МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ЦИКЛ НАУКОВИХ ПРАЦЬ

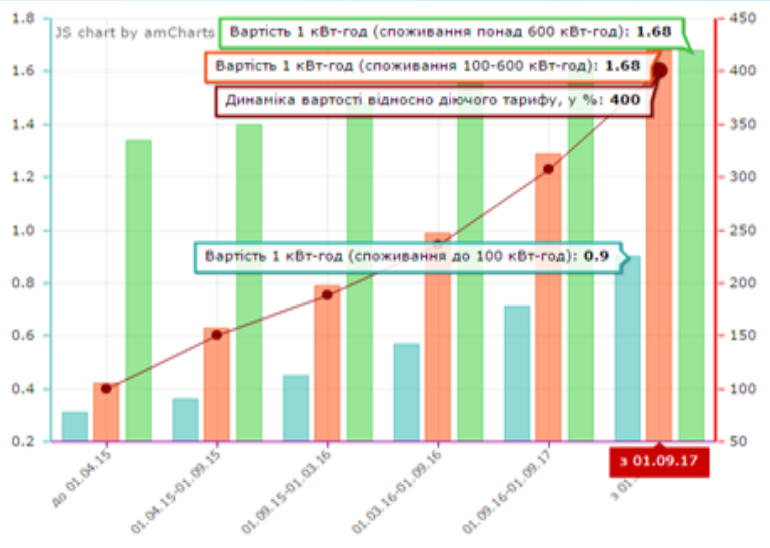
АНТИПОВА Євгена Олексійовича
на тему:

«НОВІТНІ АКУМУЛЯТОРИ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ФАЗОПЕРЕХІДНИХ ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК З ПОКРАЩЕНОЮ ТЕПЛОПРОВІДНОЮ СТРУКТУРОЮ»

висунутий на здобуття щорічної премії Президента України для молодих вчених у 2020 році

Київ - 2020

Актуальність. Рівень зростання цін на енергоносії в Україні (для населення) з 2013 року і по теперішній час (діють з 2017 р.)



Постійне зростання цін на енергоносії викликає підвищений інтерес до більш ефективного їх використання. Останнє, забезпечується як за рахунок використання нового енергоефективного обладнання, так і завдяки впровадженню різноманітних апаратів та систем накопичення (акумулювання) енергії.

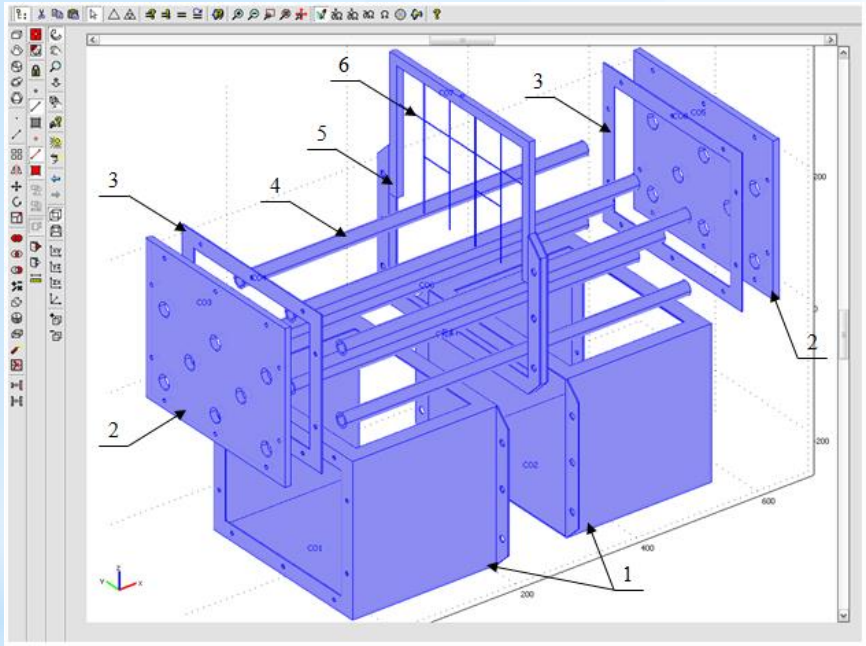
Впровадження систем електроакумуляційного нагріву, в енергосистему України, передбачено положеннями розділу 3.2 «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року», що **дозволить забезпечити економію природного газу в межах 2...8 млрд. м³ та скоротити викиди шкідливих оксидів азоту в атмосферу на 1,6...6,4 тис. т на рік**.

Тому **метою роботи** є підвищення енергетичної ефективності робочих параметрів теплових акумуляторів на основі фазоперехідних матеріалів органічного походження та оптимізація вибору компонентного складу систем комплексного енергозабезпечення з накопичувачами енергії задля покращення надійності та проведення процесу енергоживлення споживачів у найбільш оптимальному режимі.

Для вирішення поставленої мети було **створено діючі зразки акумулятора енергії новітньої конструкції та новий тип органічного акумулюючого матеріалу з покращеною теплопровідною структурою, розроблено та** числовим методом й експериментальним шляхом **досліджено ефективність роботи автономної системи енергозабезпечення споживачів з теплоакумулятором.**

Модель акумулятора теплоти досліджуваної конструкції в середовищі COMSOL Multiphysics 3.5a

Математична модель процесів тепло- і масопереносу при фазових перетвореннях акумулюючого матеріалу включає в себе рівняння Нав'є-Стокса та рівняння конвективного теплопереносу:



1 – корпус; 2 – прозорі торцеві кришки;
3 – гумові прокладки;
4 – трубний пучок; 5 – рухома рамка;
6 – «температурна сітка».

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial \rho w_x}{\partial \tau}+w_x\frac{\partial \rho w_x}{\partial x}+w_y\frac{\partial \rho w_x}{\partial y}&=-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho g_x+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial w_x}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial w_x}{\partial y}\right),\\ \frac{\partial \rho w_y}{\partial \tau}+w_x\frac{\partial \rho w_y}{\partial x}+w_y\frac{\partial \rho w_y}{\partial y}&=-\frac{\partial p}{\partial y}+\rho g_y+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial w_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial w_y}{\partial y}\right)\end{aligned}\right\};$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau}+\frac{\partial \rho w_x}{\partial x}+\frac{\partial \rho w_y}{\partial y}=0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}+w_x\frac{\partial T}{\partial x}+w_y\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{1}{\rho c_p}\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{1}{\rho c_p}\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)\pm Q_s(x,y).$$

Початкові та граничні умови:

$$T(x,y,\tau=0)=T_0;$$

- на поверхні корпусу:

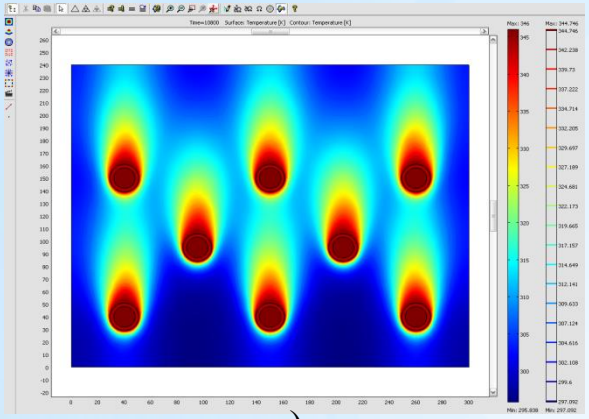
$$\left.\frac{dT}{dn}\right|_{s,c}=0;$$

- на поверхні джерел теплоти:

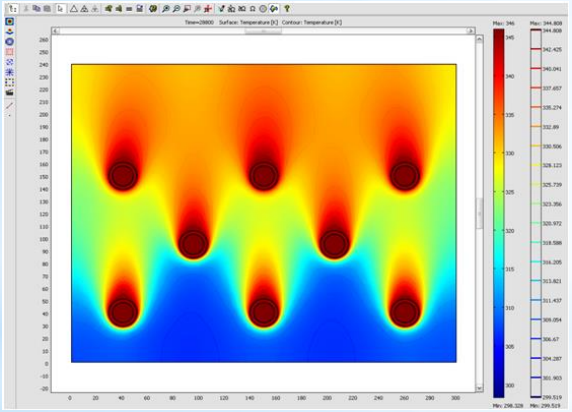
$$T_s(x,y)=T_{s,t}.$$

Акумулюючий матеріал – парафін марки Т-3, $T_ф$ = 55 °С. Маса парафіну в робочій камері $M_{там}$ = 26,1 кг. Температура води під час: «заряду» – 60…80 °С, «розряду» – 35…45 °С.

