

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

## **Ілюстративний матеріал**

**ДО РОБОТИ**

**на здобуття премії Президента України для молодих вчених**

**«Інноваційні енергоефективні  
геліоколектори, інтегровані у зовнішні  
захищення будівель для відбудови України  
у воєнний і повоєнний час»**

**ПРЕТЕНДЕНТ: ШАПОВАЛ Степан Петрович,**

**д.т.н., професор, професор кафедри теплогазопостачання та вентиляції  
Національного університету «Львівська політехніка»**

# Інноваційні енергоефективні геліоколектори, інтегровані у зовнішні захищення будівель для відбудови України у воєнний і повоєнний час

**Мета роботи** полягає в науковому обґрунтуванні та розробленні систем теплозабезпечення (СТ) на основі інноваційних енергоефективних геліоколекторів, інтегрованих у зовнішні захищення будівель (ІЕГІЗЗБ) та створенні, за результатами досліджень, відповідних методів розрахунку їхніх теплотехнічних характеристик.

**Актуальність теми дослідження.** Сьогодні, під час війни, Україна стоїть перед безпрецедентними проблемами в паливно-енергетичному комплексі, які випливають з дефіциту енергетичних ресурсів і, як наслідок, – з підвищеної залежності від їхнього імпорту. Сьогодні в світі відбуваються зміни у способах формування енергетичної позиції країн: надається пріоритет підвищенню енергоефективності та використанню відновлюваних та альтернативних джерел енергії. Впровадження цих заходів є однією із прерогатив тотального формування світової енергетики. Це визначає для України принципово нові економічні та технологічні завдання і потребує пошуку та впровадження на практиці новітніх рішень у галузі архітектури та будівництва. Одним із перспективних способів вирішення цих проблем є впровадження енергоефективних будівель. Тому, для України важливо інтенсифікувати процеси з розвитку енергоефективного будівництва та збільшення частки альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної, яка на території України має значний потенціал.

## **Наукова новизна роботи:**

- отримано подальший розвиток основи новітніх технологій теплозабезпечення енергоефективних будівель у результаті вдосконалення комбінованих систем теплопостачання із застосуванням ІЕГІЗЗБ, які дали змогу підвищити ефективність роботи комбінованих систем теплопостачання;
- вперше визначено параметри ефективного використання теплової енергії, отриманої ІЕГІЗЗБ в елементах систем сонячного теплопостачання з урахуванням їхніх конструктивних особливостей і режимів роботи під час комплексу експериментальних досліджень;
- вперше експериментально встановлено теплові характеристики ІЕГІЗЗБ та систем сонячного теплопостачання на їхній основі в цілому, за впливу визначальних метеопараметрів, таких, як густина потоку сонячної радіації та швидкість вітрового потоку, що дає змогу розраховувати такі системи;
- набула подальшого розвитку методологія розрахунку теплових процесів у комбінованих системах теплозабезпечення енергоефективних будівель з урахуванням ІЕГІЗЗБ, яка базується на поєднанні експериментальних та аналітичних досліджень із врахуванням кліматичних особливостей районів України.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати досліджень використовувались під час створення систем сонячного теплопостачання (ССТ) енергоефективних будівель на основі ІЕГІЗЗБ. Було розроблено конструкції ІЕГІЗЗБ – зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову, зокрема геліостіни, геліопокриття, геліовікна, і створено методики розрахунку їхніх теплових характеристик. Крім того, вдосконалено інженерний метод розрахунку систем теплозабезпечення енергоефективних будівель, який враховує теплотехнічні характеристики запропонованих огорожень, умови експлуатації та вплив зовнішніх факторів і характерних кліматичних особливостей України в умовах відбудови.

# Об'ємно-планувальні рішення енергоефективних будівель

## Розширена класифікація систем сонячного теплопостачання

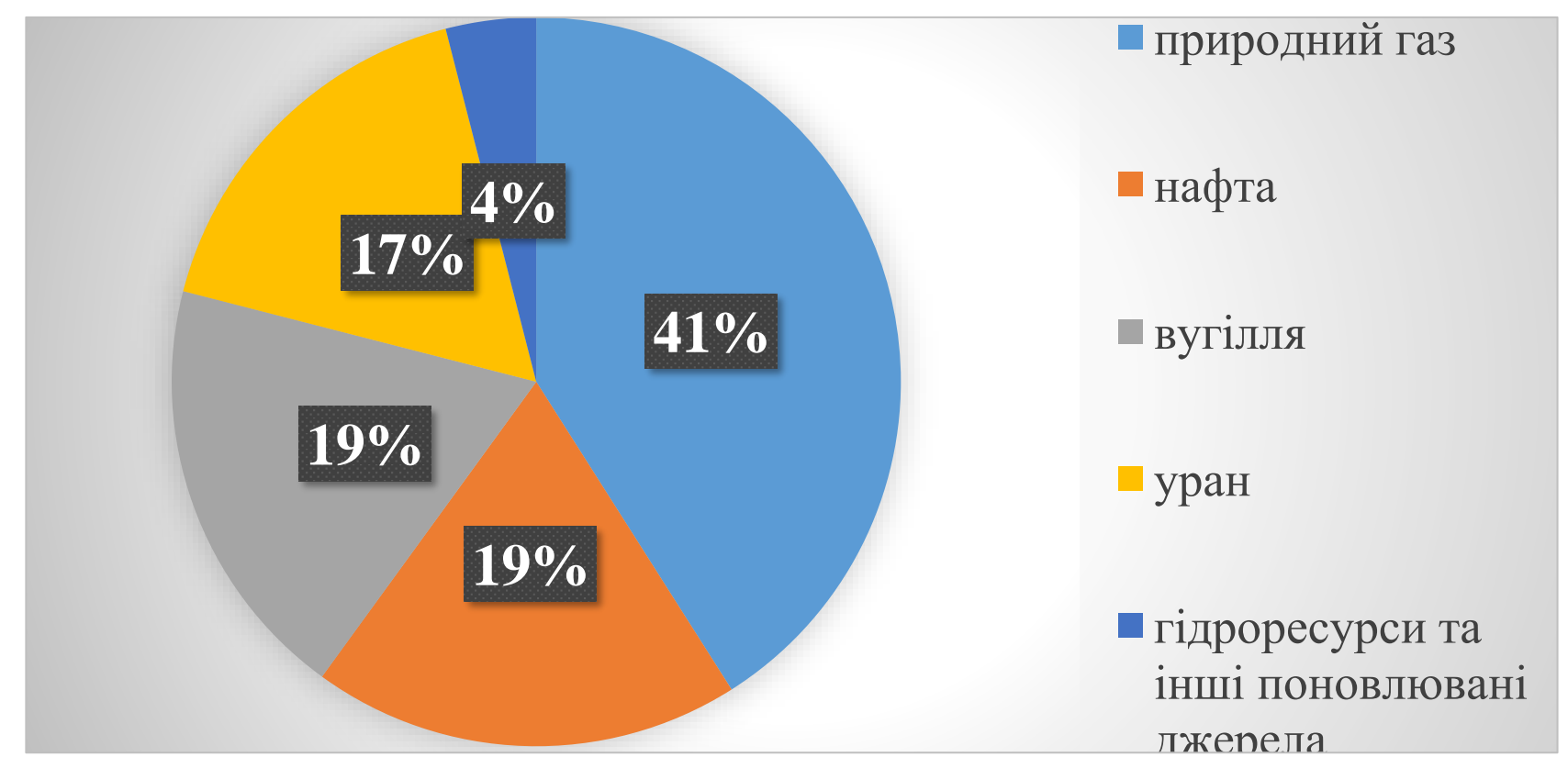
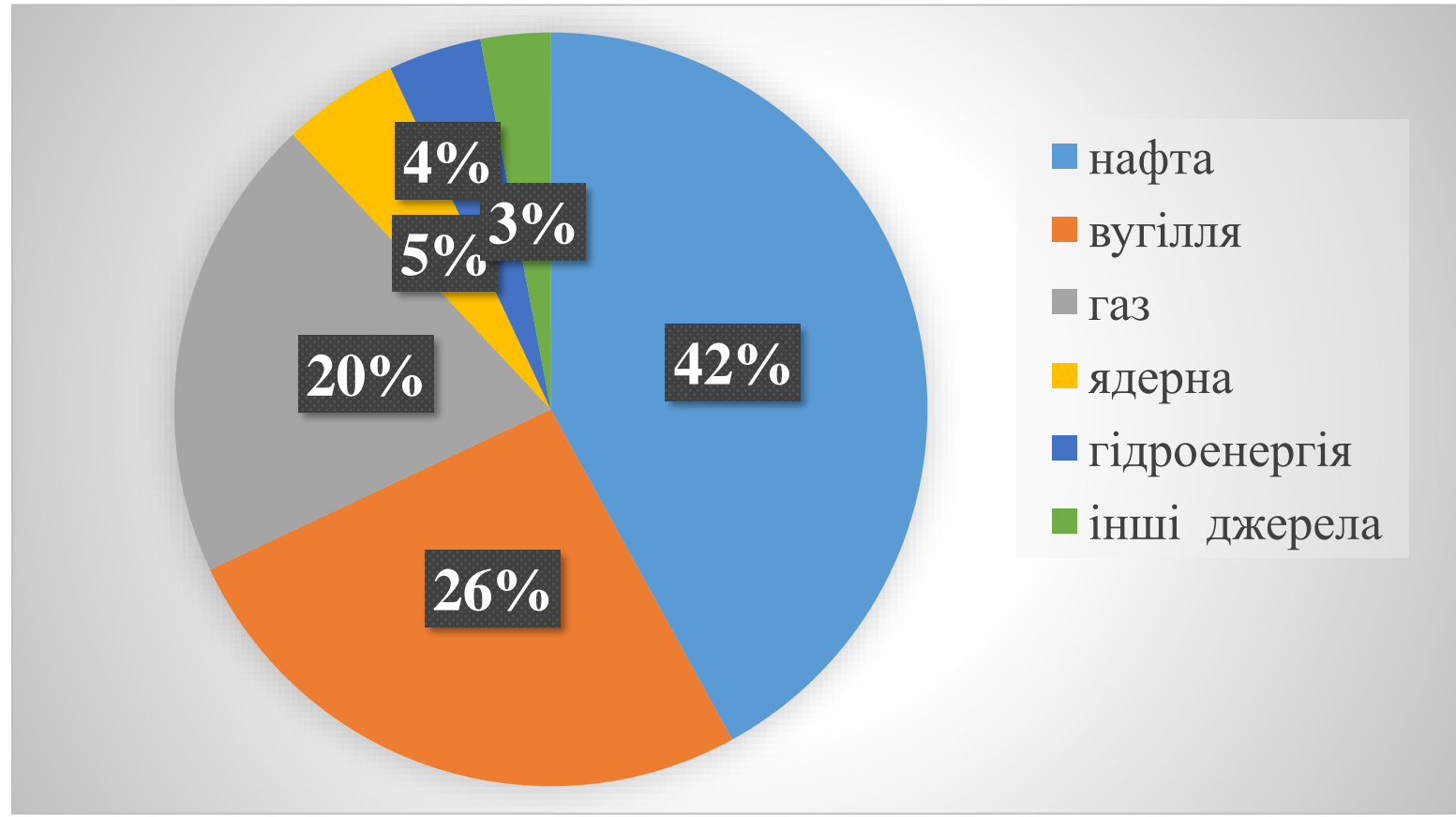


