

УДК 621.472

**Бондаренко В.В.**, 0000-0001-9589-3873  
Науковий керівник: **Студенець В.П.**, к.т.н., доц.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АКУМУЛЯТОРІВ СОНЯЧНОЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ДВИГУНА СТІРЛІНГА НА БАЗІ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ З ФАЗОВИМ ПЕРЕХОДОМ**

*Виконано порівняння енергетичних характеристик різних матеріалів з фазовим переходом, що використовуються для акумулювання теплової енергії. Розраховано конструктивні розміри акумуляторів за заданої тривалості роботи двигуна Стірлінга.*

**Ключові слова:** тепловий акумулятор, матеріали з фазовим переходом, двигун Стірлінга.

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF SOLAR HEAT BATTERIES FOR A STIRLING ENGINE BASED ON DIFFERENT PHASE TRANSITION MATERIALS.**

*A comparison of the energy characteristics of different materials with a phase transition used for the accumulation of thermal energy is performed. The design dimensions of the batteries for a given duration of operation of the Stirling engine are calculated.*

**Keywords:** energy storage, phase-change material, Stirling engine.

### **Вступ**

Робота енергетичних установок, джерелом енергії в яких є сонце, потребують акумулювання енергії, оскільки рівень сонячної інсоляції не є постійним у часі. У попередніх роботах енергетичну установку “Сонячний концентратор – двигун Стірлінга” було обладнано тепловим акумулятором, що подовжував роботу установки за відсутності сонячного випромінювання [1]. Попередні роботи мали певні недоліки:

- Неспівпадіння робочого інтервалу температур двигуна та температури фазового переходу акумулятора, що унеможливило використання енергії фазового переходу;
- Недостатній час роботи двигуна від акумулятора.

### **Мета роботи**

Пошук та порівняння матеріалів для теплового акумулятора, що мають температуру фазового переходу в інтервалі робочих температур двигуна Стірлінга УДС-1. Конструктивний розрахунок теплового акумулятора.

### **Аналіз стану питання**

Акумулювання енергії є важливим елементом енергетичних систем, особливо за наявності джерел енергії, що є непостійними у часі, таких як сонячна енергія.

Акумулювання у сонячних енергоустановках необхідно для продовження генерації електроенергії у нічний час та під час зменшення інтенсивності сонячного випромінювання вдень. Енергія у сонячних енергетичних установках може бути закумульована як до генерації електроенергії (у вигляді теплової енергії), так і після (у вигляді електричної енергії).

Сучасні технології акумуляції тепла переважно застосовують РСМ-матеріали, що дозволяють суттєво збільшити ємність акумулятора за рахунок теплоти фазового переходу.

РСМ, що використовуються для зберігання теплової енергії - це, як правило, органічні сполуки, неорганічні солі та їх евтектики [2].

Органічні сполуки, що використовуються як РСМ, включають парафінові воски, складні ефіри, кислоти та спирти. Неорганічні матеріали включають гідрати солей, евтектики неорганічних солей, метали та їх евтектики. РСМ з органічних сполук, як правило, мають низькі температури плавлення і можуть використовуватися лише для теплового акумулювання у системах опалення та водопостачання будівель. Для високотемпературного теплового зберігання найбільш широко використовуються розплави солей.

Також розвивається використання металів та металевих сплавів як РСМ. Зазвичай вони мають великі значення густини та теплопровідності. Такі матеріали дозволяють проектувати більш компактні акумулятори, що швидше поглинають та віддають теплову енергію [3].

**Матеріал і результати досліджень**

Для порівняння були обрані декілька матеріалів, використання яких у сонячних теплових акумуляторах досліджувалося останнім часом [3, 4]. Матеріали представлені у таблиці 1.

Також до порівняння додані кілька стандартних теплоакумулюючих матеріалів з високою температурою фазового переходу [5]. Матеріали представлені у таблиці 2.

