

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БУДІВНИЦТВІ

УДК 697.92

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ
СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ**

В. М. Желих, Х. Р. Лесик, Б. І. Пізнак

**RESEARCH EKSERHETYC EFFECTIVENESS OF LOW TEMPERATURE SOLAR
COLLECTORS**

V. Gelykh, K. Lesyk, B. Piznak

Наведено характерні відмінності між системами з активним та пасивним використанням сонячної енергії. Здійснено аналіз робіт спрямованих на визначення ексергії плоских сонячних колекторів. Проведено експериментальні дослідження коефіцієнта ексергетичної ефективності термосифонного та полімерного сонячних колекторів, виконано їх зіставлення, результати цих досліджень представлено у графічному вигляді.

Приведены характерные различия между системами с активным и пассивным использованием солнечной энергии. Осуществлен анализ работ по выявлению эксергии плоских солнечных коллекторов. Проведены экспериментальные исследования коэффициента эксергетической эффективности термосифонного и полимерного солнечных коллекторов, выполнено их сопоставление, результаты этих исследований представлены в графическом виде.

An characteristic differences between systems with active and passive solar energy. The analysis work aimed at determining the exergy flat solar collectors. Experimental study of the effectiveness factor ekserhetychnoyi Thermosyphon and polymer solar collectors made their comparison, the results of these studies are presented in graphical form.

Вступ

Основним елементом в низькотемпературних геліоустановках є плоскі сонячні колектори. Отримане від них тепло переноситься до споживача за допомогою робочого тіла (повітря або рідини). В цих геліоколекторах теплоносієм нагрівається до 100 °С. Такі пристрої використовуються для систем опалення, гарячого водопостачання та іноді холодопостачання житлових і промислових приміщень.

Сонячні системи бувають двох типів: активного та пасивного.

На рис. 1 зображено принципову схему активної геліосистеми. В таких системах задіяні додаткові механізми для руху теплоносія. Сонячні промені потрапляють на геліоколектор, де частково акумулюються і отримане тепло передається проміжному теплоносію, який насосом чи вентилятором до споживача.

Як базовий елемент в активних геліосистемах найчастіше використовуються плоскі сонячні водонагрівачі, одним з варіантів яких є полімерний плоский геліоколектор. Серед його переваг можна виділити: малу питому масу, задовільні фізико-механічні властивості, високу корозійно- та атмосферостійкість.

В пасивних (термосифонних) системах (рис. 2) теплоносієм переміщується завдяки природній конвекції, тобто гравітаційним силам. Вона виникає через різницю густин холодного і підігрітого робочого тіла. Пасивні конвективні системи дешевші від активних. При цьому вони є менш ефективними, в них теплоносієм, а як правило це повітря, циркулює досить повільно. Повітряні геліоколектори є досить простими у виготовленні та експлуатації і головним чином використовуються для обігрівання приміщень та сушіння сільськогосподарської продукції. Одним з основних завдань при конструюванні повітряних нагрівачів є максимальне збільшення площі нагріву та мінімізація втрат тепла в навколишнє середовище.

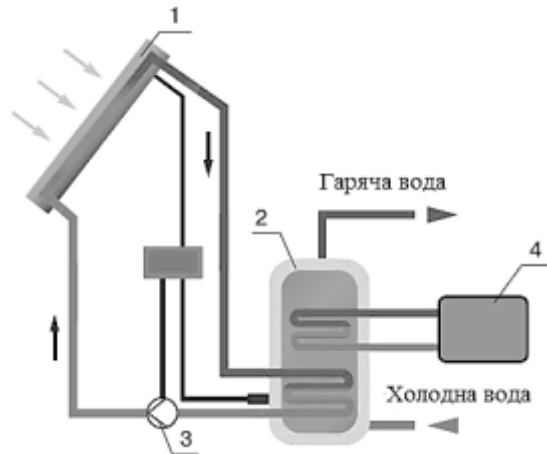


Рис. 1. Приклад активної геліосистеми теплозабезпечення
1 – сонячний колектор; 2 – бак-акумулятор; 3 – насос; 4 – електродігрівач

