МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ЦИКЛ НАУКОВИХ ПРАЦЬ

АНТИПОВА Євгена Олексійовича
на тему:

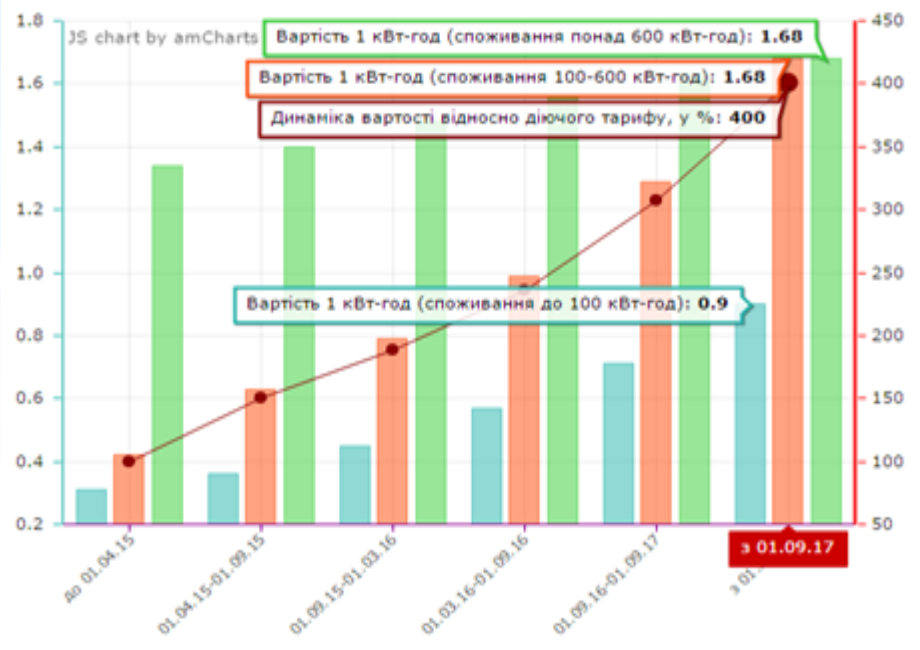
«КОМБІНОВАНІ АКУМУЛЯТОРИ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ФАЗОПЕРЕХІДНИХ ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК З ПОКРАЩЕНОЮ ТЕПЛОПРОВІДНОЮ СТРУКТУРОЮ»

висунутий на здобуття щорічної премії Президента України для молодих вчених у 2019 році

Київ - 2019

Актуальність. Рівень зростання цін на енергоносії в Україні в період 2013-2017 рр. (для населення)

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

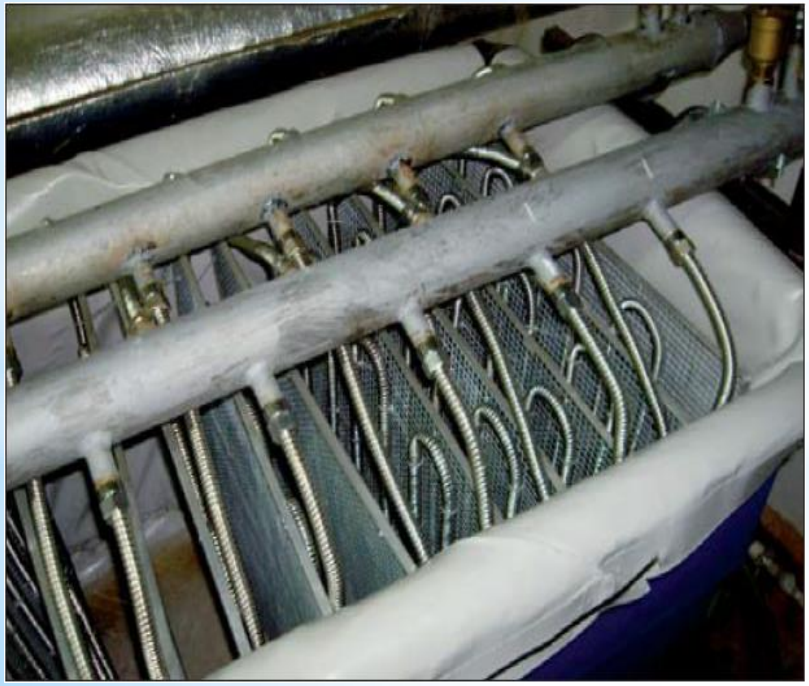


Впровадження систем електроакумуляційного нагріву, в енергосистему України, передбачено положеннями розділу 3.2 «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року», що **дозволить забезпечити економію природного газу в межах 2...8 млрд. м³ та скоротити викиди шкідливих оксидів азоту в атмосферу на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

Тому **метою роботи** є розробка нового, комплексного підходу в дослідженні процесів перетворення й накопичення енергії та, на основі отриманих результатів, створення енергоефективних систем і нових конструкцій комбінованих акумуляторів енергії з покращеною теплопровідною структурою, задля підвищення надійності та проведення процесу енергозабезпечення споживачів у найбільш оптимальному режимі

Особливості та недоліки існуючих конструкцій акумуляторів теплоти фазового переходу

Аналіз різних способів акумулювання виявив, що найбільш перспективними є акумулятори теплоти фазового переходу. Корпуса таких апаратів переважно проектують у вигляді контейнера прямокутної форми. В якості теплообмінної поверхні використовують капсули, труби чи канали прямокутного перерізу, які можуть бути оснащені інтенсифікаторами поверхні.