Таблиця 1 – Характеристики теплоакумулюючих матеріалів (частина 1).

	Tm	ΔHm	ρ	Cm	ΔHv
	°C	кДж/кг	кг/м <sup>3</sup>	Дж/кг/К	МДж/м <sup>3</sup>
Mg70Zn24.9Al5.1	340	157	2820	830	442,74
Zn85.8Al8.2Mg6	400	104	6190	530	643,76
Mg72Zn22	342	155	2850	711	441,75
Mg13Bi87	546	181	3090	530	559,29
NaCl/MgCl2	450	429	2240	960	960,96
NaCl/CaCl2/MgCl2	424	190	2500	1190	475
MgCl2-SrCl2	500	281	2100	670	590,1

Таблиця 2 – Характеристики теплоакумулюючих матеріалів (частина 2).

	Tm	ΔHm	ρ	Csol	Cliq	ΔHv
	°C	кДж/кг	кг/м <sup>3</sup>	Дж/кг/К	Дж/кг/К	МДж/м <sup>3</sup>
Al	660	390	2699	1255,8	1176,7	1052,61
54Al-22Cu-18Mg-6Zn	520	305	3140	1510	1130	957,7
65Al-30Cu-5Si	571	422	2730	1300	1200	1152,06
88Al-12Si	576	560	2700	1038	1741	1512
Mg	648	365	1740	1270	1370	635,1

Експериментальний стенд “Сонячний концентратор – двигун Стірлінга” з двигуном моделі УДС-1 може працювати у різних температурних діапазонах, але існує нижня межа температурного інтервалу, що визначається достатньою температурою для роботи двигуна (400-450 °C), та верхня межа інтервалу, що визначається допустимою температурою роботи двигуна протягом тривалого періоду.

Аналіз та порівняння матеріалів було проведено у кількох температурних діапазонах: 400-700 °C, 450-750 °C, 500-800 °C, 500-700 °C, 400-800 °C.

Для кожного інтервалу було розраховано масову та об’ємну енергетичну ємність

акумулятора, що складається з кількості теплоти, що поглинає матеріал у твердій фазі, теплоти фазового переходу та кількості теплоти, що поглинає матеріал у рідкій фазі. Результати розрахунків представлені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Кількість теплоти, що може бути закумуляована матеріалом.

	$\Delta T, ^\circ C$		$\Delta T, ^\circ C$		$\Delta T, ^\circ C$	
	400 - 700		450 - 750		500 - 800	
	Qm кДж/кг	Qv МДж/м <sup>3</sup>	Qm кДж/кг	Qv МДж/м <sup>3</sup>	Qm кДж/кг	Qv МДж/м <sup>3</sup>
Zn85.8Al8.2Mg6	263	1628				
Mg13Bi87	340	1051	340	1051	340	1051
NaCl/MgCl2	717	1606	717	1606		
NaCl/CaCl2/MgCl2	547	1368				
MgCl2-SrCl2	482	1012	482	1012	482	1012
Al	764	2061	760	2050	756	2040
54Al-22Cu-18Mg-6Zn	690	2165	671	2106	652	2046
65Al-30Cu-5Si	799	2182	794	2168	789	2154
88Al-12Si	959	2588	994	2683	1029	2778
Mg	751	1307	756	1316	761	1324
	$\Delta T, ^\circ C$		$\Delta T, ^\circ C$			
	500 - 700		400 - 800			
	Qm кДж/кг	Qv МДж/м <sup>3</sup>	Qm кДж/кг	Qv МДж/м <sup>3</sup>		
Zn85.8Al8.2Mg6			316	1956		
Mg13Bi87	287	887	393	1214		
NaCl/MgCl2			813	1821		
NaCl/CaCl2/MgCl2			666	1665		
MgCl2-SrCl2	415	872	549	1153		
Al	638	1722	881	2378		
54Al-22Cu-18Mg-6Zn	539	1691	803	2520		
65Al-30Cu-5Si	669	1827	919	2509		
88Al-12Si	855	2308	1133	3058		
Mg	624	1086	888	1545		

Результати розрахунків представлені у вигляді діаграм на рисунках 1-4.