Для оцінювання роботоздатності будь-якої системи досліджують її ексергетичну ефективність. Ступінь придатності до дії повітряних сонячних колекторів почали досліджувати наприкінці 80-х рр. 20 століття. У 1988 році Альтфелд [1] досліджував вплив температури та швидкості повітря на вході в сонячний колектор та на виході з нього, а також геометричних розмірів повітряного каналу на ексергетичну ефективність системи. Він припустив, що сумарний коефіцієнт втрат тепла від геліоколектора є постійною величиною. Дата Гупта [2] у 1990 році, здійснивши тепловий та ексергетичний аналіз роботи сонячного повітрянагрівача, також прийшов до висновку про сталий коефіцієнт тепловтрат в навколишнє середовище. У 1995 році Генг Лю [3] запропонував загальне рівняння для визначення ексергетичної ефективності геліосистеми та окремих її елементів. У 2004 році Рейз для певних умов отримав оптимальні значення температури та швидкості повітря на вході в колектор та геометричних розмірів повітряного каналу.

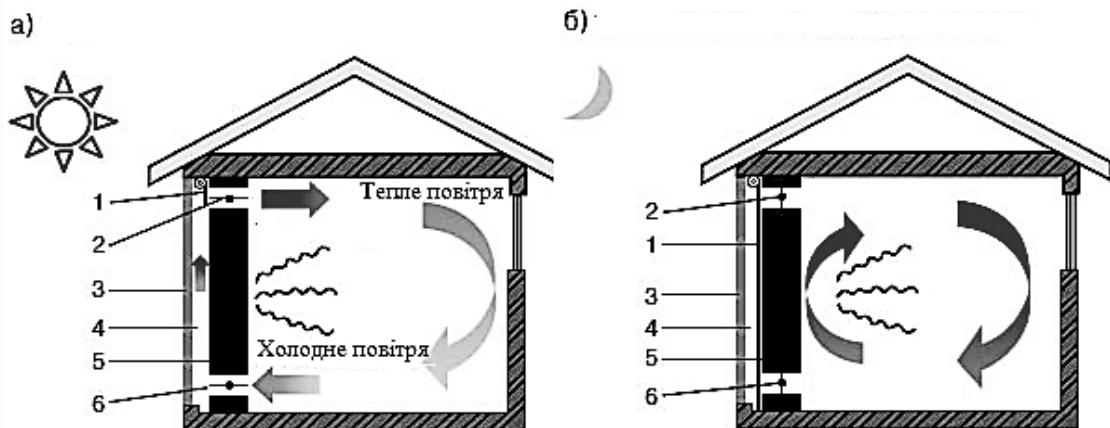


Рис. 2. Приклад пасивної повітряної сонячної системи
а – день (сонячно); б – ніч або похмура погода
1 – штора; 2 – верхній клапан; 3 – скляна пластина;
4 – повітряний прошарок; 5 – стіна; 6 – нижній клапан

У своїй роботі [4] Фарахад здійснив поетапний аналіз ефективності роботи плоского сонячного колектора для подальшої оптимізації його параметрів.

Для початку проводиться енергетичний аналіз. Основним завданням на цьому етапі є визначення кількості теплоти, що виробляє сонячний колектор, та його коефіцієнта корисної дії. Наступною стадією є оптичний аналіз, згідно з якою підраховується величина радіаційного потоку, поглинутого одиницею площі теплопоглинаючої пластини.

Ексергетичний аналіз геліоустановок наведений у роботах Сузукі А., Котас Т., Фарахат С., Дутти К. та Саха С. Ексергія визначається як максимальний обсяг роботи, який може бути виконаний системою, при переході від поточного стану до стану термодинамічної рівноваги [5].

Загальний вигляд балансового рівняння ексергії [4]:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_s + \dot{E}_{out} + \dot{E}_1 = 0, \quad (1)$$

де $\dot{E}_{in}; \dot{E}_s; \dot{E}_{out}; \dot{E}_1$ – відповідно значення вхідної, збереженої, вихідної та втраченої ексергії.