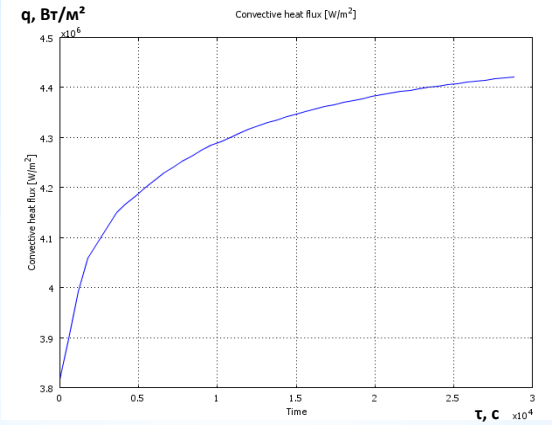
Температурні поля в об’ємі акумулюючого матеріалу акумулятора теплоти досліджуваної конструкції

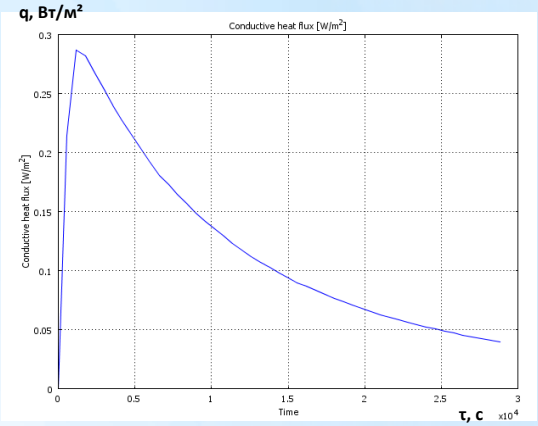


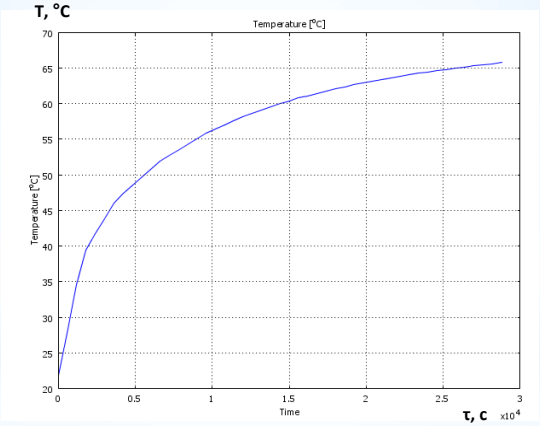
а)

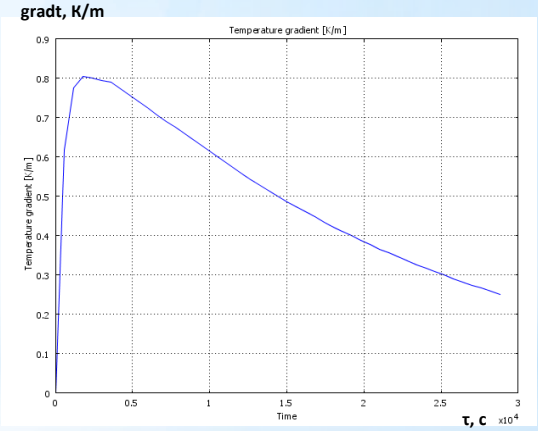


б)





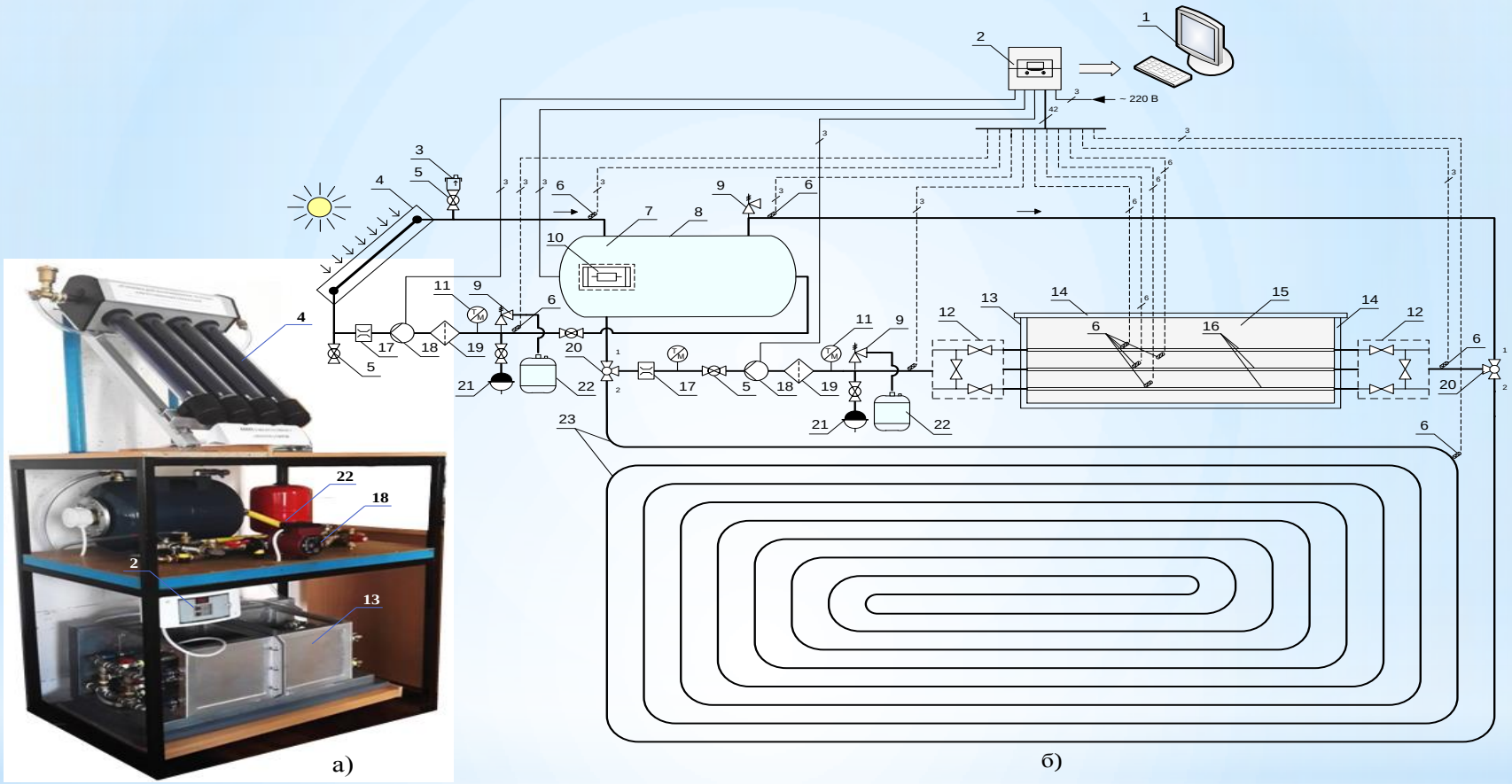




а – через 10800 с; б – 28800 с.

Встановлено, що відмінність між температурами в об’ємі ТАМу нижнього та верхнього рівнів складає в межах ±5÷7 ºС. Останнє дозволило висунути припущення щодо необхідності розміщення першого ряду нагрівальних труб від дна та стінок корпусу акумулятора на відстані, яка не перевищує значення граничного радіусу поширення теплоти в масиві ТАМ.