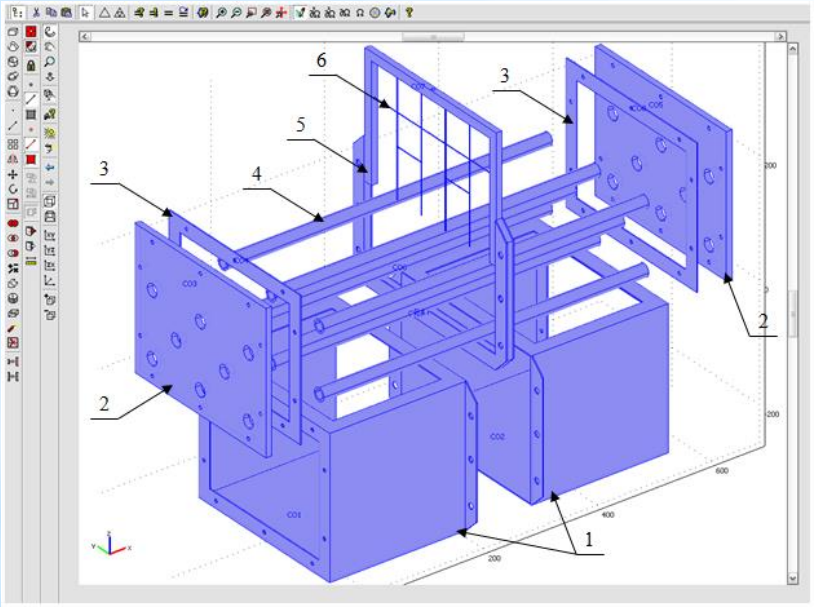


Недоліки капсульних: велика кількість капсул малого розміру, що призводить до значної трудомісткості їх виготовлення, подорожчання конструкції такого акумулятора, а також до великих втрат тиску при проходженні теплоносія через пористий (капсульний) шар теплоакумулюючого матеріалу.

Кожухотрубних: істотний гідродинамічний опір теплообмінної поверхні, особливо при використанні гофрованих труб, трудомісткість виготовлення теплопровідної структури, яка займає приблизно 8-10 % об’єму акумулюючого матеріалу. Звідси, одночасно при збільшенні масогабаритних і собівартісних параметрів, знижується експлуатаційна надійність такого акумулятора.

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:

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

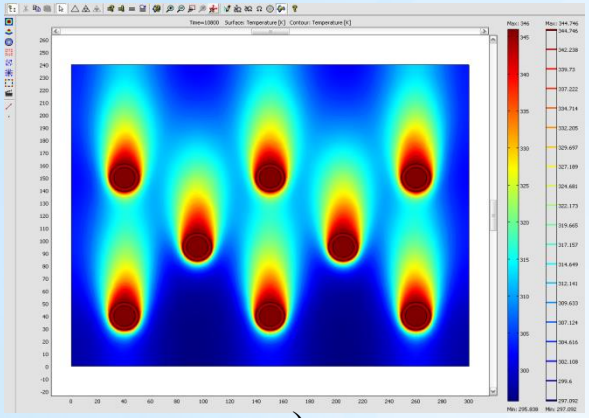
- на поверхні корпусу:

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

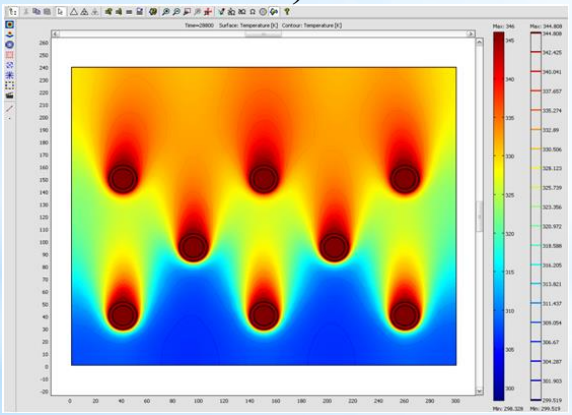
- на поверхні джерел теплоти:

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

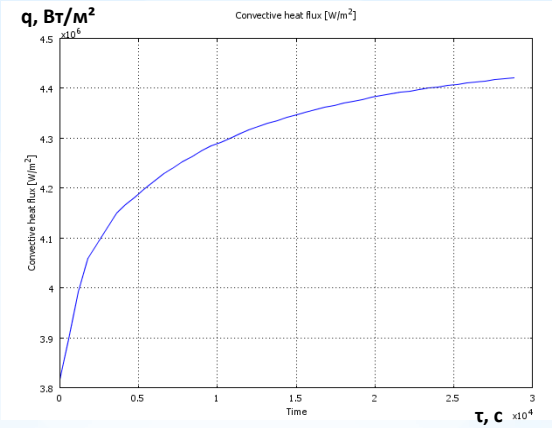
Температурні поля в об’ємі акумулюючого матеріалу акумулятора теплоти досліджуваної конструкції

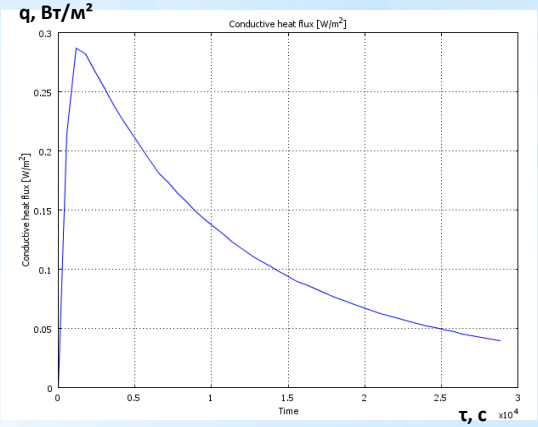


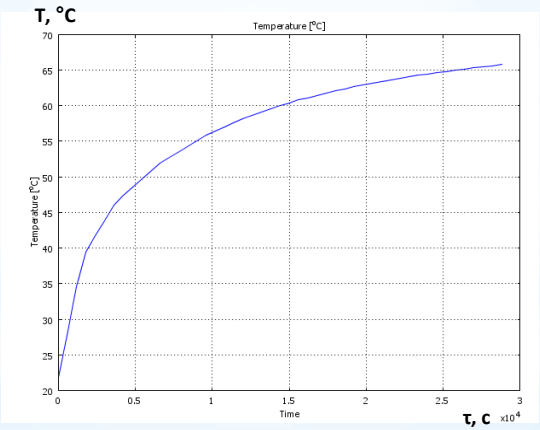
а)

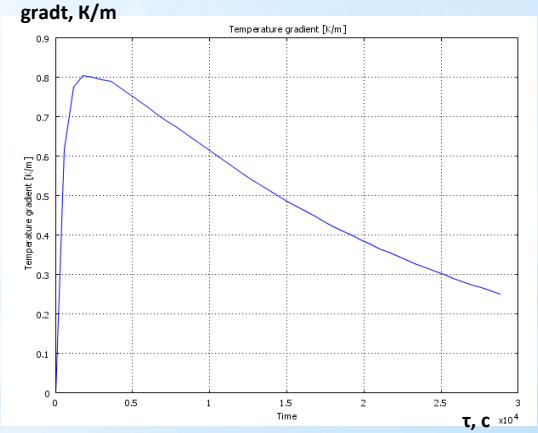


б)