Значення ексергії на вході в колектор включає в себе ексергію потоку рідини і поглинутої сонячної радіації. Ексергія потоку рідини визначається згідно із залежністю:

$$\dot{E}_{in,f} = L_m C_p \left(t_{ex} - t_a - t_a \ln \left(\frac{t_{ex}}{t_a} \right) \right) + \frac{L_m \Delta P_1}{\rho}, \quad (2)$$

де L_m, C_p – відповідно масова витрата теплоносія, кг/год, та його питома теплоємність, кДж/кг·°С;

t_{ex} – температура теплоносія на вході в колектор, °С;

t_a – температура навколишнього середовища, °С;

ΔP_1 – перепад тиску теплоносія з навколишнім середовищем на вході в сонячний колектор,

ρ – густина теплоносія, кг/м³.

Величина ексергії поглинутої сонячної радіації визначається за формулою:

$$\dot{E}_{in,Q} = S \cdot F_p \left[1 - \left(\frac{t_a}{t_s} \right) \right], \quad (3)$$

де $S = I \cdot (\tau_\alpha)$ – кількість сонячної радіації поглинутої теплопоглиначем, Вт/м²;

τ_α – коефіцієнт поглинання-пропускання матеріалу;

I – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м²;

F_p – площа теплопоглинаючої пластини геліоколектора, м²;

$t_s = 4080$ °С – температура Сонця, яка рівна $\frac{3}{4}$ температури його абсолютно чорного тіла [6];

Ексергія на виході з колектора розраховується таким чином:

$$\dot{E}_{out,f} = -L_m C_p \left(t_{eux} - t_a - t_a \ln \left(\frac{t_{eux}}{t_a} \right) \right) - \frac{L_m \Delta P_2}{\rho}. \quad (4)$$

В залежності (4) t_{eux} – температура теплоносія на виході з колектора, °С; ΔP_2 – перепад тиску теплоносія з навколишнім середовищем на виході з сонячного колектора.

Значення втраченої ексергії, \dot{E}_1 , Вт, визначається на основі: тепловтрат в навколишнє середовище (5), різниці температур між поверхнею абсорбера і небосхилом (6), втрат тиску (7); різниці температур між поверхнею абсорбера і теплоносієм (8).

$$\dot{E}_1 = -U_{emp} A_c (t_p - t_a) \left(1 - \frac{t_a}{t_p} \right). \quad (5)$$

$$\dot{E}_{l,\Delta T_s} = -S \cdot A_c t_a \left(\frac{1}{t_p} - \frac{1}{t_s} \right). \quad (6)$$

$$\dot{E}_{l,\Delta P} = -\frac{L_m \Delta P}{\rho} \frac{t_a \ln \left(\frac{t_{eux}}{t_a} \right)}{(t_{eux} - t_{ex})}. \quad (7)$$

$$\dot{E}_{d,\Delta T_f} = -L_m C_p t_a \left(\ln \left(\frac{t_{eux}}{t_{ex}} \right) - \frac{(t_{eux} - t_{ex})}{t_p} \right). \quad (8)$$

Коефіцієнт ексергетичної ефективності сонячного колектора:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{out}}{I_T A_c \left(1 - \frac{t_a}{t_s}\right)} = 1 - \left\{ \begin{aligned} & \left(1 - (\tau\alpha)\right) + \frac{L_m \Delta P}{\rho I_T A_c \left(1 - \frac{t_a}{t_s}\right)} \frac{t_a \ln\left(\frac{t_{вих}}{t_a}\right)}{(t_{вих} - t_{ex})} + \frac{(\tau\alpha) \cdot t_a \left(\frac{1}{1 - \frac{t_a}{t_s}} - \frac{1}{t_p - t_s}\right)}{\left(1 - \frac{t_a}{t_s}\right)} + \\ & + \frac{U_1 (t_p - t_a)}{I_T \left(1 - \frac{t_a}{t_s}\right)} \left(1 - \frac{t_a}{t_p}\right) + \frac{G_p C_p t_a \left(\ln\left(\frac{t_{вих}}{t_{ex}}\right) - \frac{(t_{вих} - t_{ex})}{t_p}\right)}{I_T A_c \left(1 - \frac{t_a}{t_s}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Як вже було вище сказано, активні системи ефективніші за пасивні. В даній роботі визначалося як впливає на зміну ексергетичної ефективності та теплової потужності сонячного водо- та повітрянагрівачів наявність додаткового джерела енергії.