Загальний вигляд експериментальної установки



Загальний вигляд (а) та гідравлічна схема (б) експериментальної установки: 1 – комп’ютер; 2 – аналого-цифровий перетворювач; 3 – повітря-спускник; 4 – вакуумний геліоколектор; 5 – шаровий вентиль; 6 – накладний датчик температури; 7 – теплообмінник; 8 – напірний бак-акумулятор; 9 – запобіжний (скидний) клапан; 10 – дублююче джерело підігріву (ТЕН); 11 – термоманометр; 12 – розподільний колектор; 13 – дослідний модуль; 14 – шар теплової ізоляції; 15 – акумулюючий матеріал; 16 – трубний пучок; 17 – витратомір; 18 – циркуляційний насос; 19 – сітчастий фільтр; 20 – триходовий вентиль; 21 – розширювальний бак; 22 – буферна ємність; 23 – контур системи опалення «тепла підлога».

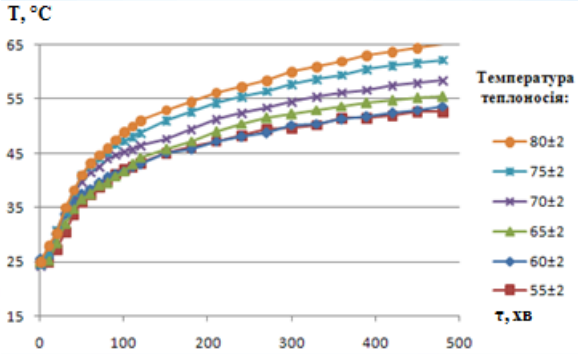
Динаміка поширення температур в об’ємі акумулюючого матеріалу, при різних значеннях температур теплоносія на вході

а)

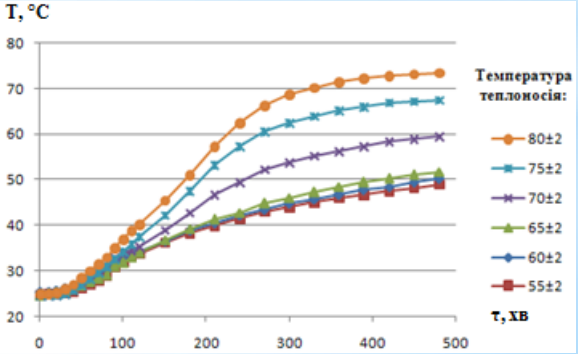
Для забезпечення умови радіального поширення теплоти в масиві акумулюючого матеріалу, за умовний час роботи апарата $\tau \approx 28800$ с, у межах $R \leq 40$ мм, як горизонтальні циліндричні джерела теплоти використано трубний пучок, який складається з 8 сталевих труб ($d_з$ = 21,3х2,8 мм) розташованих по центру ємності в рівномірному шаховому порядку паралельно до дна корпусу модуля.

Встановлено, що температура матеріалу в нижній частині корпусу теплоакумулятора (рис. в) на 10-12 % нижча, ніж в області інтенсивних циркуляційних течій рідини (рис. г), що призводить до появи «застійних зон» під тепловим джерелом та перегріву розплавленого об’єму у верхній частині акумулятора теплоти, тривалістю щонайменше 25 % від часу роботи в режимі «заряд». Аналіз рисунків а та б підтверджує висунуте припущення щодо доцільності розміщення першого ряду нагрівальних труб на відстані, яка не перевищує значення граничного радіусу R.

б)



в)

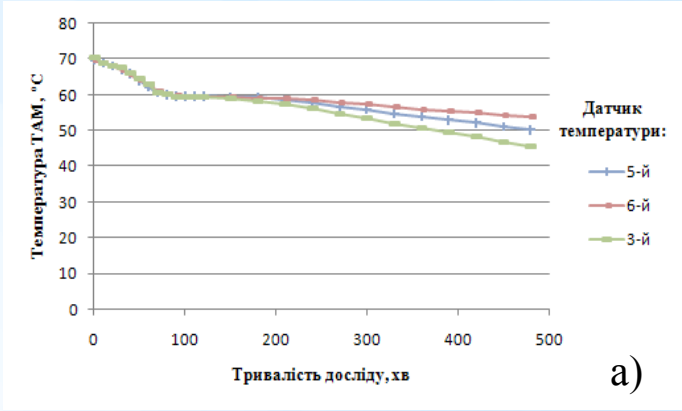


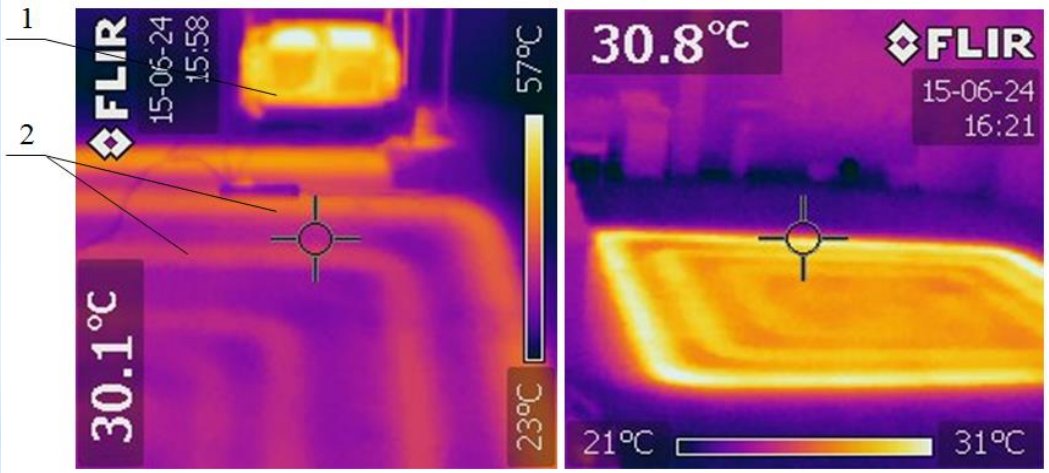
г)

Робота акумулятора теплоти в режимі «розряд» на навантаження

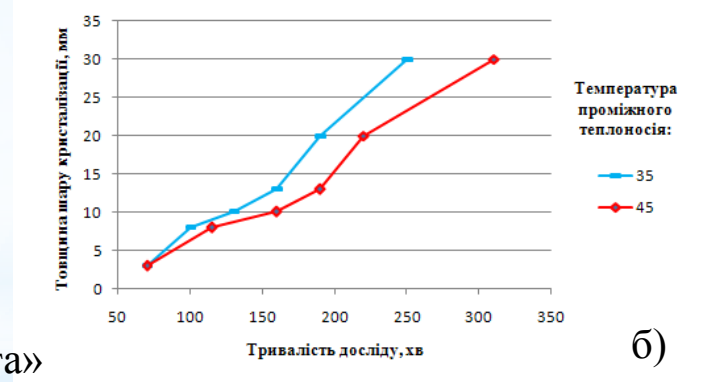
Встановлено, що тепловий акумулятор фазового переходу на основі парафіну (маса 26,1 кг), забезпечує покриття навантаження системи опалення потужністю 700 Вт·год протягом 4 годин (рис. а), при температурі теплоносія в системі 35…45 °С.

Досліджено, що при подачі води з температурою +45 °С товщина кристалізації через 180 хв. складає 13 мм (рис. б), натомість при температурі води +35 °С – 20 мм. При цьому, температура глибинних шарів на 27 % вища від температури шару закристалізованого матеріалу.