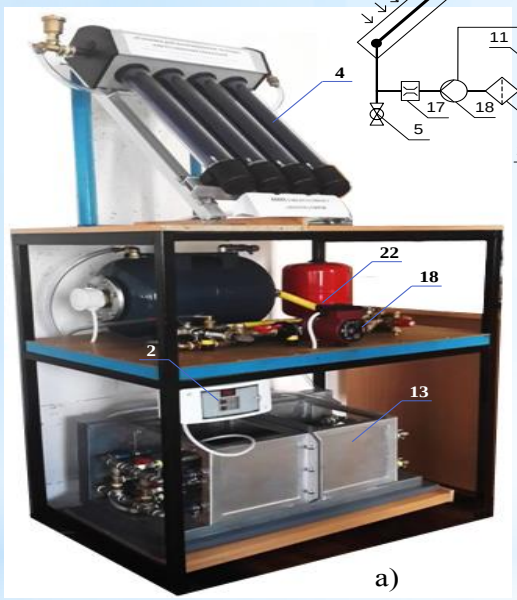




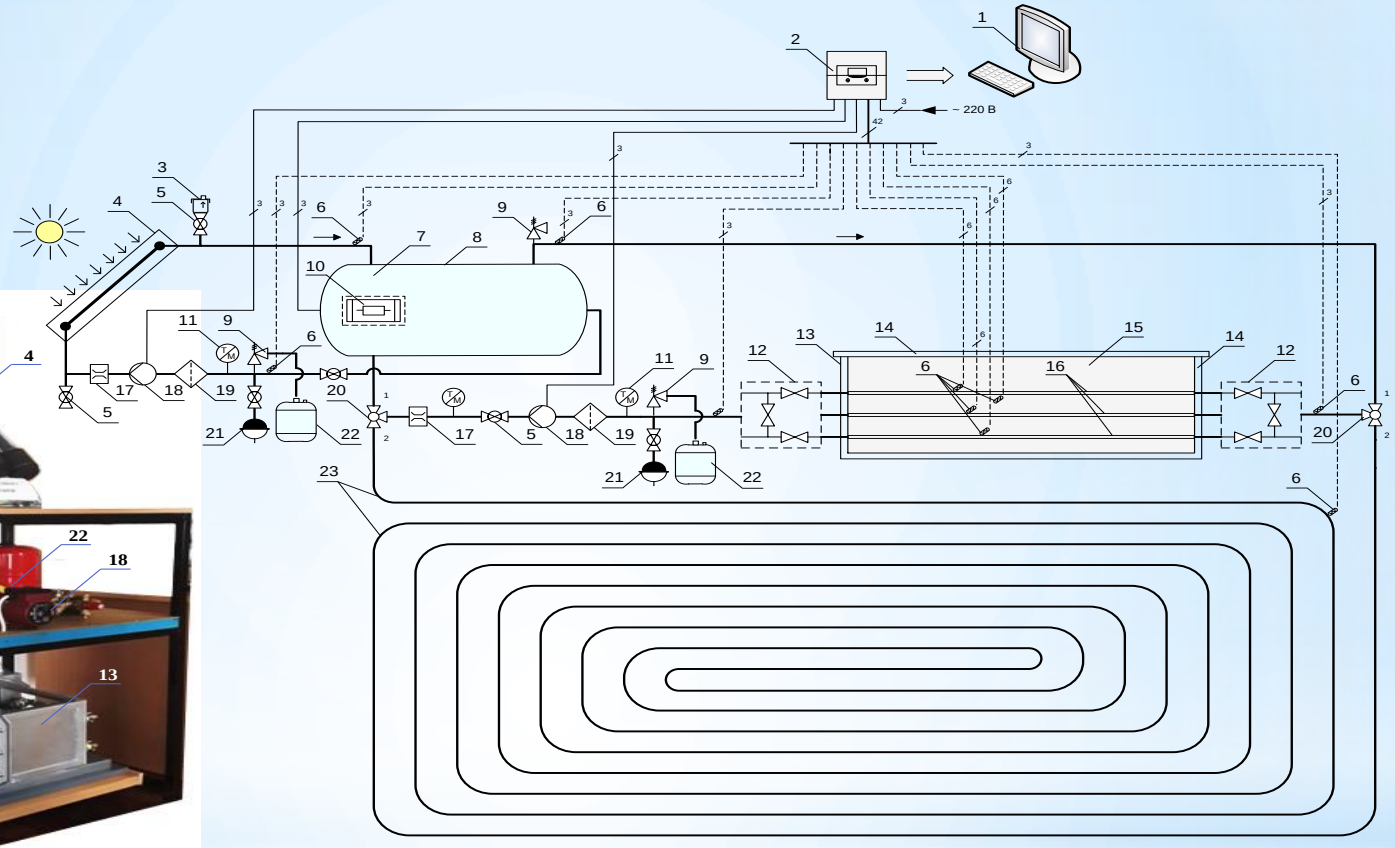
а – через 10800 с; б – 28800 с.

Встановлено, що відмінність між температурами в об’ємі ТАМу нижнього та верхнього рівнів складає в межах ±5÷7 ºС.

Загальний вигляд експериментальної установки



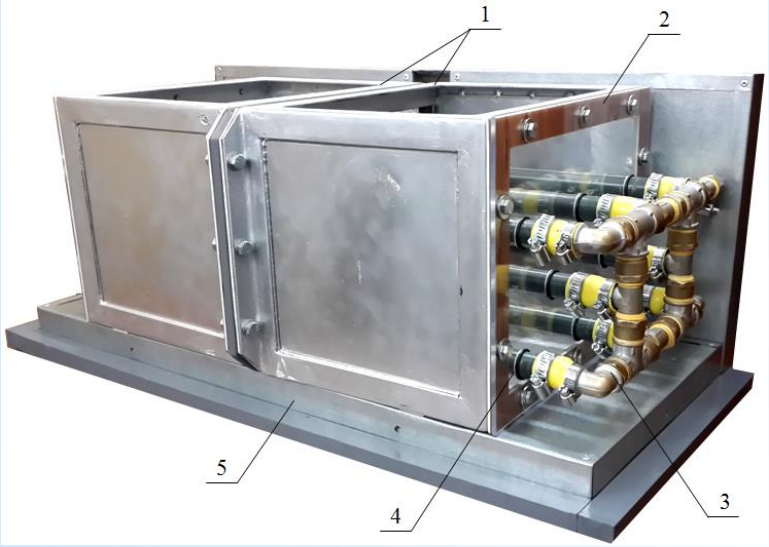
а)



б)

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».