Рис. 1. Фактична структура споживання енергії на Землі за рік

Рис. 2. Фактична структура сукупного споживання первинної енергії в Україні

Таблиця 1. Опалення та охолодження від поновлюваних джерел, наявний обсяг за рік та поставлена мета [Renewables 2017 Global Status Report – Paris: REN21 Secretariat, 2017. – 302 p. – (ISBN 978-3-9818107-6-9).]

Країна	Обсяг (2015)	Мета
Фінляндія	52,80%	47% відновлюваних джерел енергії в загальному опаленні і охолодженні до 2020 року
Франція	19,80%	38% до 2030 року
Німеччина	12,90%	14% до 2020 року
Греція	25,90%	20% відновлюваних джерел енергії в загальному опаленні і охолодженні до 2020 року
Угорщина	21,30%	18,9% відновлюваних джерел енергії в загальному опаленні і охолодженні до 2020 року
Нідерланди	5,50%	8,7% до 2020 року
Польща	14,30%	17% до 2020 року
Словенія	34,10%	30,8% відновлюваних джерел енергії в загальному опаленні і охолодженні до 2020 року
Іспанія	16,80%	18,9% до 2020 року
Швеція	69,60%	62,1% відновлюваних джерел енергії в загальному опаленні і охолодженні до 2020 року
Україна		до 2020 року 12,4%

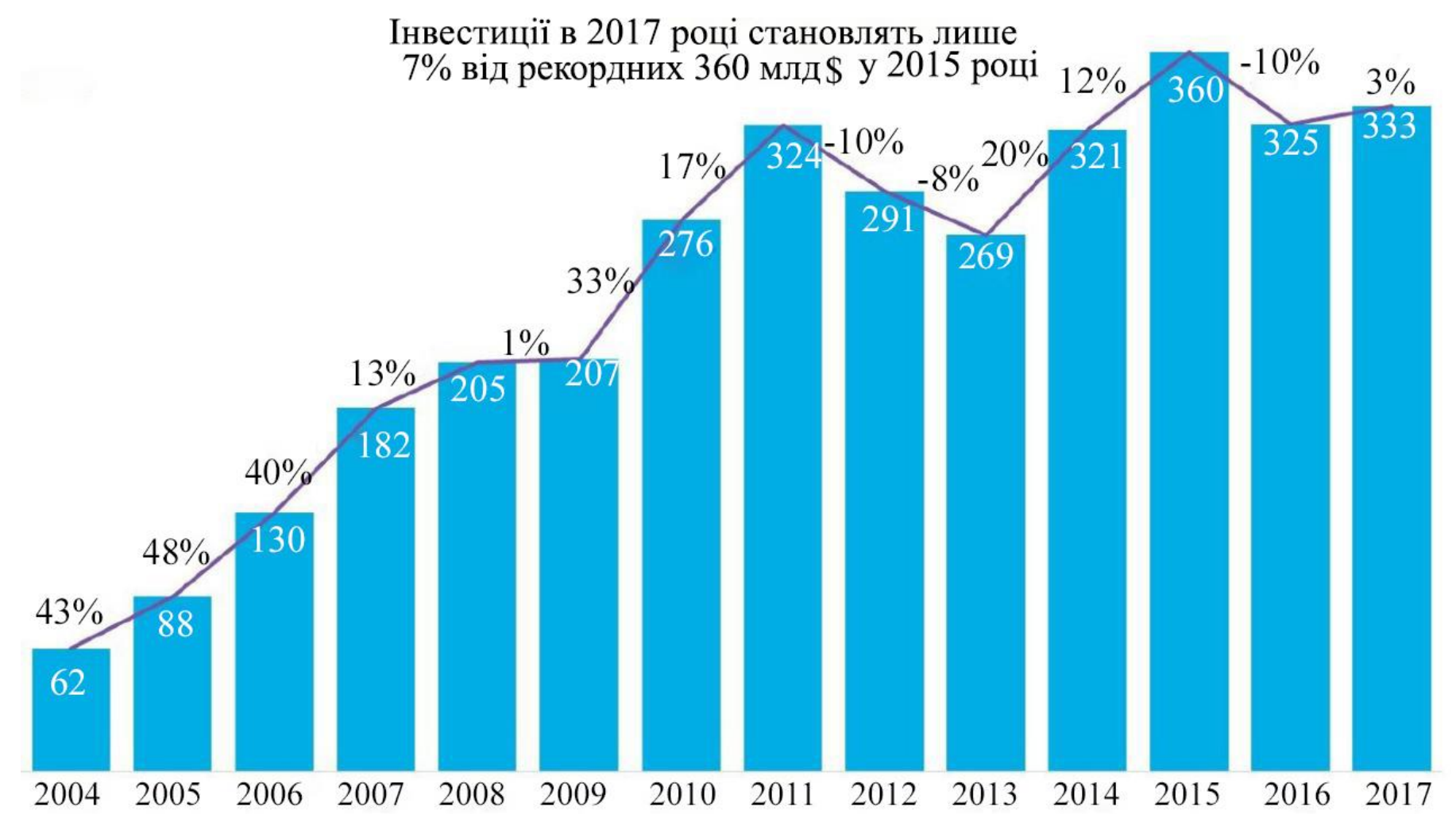


Рис. 3. Світові інвестиції в нетрадиційну енергію в 2004-2017 роки [Renewables 2017 Global Status Report – Paris: REN21 Secretariat, 2017. – 302 p.]

