та геліовікна для систем сонячного тепlopостачання. Проведено оцінку теплової ефективності геліопокриття, чисельно визначено енергетичний баланс та здійснено моделювання теплових процесів в елементах геліопокриття. Проаналізовано вплив швидкості та напрямку вітрового потоку на коефіцієнт тепловіддачі геліопокриття. Отримано залежність коефіцієнта тепловіддачі геліопокриття від швидкості та напрямку потоку повітря для конструкції з прозорим покриттям.

Проведено комп'ютерне моделювання теплових процесів в геліостіні, геліовікні та геліопокритті та визначено доцільність використання елементів систем сонячного тепlopостачання, які інтегровані в конструкції зовнішніх огорожень. В результаті моделювання процесу акумуляції сонячного випромінювання в геліопокритті, геліостіні та геліовікні встановлено, що миттєва тепла потужність за умов вимушеного руху теплоносія становила; для геліопокриття 540 Вт/м<sup>2</sup>, геліостіни - 500 Вт/м<sup>2</sup>, геліовікна – 370 Вт/м<sup>2</sup>.

**В третьому розділі «Експериментальні дослідження теплотехнічних характеристик зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову для енергоефективних будівель»** розглядаються

питання, що стосуються експериментального дослідження ефективності зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову.

Досліджено теплову ефективність геліопокриття з тепловим акумулятором та встановлено його теплотехнічні характеристики у випадку розміщення трубок циркуляційного контуру теплоносія під або над теплопоглиначем, а також за наявності та відсутності прозорого покриття. Усі дослідження були проведені для трьох режимів руху теплоносія: прямої його подачі та вимушеної або природньої циркуляції.

При дослідженні геліопокриття без прозорого покриття з трубками циркуляції теплоносія, що розташовані під теплопоглиначем у системі теплопостачання за природньої циркуляції теплоносія, встановлено, що його ефективність при зміні кутів надходження  $\alpha$  і  $\beta$  від  $90^\circ$  до  $30^\circ$  зменшується на 67%, а за наявності прозорого покриття – на 32%. Також визначено, що теплова ефективність геліопокриття без прозорого покриття з розміщеними над теплопоглиначем трубками циркуляції теплоносія при варіюванні кутів надходження  $\alpha$  і  $\beta$  від  $90^\circ$  до  $30^\circ$  знижується на 50%.

Також проведено дослідження ефективності геліостіни з теплопоглиначем, що містить трубки циркуляції теплоносія у вигляді двох конструкцій – гребінки і зміювика. Отримано графічні та аналітичні залежності коефіцієнта корисної дії геліостіни від витрати теплоносія, діаметра трубок теплопоглиначя, їх товщини та відстані між ними.

Визначено, що на енергетичну ефективність геліостіни значний вплив має витрата теплоносія, а інтенсивність потоку випромінювання впливає в меншій мірі. На завершальному етапі лабораторних досліджень було встановлено залежність теплової ефективності геліовікна в системі теплопостачання від його конструктивних особливостей, а також від режимів роботи та впливу зовнішніх факторів. Визначено, що ефективність геліовікна із закритими жалюзі, на 10 – 15% більша, ніж при їх відсутності.

Для збільшення світлопропускнуої здатності геліовікна було запропоновано виконати теплопоглинач у верхній його частині у вигляді теплообмінника з ребрами для відбору теплоти від повітря, що циркулює в середині геліовікна. Встановлено, що усереднене значення ККД геліовікна з теплообмінником без жалюзі становить 54%.

***Четвертий розділ «Дослідження теплотехнічних характеристик зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову в реальних умовах»*** присвячений дослідженню теплотехнічних характеристик геліовікна, геліостіни і геліопокриття в реальних умовах та на основі отриманих результатів здійснено їх енергетичний аналіз.

Досліджено, що при південній орієнтації геліопокриття середньоденна теплова потужність системи сонячного теплопостачання на 42% більша, ніж для північної орієнтації, а у випадку східного та західного напрямку вказана потужність відрізняється від північного не більше, як на

10 %. Теплова ефективність геліостіни для північної і північно-східної орієнтації зменшується на 40 % відносно південної, в той час, для східного напрямку на – 20%, а для інших орієнтацій зниження ефективності не спостерігалось. Визначено, що середній ККД системи сонячного теплопостачання з геліовікном становить 40%.

На основі одержаних даних щодо теплових характеристик розроблених конструкцій зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії проведено їх ексергетичний аналіз для реальних умов теплопостачання.

Отримано аналітичні залежності ККД геліовікна, геліостіни та геліопокриття, які необхідні для визначення теплових характеристик системи сонячного теплопостачання, які в подальшому використані при розробці методики їх інженерного розрахунку, а також в чисельних розрахунках системи сонячного теплопостачання з використанням зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії.