Загальний вигляд дослідного модуля



1 – розбірний корпус; 2 – торцева кришка;
3 – розподільчий колектор;
4 – трубний пучок; 5 – теплоізоляційна панель

Основним елементом розробленої експериментальної установки є дослідний модуль - горизонтально орієнтована ємність у формі паралелепіпеда:

заввишки H = 240 мм,
завдовжки L = 500 мм,
завширшки B = 300 мм.

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

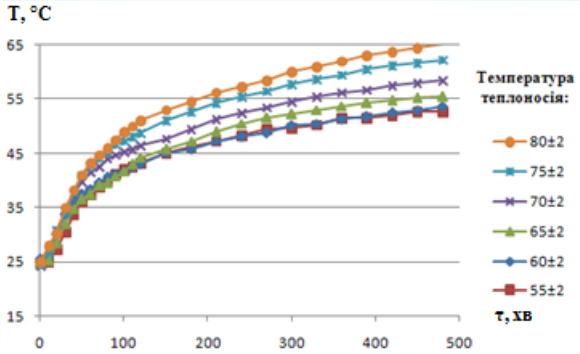
Для забезпечення умови радіального поширення теплоти в масиві акумулюючого матеріалу, за умовний час роботи апарата $\tau \approx 28800$ с, **у межах $R \leq$ 40 мм**, як горизонтальні циліндричні джерела теплоти **використано трубний пучок, який складається з 8 сталевих труб ($d_з$ = 21,3х2,8 мм)**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

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

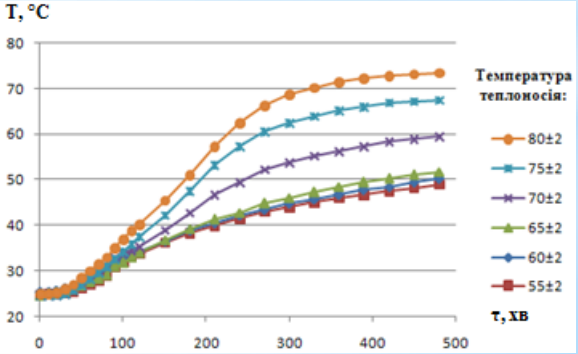
а)

б)

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** необхідності **розміщення** першого ряду **нагрівальних труб** від дна та стінок корпусу акумулятора **на відстані**, **яка не перевищує** значення **граничного радіусу R**.



в)

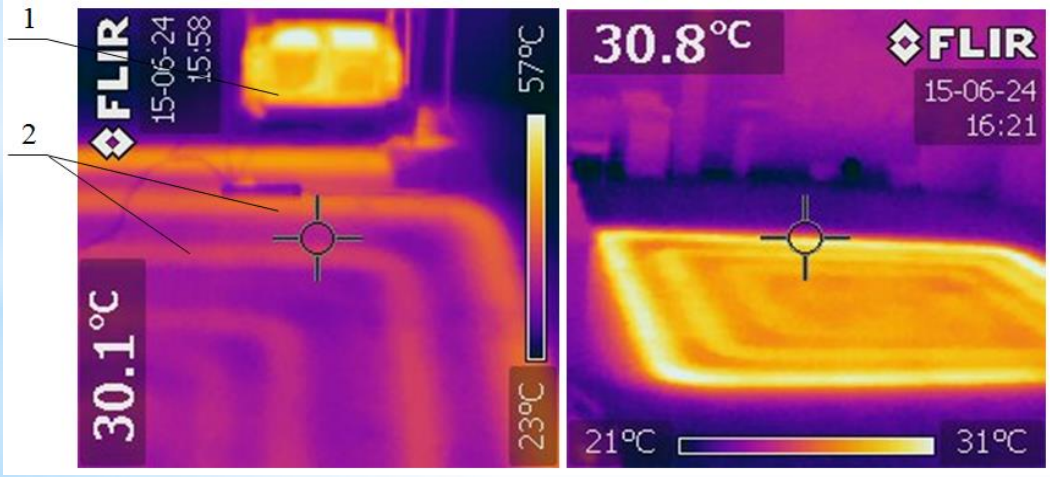


г)

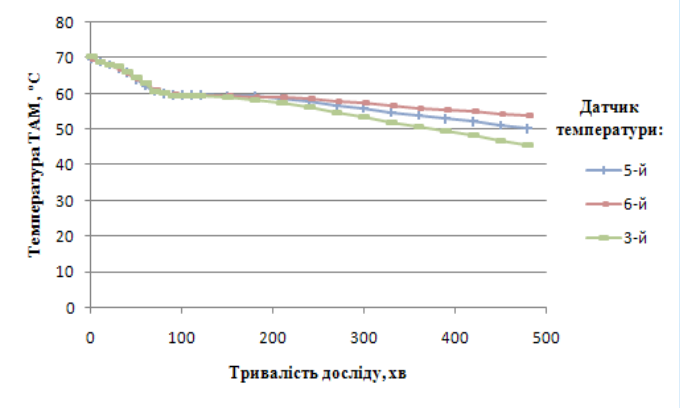
Робота акумулятора теплоти в режимі «розряд» на навантаження

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.

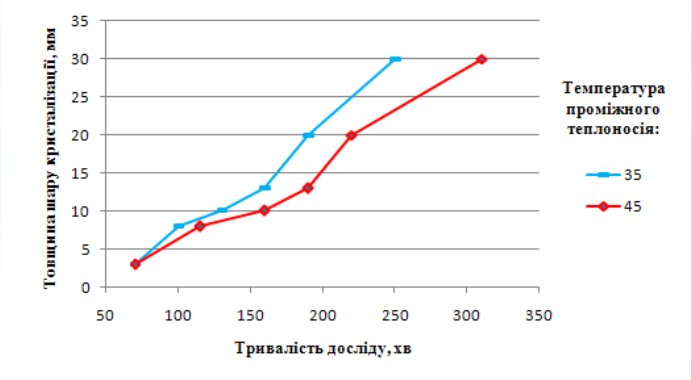
Досліджено, що при подачі води з температурою +45 °С товщина кристалізації через 180 хв. складає 13 мм (рис. б), натомість при температурі води +35 °С – 20 мм. При цьому, температура глибинних шарів на 27 % вища від температури шару закристалізованого матеріалу.