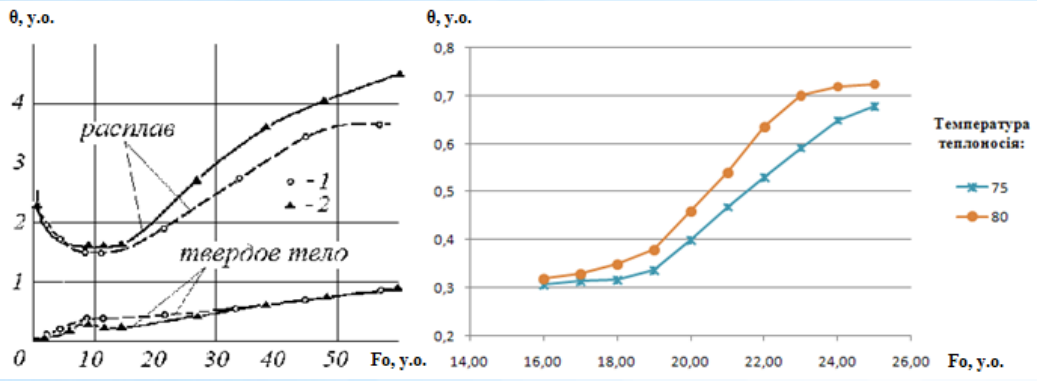


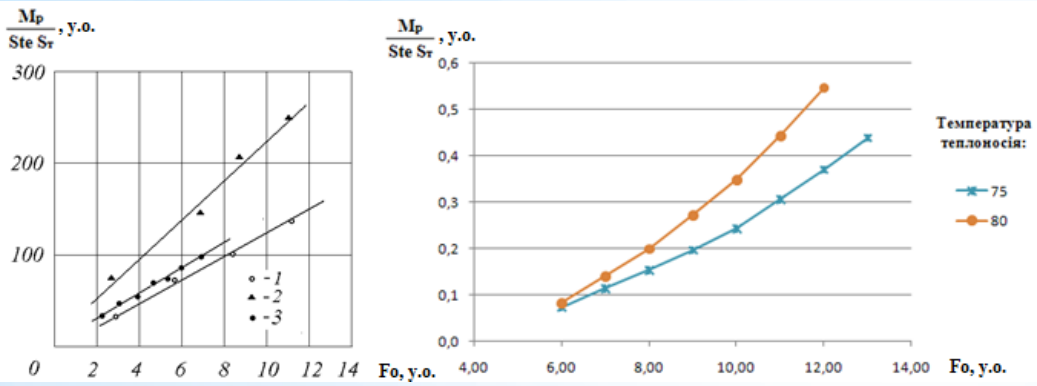
1 – дослідний модуль; 2 – система опалення «тепла підлога»

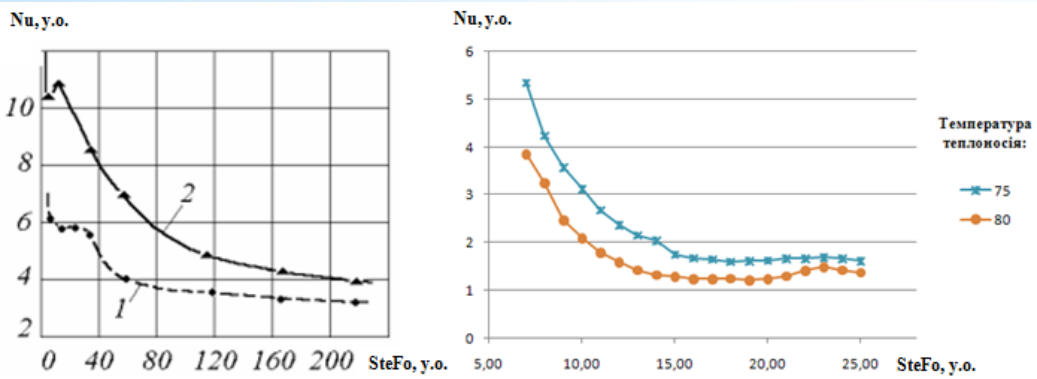


У підсумку, обґрунтовано, що для підвищення коефіцієнта корисного використання маси акумулюючого матеріалу μ, розміщення першого ряду нагрівальних труб, слід виконувати на осьовій відстані R. Встановлено, що перевищення цієї величини на 20 % призводить до зменшення коефіцієнта μ на 7 %. Зазначений факт уможливлює мінімізацію застійних зон під час акумуляції теплової енергії та зменшення часу «зарядки» теплоакумулятора на 15–20 %.

Порівняння отриманих результатів з даними інших дослідників

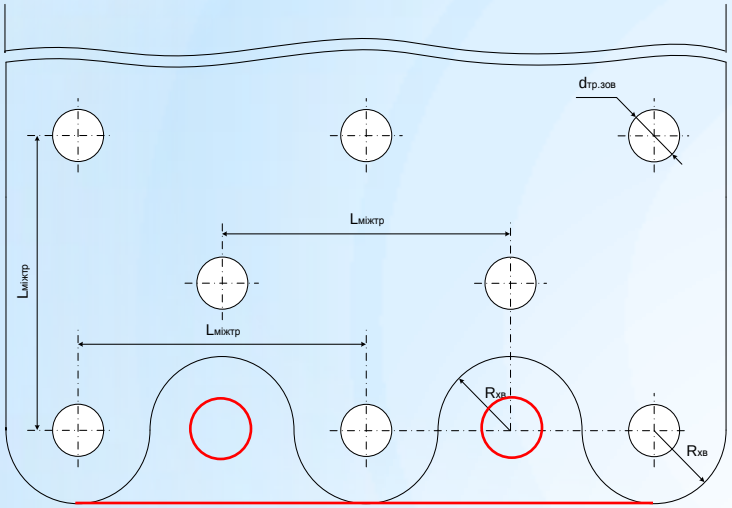






Отримана детальна інформація про температурний розподіл в об'ємі робочого матеріалу дає змогу простежити зміну середньооб'ємних температур (θ) у рідкій і твердій фазах, $M_p/Ste\ S_m$ (де M_p – маса розплаву, Ste – число Стефана, S_m – площа поверхні джерела теплоти) та числа Нусельта (Nu) від числа Фур'є (Fo), які представлено на рис. 8. Аналіз отриманих кривих свідчить про наявність трьох фаз плавлення та двох періодів кристалізації. У першій фазі перенесення тепла від джерела до межі поділу фаз здійснюється за рахунок кондуктивної складової теплового потоку, у другій та третій – конвективної. Під час «розряду» теплоакумулятора (періоду кристалізації ТАМ), перенос теплоти здійснюється кондуктивним шляхом та залежить від величини термічного опору δ_p/λ_p між джерелом і межею поділу рідкої та твердої фаз.

Ефективні відстані розміщення теплообмінної поверхні в корпусі акумулятора теплоти удосконаленої конструкції



Раціональний розмір (радіус) хвилі знаходиться в межах:

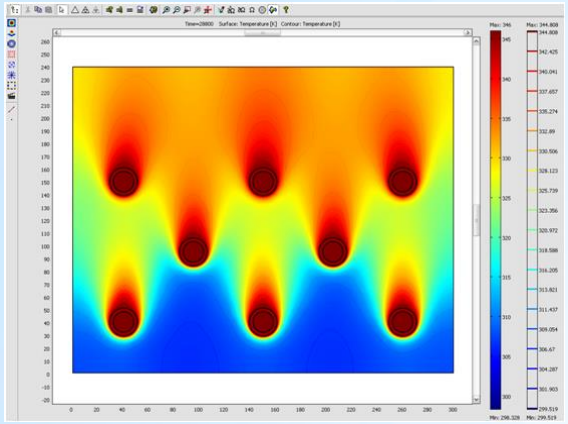
$$1{,}45d_{тр.зов.} \geq R_{хв} \geq 1{,}25d_{тр.зов.},$$

де $d_{тр.зов.}$ – діаметр нагрівальної труби за зовнішнім обміром, мм

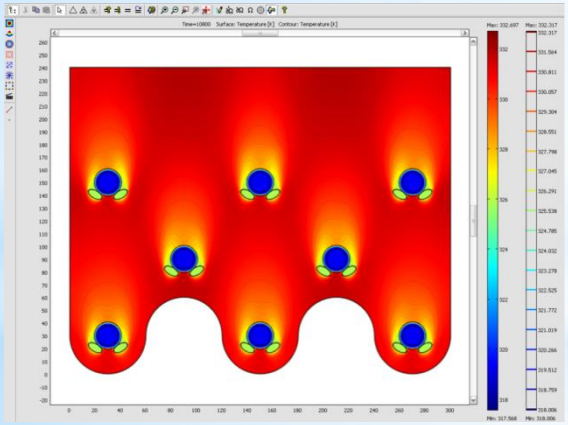
Такий вибір співвідношення обумовлений тим, що перевищення відстані $R_{хв}$ більш ніж $1{,}45d_{тр.з.}$ недоцільно, оскільки при цьому збільшується відстань між нагрівальними трубами і, як наслідок, знижується ефективність процесу зарядки акумулятора та, що особливо важливо, зменшується інтенсивність прогріву акумулюючого матеріалу нижніх шарів, зростає об'єм «застійних зон». Зниження $R_{хв}$ менш $1{,}25d_{тр.з.}$ також недоцільно, так як, для підтримки необхідної ефективності процесу плавлення всього об'єму ТАМу, довелося б збільшити кількість нагрівальних труб, що зменшило б час «зарядки» такого акумулятора однак, у цьому випадку, за умови збереження акумуляційної здатності теплоакумулятора, збільшаться його масогабаритні та вартісні показники.