Мета та задачі дослідження. Зіставлення коефіцієнтів ексергетичної ефективності термосифонного та полімерного сонячних колекторів.

Експериментальні дослідження та їх аналіз. Дослідження проводилися для двох типів низькотемпературних сонячних колекторів: полімерного сонячного колектора (рис. 3) та термосифонного геліоколектора (рис. 5).

На першому етапі було проведено ряд експериментів для сонячного водонагрівача [7]. Сонячний колектор виготовлений з плити стільникової полікарбонату, площею нагрівання 1 м².

Дослідження проводилися при різних витратах теплоносія в діапазоні від 10 до 60 кг/год, що зумовлено співвідношенням отриманої енергії до енергії, яка була затрачена на перекачування теплоносія. Як робоче тіло використовувалася вода, для покращення абсорбції сонячного випромінювання зафарбована в чорний колір за допомогою пігментного чорнила. Циркуляція теплоносія в експериментальній установці здійснювалася завдяки pompі (7), що встановлена на зворотному трубопроводі (9), а його кількість вимірювалася витратоміром (6).

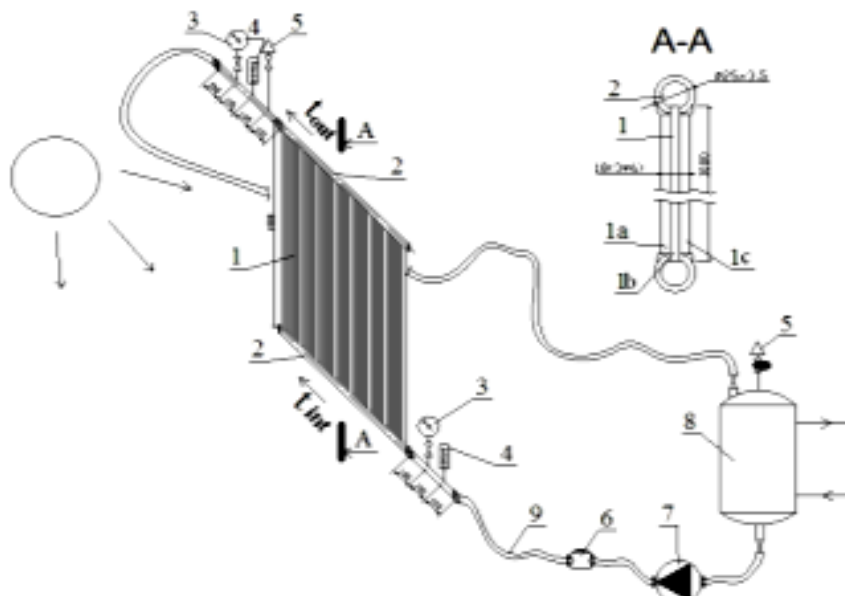


Рис. 3. Схема експериментальної установки:

- 1 – тришарова полікарбонатна стільникова плита, 1a – світлопроникне захисне покриття,
- 1b – шар по якому проходить теплоносії, 1c – шар який виконує роль теплової ізоляції,
- 2 – колектори для підведення і відведення теплоносія, 3 – манометр, 4 – термометр,
- 5 – розповітрявач, 6 – витратомір, 7 – циркуляційна помпа,
- 8 – смісний теплообмінник, 9 – гнучкий трубопровід

Результати проведених досліджень зображено на рис. 4. Ексергетичний коефіцієнт сонячного колектора η_{ex} , визначався з врахуванням зміни температури води на виході з колектора, $t_{вих}$ та її витрати L_m , кг/год.