1 – дослідний модуль;
2 – діючий макет системи опалення «тепла підлога»

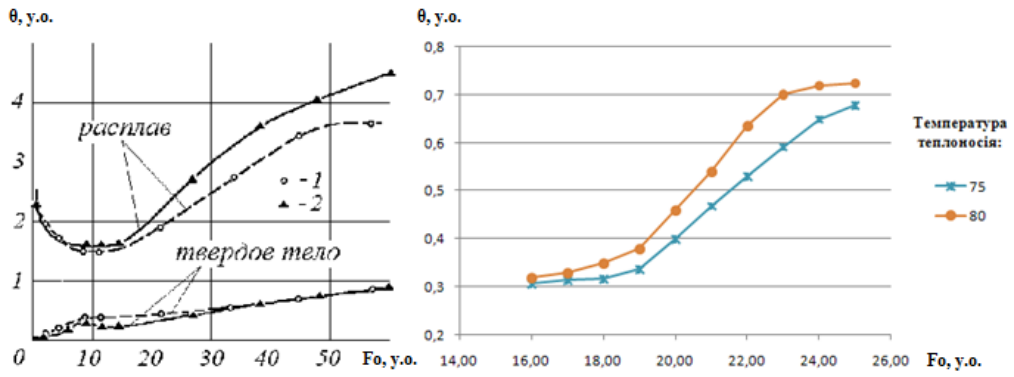


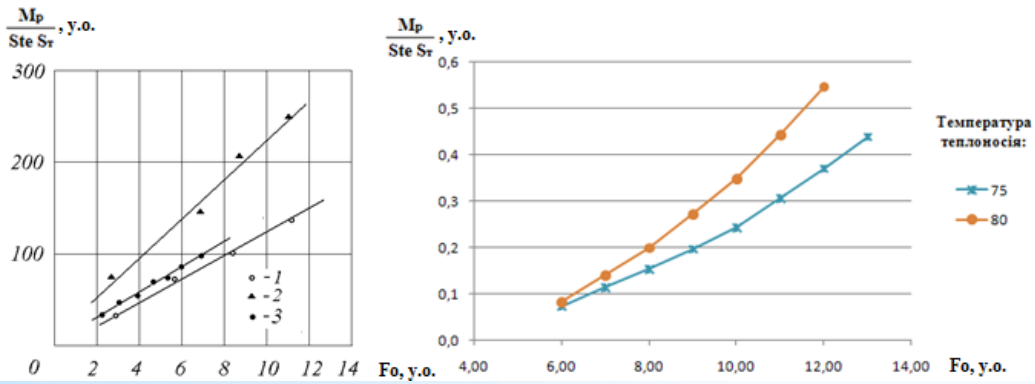
а)



б)

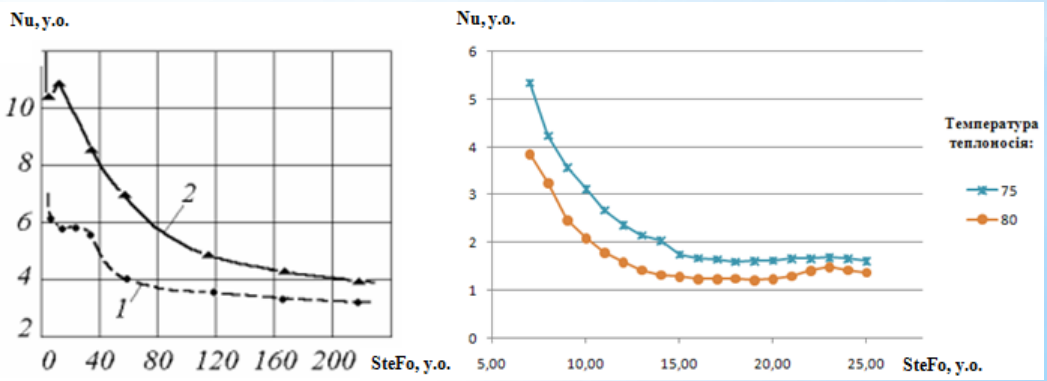
Порівняння отриманих результатів з даними інших дослідників



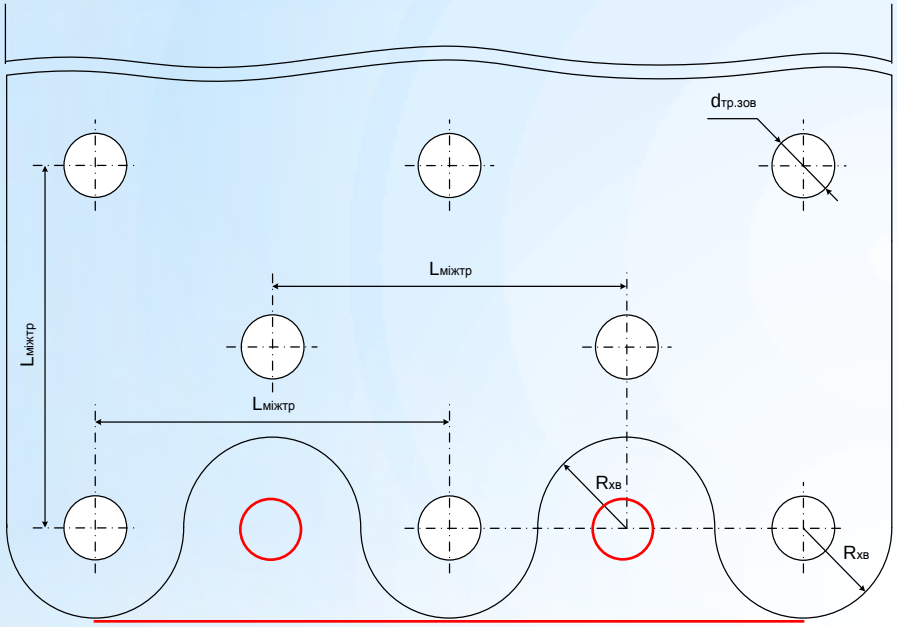


Отримана детальна інформація про температурний розподіл в об'ємі робочого матеріалу дає змогу простежити зміну середньооб'ємних температур (θ) у рідкій і твердій фазах, $M_p/Ste\ S_m$ (де M_p – маса розплаву, Ste – число Стефана, S_m – площа поверхні джерела теплоти) та числа Нусельта (Nu) від числа Фур'є (Fo), які представлено на рис. 8. Аналіз отриманих кривих свідчить про наявність трьох фаз плавлення та двох періодів кристалізації.

