МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ЦИКЛ НАУКОВИХ ПРАЦЬ

АНТИПОВА Євгена Олексійовича
ТРОХАНЯКА Віктора Івановича
на тему:

«КОМБІНОВАНІ АКУМУЛЯТОРИ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ФАЗОПЕРЕХІДНИХ ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК З НАНОЧАСТИНКАМИ МЕТАЛІВ»

висунутий на здобуття щорічної премії Президента України для молодих вчених у 2018 році

Київ - 2017

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**. Разом з тим, оскільки, переважна більшість вітчизняних енергетичних мереж та апаратів знаходиться в аварійному стані, якість отриманої енергії не завжди відповідає встановленим нормам, що вимагає проведення досліджень спрямованих на пошук шляхів підвищення ефективності роботи вказаних (електро- і теплоакумуляційних) апаратів та систем на їх основі.

Постановка завдання

Мета роботи є розробка основ нового, комплексного підходу у проведенні досліджень, спрямованих на підвищення робочих характеристик акумуляторів теплоти при використанні фазоперехідних теплоакумулюючих матеріалів органічного походження, що мають наповнювачі у вигляді наночастинок металів.

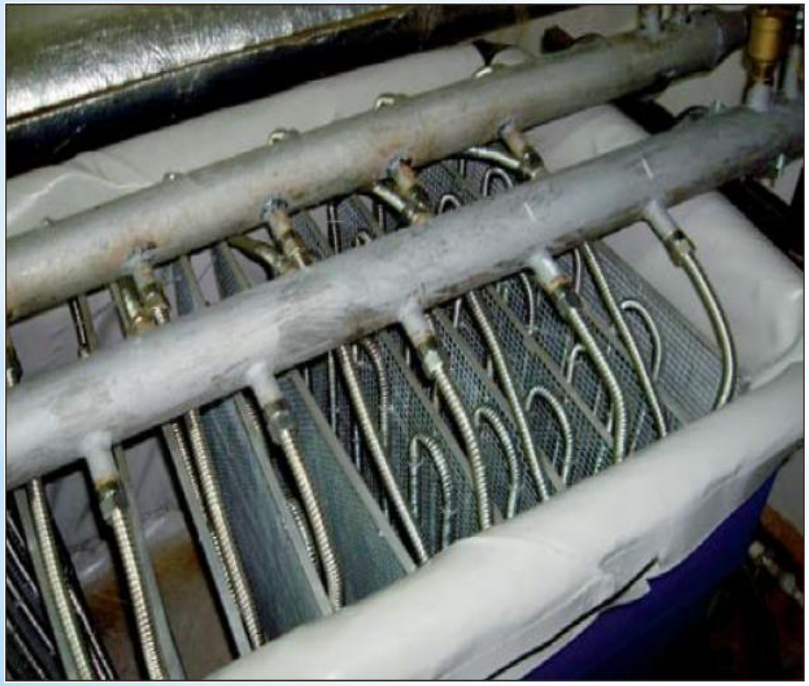
Об'єкт дослідження – вплив наповнювачів у вигляді наночастинок металів на інтенсивність процесів плавлення/кристалізації акумулюючого матеріалу органічного походження та ефективність роботи акумулятора теплоти фазового переходу в/та системі(и) комплексного енергозабезпечення споживачів у цілому.

Предмет дослідження – залежність параметрів функціонування системи комплексного енергоживлення з комбінованим акумулятором енергії та їх вплив на ефективність процесу енергозабезпечення споживачів.

Методи дослідження – експериментальні дослідження та числове моделювання процесів тепло- і масопереносу в акумуляторах енергії виконано за допомогою програм для дво- і тривимірного моделювання «COMSOL Multiphysics 3.5a» та ІЧ спектроскопії з Фур'є перетворенням, а процесів перетворення та акумулювання енергії в системі комплексного енергозабезпечення з оцінкою їх впливу на ефективність її роботи загалом – методом імітаційного моделювання, який реалізовано в програмному пакеті «Matlab Simulink».

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.

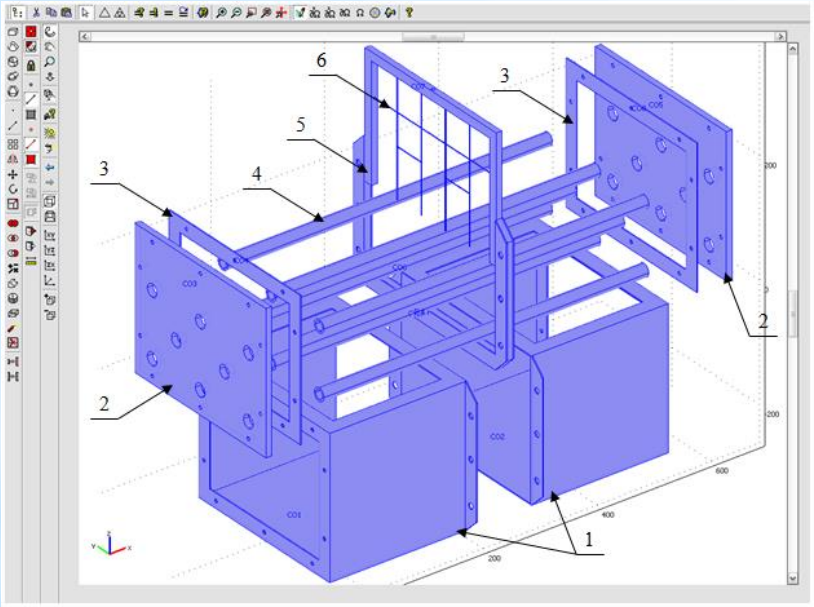


Недоліки капсульних: велика кількість капсул малого розміру, що призводить до значної трудомісткості їх виготовлення, подорожчання конструкції такого акумулятора, а також до великих втрат тиску при проходженні теплоносія через пористий (капсульний) шар теплоакумулюючого матеріалу.

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:

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

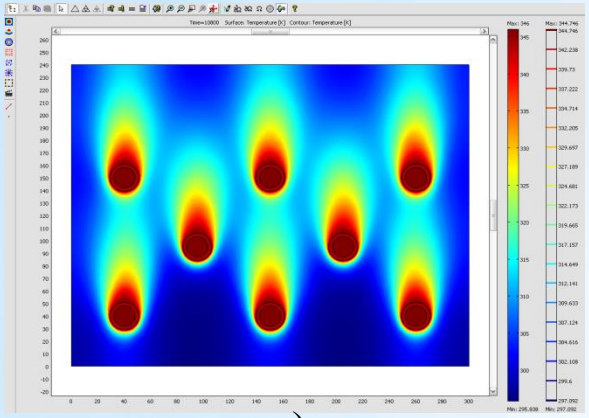
- на поверхні корпусу:

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

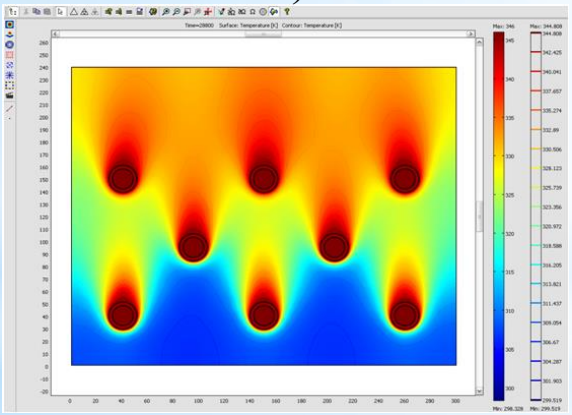
- на поверхні джерел теплоти:

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

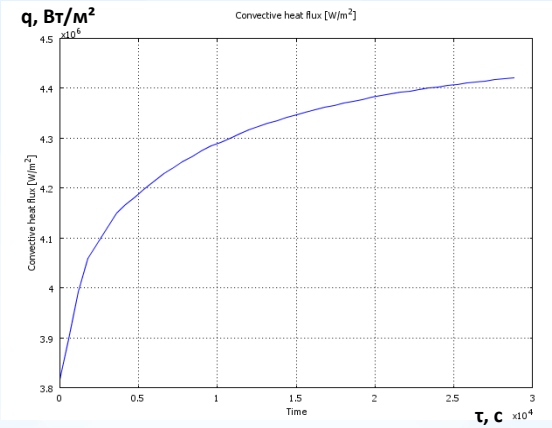
Температурні поля в об’ємі акумулюючого матеріалу акумулятора теплоти досліджуваної конструкції