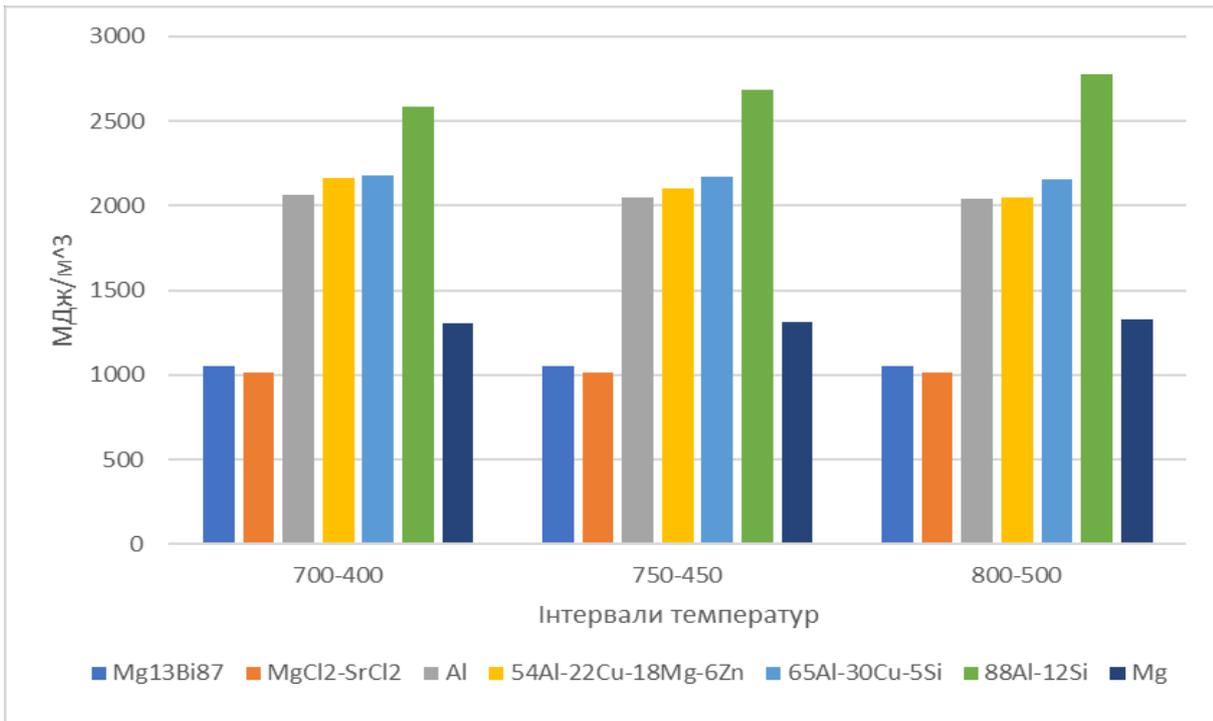


Рис. 1 – Питома об’ємна ємність акумулятора при зміщенні інтервалу робочих температур.