В останньому випадку, 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 нової конструкції



Раціональний розмір (радіус) хвилі знаходиться в межах:

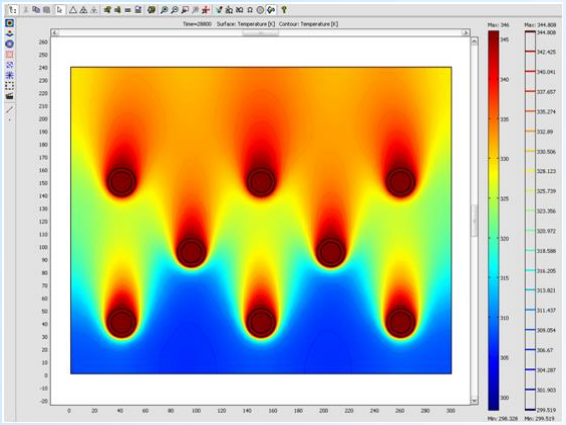
$$1{,}45d_{тр.зов.} \geq R_{хв} \geq 1{,}25d_{тр.зов.},$$

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

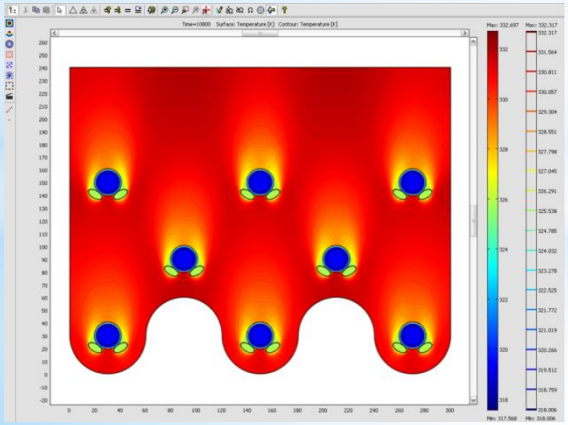
Встановлено, що **перевищення R на 20 % призводить до зменшення коефіцієнту корисного використання маси** акумулюючого матеріалу **на 7 %**.

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 нової конструкції з електричними нагрівальними елементами



а)



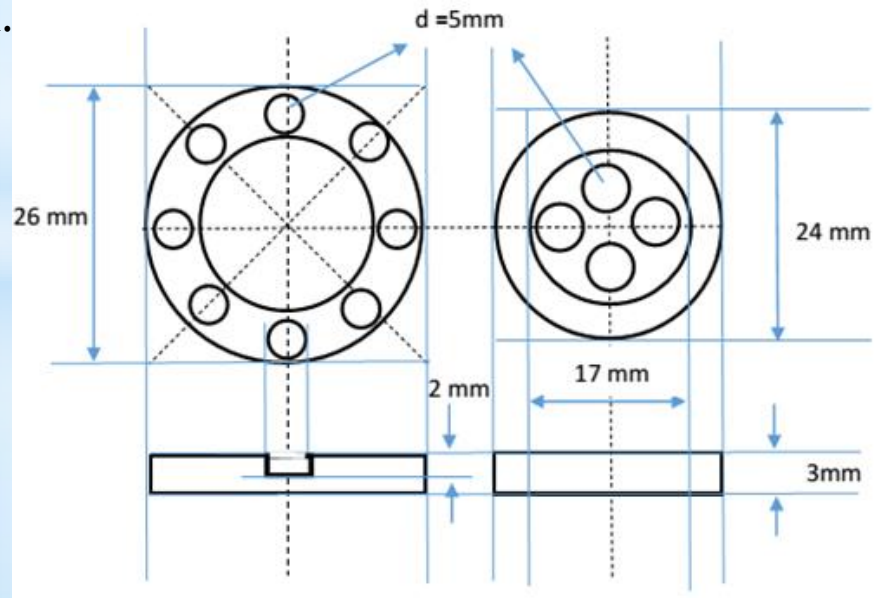
б)

Порівняльний аналіз досліджуваної (а) та нової (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 %.

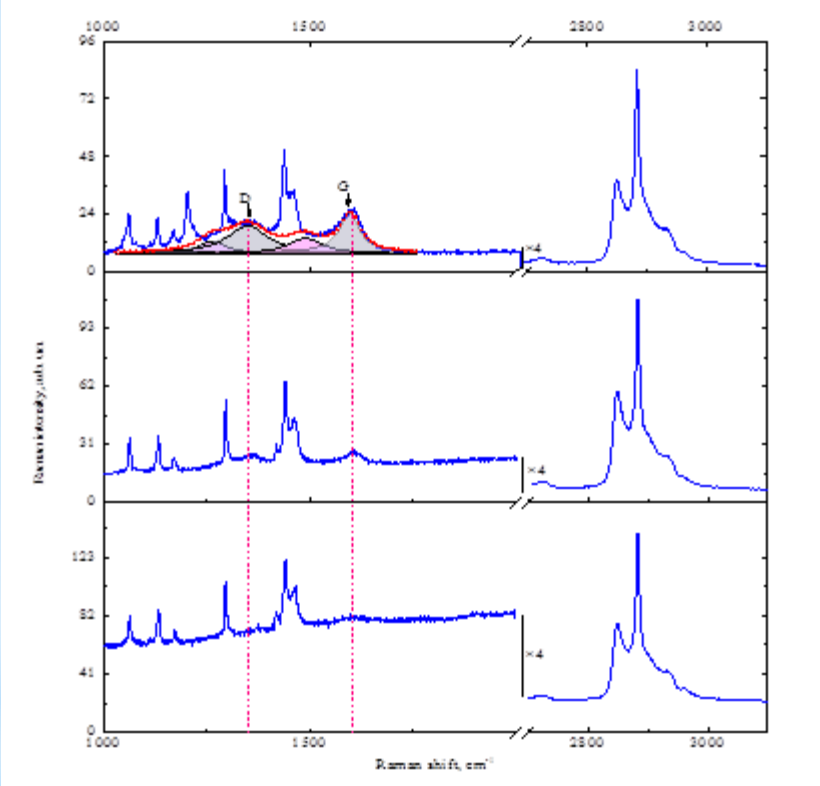
Зовнішній діаметр труби, мм	Кількість метрів кабелю на погонний метр труби, м				
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
	Шаг установки кабелю, см				
28	21	15	12	10	9
34	25	17	14	11	10
42	31	21	17	14	13
48	35	24	19	16	14