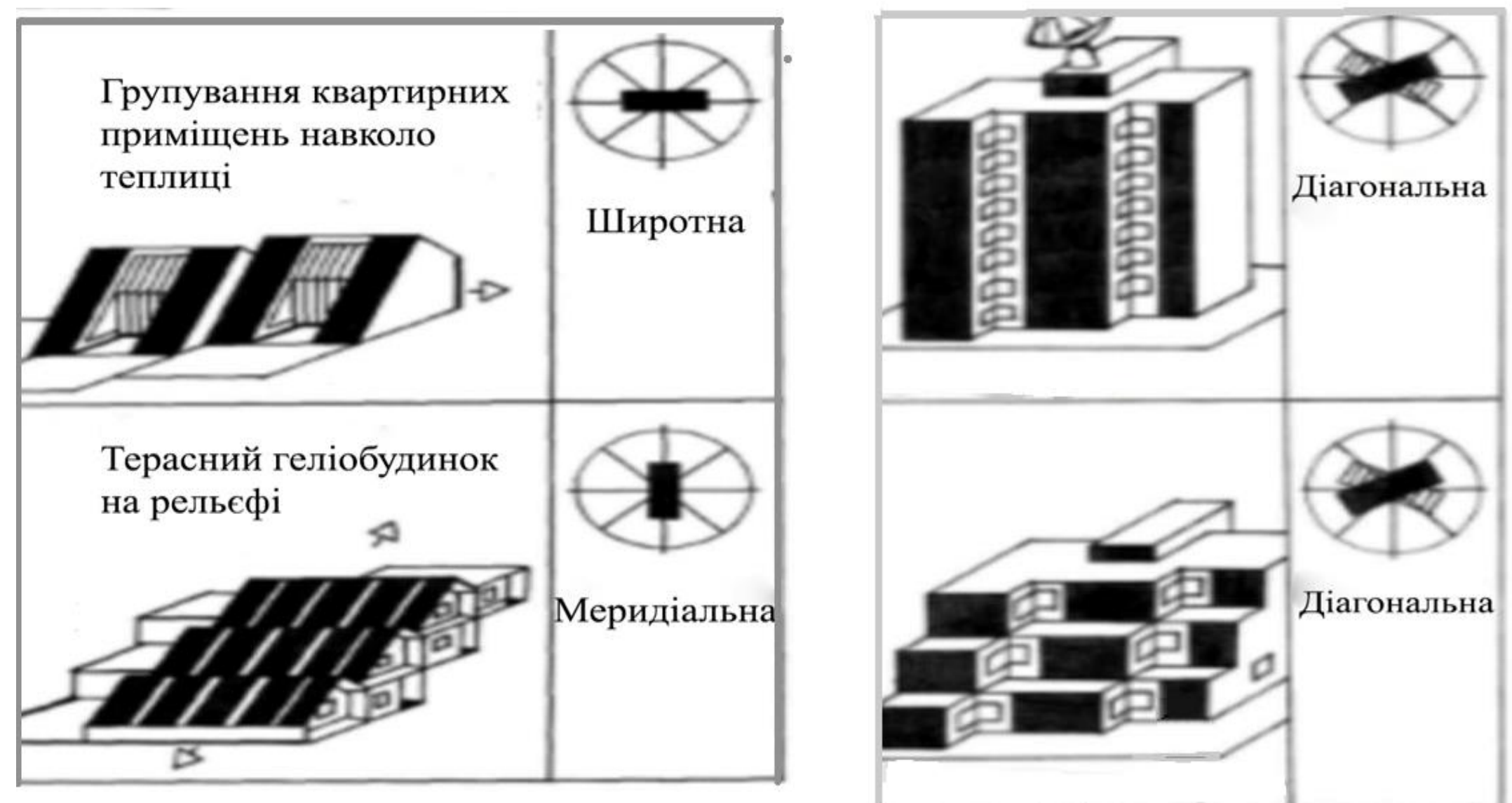
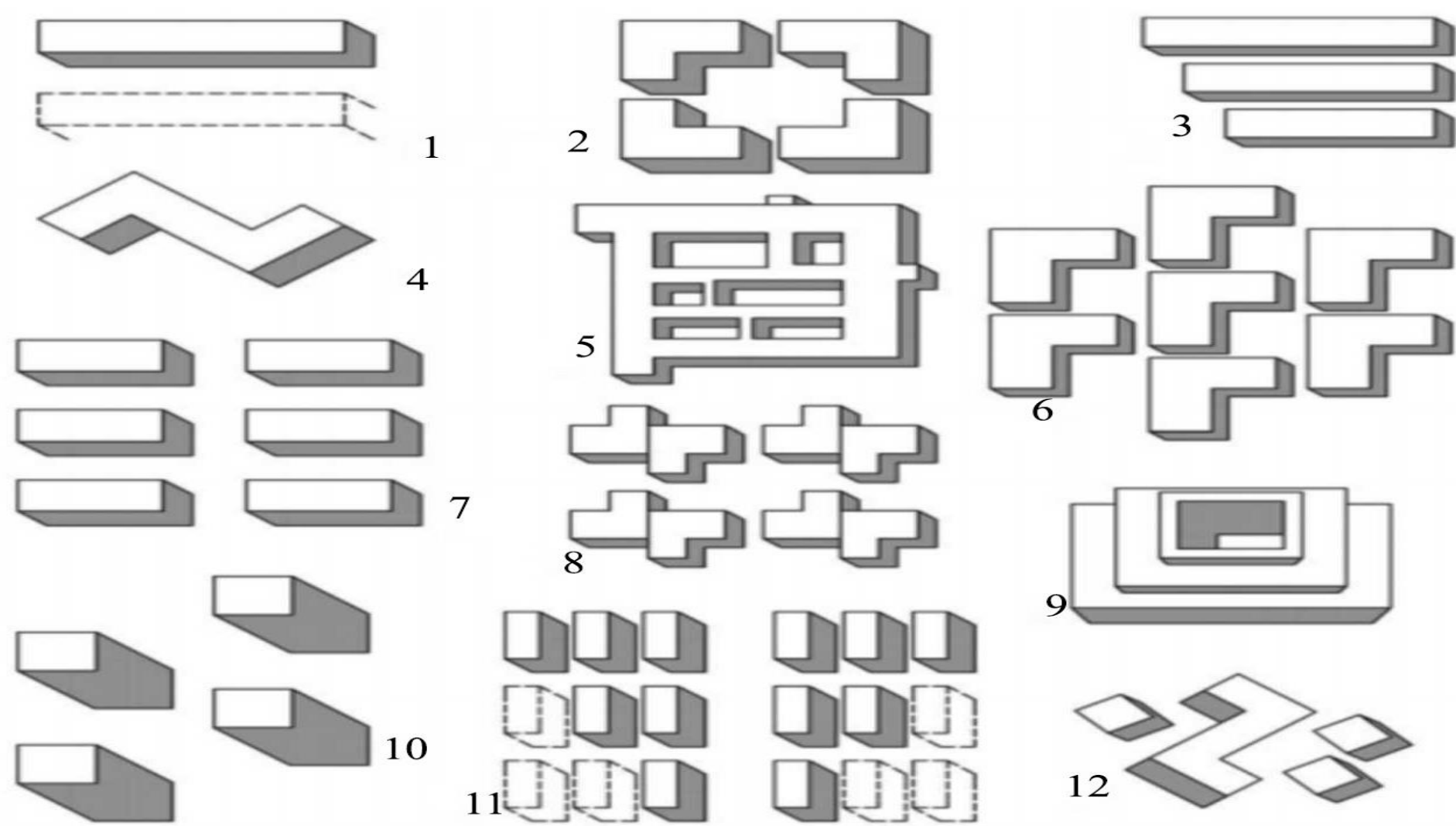


Рис.5. Об'ємно планувальні рішення енергоефективних будинків

Рис. 4. Розміщення будівель в плямі забудови

### Будівлі із скляними фасадами



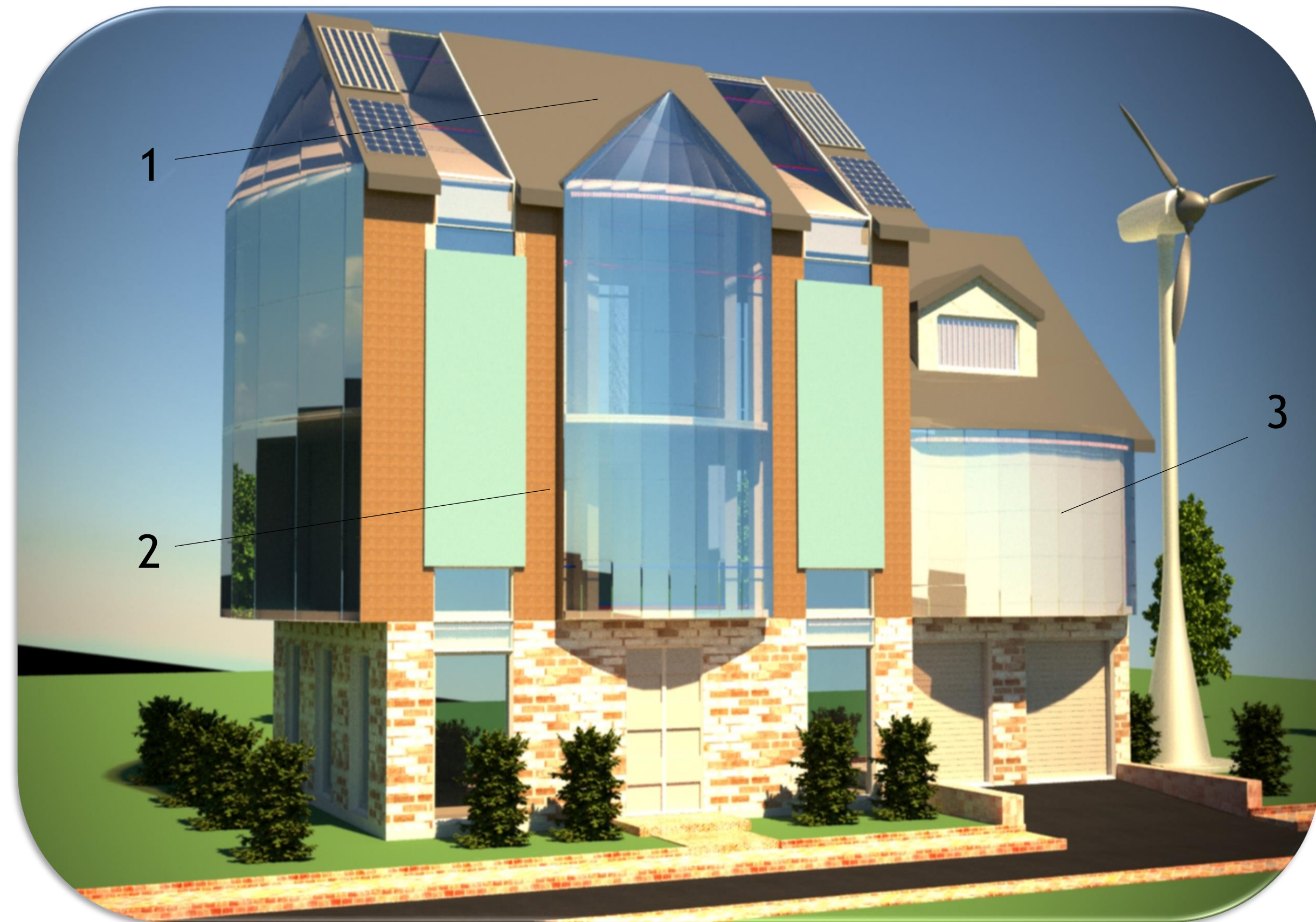
Кришталевий собор (м. Гарден-Гроувс США)