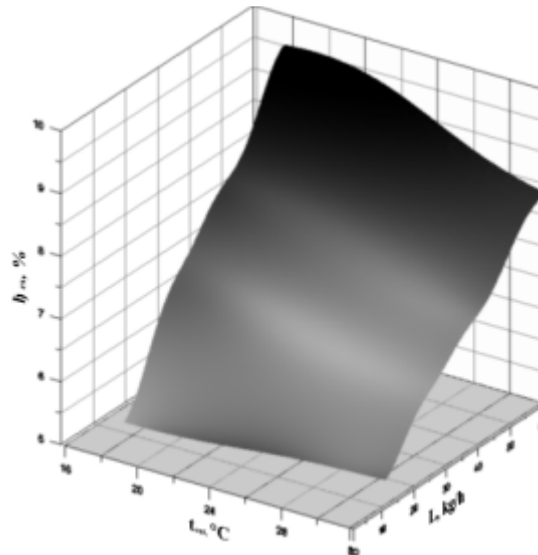


Рис. 4. Залежність коефіцієнта ексергетичної ефективності полімерного геліоколектора, η_{ex} , %, від температури води на виході з колектора, $t_{вих}$, °C та витрати теплоносія, L_m , кг/год

З рис. 4 можна побачити, що для плоского полімерного геліоколектора коефіцієнт ексергетичної ефективності зростає при збільшенні витрати теплоносія на виході, що пов'язано із зростанням тепловтрат. Середній коефіцієнт ексергії для досліджуваного діапазону становить 7,13 %.

Наступний етап було присвячено визначенню ексергетичної ефективності термосифонного сонячного колектора (рис. 5) [8].

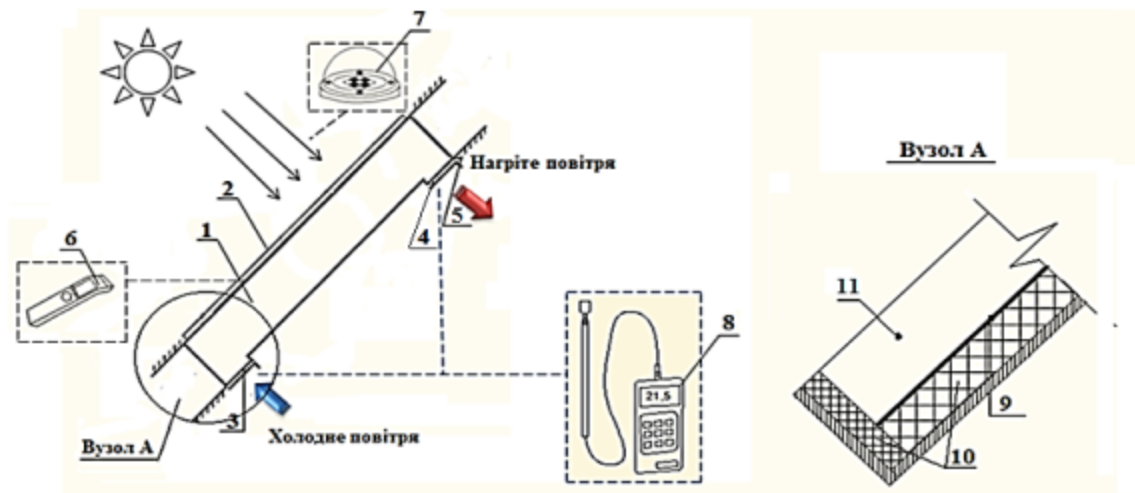


Рис. 5 Схема експериментального станда термосифонного геліоколектора
 1 – корпус термосифонного геліоколектора; 2 – світлопроникне покриття; 3 – вхідний отвір;
 4 – вихідний отвір; 5 – регулююча заслінка; 6 – пірометр Нимбус-530; 7 – альбедометр;
 8 – термоанемометр АТТ-1004; 9 – теплопоглинаюча пластина;
 10 – теплоізоляція корпусу геліоколектора 11 – повітряний канал

Площа теплопоглинання термосифонного геліоколектора становила $1,2 \text{ м}^2$, як теплоносієм використовувалося повітря. Основною особливістю запропонованого геліоколектора є конструкція, яку можна вмонтувати в похилий дах, а також наявність утепленого, герметичного корпусу та додаткового шару теплоізоляційного матеріалу для зменшення втрат тепла.