Параметр	Номінальний діаметр, мм				
$d_{тр\ зов}$, мм	21,25	26,75	33,50	42,25	48,00
$R_{хв\ max} \leq 1{,}45d_{тр\ зов}$, мм	30,81	38,79	48,58	61,26	69,60
$R_{хв}$, мм	**29,00**	**36,00**	**45,00**	**57,00**	**65,00**
$L_{міжтр}$, мм	**115,00**	**144,00**	**181,00**	**228,00**	**259,00**

Температурні поля в об’ємі акумулюючого матеріалу акумулятора теплоти досліджуваної та новітньої конструкції з електричними нагрівальними елементами



а)



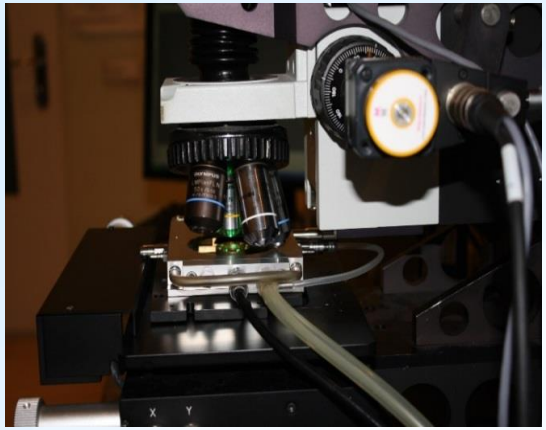
б)

Порівняльний аналіз досліджуваної (а) та новітньої (б) конструкції акумулятора теплоти свідчить, що температура акумулюючого матеріалу в нижній частині корпусу апарата вища на 15 %. Встановлено, що оснащення додатковими електричними нагрівальними елементами (відстані розміщення яких представлено в таблиці), забезпечило: підвищення ефективності відбору теплоти на 8–10 %, зменшення габаритів на 10–15 %, зростання коефіцієнта корисного використання маси матеріалу на 36 % та збільшення тривалості роботи апарата в режимі «розряд» на 86 %.

Зовнішній діаметр труби, мм	Кількість метрів кабелю на погонний метр труби, м				
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
	Шаг установки кабелю, см				
28	21	15	12	10	9
34	25	17	14	11	10
42	31	21	17	14	13
48	35	24	19	16	14

Проведений аналіз патентно-ліцензійної документації виявив відсутність інформації по новим технічним способам і конструкціям теплообмінної поверхні подібного характеру, що дає право розглядати запропоноване – новим технічним рішенням (подано заявку) з метою підвищення робочих (розрядних) характеристик акумуляторів теплоти фазового переходу на основі органічних ТАМ.

Обладнання та матеріали для оптичного дослідження температурних залежностей парафінів з наночастинками металів як нових ТАМів



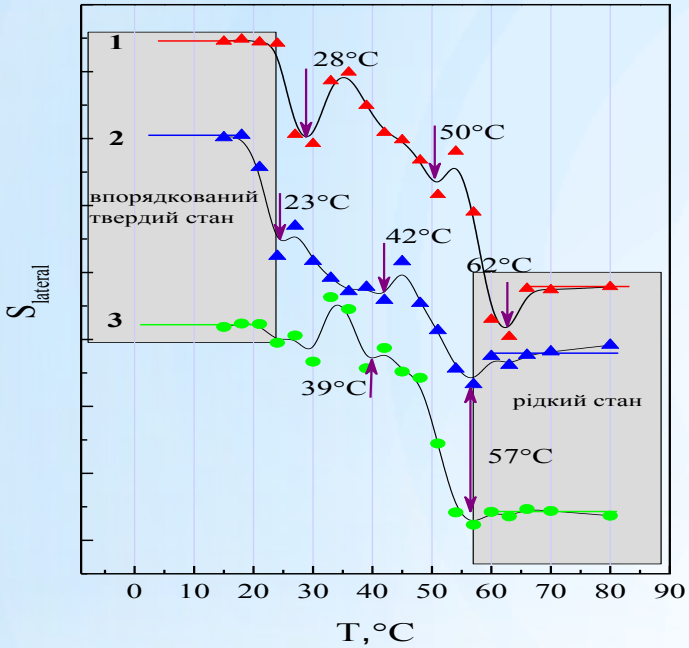
а) б) в)

Рис. 1: а – зовнішній вигляд спектрометра (а) та камери (б) процес зважування акумулюючого матеріалу (в)

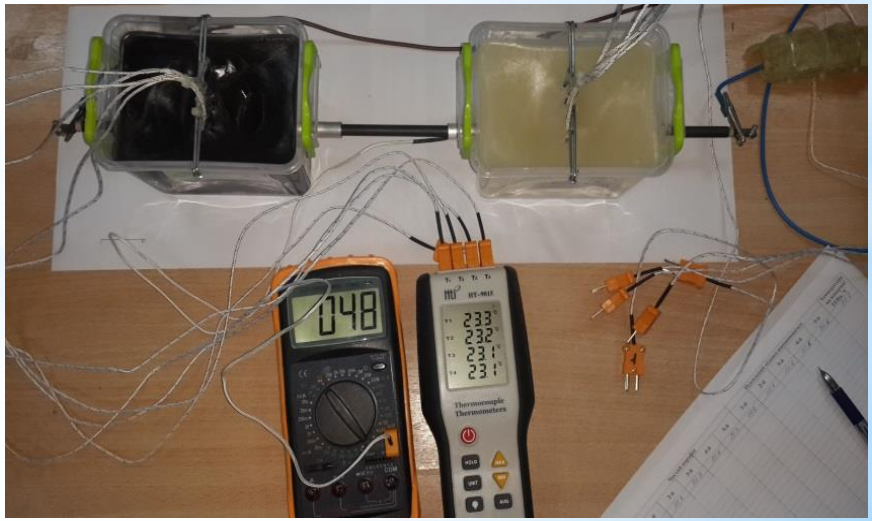
а) б)

Рис. 2: а – дослідні модулі з чистим і підсиленим теплопровідними включеннями акумулюючим матеріалом; б – теплопровідні порошки, які використовувались в якості підсилювачів

Температурні залежності параметра $S_{lateral}$ для вихідного парафіну Т3 (1) та для суміші парафіну Т3 з металевими теплопровідними наповнювачами (2, 3)



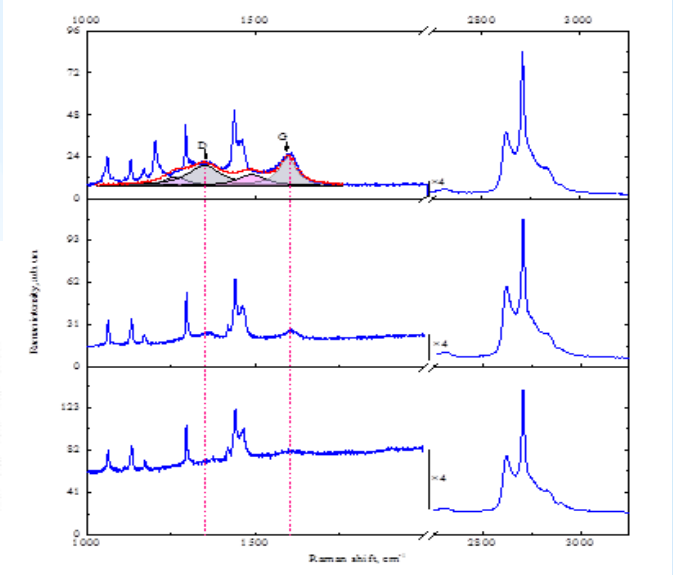
Створено новий тип органічного акумулюючого матеріалу з покращеною теплопровідною структурою, досліджено вплив мікро- та наночастинок різних металів на інтенсивність процесів структурно-фазових перетворень чистих та підсилених парафінів в однакових експлуатаційних умовах (див. рисунок). Для встановлення впливу температури та домішок на структурні перетворення теплоакумулюючих речовин експериментальним шляхом, застосовано метод спектроскопії комбінаційного розсіяння світла. Для реєстрації раманівських спектрів було використано потрійний спектрометр Horiba Jobin Yvon T64000, укомплектований конфокальним оптичним мікроскопом.