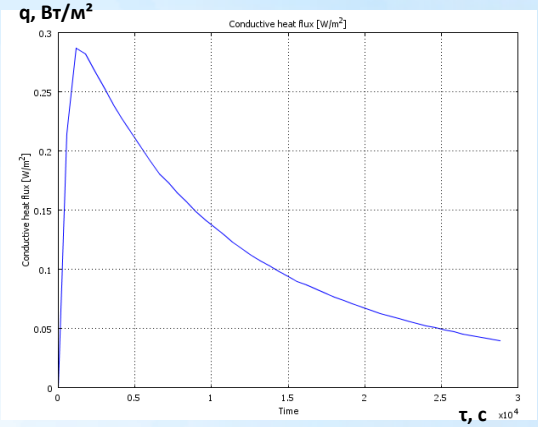


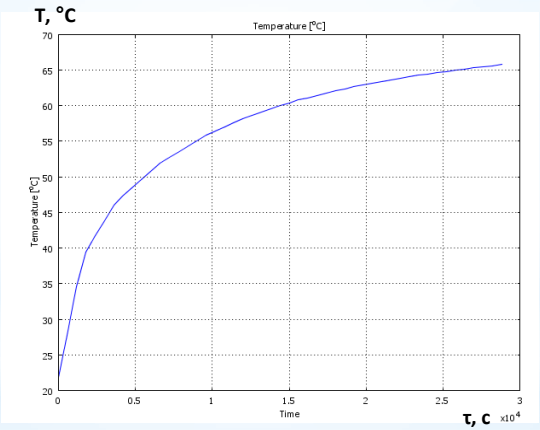
а)

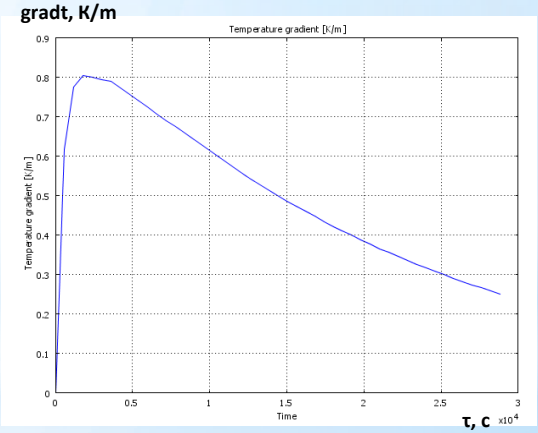


б)









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.

Значення граничного радіусу поширення теплоти в об’ємі акумулюючого матеріалу фазового переходу

В результаті числових розрахунків для різних параметрів циліндричної теплообмінної поверхні **знайдено граничну відстань (радіус) між тепловими джерелами** (див. таблиця 1), що дало змогу зменшити масогабаритні показники акумулятора теплоти та підвищити його акумуляційну здатність.

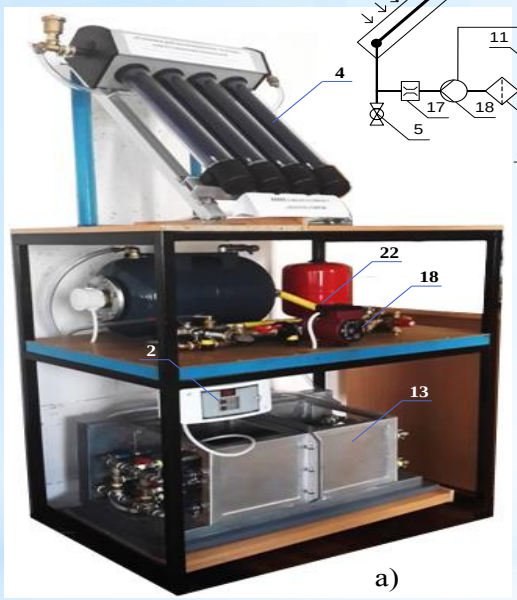
Таблиця 1

Граничний радіус поширення теплоти в об’ємі матеріалу

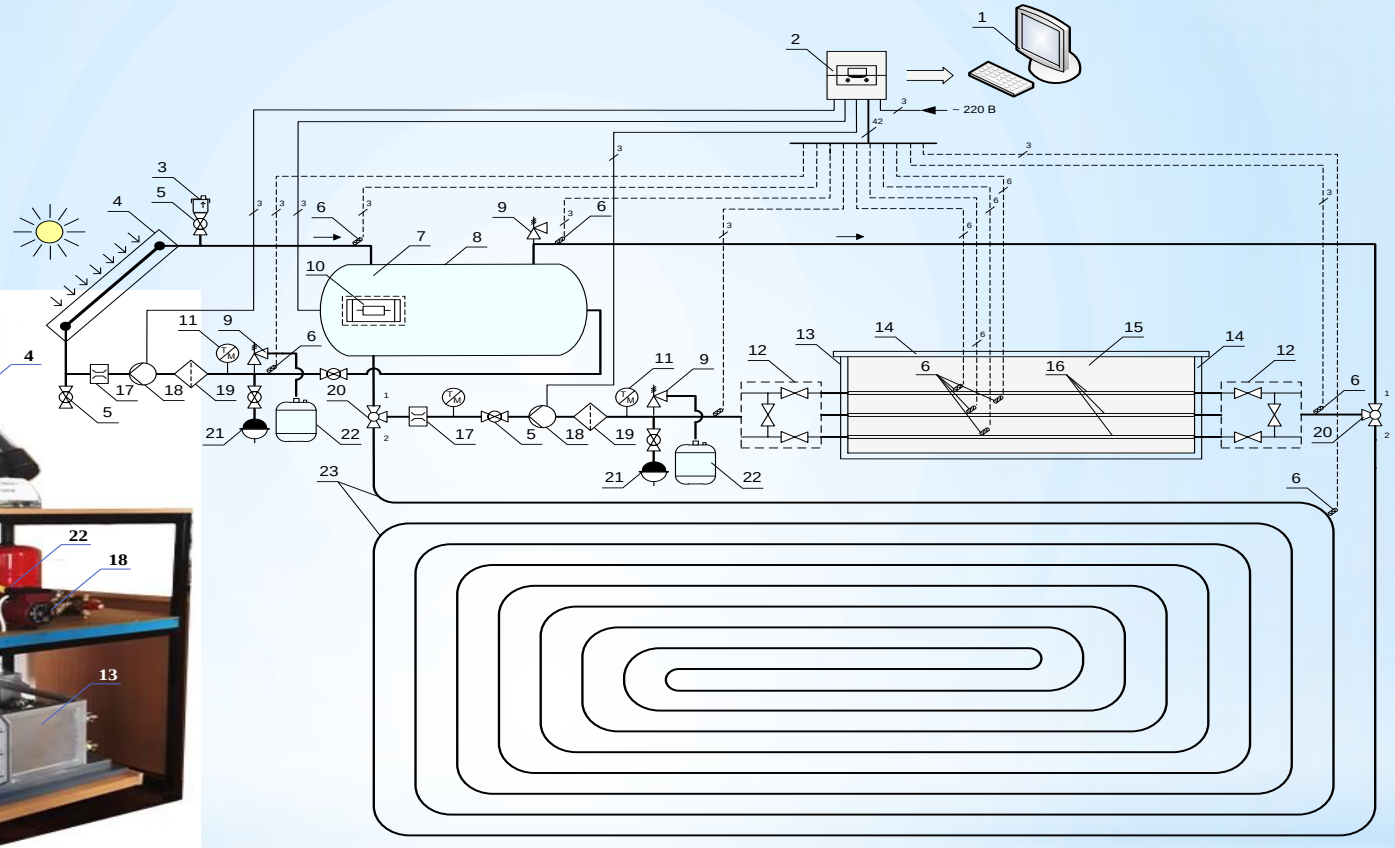
Параметр	Номінальний діаметр (дюйми)				
	½	**¾**	**1**	**1 ¼**	**1 ½**
Умовний прохід, мм	13	19	25	32	38
$d_{тр.зов}$, мм	21,25	26,75	33,50	42,25	48,00
R, мм	**29,00**	**36,00**	**45,00**	**57,00**	**65,00**

Аналіз результатів проведеного числового моделювання дає змогу зробити припущення: ***розміщення нижнього ряду нагрівальних елементів від дна та стінок корпусу акумулятора, слід виконувати на відстані, яка не перевищує значення граничного (кінцевого) радіуса R***, радіального поширення теплоти в масиві акумулюючого матеріалу.