Наявність корпусу з удосконаленими характеристиками дозволяє зменшити тепловтрати колектора. Покриття чорного кольору покращує сприймання теплопоглинаючою пластиною енергії сонця, а відсутність вентиляторів та повітропроводів спрощує конструкцію сонячного

колектора та значно зменшує експлуатаційні витрати.

Для здійснення аналізу роботи запропонованої конструкції (рис. 5) було проведено ряд натурних експериментів у м. Львові. За допомогою термоанемометра АТТ-1004 (8) вимірялися температура та швидкість повітря на вході (3) та виході (4) з термосифонного сонячного колектора, а також рухомість зовнішнього повітря. Для визначення температури теплопоглинаючої пластини (9) геліоколектора використовувався пірметр марки Нимбус-530 (6). Заміри інтенсивності сонячного випромінювання здійснювалися за допомогою альбедометра (7).

Опрацювавши методику, запропоновану Фарахадом, отримано залежність коефіцієнта ексергетичної ефективності, η_{ex} , %, від масової витрати теплоносія, L_m , кг/год, та його температури на виході з сонячного колектора, $t_{вих}$, °C (рис. 6).

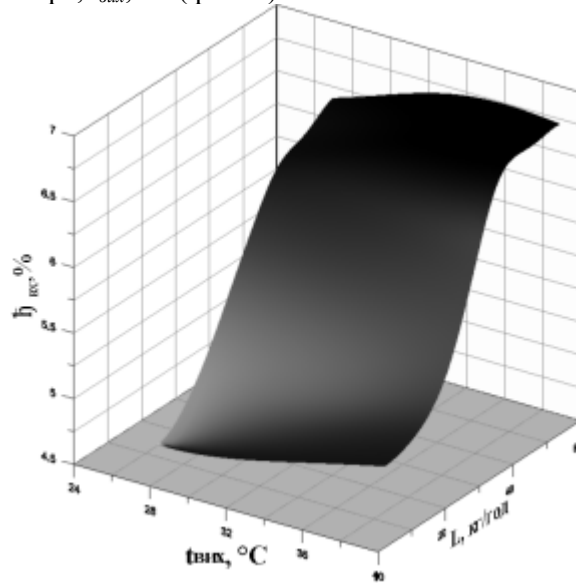


Рис. 6. Залежність коефіцієнта ексергетичної ефективності термосифонного сонячного колектора, η_{ex} , %, від температури повітря на виході з колектора, $t_{вих}$, °C та витрати теплоносія, L_m , кг/год

Як видно з рис. 6 значення ексергетичного коефіцієнта постійно зростало до певної межі. Це пояснюється тим, що дослідження проводилися з ранку до обіду, тобто температура зовнішнього повітря постійно збільшувалася. Максимальне значення коефіцієнта ексергії отримане для запропонованої конструкції становить 5,13 %.

На основі отриманих значень ексергетичного коефіцієнта та теплової потужності досліджуваних сонячних колекторів побудовано графічні залежності відношення цих величин.