Оснастка для вимірювання спектрів КРС та фіксування температури фазових переходів у парафіні

У роботі для реєстрації раманівських спектрів було використано потрійний спектрометр Horiba Jobin Yvon T64000, укомплектований конфокальним оптичним мікроскопом. Для збудження оптичних спектрів використано випромінювання Ar-Kr лазеру ($\lambda_{зб}$ = 514.5 нм). Лазерний пучок фокусувався у пляму діаметром 0.7 мкм. Точність визначення частотного положення коливних смуг дорівнювала 0.15 $см^{-1}$. Для досягнення та реєстрації фазового переходу твердотільний зразок парафіну нагрівали до температури 70 ºС. Для цього було виготовлено металеву (мідну і латунну) теплопровідну кювету (див. рис.), яка по розмірах була адаптована для розміщенні у камері термостатування і дала можливість працювати із зразками при їх фазових переходах.



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

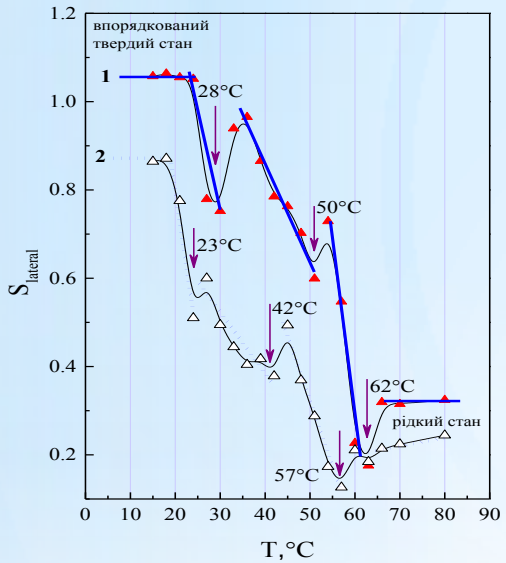


Для того, щоб методично правильно проаналізувати вплив даних порошків на динаміку фазових переходів у суміші парафіну з конкретним порошком, спочатку було проведено дослідження структурних та коливних властивостей вихідних порошків. На рис. подано спектри КРС трьох видів порошків з різними наповнювачами.

Як видно, вуглецеві наповнювачі по різному розподіляються у об’ємі парафіну. Слід зазначити, що найбільша кількість порошку входить у об’єм основної речовини, та найбільш рівномірно розподіляється тоді, коли даний порошок має найменшу фракцію.

При ретельному порівнянні частотних положень відповідних коливних смуг у спектрах КРС вихідного парафіну Т3 та його сумішах з наповнювачами, було встановлено що додавання теплопровідних наповнювачів не впливає на частотне положення основних смуг, що характеризують коливання у парафіні. Останнє свідчить про те, що порошки хімічно не реагують з матеріалом основної матриці.

Температурні залежності параметра $S_{lateral}$ для вихідного парафіну Т3 (1) та для суміші парафіну Т3 з вуглецевих теплопровідним наповнювачем (2)



З даного рисунка 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. Такі зміни свідчать про збільшення теплопровідності акумулюючого матеріалу. Вказані зміни можна пояснити так:

по-перше при внесенні теплопровідного наповнювача у парафін, у його структурі формується теплопровідна протяжна мережа. Тобто у робочому об’ємі, коли теплове поле (фронт розплаву) підходить до теплопровідної частинки, частинка нагрівається і плавить парафін у своєму околі. Таким чином фронт проходить до наступної частинки і т. д. По-друге, покращення теплопровідних властивостей парафіну з наповнювачами пояснюється теплостимульованими процесами утворення хімічних з’язків між молекулами наповнювача і парафіновою матрицею тобто, має місце зменшення термоопору на інтерфейсі частинки наповнювача і основної парафінової матриці.

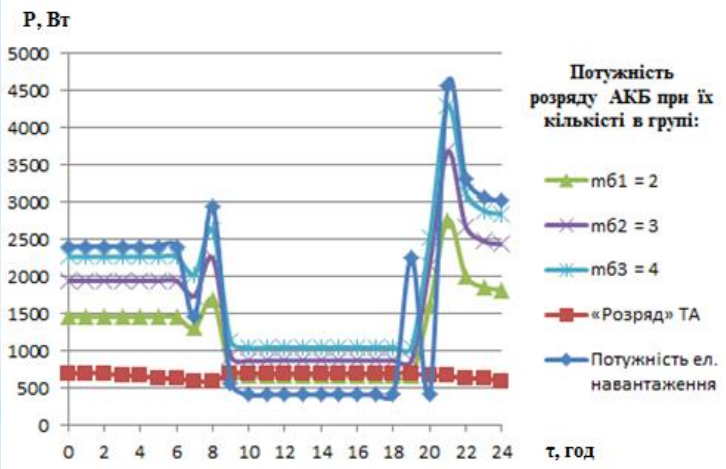
Порівняльні характеристики акумулятора теплоти нової з існуючими конструкціями теплоакумуляторів