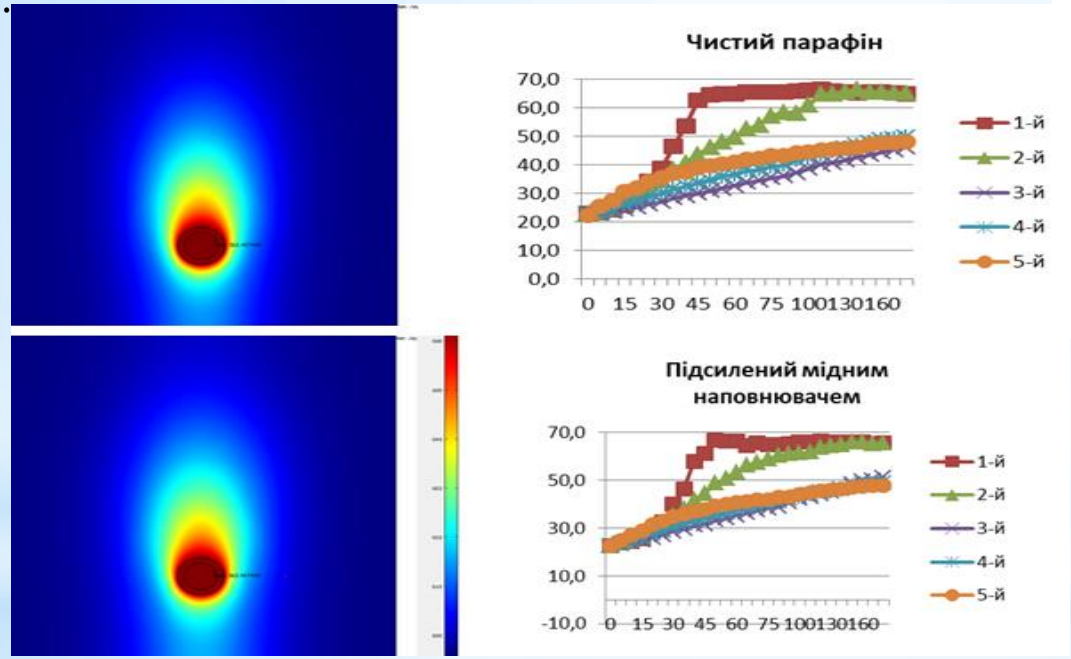


З даного графіка можна спостерігати зміщення температур основних структурно-фазових переходів для суміші парафіну Т3 з вуглецевим наповнювачем. У випадку використання мідного наповнювача також спостерігається зміщення положень перегину отриманої залежності структурного при збільшенні температури теплоакумулюючого матеріалу параметру $S_{lateral,}$ навіть у більшій мірі, ніж при використанні вуглецевих наповнювачів.

Спектри КРС сумішей парафіну Т3 з наповнювачами (металевими порошками різної фракції)

На графіку параворуч подано спектри КРС трьох видів порошків з різними наповнювачами (порошки металів різної фракції мкм та нм розміру). Проведені експериментальні дослідження для чистого парафіну та підсиленого мідним наповнювачем з фракцією 0.1-0.07 мкм (співвідношення 20:1).

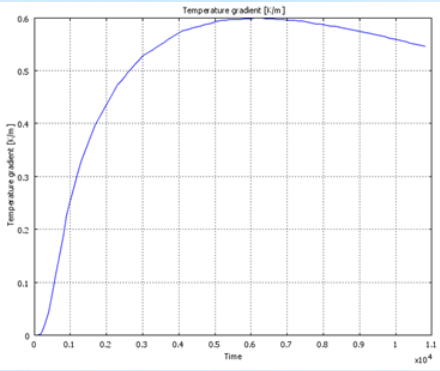




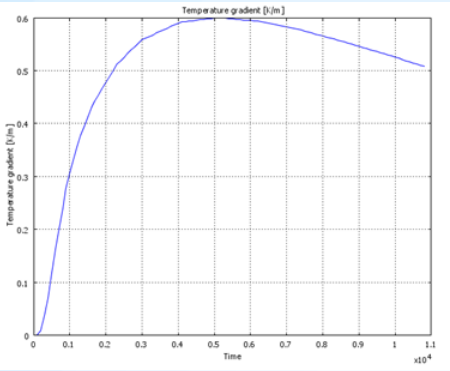
а) б)

Встановлено пришвидшення процесу плавлення теплоакумулюючого матеріалу, який розміщений над джерелом теплоти на 10-12 % та на 20-22 % ТАМу, який розташований на рівні осьової лінії джерела теплоти по обидві сторони від нього. Отримано зростання температурного режиму по всьому об’єму матеріалу твердої фракції підсиленого мідним наповнювачем парафіну, яке у середньому склало 4-6 %. Останнє вказує на доцільність використання теплопровідних наповнювачів.

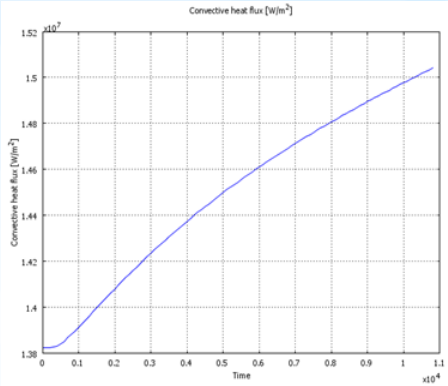
Результати числового моделювання та отримані розподіли в об’ємі чистого та підсиленого мідним наповнювачем парафіну



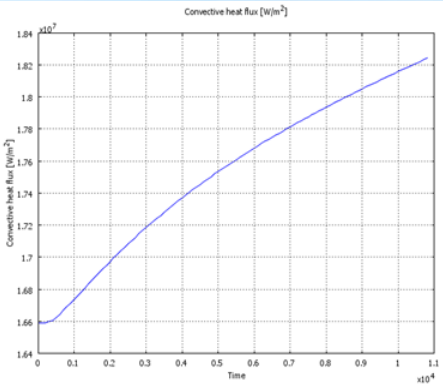
1а)



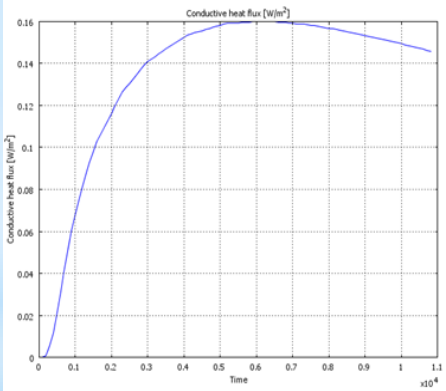
1б)



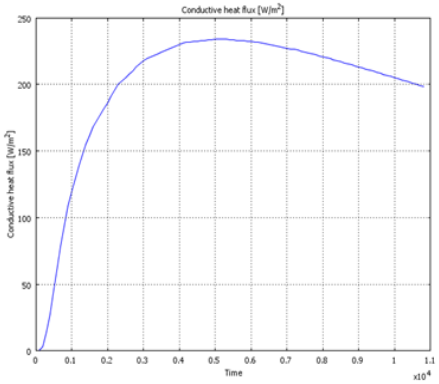
2а)



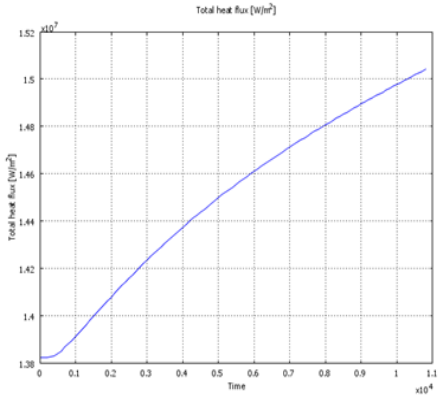
2б)