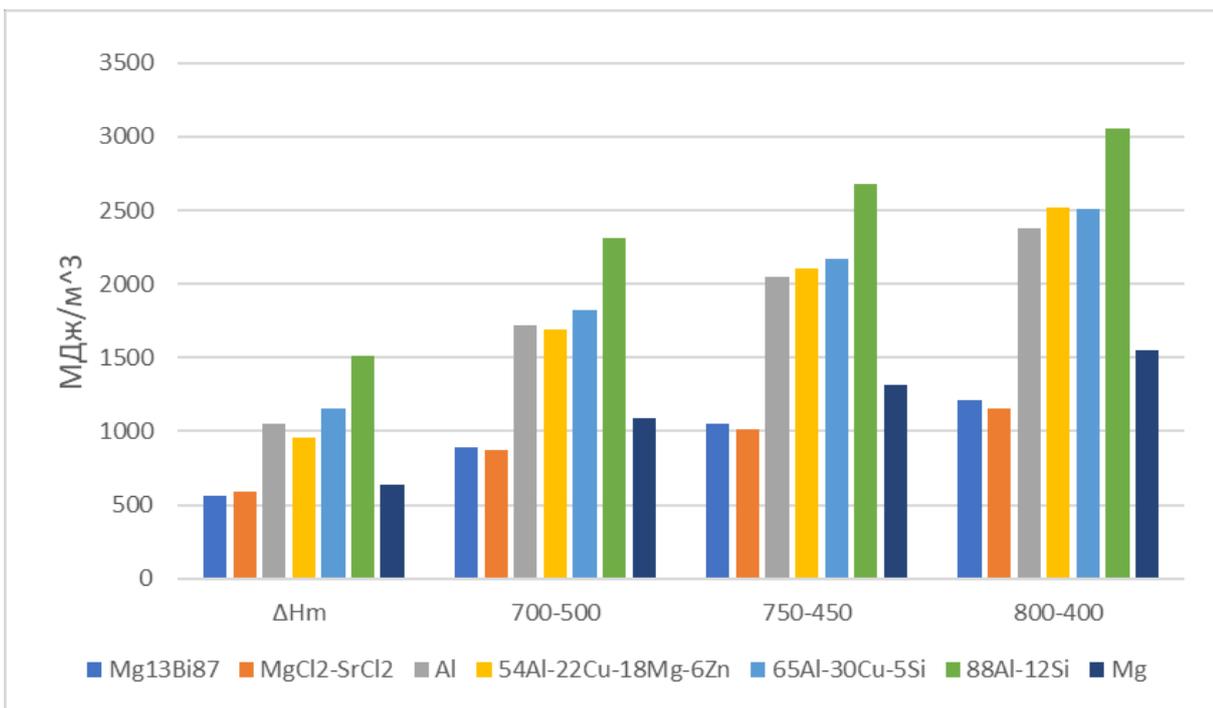


Рис. 2 – Питома об’ємна ємність акумулятора при збільшенні інтервалу робочих температур.