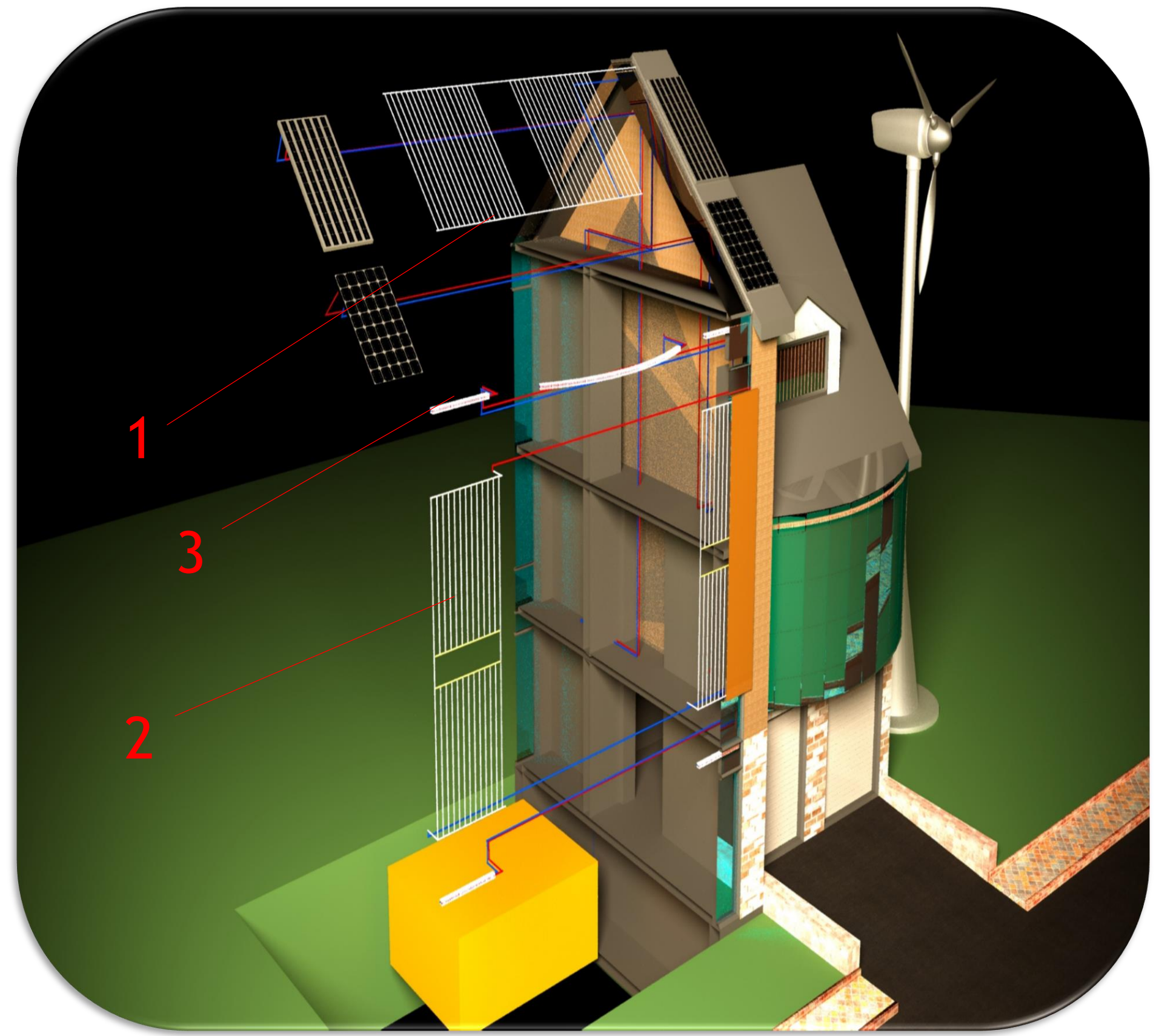
Шанхайська вежа (Китай)



Бізнес центр «Парус» (м. Київ)



а)



б)

Рис. 1. Модель енергоефективного будинку (а) із геліоколекторами суміщеними із зовнішніми огороженнями (б) ( 1 – геліопокриття, 2 – геліостіна; 3 – геліопокриття)

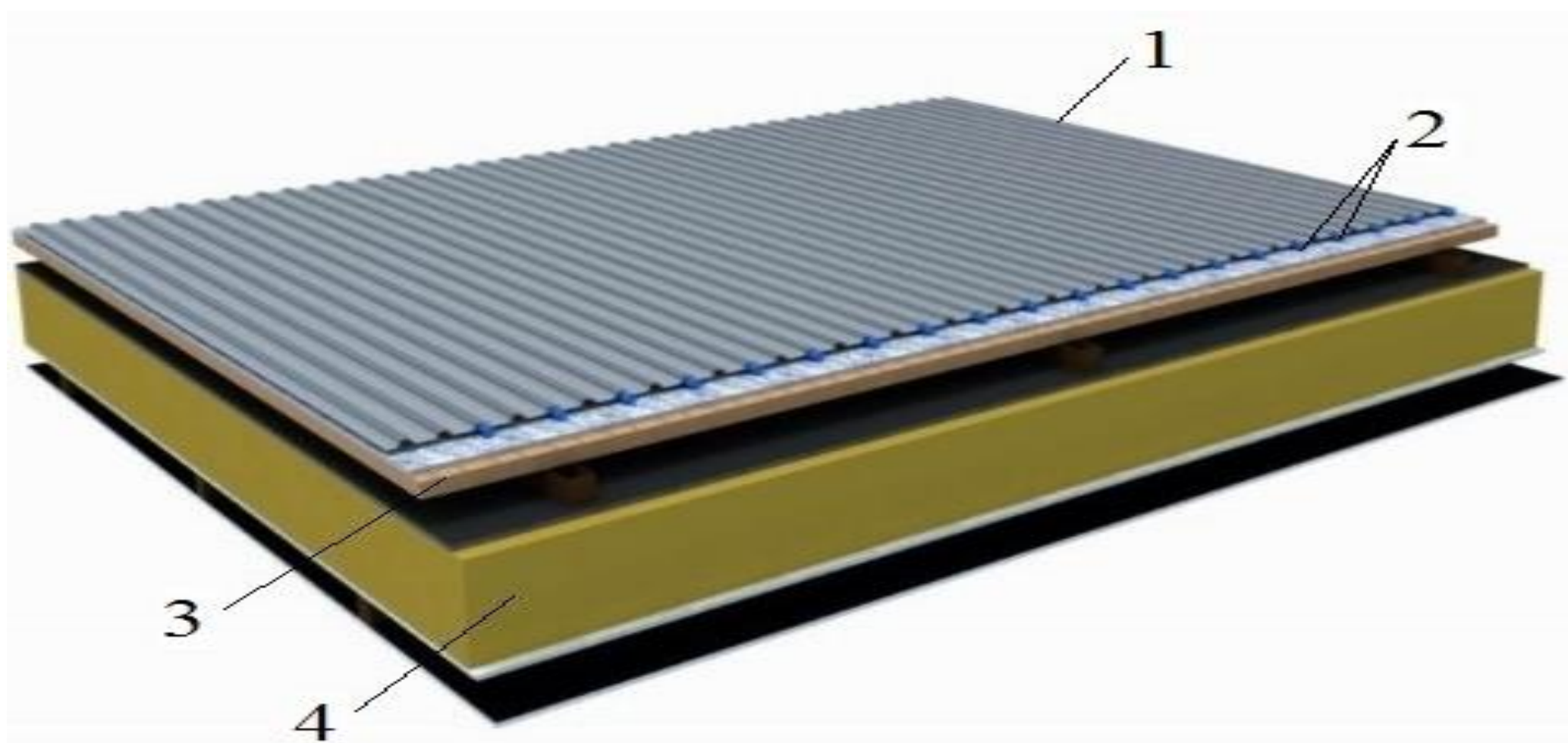


Рис. 2 – Геліопокриття:

1 – гофрований лист металу (теплопоглинач);  
2 – трубки контуру циркуляції теплоносія;  
3 – теплоізоляція; 4 – несуча конструкція даху