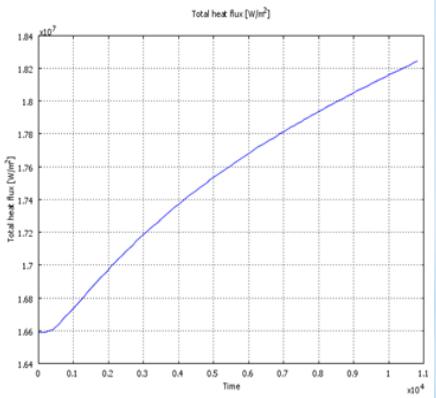
3а)



3б)



4а)



4б)

Градієнт температур (графік 1), конвективний тепловий потік (графік 2), кондуктивний тепловий потік (графік 3) та повний тепловий потік (графік 4) в місці розташування 3-ї термопари у чистому (а) і підсиленому мідним наповнювачем (б) парафіні через 2000 с від початку експерименту

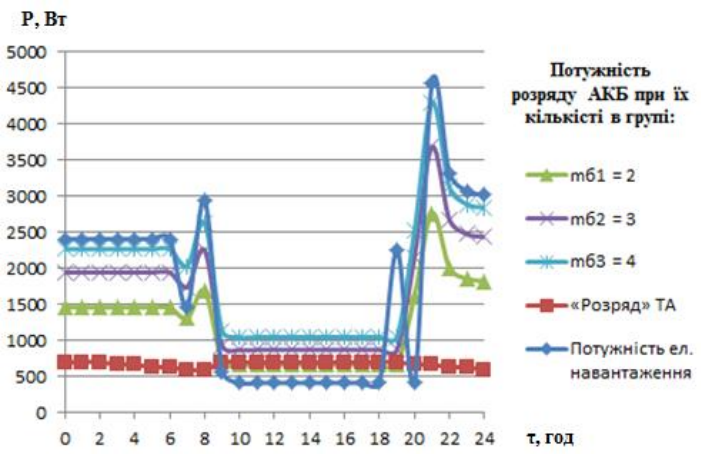
Порівняльні характеристики акумулятора теплоти новітньої з існуючими конструкціями теплоакумуляторів

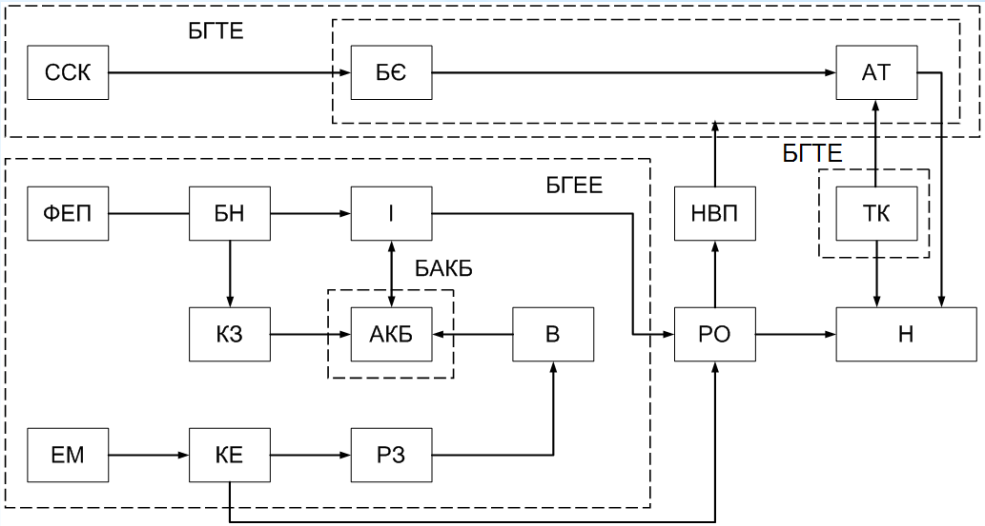
	Відомі конструкції акумуляторів теплоти									Новітня конструкція		
	Теплоакумулюючий матеріал											
$V_{там}$, л	Твердий			Рідкий (вода)			Парафін			Парафін		
	Теплова потужність, кВт/год.:			Теплова потужність, кВт/год.:			Теплова потужність, кВт/год.:			Теплова потужність, кВт/год.:		
	загальна	розряду за:		загальна	розряду за:		загальна	розряду за:		загальна	розряду за:	
		8 год.	16 год.		8 год.	16 год.		8 год.	16 год.		8 год.	16 год.
23	0,38	0,04	0,02	1,22	0,15	0,08	1,70	0,21	0,10	1,80	0,62	0,30
50	0,80	0,09	0,04	2,65	0,33	0,17	3,60	0,45	0,22	3,80	1,70	0,85
100	1,60	0,20	0,09	5,30	0,66	0,33	7,20	0,90	0,45	7,50	3,30	1,60
300	4,80	0,60	0,30	16,00	2,00	1,00	21,60	2,70	1,30	22,50	10,0	4,80
750	12,00	1,40	0,65	40,00	5,00	2,50	54,00	6,75	3,30	56,25	25,0	12,0

Аналіз таблиці показав, що теплоакумулятор на основі парафіну майже в 14 разів ефективніше від акумулятора теплоти з твердим акумулюючим матеріалом, в 5 разів від традиційного теплового акумулятора з рідким матеріалом та майже в 3 рази – від конструкції зразка-аналога. Крім того, теплоакумулятор новітньої конструкції характеризується підвищенням ефективності відбору теплоти на 8–10 %, зменшенням масогабаритних показників апарата на 10–15 %, зростанням коефіцієнта корисного використання маси акумулюючого матеріалу на 36 % та збільшенням тривалості роботи апарата в режимі «розряд» на 86 % за однакової теплової потужності зі зразком-аналогом.

Створена система комплексного енергозабезпечення з акумуляторами енергії

Запропоновано систему комплексного енергозабезпечення споживачів від двох джерел енергії: локальної від поновлюваних джерел та загальної – з електромережі.





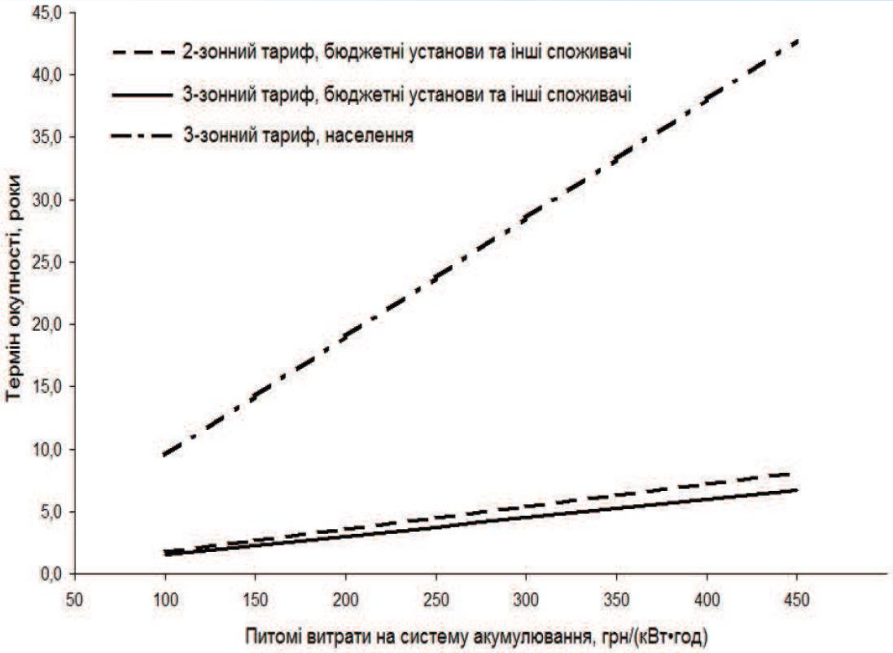
БГЕЕ – блок генерації електричної енергії;
БАКБ – блок акумуляторних батарей;
БГТЕ – блок генерації теплової енергії.