Загальний вигляд експериментальної установки



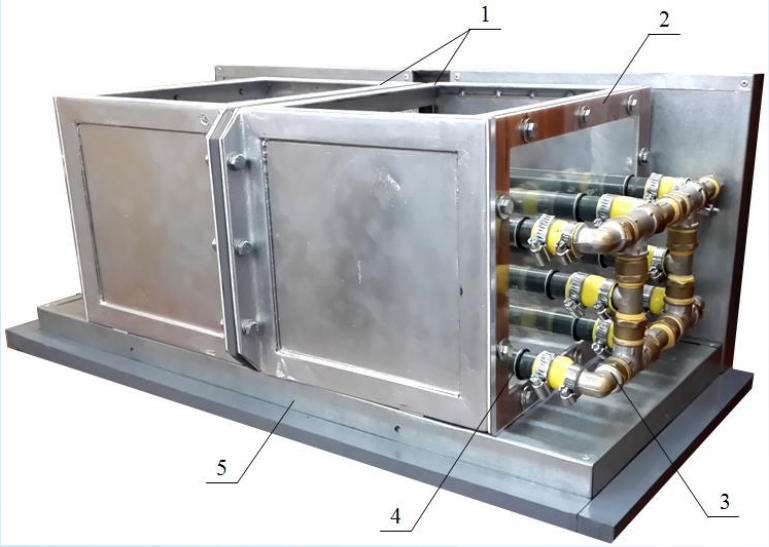
а)



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 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.

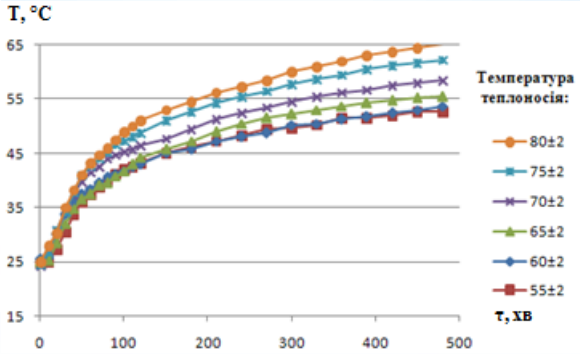
Для забезпечення умови радіального поширення теплоти в масиві акумулюючого матеріалу, за умовний час роботи апарата $\tau \approx 28800$ с, **у межах $R \leq$ 40 мм**, як горизонтальні циліндричні джерела теплоти **використано трубний пучок, який складається з 8 сталевих труб ($d_з$ = 21,3х2,8 мм)** 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

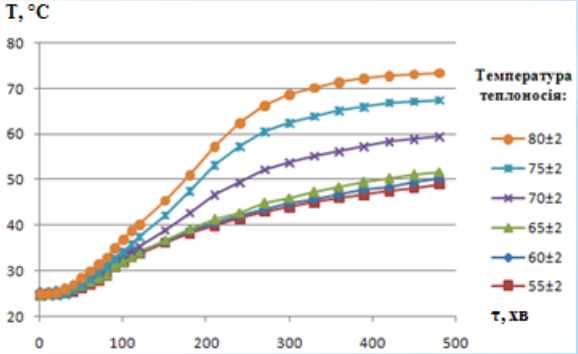
а)

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)

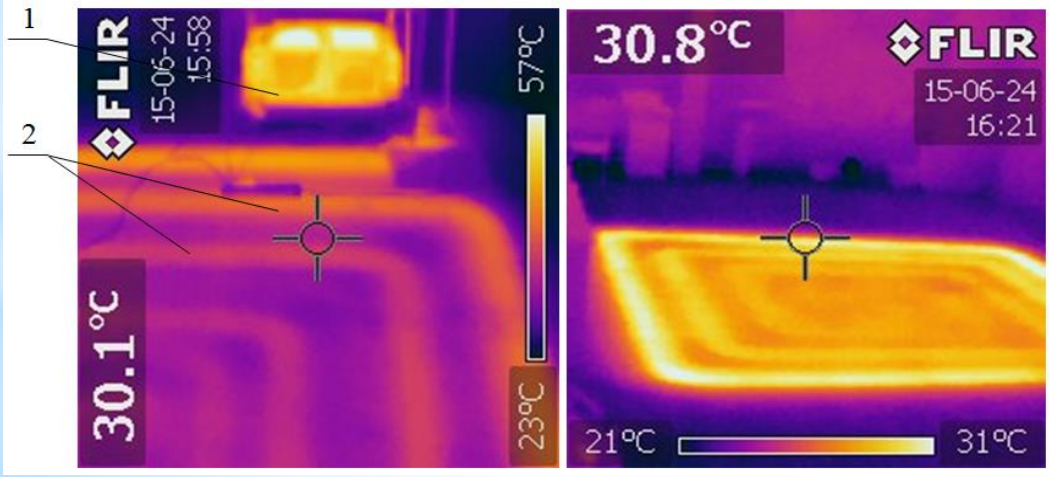


г)

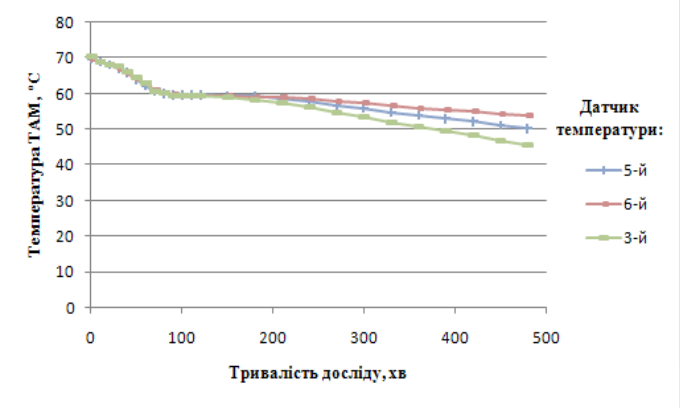
Робота акумулятора теплоти в режимі «розряд» на навантаження

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.

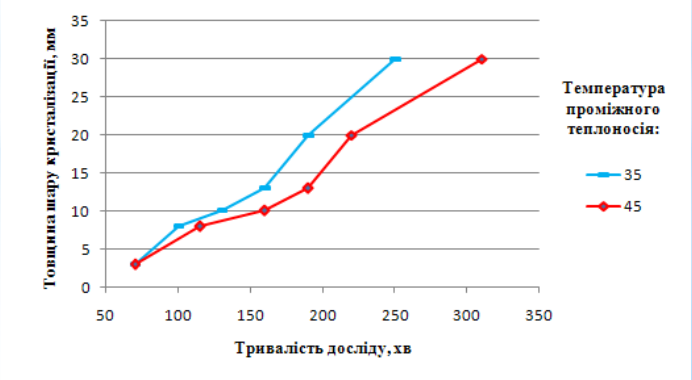
Досліджено, що при подачі води з температурою +45 °С товщина кристалізації через 180 хв. складає 13 мм (рис. б), натомість при температурі води +35 °С – 20 мм. При цьому, температура глибинних шарів на 27 % вища від температури шару закристалізованого матеріалу.