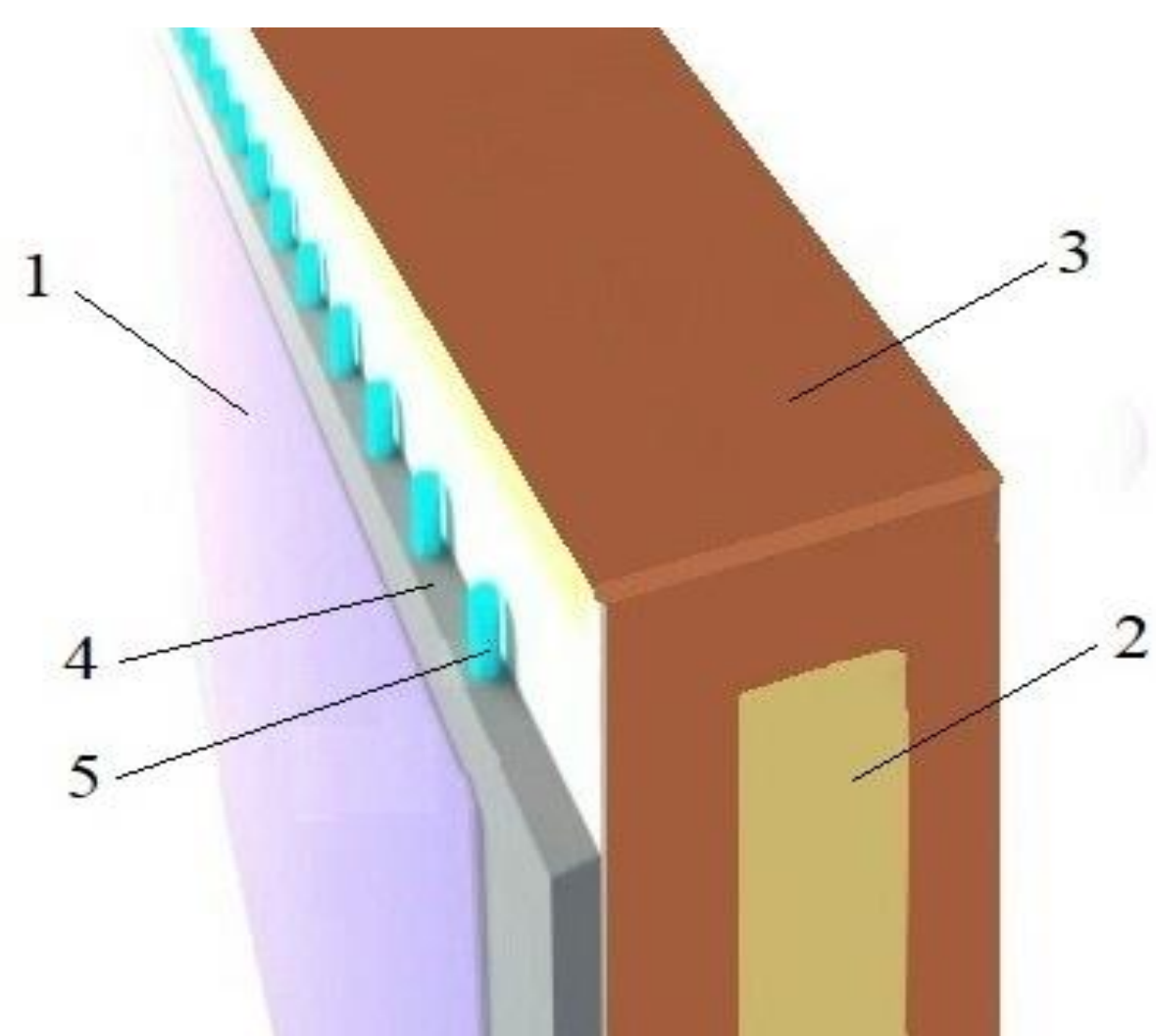
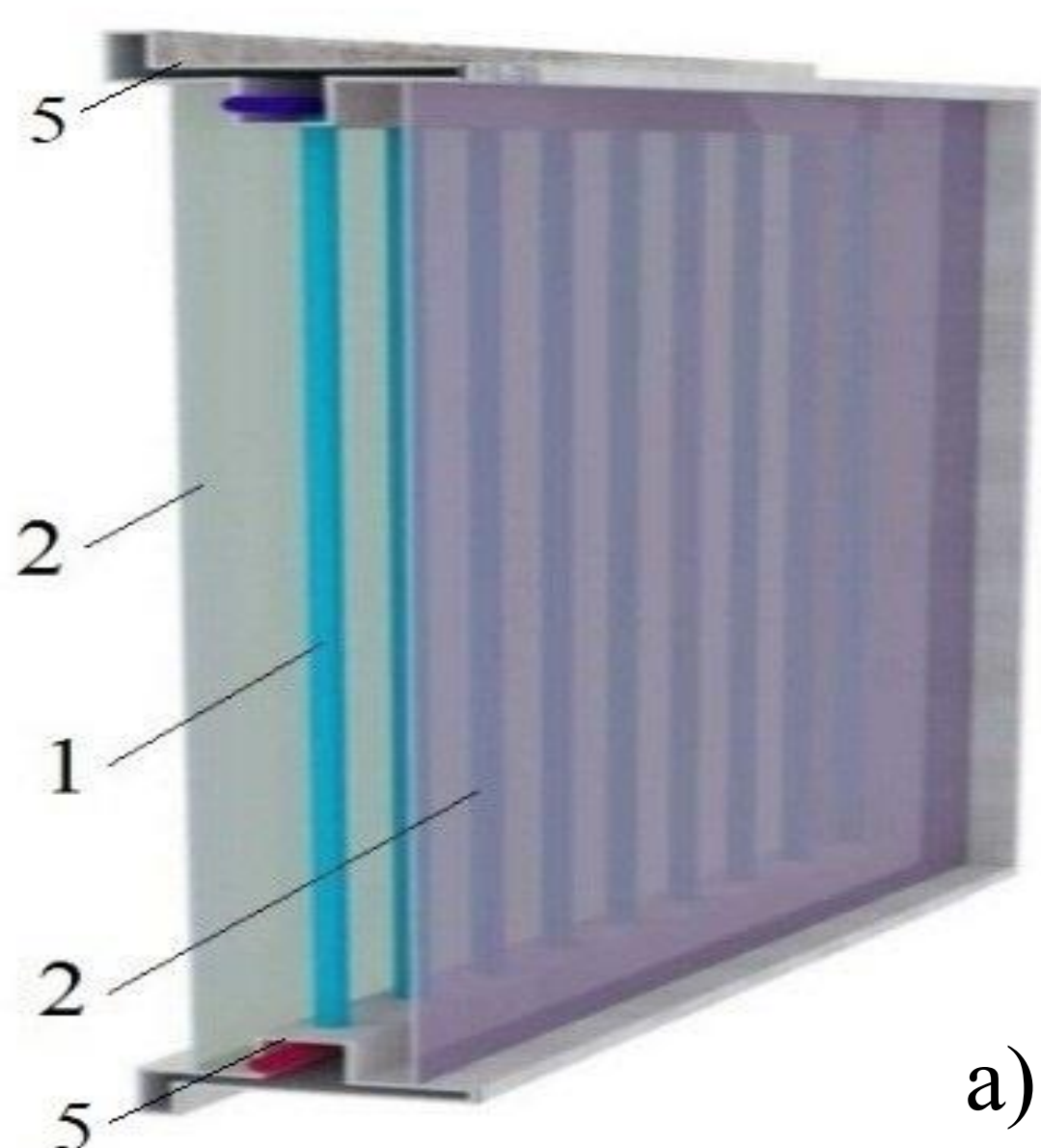
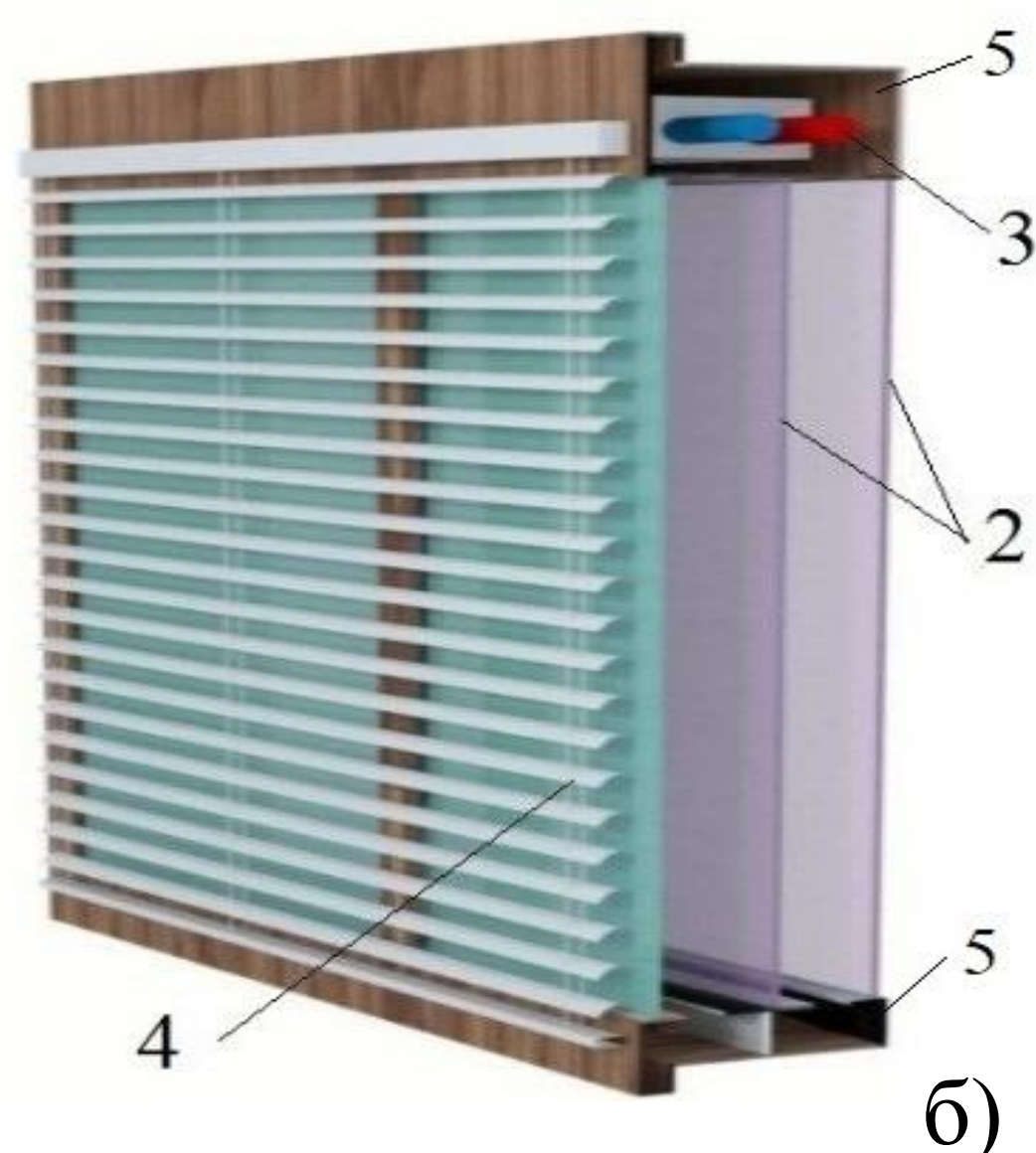


Рис. 3 – Геліостіна:

1 – світлопрозоре огороження;  
2 – теплоізоляція; 3 – несуча конструкція стіни;  
4 – теплопоглинаючий шар;  
5 – трубки контуру циркуляції теплоносія



а)



б)



в)

Рис. 4 – Геліовікно з гребінкою (а), теплообмінником (б) та вентилятором (в):  
1 – гребінка; 2 – світлопрозоре огороження; 3 – теплообмінник;  
4 – жалюзі; 5 – корпус; 6 – вентилятор