Результати дослідження показують, що доля альтернативної (поновлюваної) енергії в енергоспоживанні при заданих параметрах складає в межах 31 % для електричної та 66 % – для теплової енергії відповідно. При цьому, ефективність покриття навантаження споживачів за рахунок використання акумульованої електричної енергії становить в межах 95…100 %, а теплової – 84…89 %. Для забезпечення ефективної роботи автономного живлення споживачів номінальною електричною потужністю 2000 Вт упродовж 24 годин та піковою (до 2-х годин) потужністю 5000 Вт, система має складатися з фотоелектричної панелі з активною площею геліополя 7,7–8,9 м^2 та 12-вольтового акумулятора електричної енергії номінальною ємністю 315–365 А·год, а за теплової потужності навантаження 700 Вт – з сонячного колектора площею 4,5–5,8 м^2 та одного акумулятора теплоти фазового переходу потужністю 8 кВт.

Період окупності системи комплексного енергозабезпечення з акумуляторами енергії залежно від потужності споживача

Вид генерованої системою енергії	Потужність навантаження, Вт			
	1000	2000	5000	10000
Електрична	8	8	7	6
Електрична («зел. тариф»)	6	5	4	4
Теплова	7	6	5	5
Система в цілому	7	6	5	5

Адекватність отриманого значення періоду окупності порівняна з даними інших авторів, де термін окупності розраховано для питомих витрат в діапазоні 100...450 грн/(кВт·год), результати розрахунків представлено на рисунку. Його аналіз показав, що найбільша ефективність автономних акумулюючих систем досягається у тих споживачів, у яких встановлені багатотарифні лічильники. Попередні розрахунки показують, що використання таких систем знижує вартість 1 Гкал теплової енергії за рахунок впровадження розробки та використання пільгової електроенергії (при розрахунку за двозонними тарифами) становить 40…45 %, що також сприятиме вирівнюванню «провалів» добових графіків навантаження ОЕС України.



Наукова новизна отриманих результатів

Розроблено й апробовано новий, комплексний підхід для дослідження процесів тепло- й масопереносу при фазових перетвореннях акумулюючого матеріалу, який *у світовій та вітчизняній науці був вперше застосований для вивчення процесів плавлення/кристалізації навколо декількох циліндричних джерел теплоти, які розміщені в об'ємі акумулюючого матеріалу органічного походження*, **що дало змогу вперше**:

1. Дослідити закономірності:

- **взаємовпливу теплових і електричних джерел енергії на процеси перетворення й накопичення енергії**, що уможливило технічну реалізацію її комбінованого акумулювання в одному апараті;
- **вільноконвективного теплообміну під час фазових перетворень акумулюючого матеріалу навколо декількох циліндричних джерел теплоти з гладкою поверхнею**, що сприяло визначенню граничного радіусу поширення теплоти для більш ефективного розміщення циліндричних джерел електричної й теплової енергії в корпусі акумулятора теплової енергії новітньої конструкції.

2. Отримати залежність між граничним радіусом радіального поширення теплоти в масиві чистого та підсиленого теплопровідними включеннями (мікро- й наночастинками металів) акумулюючого матеріалу органічного походження і геометричними параметрами теплообмінної поверхні, що дало можливість проводити «зарядку» й «розрядку» апарата з максимальною ефективністю.

3. Дослідити залежність коефіцієнта корисного використання маси акумулюючого матеріалу від геометричних параметрів та потужності первинного джерела енергії, на основі якої реалізовано більш ефективну конструкцію акумулятора теплової енергії.

4. Встановити вплив багаторазового циклічного нагрівання й охолодження на структуру і морфологію фазоперехідних акумулюючих матеріалів методом спектроскопії комбінаційного розсіяння світла.

5. Дослідити та отримати залежність робочих параметрів системи комплексного енергозабезпечення споживачів з накопичувачами енергії від теплофізичних процесів перетворення та акумулювання енергії.

6. Дослідити термодинамічну поведінку парафінів та їх сумішей з твердотільними мікро- і наночастинками; оцінити їх вплив на ефективність процесів тепло- й масопереносу і, як наслідок, на накопичувальну здатність теплоакумуляторів, що дозволило оптимізувати конструкцію акумуляторів теплоти фазового переходу на основі органічних теплоакумулюючих матеріалів та покращити їх робочі, зокрема «розрядні», характеристики.

Практичне значення роботи

1. Створено діючі зразки акумулятора енергії новітньої конструкції, який відрізняється від зразка-аналогу хвилеподібним дном і додатковим оснащенням багатоярусними електричними підігрівачами, **що підвищує надійність та стабільність енергозабезпечення споживачів на 15–20 %.**

2. Розроблено новий тип органічного акумулюючого матеріалу з покращеною (підсиленою мідними наповнювачами) теплопровідною структурою, що сприяло пришвидшенню процесу плавлення теплоакумулюючого матеріалу, який розміщений над джерелом теплоти на 10-12 % та на 20-22 % ТАМу, який розташований на рівні осьової лінії джерела теплоти по обидві сторони від нього, **а також зростанню температурного режиму по всьому об'єму матеріалу твердої фракції на 4-6 %. Встановлено збільшення тривалості роботи акумулятора енергії новітньої конструкції в режимі «розряд» на 86 % за однакової теплової потужності зі зразком-аналогом.**

3. Побудовано варіант системи енергозабезпечення побутових споживачів від поновлюваних джерел з акумуляторами енергії: **отримано вихідні дані щодо вибору ефективних параметрів її компонентного складу енергогенеруючого обладнання й акумуляторів теплової та електричної енергії** залежно від кліматичних умов розміщення й потужності споживача; **проведено оптимізацію вибору компонентного складу автономної системи комплексного енергозабезпечення з акумуляторами теплової енергії новітньої конструкції** задля покращення надійності та проведення процесу енергоживлення споживачів у найбільш оптимальному режимі. **Показано, що вартість отриманої теплової енергії при цьому знизилась на 50–60 %, електричної – на 40–50 %**.

4. Розроблено нову методику розрахунку високоефективних конструкцій акумуляторів теплоти фазового переходу кожухотрубного типу на **основі органічних сполук з покращеною (підсиленою) теплопровідною структурою,** яка замінить застарілі на сьогодні методики розрахунку і рекомендації щодо виготовлення таких апаратів.

5. Оптимізовано методику підбору компонентного складу систем енергозабезпечення залежно від кліматичних умов розміщення й потужності споживача, що дало змогу проводити процеси акумулювання/використання енергії в найбільш оптимальному режимі.

6. Новизну та конкурентоспроможність запропонованих технічних рішень підтверджено 4 актами впровадження. Подані заявки на отримання патентів.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Подані у циклі робіт **результати досліджень здобуто на кафедрі теплоенергетики Національного університету біоресурсів і природокористування України за підтримки Інституту технічної теплофізики НАН України та Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України у рамках проекту Державного фонду фундаментальних досліджень у 2015-2016 рр.**, а також відповідно до цільових програм Міністерства освіти і науки України за темою: «Система комплексного енергозабезпечення споживачів із застосуванням альтернативних джерел та комбінованих акумуляторів енергії», яка входить до складу державних тематик: «Енергозберігаючі технології і калориметрія» (номер державної реєстрації 0109U007107), «Новітні акумулятори теплової енергії на основі фазоперехідних теплоакумулюючих матеріалів» (номер державної реєстрації 0115U004845) та «Експериментальне дослідження, математичне моделювання і енергетична ефективність нових теплообмінних апаратів» (номер державної реєстрації 0114U002963).

У 2019 році отримано Грант Президента України для підтримки наукового дослідження «Новітні акумулятори теплової енергії на основі фазоперехідних акумулюючих матеріалів з наночастинками металів» за договором № Ф82/211-2019 від 28.10.2019 р. між Національним університетом біоресурсів і природокористування України та Міністерством освіти і науки України.

Основні положення роботи впроваджено у ТОВ «Редюс Енерджи», ПАТ «Акціонерне товариство «Південтрансенерго» (акти впровадження наявні), а частина з них, як методичне забезпечення, використовується в навчальному процесі кафедри теплоенергетики НУБіП України під час підготовки фахівців технічних спеціальностей.

За темою роботи опубліковано 106 наукових праць, у тому числі 2 монографії, 63 статті. Згідно бази даних Scopus загальна кількість посилань – 17, h-індекс (за роботою) = 3, бази даних Google Shcolar загальна кількість посилань – 124, h-індекс (за роботою) = 7.