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

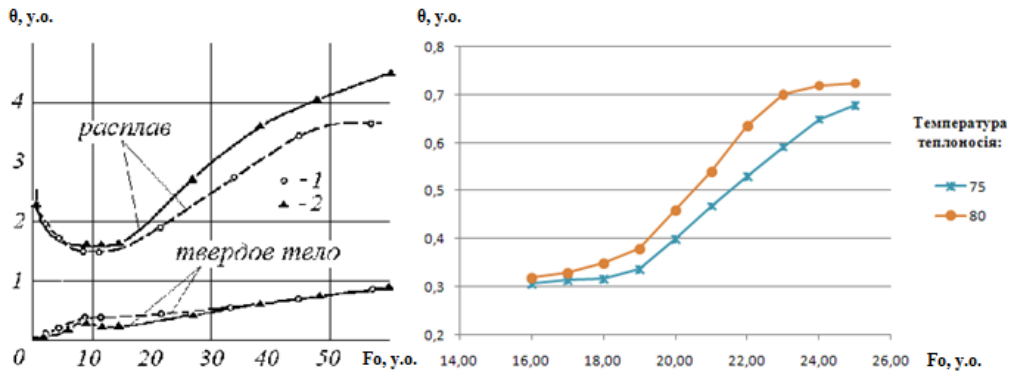


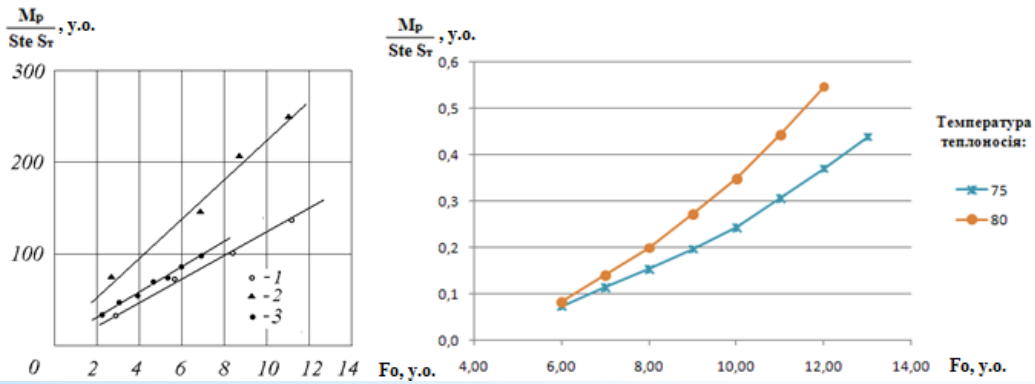
а)



б)

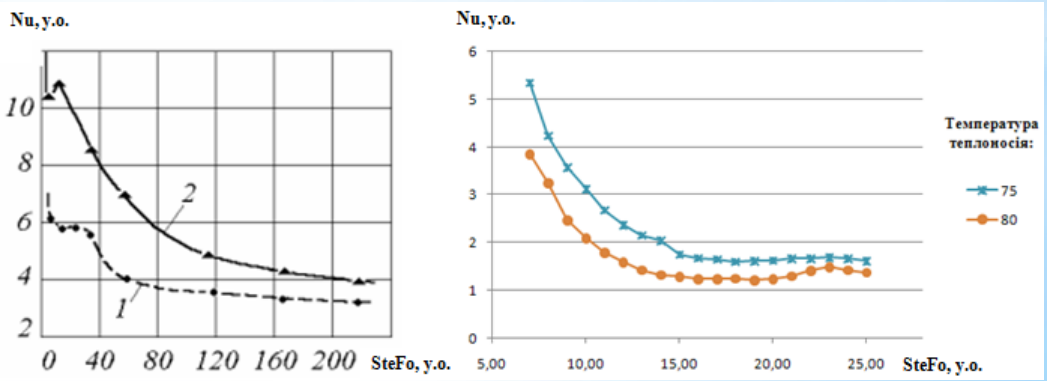
Порівняння отриманих результатів з даними інших дослідників





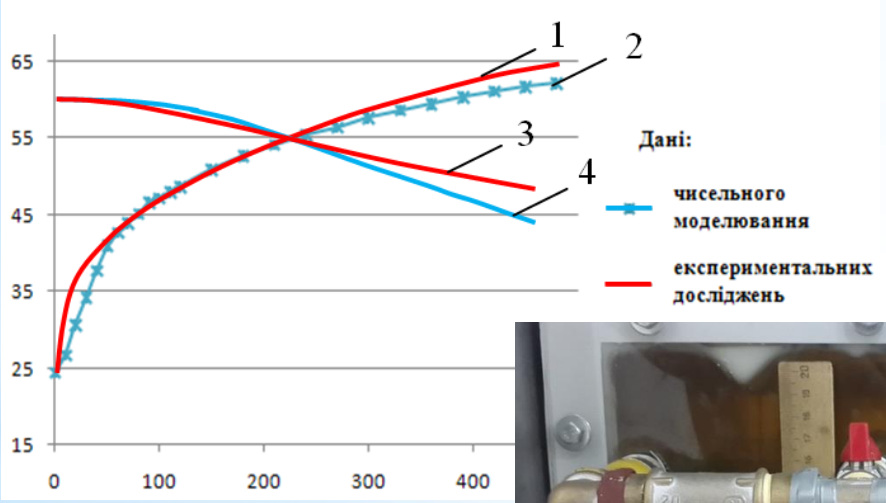
Отримана детальна інформація про температурний розподіл в об'ємі робочого матеріалу дає змогу простежити зміну середньооб'ємних температур (θ) у рідкій і твердій фазах, $M_p/Ste\ S_m$ (де M_p – маса розплаву, Ste – число Стефана, S_m – площа поверхні джерела теплоти) та числа Нусельта (Nu) від числа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

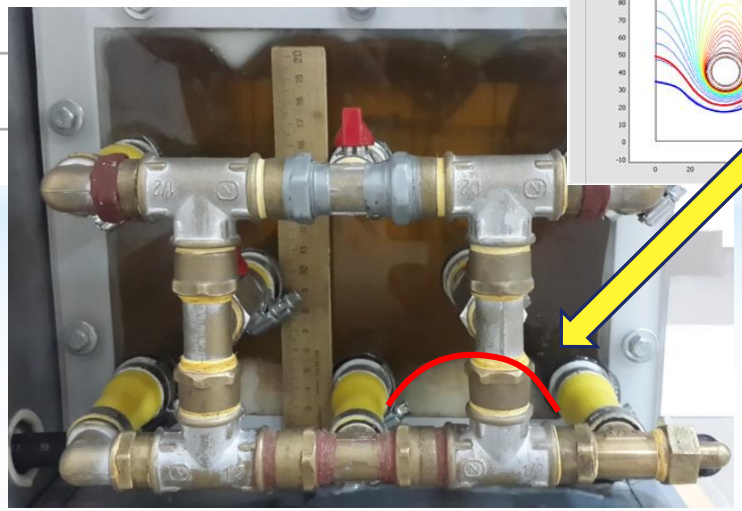
В останньому випадку, перенос теплоти здійснюється кондуктивним шляхом та залежить від величини термічного опору δ_p/λ_p між джерелом і межею поділу рідкої та твердої фаз.