# Принципова схема комбінованої системи теплопостачання енергоефективного будинку із ІЕГІЗЗБ

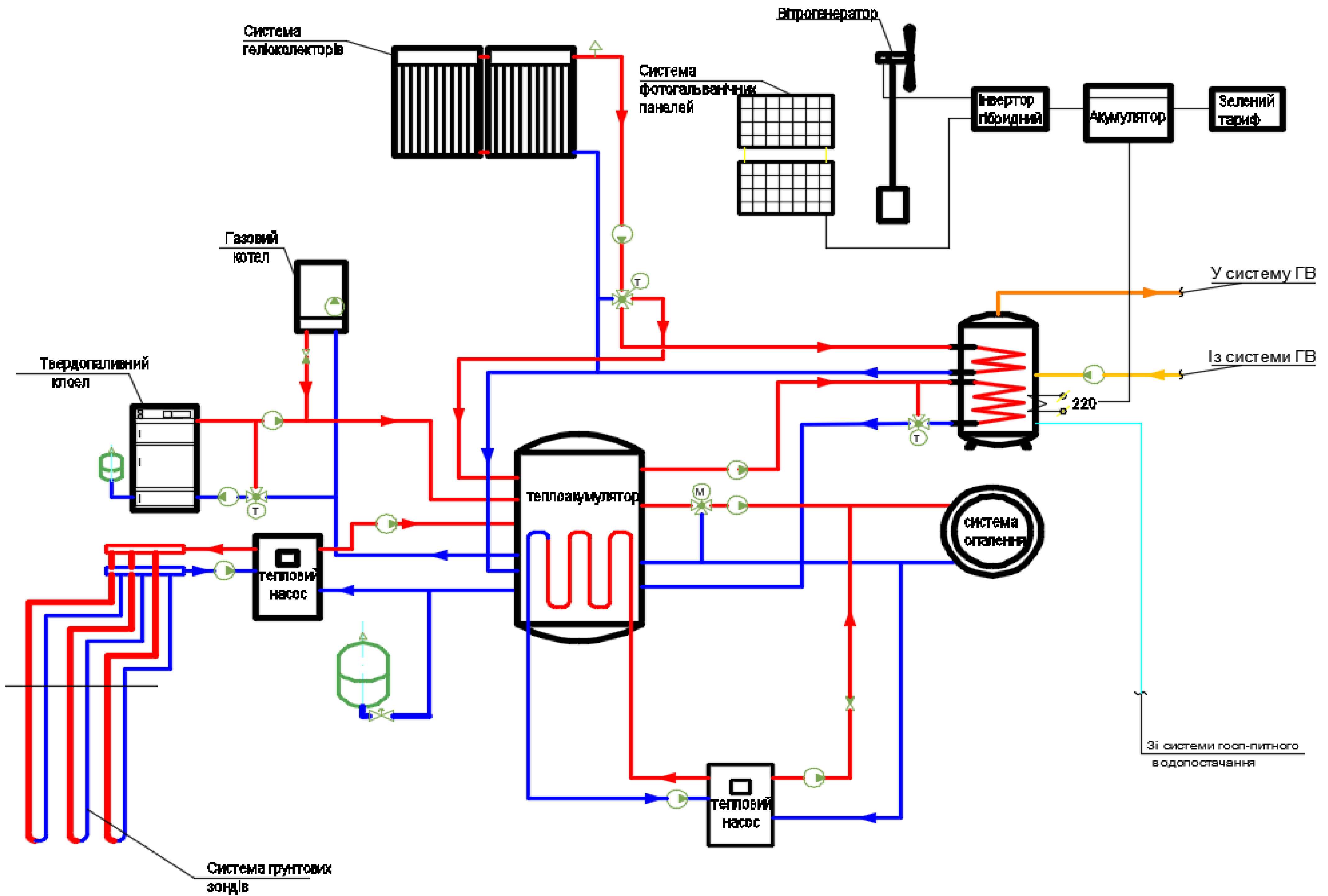


Рис.1. Принципова схема комбінованої системи теплопостачання енергоефективного будинку із інтегрованими геліоколекторами



системі тепlopостачання

1. Стаціонарний метод:

• лабораторний

$$\eta = F'(\tau\alpha) - \frac{\alpha(t_m - t_{\text{зовн}})}{I} - \frac{b(t_m - t_{\text{зовн}})^2}{I} \quad (1)$$

• натурний

$$\eta_{\text{eff}}(t) = \frac{q_u(t)}{I_{\text{eff}}(t)} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{зовн}}}{I_{\text{eff}}(t)} \quad (2)$$

2. Нестационарний метод:

$$\eta = F'[(\tau\alpha) - U_L(t_m - t_{\text{зовн}})] - \frac{C_A}{I} \cdot \frac{dt_m}{dt} \quad (3)$$

$$Q = G \cdot c \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}) \quad (4)$$

де  $F_R$  – коефіцієнт відводу тепла із сонячного колектора;  
 $(\tau\alpha)$  – приведена ефективна поглинаюча здатність сонячного колектора;  
 $U_L$  – повний коефіцієнт тепловтрат [Вт/К];  
 $t_{\text{вх}}$  – температура теплоносія на вході в сонячний колектор [К];  
 $t_{\text{вих}}$  – температура зовнішнього повітря [К];  
 $t_m$  – середньомасова температура теплоносія [К];  
 $I$  – густина потоку сонячного випромінювання [Вт/м<sup>2</sup>].

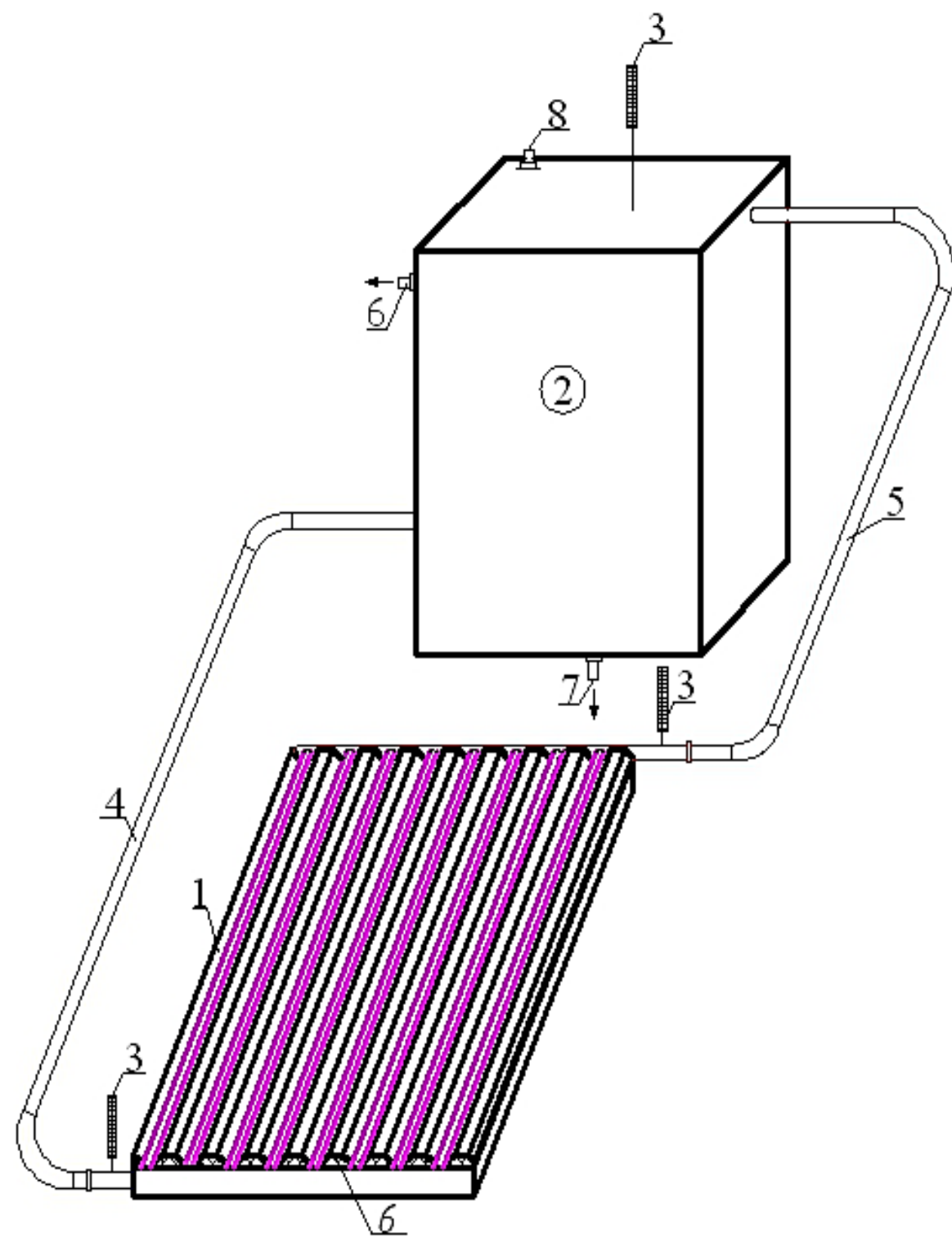


Рис.1. Схема

експериментальної установки комбінованого геліоколектора (режим гравітації/циркуляції теплоносія)