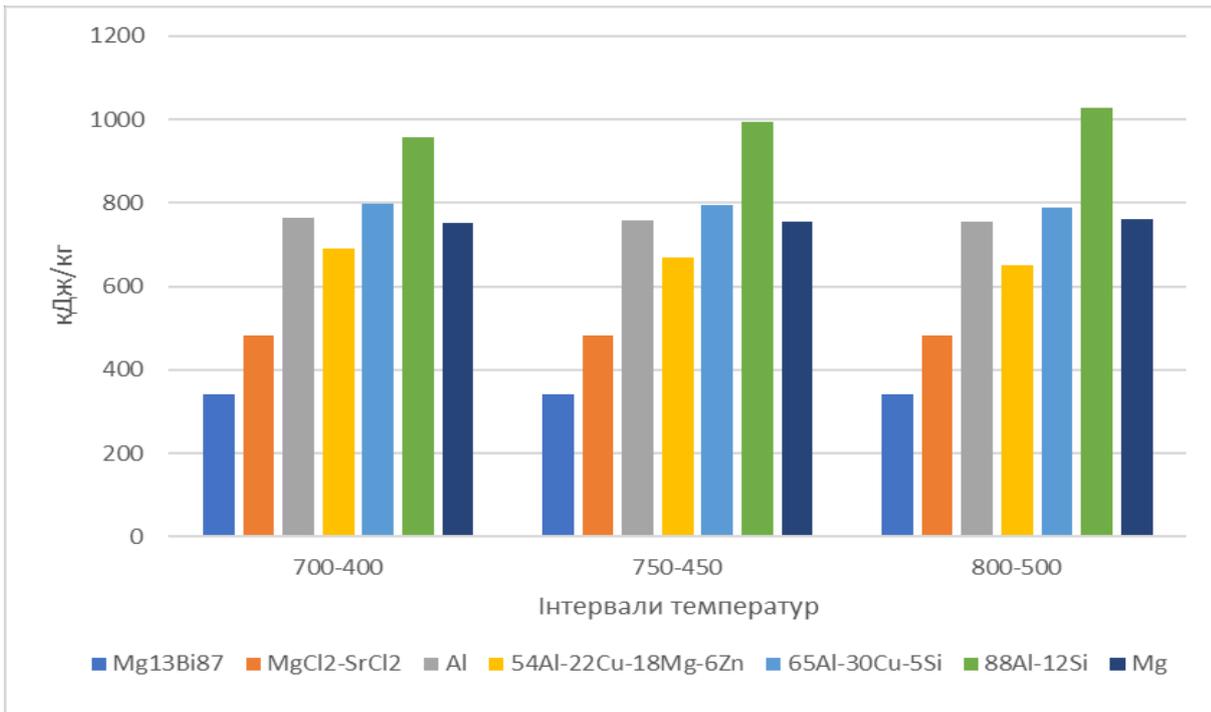


Рис. 3 – Питома масова ємність акумулятора при зміщенні інтервалу робочих температур.