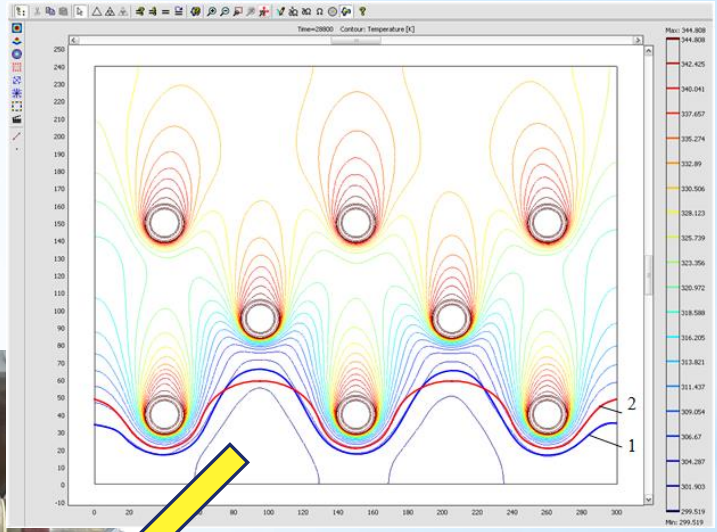


Адекватність отриманих результатів

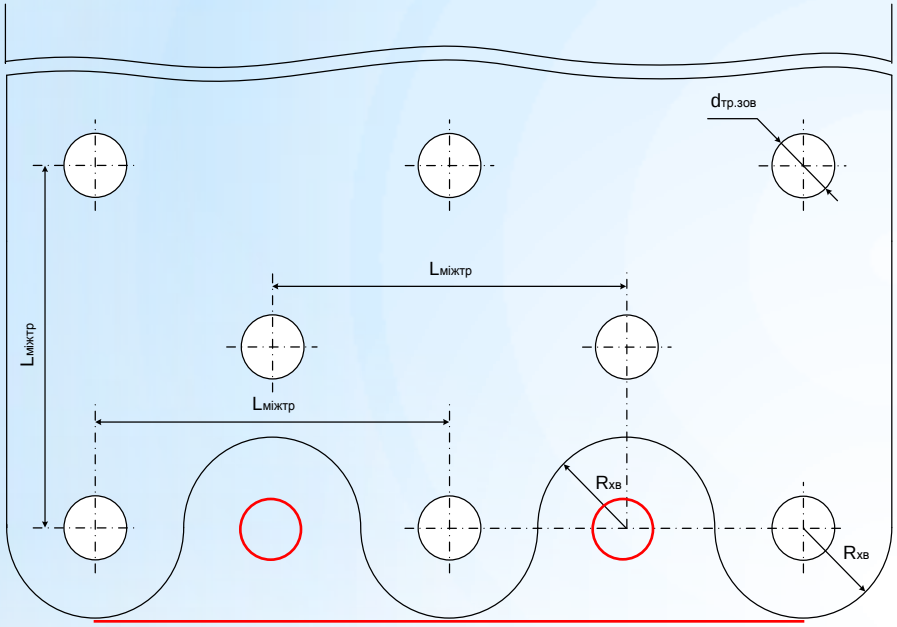
Адекватність результатів числового моделювання (синя крива) підтверджено порівнянням з даними експериментальних досліджень (червона крива), максимальна похибка по температурним показникам під час плавлення акумулюючого матеріалу не перевищує 3 %, під час його кристалізації – не більше 5 %, а по динаміці зміни профілю плавлення – в межах 5 %. Тобто, можна констатувати їх прийнятну відповідність.







Ефективні відстані розміщення теплообмінної поверхні в корпусі акумулятора теплоти вдосконаленої конструкції



Раціональний розмір (радіус) хвилі знаходиться в межах:

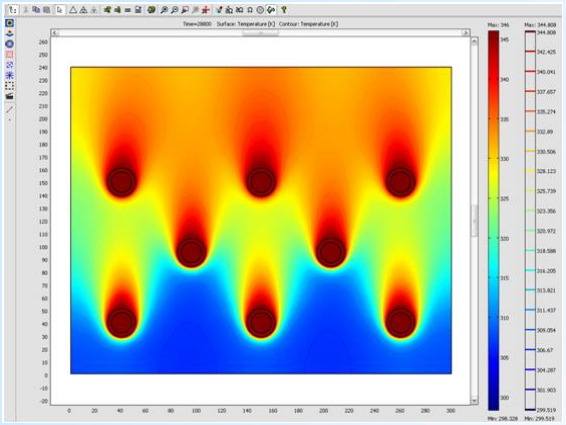
$$1{,}45d_{тр.зов.} \geq R_{хв} \geq 1{,}25d_{тр.зов.},$$

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

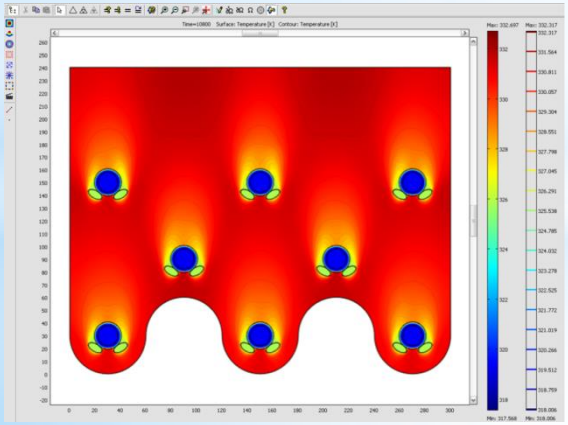
Встановлено, що **перевищення R на 20 % призводить до зменшення коефіцієнту корисного використання маси** акумулюючого матеріалу **на 7 %**.

Параметр	Номінальний діаметр (дюйми)				
	½	**¾**	**1**	**1 ¼**	**1 ½**
$d_{тр.зов}$, 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 вдосконаленої конструкції з електричними нагрівальними елементами



а)



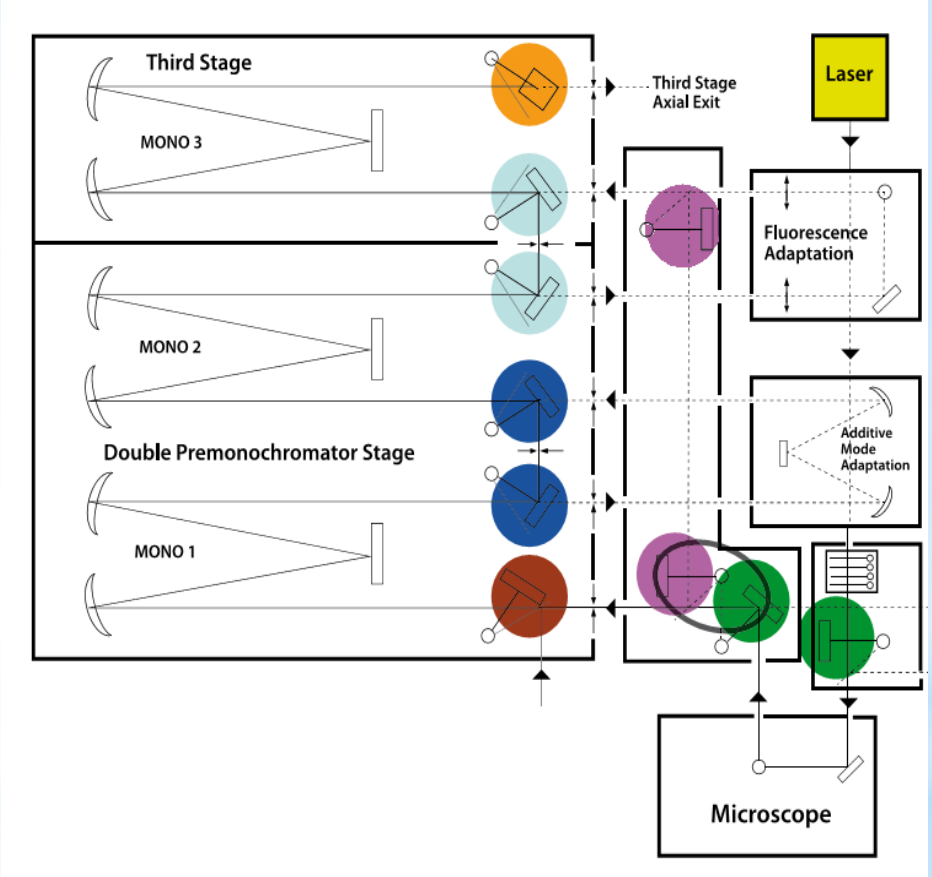
б)

Порівняльний аналіз досліджуваної (а) та вдосконаленої (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