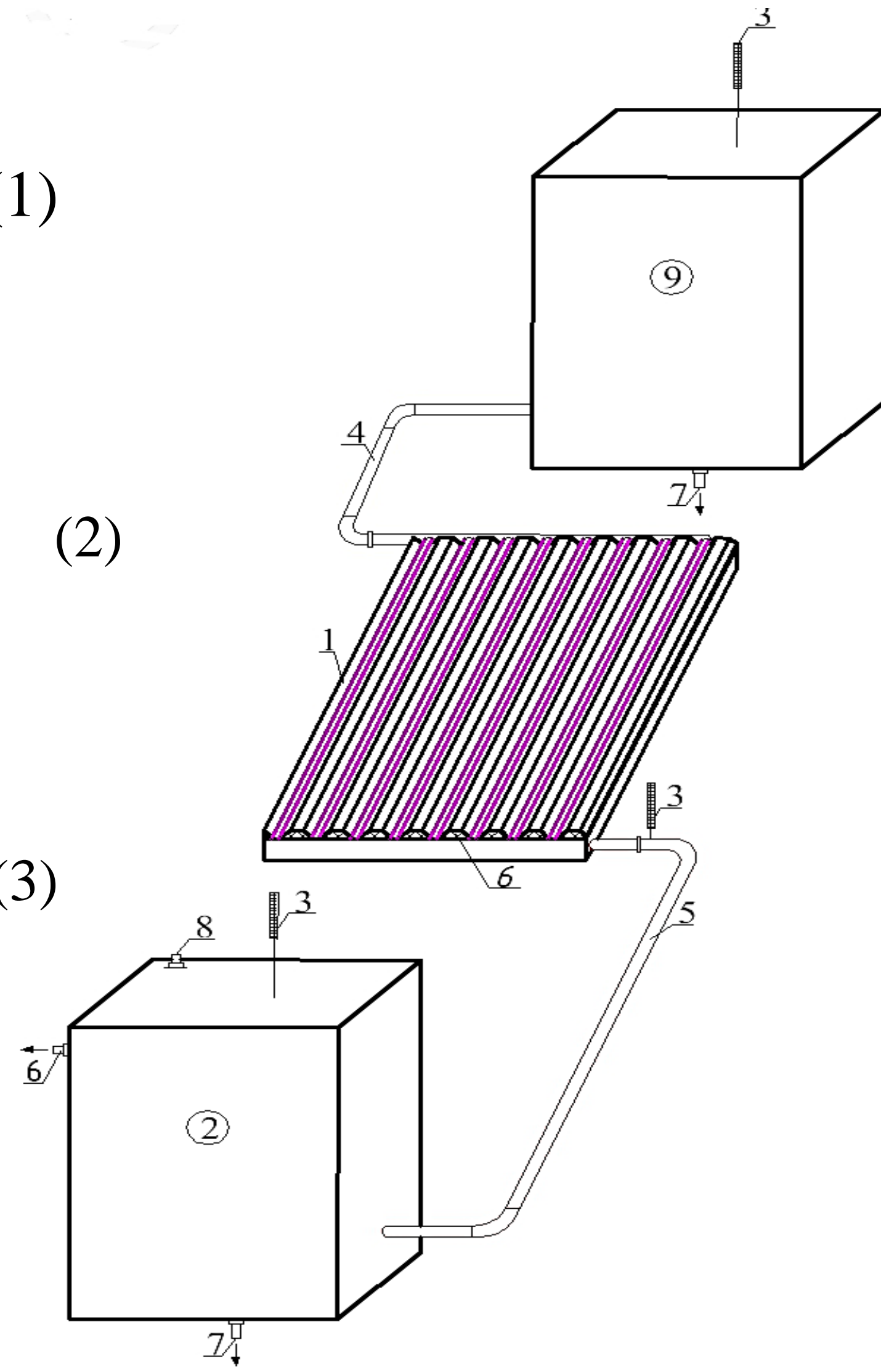


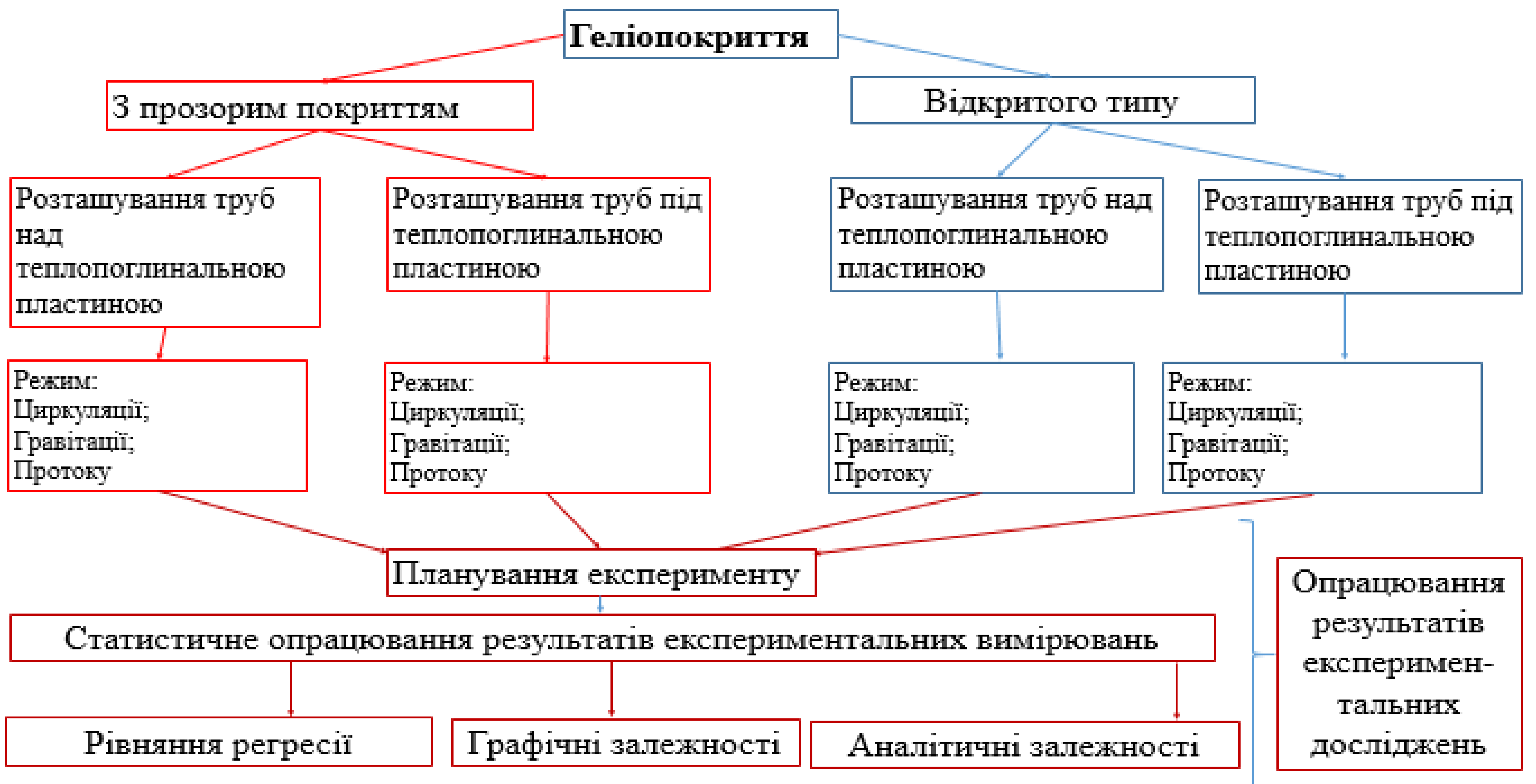
Рис.2. Схема експериментальної установки комбінованого геліоколектора (режим потоку теплоносія)

- 1 – геліопокрівля;
- 2 – бак-акумулятор;
- 3 – термометри;
- 4 – подаючий трубопровід;
- 5 – зворотній трубопровід;
- 6 – патрубок відбору теплоносія;
- 7 – патрубок зливу теплоносія;
- 8 – повітроспускний клапан;
- 9 – бак холодної води

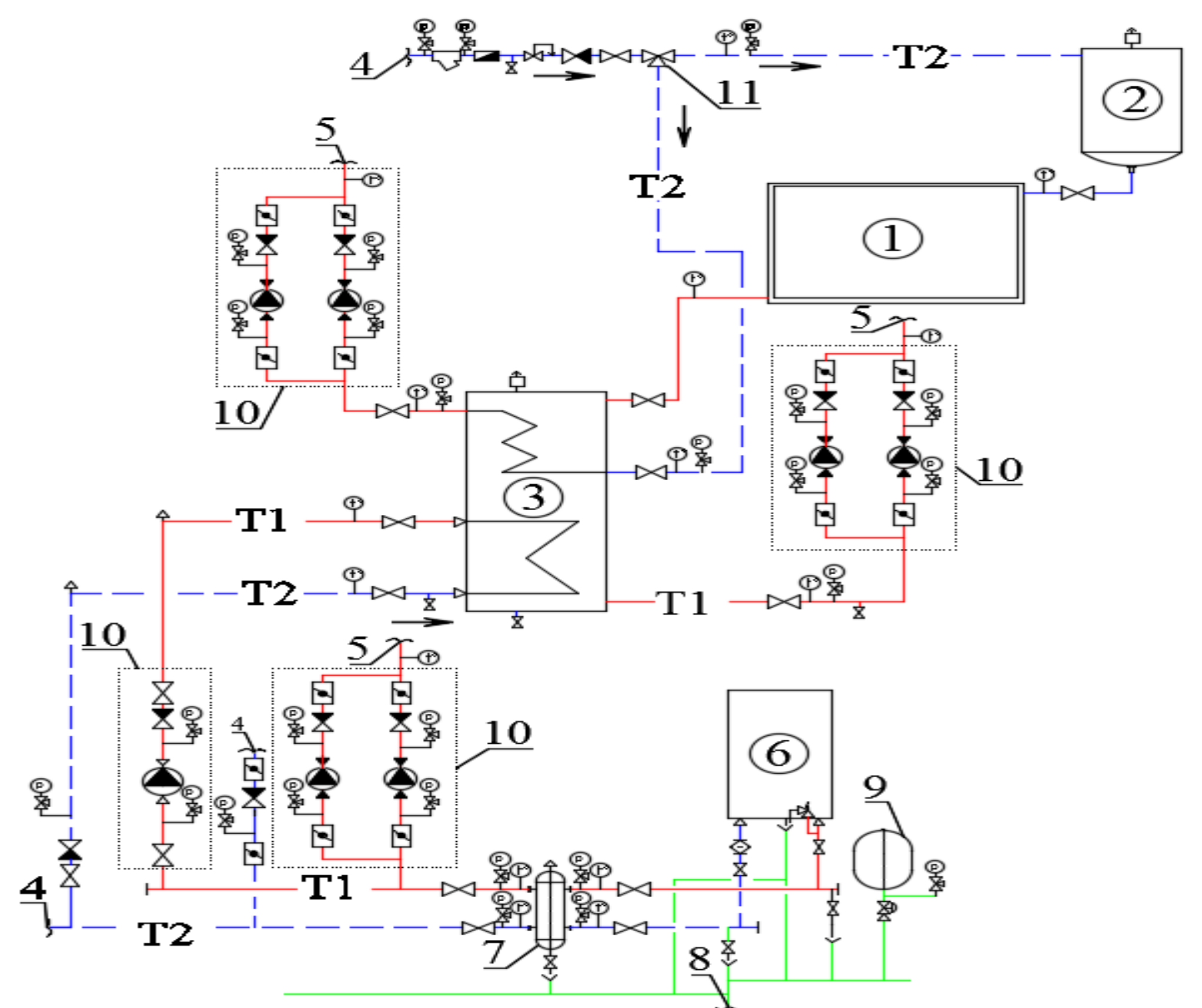
Прилади для експериментальних вимірювань Таблиця 1