***П'ятий розділ «Рекомендації, щодо практичного застосування результатів досліджень для теплопостачання енергоефективних будинків»*** присвячений практичному застосуванню представлених в роботі результатів досліджень. За результатами проведених досліджень запропоновано енергоощадну комбіновану систему теплопостачання енергоефективних будівель на основі геліостіни, геліовікна та геліопокриття. Запропоновано чисельний метод розрахунку накопичення енергії в тепловому акумуляторі періодичної дії для системи сонячного теплопостачання із зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії, який дає змогу оцінити зміну температури теплоносія.

Розроблено комп'ютерну програму для розрахунку параметрів комбінованої системи теплопостачання із зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії щомісячно.

***В шостому розділі «Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову для теплопостачання енергоефективних будинків»*** автор наводить техніко-економічний аналіз ефективності систем теплопостачання на основі розроблених зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову. Виконано порівняння поточної вартості майбутніх чистих грошових потоків від реалізації проекту системи теплозабезпечення із ЗОПСЕТ з інвестиційними затратами. Крім того під час техніко-економічних розрахунків було здійснено дослідження раціональності витрат та доходу для різної теплової потужності систем гарячого водопостачання.

*У загальних висновках* наводиться перелік основних наукових і практичних результатів, одержаних у дисертаційній роботі.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.**

Аналіз дисертаційної роботи Шаповала С.П. дає підстави стверджувати, що викладені в дисертації наукові положення і висновки є науково обґрунтованими, достовірними та мають теоретичне і практичне значення. Це переконливо підтверджено використанням широкого спектру сучасних загальноприйнятих і оригінальних методів дослідження, застосуванням математико-статистичних методів планування та обробки результатів експериментів з використанням обчислювальної техніки.

Наукові результати узгоджуються із загальновідомими теоретичними положеннями при розробці сонячних енергетичних систем, доповнюючи їх, що свідчить про теоретичну цінність результатів дисертаційної роботи.

Обґрунтованість наукових положень та їх позитивне використання підтверджується апробацією результатів експериментальних досліджень у виробничих умовах.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

В дисертації отримано наступні наукові результати:

- отримали подальший розвиток основи новітніх технологій теплозабезпечення енергоефективних будівель у результаті вдосконалення комбінованих систем теплопостачання із застосуванням зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову, які дали змогу підвищити ефективність роботи комбінованих систем теплопостачання;
- уточнено математичну і фізичну модель теплових процесів у складових елементах системи теплозабезпечення, досліджено і науково обґрунтовано значення раціональної кількості умовних шарів стратифікації теплоносія в тепловому акумуляторі з урахуванням теплотехнічних і геометричних характеристик зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову;
- на основі аналітичних досліджень і обробки статистичних даних уточнено графоаналітичні залежності визначення потенціалу сонячної радіації з урахуванням складової відбитого опромінення на огороження будівель різної орієнтації впродовж року для території України;

- розвинуто метод комп'ютерного моделювання, який дав змогу в широкому діапазоні дослідити температурні режими роботи зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову;
- вперше визначено параметри ефективного використання теплової енергії, отриманої зовнішніми огороженнями-перетворювачами сонячної енергії у теплову в елементах систем сонячного теплопостачання з урахуванням їхніх конструктивних особливостей і режимів роботи під час комплексу експериментальних досліджень;
- вперше експериментально встановлено теплові характеристики зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову та систем сонячного теплопостачання на їх основі в цілому, з урахуванням впливу визначальних метеорологічних параметрів, таких, як густина потоку сонячної радіації і швидкість вітрового потоку, що дало змогу розраховувати такі системи;
- набула подальшого розвитку методологія розрахунку теплових процесів у комбінованих системах теплозабезпечення енергоефективних будівель з урахуванням зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову, яка базується на поєднанні експериментальних та аналітичних досліджень з врахуванням кліматичних особливостей районів України.

### **Практичне значення одержаних результатів**

На основі результатів реалізації наукової концепції, проведених теоретичних і експериментальних досліджень удосконалено наукові підходи до створення нових типів огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову, їх наукового обґрунтування та розробки геліопокриття, геліостіни і геліовікна, а також розробці та удосконаленню технології їх виробництва.

Розроблено конструкції зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії та створено методики розрахунку їхніх теплових характеристик. Розроблена комбінована система теплопостачання і конструкції огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову захищені двома патентами України на корисну модель та двома – на винахід.

Практичне значення дисертаційної роботи підтверджується також результатами їх впровадження на ряді підприємств: "Гіз-контакт" (м. Харків); ТОВ "БМ КОМФОРТ" (м. Львів); ТОВ "ОЛФОМЕД" (м. Київ); ПП "АРХ.МЕД.ПРОЕКТ" (м. Дніпро).