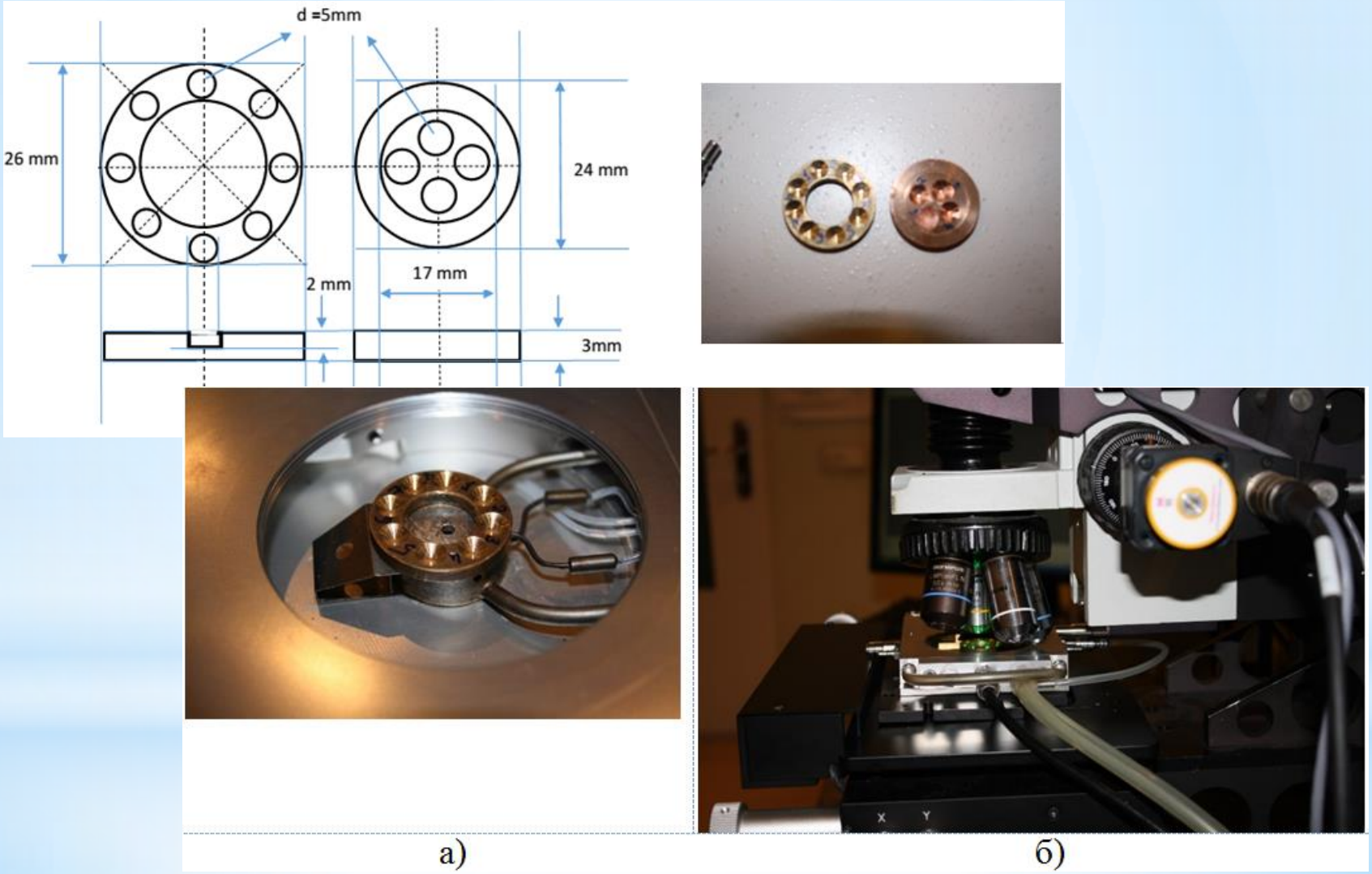
Кріостатна оснастка для вимірювання спектрів КРС та фіксування температури фазових переходів у парафіні

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 п'ятно діаметром 0.7 мкм. Точність визначення частотного положення коливних смуг дорівнювала 0.15 $см^{-1}$. Схема вказаної установки показано на рисунку. Для досягнення та реєстрації фазового переходу твердотільний зразок парафіну потрібно нагрівати до температури не менше 70 ºС.



Тому потрібно було виготовити кювету яка по розмірах була би адаптована для розміщенні у камері термостатування та давала би можливість працювати із зразками при їх фазових переходах.

Макети теплопровідних кювет, виготовлених з латуні та міді



Загальний вигляд розробленої кювети (а), встановленої на теплопровідний контактний столик термоелектричної комірки (б)

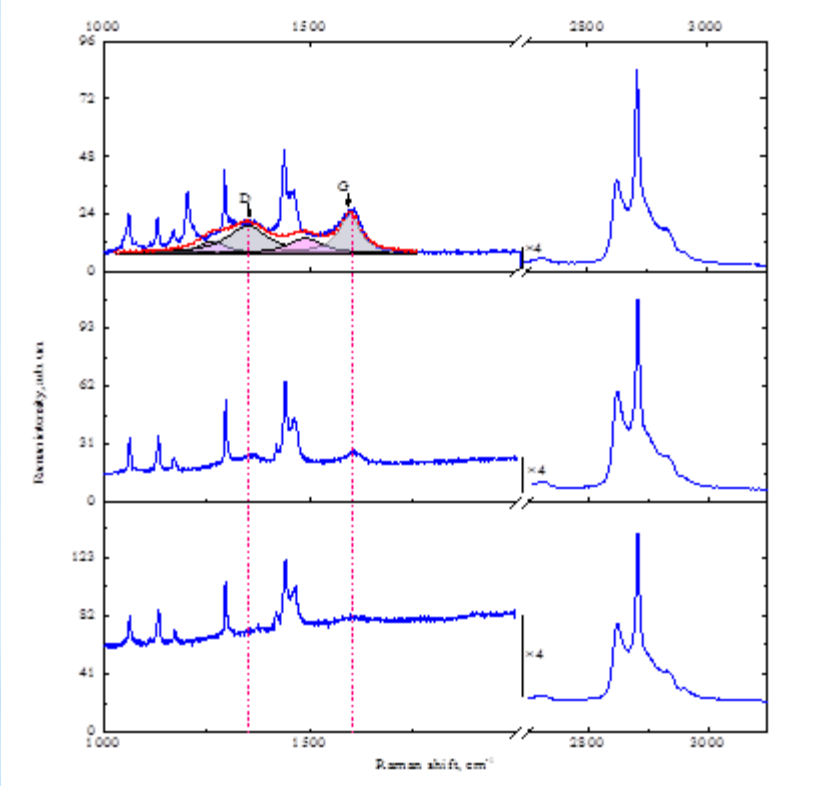
Структурні характеристики теплопровідних порошків

Зразок №1 отриманий із сировини рослинного походження шляхом її карбонізації та активації калій гідроксидом. Отриманий карбонізований вуглець механічно подрібнювався спершу до фракції 200 - 250мкм, потім до нм розміру і змішувався з гідроксидом калію та водою у ваговому відношенні: m(KOH)/m(C) = 2/1. Тверді продукти термолізу відмивали від лугу в 5 % водному розчині HCl та дистильованій воді до нейтрального pH.

Зразок № 2 отриманий із рослинної сировини (абрикосові кісточки). Для отримання даного матеріалу вихідну сировину висушували та подрібнювали до фракції >0.1 мм, ділили на порції масою 10 г і змішували з 50 г ортофосфорної кислоти концентрацією 32 %, при цьому відношення маси активуючого агента до маси вихідної сировини $m(H_3PO_4)/m(BC)$ = 1,6/1. Після висушування та охолодження матеріал відмивали гарячою дистильованою водою до нейтрального pH.

Зразок № 3 - аусфер вугілля синтетичного походження, отримане методом карбонізації фенолформальдегідних смол.

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.

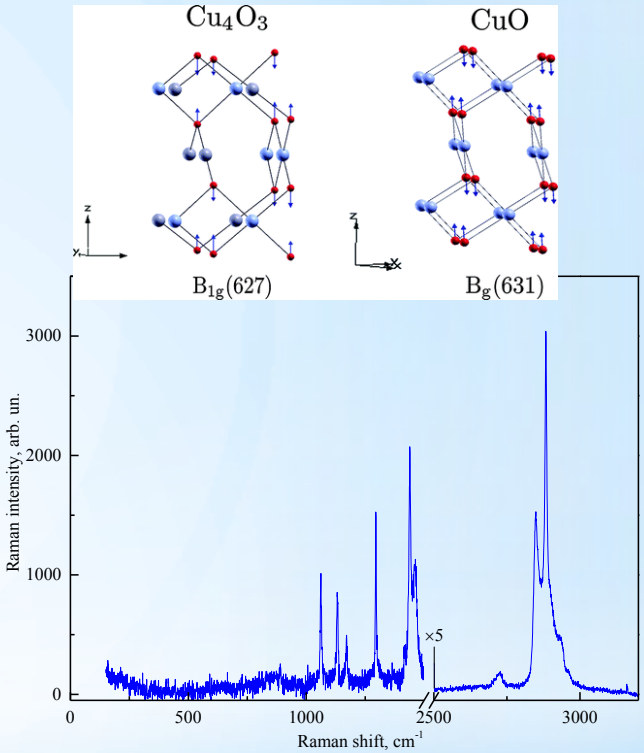
Як видно, вуглецеві наповнювачі по різному розподіляються у об’ємі парафіну. Слід зазначити, що найбільша кількість порошку входить у об’єм основної речовини, та найбільш рівномірно розподіляється тоді, коли даний порошок має найменшу фракцію.