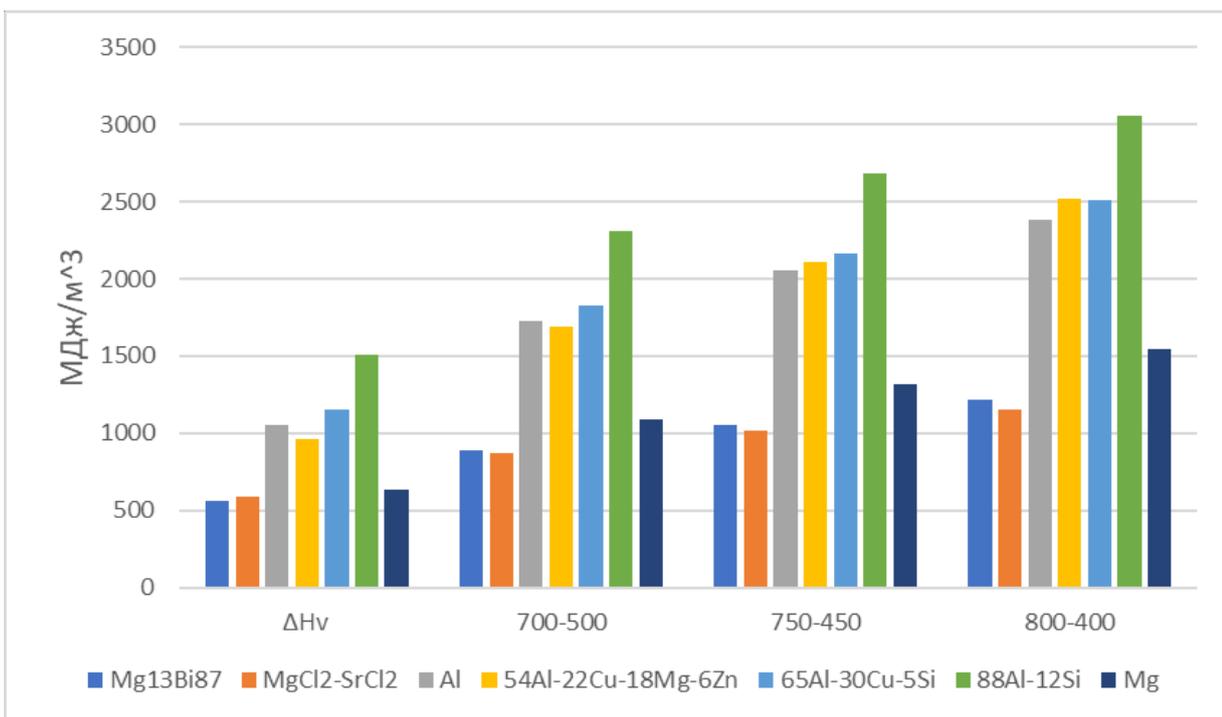


Рис. 4 – Питома масова ємність акумулятора при збільшенні інтервалу робочих температур.

Робота має на меті виконати попередній конструктивний розрахунок теплового акумулятора для експериментального стенду “Сонячний концентратор – двигун Стірлінга”, що дозволить двигуну працювати 1 годину, використовуючи енергію акумулятора.

Акумулятор являє собою два концентричних циліндра з дном. Внутрішній циліндр при цьому повторює зовнішню форму поршня двигуна Стірлінга, тобто має діаметр та висоту

70 мм.

Задача конструктивного розрахунку – визначити відстань між стінками зовнішнього та внутрішнього циліндру акумулятора.

На основі попередніх даних було розраховано масу та об'єм РСМ-матеріалу, що є необхідним для роботи двигуна Стірлінга УДС-1 за умови, що двигун споживає 0,7 кВт теплової енергії [1]. З отриманого необхідного об'єму матеріалу було визначено відстань між стінками зовнішнього та внутрішнього циліндру акумулятора. Розрахунки виконано для інтервалу температур 500-800 °С. Результати представлені у таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати конструктивного розрахунку акумулятора.

	m	V	X
	кг	см <sup>3</sup>	см
Mg13Bi87	7,41	2398	3,34
MgCl2-SrCl2	5,23	2489	3,43
Al	3,33	1235	2,03
54Al-22Cu-18Mg-6Zn	3,87	1231	2,02
65Al-30Cu-5Si	3,19	1169	1,94
88Al-12Si	2,45	907	1,58
Mg	3,31	1902	2,82

### Висновки

У роботі було визначено та порівняно енергетичні характеристики теплоакумулюючих матеріалів з фазовим переходом у різних інтервалах температур, що відповідають інтервалу робочих температур двигуна Стірлінга УДС-1. Також було виконано попередній конструктивний розрахунок теплового акумулятора, що передбачає автономну роботу двигуна Стірлінга протягом 1 години.

### Література

1. Бондаренко В.В, Студенець В.П. Дослідження теплового акумулятора для сонячної енергоустановки на базі двигуна Стірлінга // Енергетика. Екологія. Людина. Зб. наукових праць ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського – Київ: ІЕЕ, 2018. – с. 165-171.
2. Huili Zhang, Jan Baeyens, Gustavo Cáceres, Jan Degève, Yongqin Lv. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects / Progress in Energy and Combustion Science 53 (2016) 1–40.
3. Elena Risueno, Stefania Doppiu, Javier Rodríguez-Aseguinolaza, Pablo Blanco, Antoni Gil, Manuel Tello, Abdessamad Faik, Bruno D'Aguanno. Experimental investigation of Mg-Zn-Al metal alloys for latent heat storage application/ Journal of Alloys and Compounds 685 (2016) 724-732
4. E. Risueño, A.Faika, J. Rodríguez-Aseguinolaza, P. Blanco-Rodríguez, A.Gila, M. Tello and B. D'Aguanno. Mg-Zn-Al eutectic alloys as phase change material for latent heat thermal energy storage / Energy Procedia 69 (2015) 1006 – 1013.
5. A. Inés Fernández, Camila Barreneche, Martin Belusko, Mercè Segarra, Frank Bruno, Luisa F. Cabeza. Considerations for the use of metal alloys as phase change materials for high temperature applications / cc-by-nc-nd, (c) Elsevier, 2017.