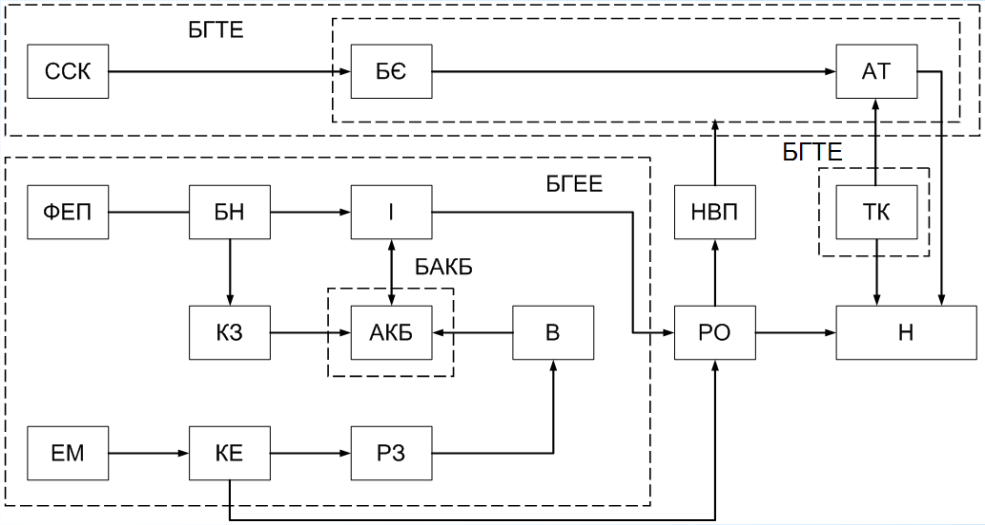
Відомі конструкції акумуляторів теплоти										Нова конструкція		
Теплоакумулюючий матеріал												
$V_{там}$, л	Твердий			Рідкий (вода)			Парафін			Парафін		
	Теплова потужність, кВт/год.:			Теплова потужність, кВт/год.:			Теплова потужність, кВт/год.:			Теплова потужність, кВт/год.:		
	загальна	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.

Розроблення системи комплексного енергозабезпечення з акумуляторами енергії

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





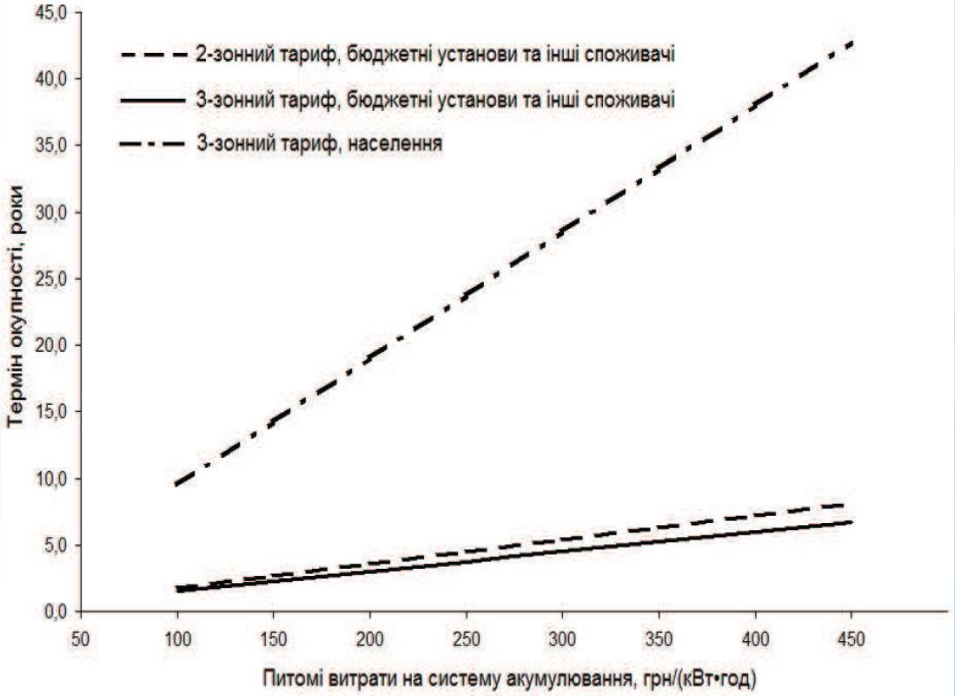
БГЕЕ – блок генерації електричної енергії;
БАКБ – блок акумуляторних батарей;
БГТЕ – блок генерації теплової енергії.

Результати дослідження показують, що доля альтернативної (поновлюваної) енергії в енергоспоживанні при заданих параметрах моделі 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 %.

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.



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 з гладкою поверхнею, які розміщені в об'ємі акумулюючого матеріалу органічного походження*, **що дало змогу вперше**:

- **дослідити закономірності взаємовпливу теплових і електричних джерел енергії на процеси перетворення й накопичення енергії**, що уможливило технічну реалізацію її комбінованого акумулювання в одному апараті;
- **отримати залежність коефіцієнта корисного використання маси акумулюючого матеріалу від геометричних параметрів та потужності первинного джерела енергії**, на базі якої розроблено нову конструкцію комбінованого акумулятора енергії;
- **визначити граничний радіус поширення теплоти для розміщення циліндричних джерел електричної та теплової енергії** в корпусі комбінованого акумулятора енергії і **дослідити його залежність від геометричних параметрів теплообмінної поверхні**, яка розміщена в масиві чистого та підсиленого теплопровідними включеннями (мікро- й наночастинками металів) акумулюючого матеріалу, що підвищило енергетичну ефективність робочих характеристик апарату;
- **отримати залежність робочих параметрів системи комплексного енергозабезпечення споживачів від теплофізичних процесів перетворення та акумулювання енергії**, що підвищило її ефективність та знизило капіталовкладення.

Практичне значення роботи

1. Розроблено та експериментальним шляхом досліджено ефективність роботи:

- **нової конструкції комбінованого акумулятора енергії**, яка відрізняється від зразка-аналогу хвилеподібним дном і додатковим оснащенням багатоярусними електричними підігрівачами, **що підвищує ефективність та стабільність енергозабезпечення споживачів на 15–20 %;**

- **варіанта 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. Показано, що **вартість отриманої теплової енергії при цьому знизилась на 50–60 %, електричної – на 40–50 %**.

2. На основі здобутих наукових результатів:

- **розроблена методика 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;**

- **оптимізовано методику підбору** компонентного складу систем енергозабезпечення.

3. Новизну та конкурентоспроможність запропонованих технічних рішень підтверджено 4 актами впровадження.

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).

Основні положення роботи впроваджено у ТОВ «Редюс Енерджи», ПАТ «Акціонерне товариство «Південтрансенерго» (копія актів впровадження додається), а частина з них, як методичне забезпечення, використовується в навчальному процесі кафедри теплоенергетики Національного університету біоресурсів і природокористування України під час підготовки фахівців технічних спеціальностей.