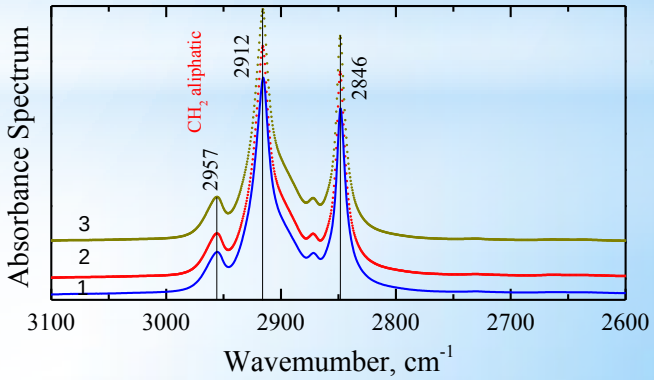
При ретельному порівнянні частотних положень відповідних коливних смуг у спектрах КРС вихідного парафіну Т3 та його сумішах з наповнювачами, було встановлено що додавання теплопровідних наповнювачів не впливає на частотне положення основних смуг, що характеризують коливання у парафіні. Останнє свідчить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

Спектр КРС парафіну ТЗ з мідним наповнювачем

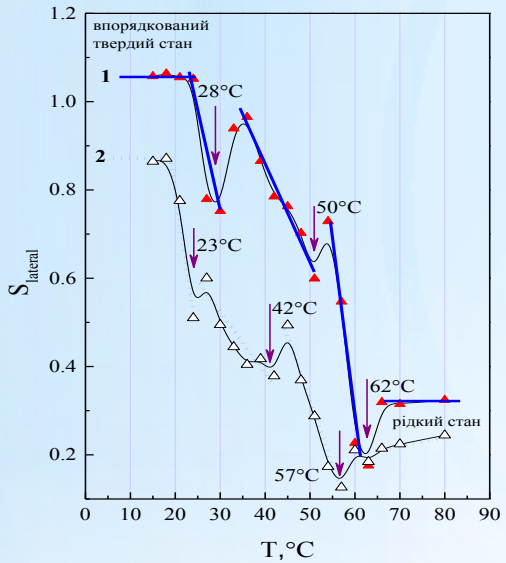
У випадку мідного наповнювача слід було очікувати утворення двох нових типів хімічних зв'язків у структурі основної парафінової матриці. Автори роботи показали, що при наявності у матеріалі двох подібних структур, теоретично можлива поява у коливних спектрах смуг КРС і спектрів ІЧ поглинання. Зазначених смуг немає у наших експериментально отриманих спектрах (див. середній рисунок). Це означає, що прослідкувати поведінку наповнювача, його розподіл, та структурно-фазні перетворення за його участю неможливо.

На останньому рисунку зображено накладання вихідного спектру ІЧ поглинання і відповідних спектрів парафіну ТЗ з наповнювачами. Як видно, частотні положення основних смуг поглинання, які є характеристичними для структурно-фазових перетворень при додаванні наповнювачів не змінюються. Останнє ще раз підтверджує твердження про те, що наповнювачі не вступають в хімічну реакцію з основною речовиною.





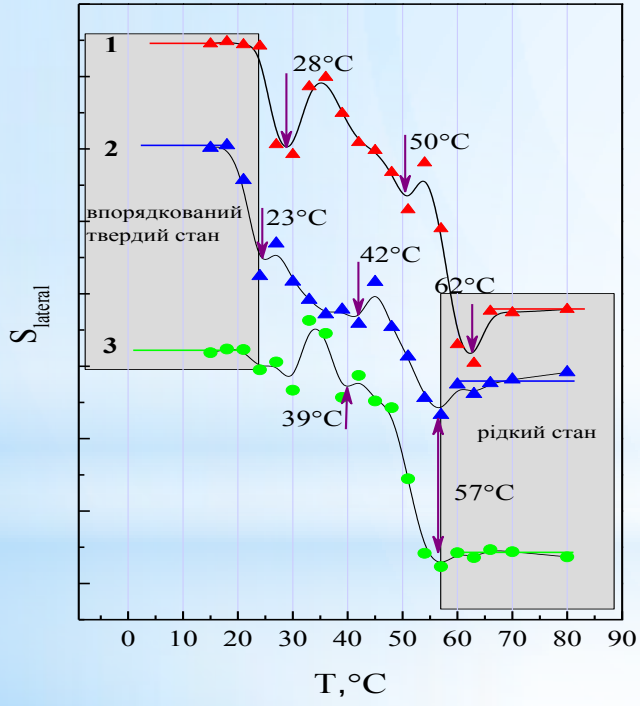
Температурні залежності параметра $S_{lateral}$ для вихідного парафіну Т3 (1) та для суміші парафіну Т3 з вуглецевих теплопровідним наповнювачем (2)



З даного рисунка можна спостерігати зміщення температур основних структурно-фазових переходів для суміші парафіну Т3 з вуглецевим наповнювачем. Як видно, 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.

Температури структурно-фазових переходів парафіну Т3 (1), суміші парафіну Т3 з вуглецевих теплопровідним наповнювачем (2) та мідним наповнювачем (3)

Графік є результуючим та показує різницю в температурах фазових перетворень чистого (вихідного) парафіну Т3 і підсиленого вуглецевими та мідними теплопровідними наповнювачами. Як видно, 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.



Наостанок, варто зазначити, що враховуючи розміри (глибину) кювети для досліджуваного зразка (3 мм) і фокусну відстань об’єктиву, останнє говорить про те, що в робочому діапазоні температур 15…70 ºС частинки теплопровідного наповнювача з мікро- і наночастинками не опускаються на дно кювети, а продовжують висіти у об’ємі рідкого парафіну, на відміну від порошків, які мали фракції 0.2 мм і більше.

Тут варто сказати, що аналогічні дослідження були проведені для сумішей парафіну Т3 з наповнювачами різних фракцій.

Порівняльні характеристики акумулятора теплоти удосконаленої з існуючими конструкціями теплоакумуляторів

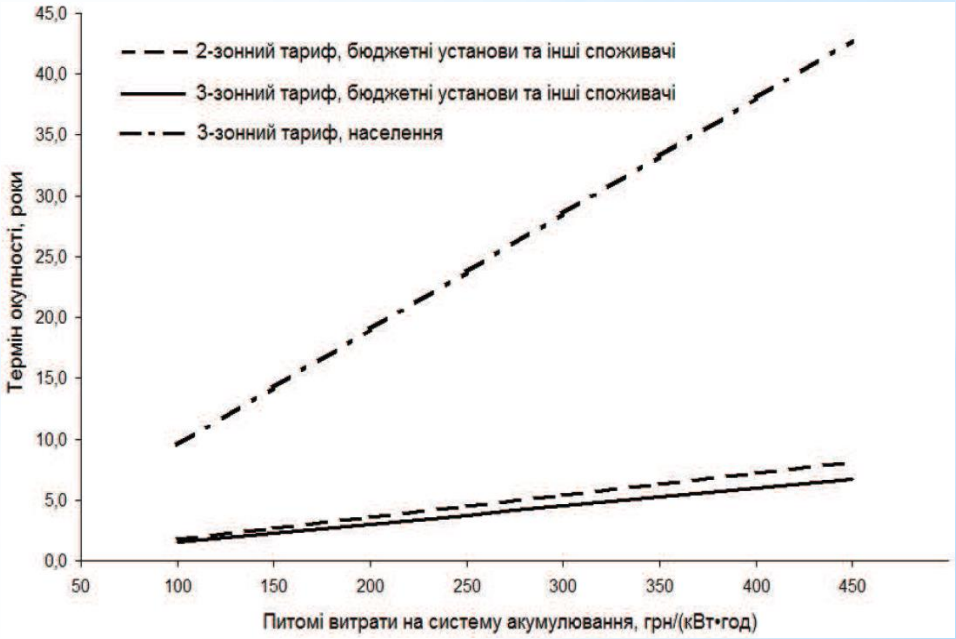
Відомі конструкції акумуляторів теплоти										Удосконалена кон-ція		
Теплоакумулюючий матеріал												
$V_{там}$, л	Твердий			Рідкий (вода)			Парафін			Парафін		
	Теплова потужність, кВт/год.:			Теплова потужність, кВт/год.:			Теплова потужність, кВт/год.:			Теплова потужність, кВт/год.:		
	загальна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