### **Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів.**

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, базуються на значному обсязі експериментальних та теоретичних досліджень як у лабораторних, так і в реальних умовах. Вони є логічними і науково обґрунтованими. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та висновків підтверджується коректністю постановок задач чисельного моделювання та розрахункових досліджень, використанням надійної сучасної виміральної техніки для експериментальних досліджень і коректних методів планування та математичної обробки експериментальних даних. Достовірність результатів чисельного моделювання підтверджується також їх задовільним узгодженням з даними експериментів, отриманих автором.

### **Повнота викладення наукових положень та висновків.**

Основні положення дисертаційної роботи та висновки викладені в 43 друкованих наукових працях, у тому числі: 1 монографія, 25 наукових публікацій у фахових виданнях України, 4 статті, що індексуються у Scopus, 3 – у Index Copernicus та 5 у наукових періодичних міжнародних виданнях, отримано 2 патенти України на корисну модель та 2 патенти на винахід.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

### **Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертаційної роботи.**

Зміст автореферату є ідентичним до змісту дисертації і достатньо повно відображає основні положення дослідження.

Автореферат розкриває основні положення дисертації, у достатній мірі відтворює структуру і обсяг роботи. Дисертація та автореферат оформлені у відповідності до вимог оформлення кандидатських дисертацій.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи та автореферату.**

При загальній позитивній оцінці одержаних в роботі результатів і зроблених дисертантом висновків вважаю за необхідне зробити наступні зауваження.

1. При дослідженні акумулятора в розд. 2 був проведений розрахунок для кількох шарів стратифікації води в ньому. Більш коректно було б провести моделювання процесів гідродинаміки і теплопереносу в

- аккумуляторі з використанням рівнянь Нав'є-Стокса, що дало б більш точні результати по розподілу температур в ємності аккумулятора.
2. Система рівнянь (2.93) (розд. 2), що описує теплоперенос в комплексній системі теплопостачання (геліостіна, геліопокриття, геліовікно, тепловий аккумулятор, теплообмінник та інш.) є складною, в яку входить велика кількість параметрів, для визначення яких потрібно проводити спеціальні наукові дослідження. Розв'язки цієї системи дозволяють дослідити лише якісний характер зміни основних характеристик системи теплопостачання, потребують експериментальної перевірки та підтвердження достовірності отриманих результатів чисельного розрахунку.
  3. В ряді параметрів для витрат теплоносія використовувалась одиниця кг/хв, що не відповідає загальноприйнятій системі одиниць  $\text{Si}$  кг/с.
  4. На рис. 2.22 наведена залежність коефіцієнта тепловіддачі зовнішнього огороження від швидкості вітру, але не вказано яким чином отримана вказана залежність.
  5. Не зовсім зрозуміле падіння миттєвого значення теплової потужності на рис. 3.46 (розд. 3, стор. 159) в початковий момент часу, адже із загальних міркувань ця потужність повинна зростати.
  6. Чим пояснюється відсутність тепловтрат для початкових моментів часу від 0 до 55 хв для геліостіни з теплопоглиначем типа гребінки (рис. 3.85, стор. 189)?
  7. В ексергетичному аналізі геліопокриття, геліостіни і геліовікна (розд. 4, стор. 275) використовуються наступні параметри:  $K_{\text{ЗОПСЕТ}}$  - коефіцієнт тепловтрат колектора,  $\Delta p$  – втрати тиску теплоносія на вході в геліоколектор,  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання-пропускання матеріалу. В той же час, в дисертаційній роботі не вказано як визначались значення цих параметрів.
  8. В розд. 5 немає методики розрахунку гідравлічних втрат в системі циркуляції теплоносіїв, що не дає можливості для визначення потужності насосного обладнання при розробці систем теплопостачання на основі сонячної енергії.

### **Загальний висновок та відповідність дисертації вимогам.**

В цілому, зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Шаповала С.П. Дисертація є самостійним і завершеним науковим дослідженням, в якому отримані нові науково

обґрунтовані результати. Означена в роботі мета досягнута, поставлені завдання вирішені. Основні положення дисертації належним чином висвітлені в опублікованих наукових працях, пройшли апробацію на конференціях, впроваджені в практичну і освітянську діяльність. Зміст автореферату, основних положень, викладених в ньому, ідентичний змісту дисертації. Оформлення дисертації та автореферату відповідає вимогам. Загальна оцінка дисертації – позитивна.

З урахуванням аналізу дисертаційної роботи і матеріалів наведених у відгуку вважаю, що дисертаційна робота «Системи теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову» відповідає паспорту спеціальності та вимогам до докторських дисертацій, а саме п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19.08.2015), а її автор, Шаповал Степан Петрович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри теплоенергетики  
Національного університету біоресурсів  
і природокористування України,  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

Горобець В. Г.

*Згідно завідувача*  
*Ученый секретарь*  
*НАУБіЖ* *України*



*В. Д. Барановський*