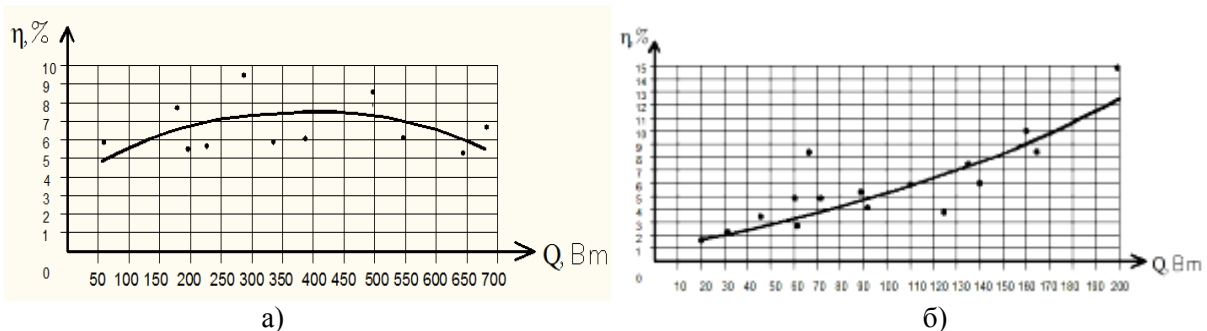


Рис. 7. Залежність ексергетичного коефіцієнта η_{ex} , %, від теплової потужності Q , Вт
а) полімерний сонячний колектор; б) термосифонний геліоколектор

В активній системі для збільшення витрати теплоносія, а відповідно і її теплової потужності використовується насос. При цьому зростає кількість електроенергії на його роботу, в наслідок чого зменшується ексергетичний коефіцієнт системи (рис. 7, а).

В пасивній геліосистемі, яка працює на принципі вільної конвекції, ексергетичний коефіцієнт зростає разом з тепловою потужністю (рис. 7, б), оскільки не має додаткових затрат

енергії на перенесення повітря.

На основі експериментальних даних отримано емпіричні залежності [10], для знаходження ексергетичного коефіцієнта, η_{ex} %:

$$\eta_{ex}^a = -1,08 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 + 0,008 \cdot x + 5,6 \quad (10)$$

$$\eta_{ex}^b = 3,26 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 - 0,016 \cdot x + 3,5 \quad (11)$$

Висновки

- Проведено зіставлення ексергетичних коефіцієнтів низькотемпературних геліосистем, в результаті чого виявлено, що для термосифонних сонячних колекторів середнє значення ексергетичного коефіцієнта становить 5,13 %, а для полімерного – 7,13 %. Це підкреслює більшу працездатність системи з активним використанням сонячної енергії.

Використана література

1. Altfeld K., Leiner W. and Fiebig M., 1988, Second Law Optimization of Flat-Plate Solar Air Heaters, Solar Energy, Vol. 41, No. 2, pp. 127-132 & 309-317.
2. Bejan A., Keary D. W. and Kreith F., 1981, "Second Law Analysis and Synthesis of Solar Collector Systems", Journal of Solar Energy
3. Duffie J. A., Beckman W. A. 1991. Solar engineering of thermal processes. New York: Wiley;
4. Farahat S., Ajam H. and Sarhaddi F., 2004a, "Method and Basis of Flat Plate Collector Optimization with Exergy Concept", Proceedings of First Iranian Conference on Ecoenergy, Urmia University, Urmia, Iran.
5. Farahat S., Ajam H. and Sarhaddi F., 2004b, "Optimization of Linear Parabolic Solar Collectors with Exergy Concept", Proceedings of 19th International Power System Conference, Tehran, Iran.
6. Geng Liu Y., Cengel A. and Turner R. H., 1995, Exergy Analysis of a Solar Heating System, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 1173.p.
7. Zhelyh V., Piznak B., Fechan A. 2011, Patent for uaeful model № 55 948 – Solar collector.
8. Zhelyh V., Lesyk Ch., 2012, Patent for uaeful model № 55 948 – Thermosifon solar collector.
9. Желих В. М. Експериментальне дослідження полімерного сонячного колектора / В. М. Желих, Б. І. Пізнак. – Вісник НУ ЛП № 737. – Львів, 2012.
10. Возняк О. Т., Желих В. М. 2003, Основи наукових досліджень у будівництві / О. Т. Возняк, В. М. Желих. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". – 173 с.

Желих Василь Михайлович – к. т. н., доцент кафедри "Теплогазопостачання і вентиляція" Національного університету "Львівська політехніка".

Лесик Христина Романівна – аспірант кафедри "Теплогазопостачання і вентиляція" Національного університету "Львівська політехніка".

Пізнак Богдан Іванович – аспірант кафедри "Теплогазопостачання і вентиляція" Національного університету "Львівська політехніка".