Вартість 1 Гкал теплової енергії, отриманої за рахунок акумуляції електроенергії в нічний період доби

Споживачі	Вартість 1 Гкал теплової енергії за тарифами Київенерго, грн./Гкал	Вартість 1 Гкал теплової енергії отриманої за рахунок використання системи електроопалення, грн./Гкал			
		Двозонний тариф		Тризонний тариф	
		денний	нічний	денний	нічний
Населення	657,24	1720,08	860,04	2150,10	688,03
Бюджетні установи та інші споживачі	1559,94	3820,46	742,87	2992,69	530,62

Економія вартості теплової енергії за рахунок використання пільгової енергії при розрахунку за двозонними тарифами становить 52 %, за тризонними - економія вартості 1 Гкал теплоти має позитивний ефект на рівні 66 % для бюджетних організацій і інших споживачів.



Наукова новизна отриманих результатів

Розроблено наукові основи нового, комплексного підходу у вивченні теплофізичних процесів і властивостей нових акумулюючих матеріалів, які мають іншу структуру, а саме, наповнювачі у вигляді наночастинок металів, в тому числі оптичними методами, *який у світовій та вітчизняній науці був вперше застосований для дослідження зазначених процесів під час плавлення/кристалізації об'єму теплоакумулюючого матеріалу* органічного походження з наповнювачами у вигляді наночастинок металів *навколо декількох циліндричних джерел теплоти з гладкою поверхнею*. Зокрема вперше:

- на основі закономірностей взаємовпливу теплових і електричних джерел енергії на процеси перетворення й накопичення енергії, **обґрунтовано можливість її комбінованого акумулювання в одному апараті**;

- **досліджені закономірності вільноконвективного теплообміну під час фазових перетворень акумулюючого матеріалу** *навколо декількох циліндричних джерел теплоти з гладкою поверхнею* **та оцінено їх вплив на інтенсивність процесів тепло- і масопереносу в різні моменти часу**;

Наукова новизна отриманих результатів, вперше:

- **отримано залежність коефіцієнта корисного використання маси акумулюючого матеріалу від геометричних параметрів та потужності первинного джерела енергії**, на основі якої запропоновано більш ефективну конструкцію комбінованого акумулятора енергії;

- **визначено граничний радіус поширення теплоти для розміщення циліндричних джерел електричної та теплової енергії в корпусі комбінованого акумулятора енергії**, що підвищує енергетичну ефективність робочих характеристик апарату;

- **отримано параболічну залежність між граничним радіусом радіального поширення теплоти в масиві акумулюючого матеріалу та геометричними параметрами теплообмінної поверхні**, що уможливлює проведення «зарядки» і «розрядки» апарата з максимальною ефективністю;

- **встановлено вплив багаторазового циклічного нагрівання й охолодження на структуру і морфологію фазоперехідних акумулюючих матеріалів** методом спектроскопії комбінаційного розсіяння світла.

Практичне значення роботи:

- **оптимізовано технологію виготовлення** високоефективних теплових акумуляторів на основі фазоперехідних матеріалів органічного походження з наповнювачами у вигляді наночастинок металів, **яка дозволить підвищити енергоефективність систем опалення приміщень на основі електричного теплоакумулювання**;

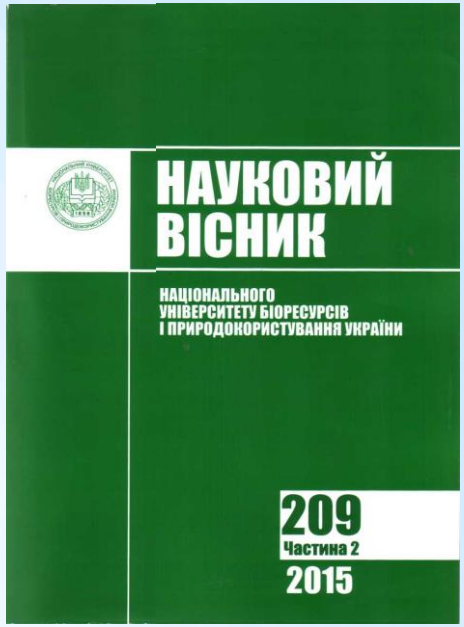
- **розроблені методика розрахунку удосконаленої конструкції акумулятора теплоти фазового переходу** на основі органічних сполук з наповнювачами у вигляді наночастинок металів **та підготовлені практичні рекомендації** виготовлення основних елементів такого теплоакумулятора, **які доповнять та частково замінять застарілі на сьогодні методики розрахунку та виготовлення таких апаратів**;

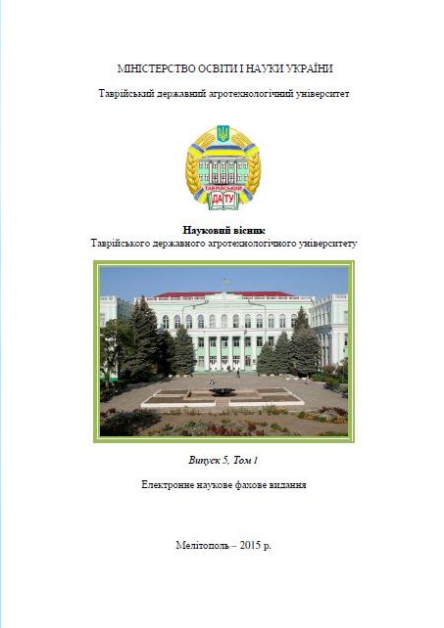
- **розроблено вдосконалену конструкцію комбінованого акумулятора енергії**, яка відрізняється від зразка-аналогу хвилеподібним дном і додатковим оснащенням багатоярусними електричними підігрівачами, **що підвищує ефективність та стабільність енергозабезпечення споживачів на 15–20 %**.

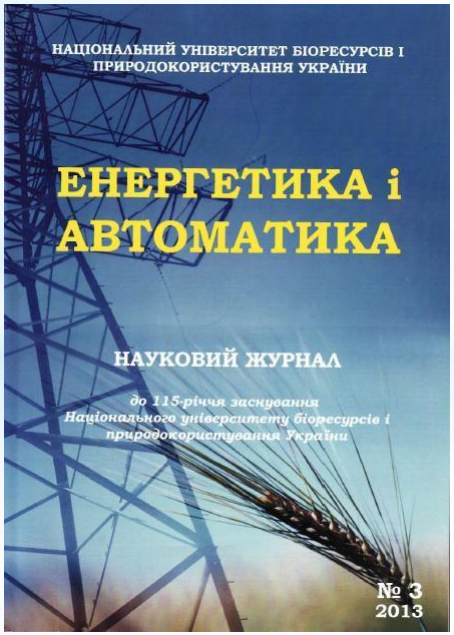
Основні положення цієї роботи впроваджено в ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН» (копія акту впровадження додається), ПАТ «Акціонерне товариство «Південтрансенерго», а частина з них, як методичне забезпечення, використовується в навчальному процесі кафедри теплоенергетики Національного університету біоресурсів і природокористування України при викладанні дисциплін «Альтернативні джерела енергії» та «Теплоенергетичні установки і системи» під час підготовки фахівців технічних спеціальностей.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Подані у роботі дослідження виконано 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 державної тематики «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).







Результати представлених досліджень опубліковано в 54 наукових працях, з них:

- **2 монографії**;
- **1 патент України на винахід**;
- **25 статей** у наукових фахових виданнях України;
- **6 наукових статей** у закордонних фахових виданнях;
- **20 тез доповідей** в збірниках матеріалів конференцій.