№ п/п	Назва вимірюваної величини	Назва приладу	Похибка
1	Густина потоку випромінювання	Актинометр ЛІОТ	±10 Вт
		IR Power Meter LS122A	4%
		Піранометр М-80	±10 Вт
		Актинометр М-3	±10 Вт
2	Освітленість	Solar power meter SM 206	4%
		Люксметр DE 3350	4%
3	Температура повітря біля експериментальної установки	ТЕСТО 405 – V1	±0,5°C
4	Швидкість повітряного потоку	ТЕСТО 405 – V1	±0,1 м/с
5	Температура	Термометр опору ТМ-2А (SZ01049)	±0,01°C





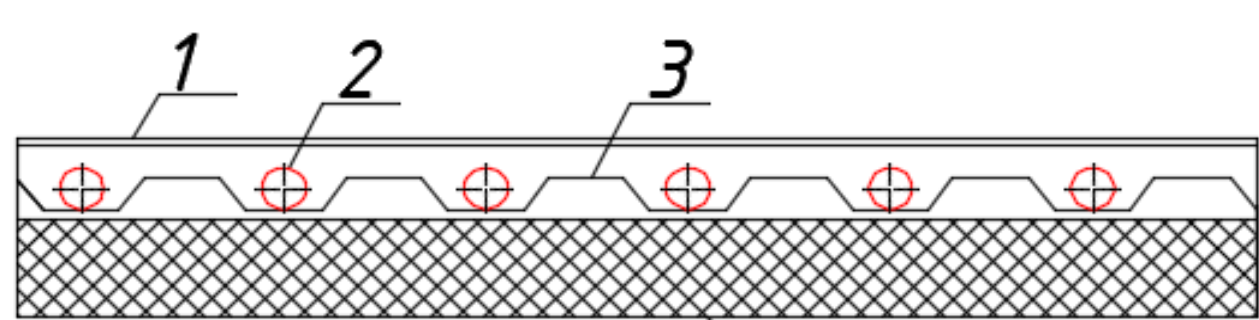
а)



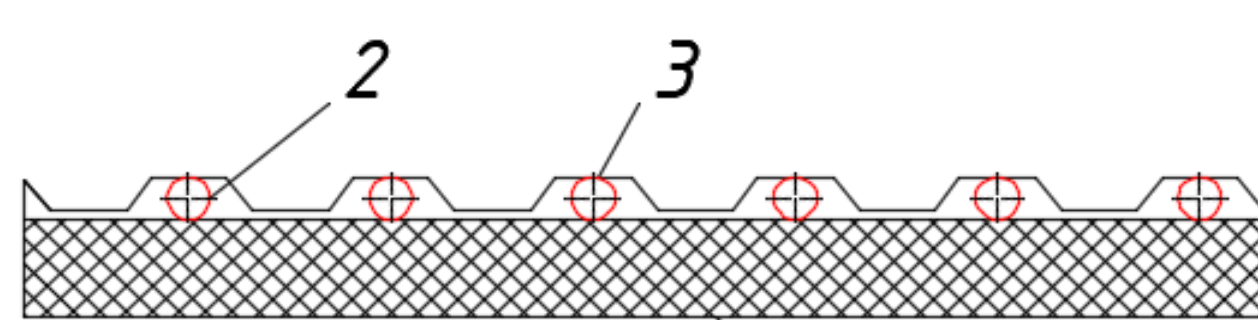
б)

Рис. 1. Схема експериментальної установки:

Схема (а) та фото (б) експериментальної установки: 1 – ГС; 2 – бак холодної води; 3 – тепловий акумулятор; 4 – патрубок подачі теплоносія; 5 – патрубок відбору теплоносія до споживачів; 6 – котел; 7 – гідравлічна стрілка; 8 – відстійник; 9 – закритий компенсатор об'єму (ЗКО); 10 – насосна група; 11 – триходовий клапан; Т1 – подавальний трубопровід; Т2 – зворотній трубопровід



а)

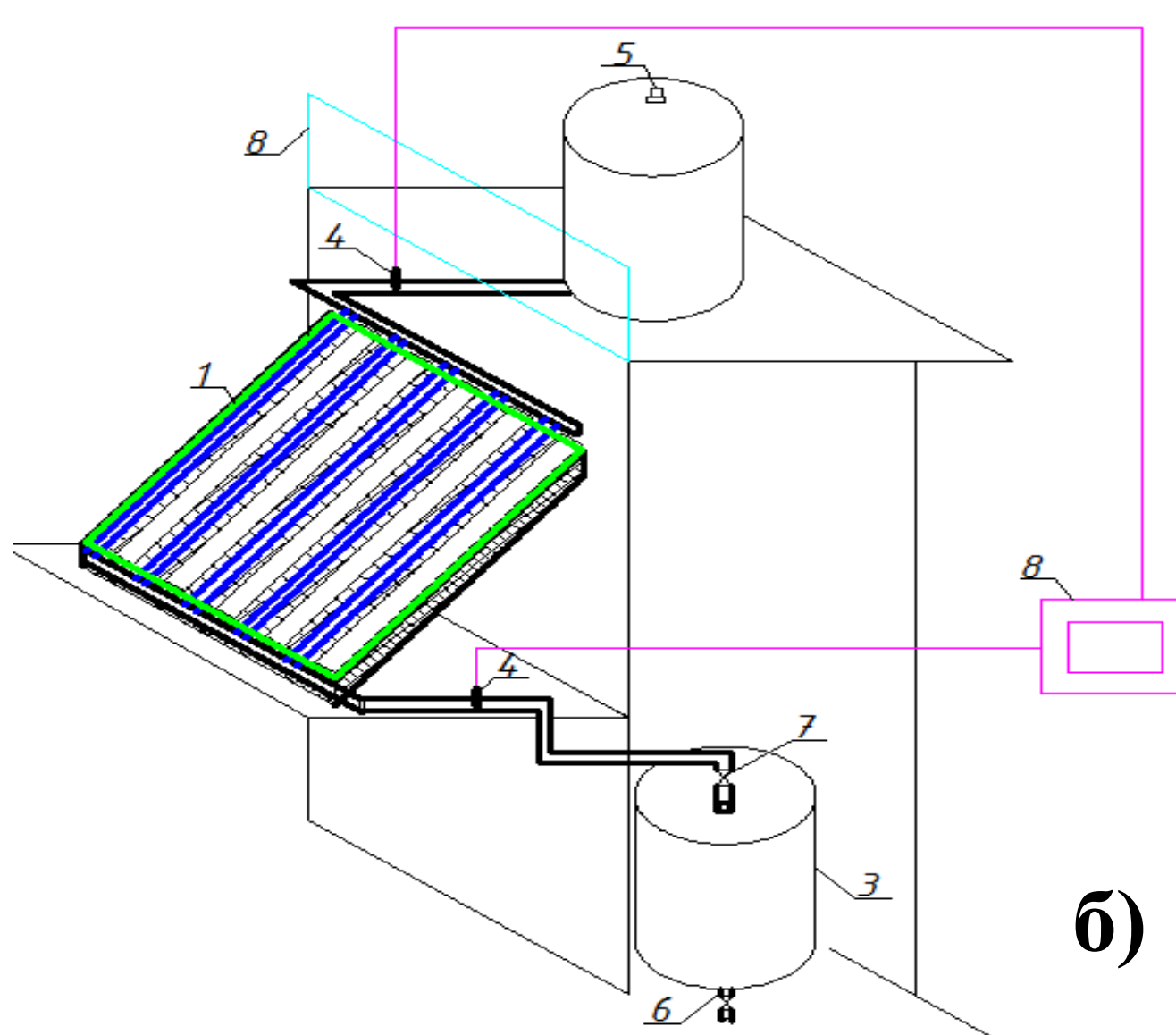


б)

Рис. 2. Схема геліопокриття із прозорим (а) та без нього (б): 1-прозоре покриття; 2 – трубки циркуляції Теплоносія; 3 – теплопоглинач; 4 – теплоізоляція



а)



б)

Рис. 3. Схема (а) та фото (б) експериментальної установки (для режиму потоку), де 1 – геліопокрівля; 2 – ємність з холодною водою; 3 – бак-акумулятор; 4 – термометри; 5 – патрубок подачі холодної води; 6 – патрубок відбору теплоносія; 7 – запірний вентиль

## Вплив зовнішніх факторів на енергетичну ефективність геліопокриття

Рівняння взаємозв'язку  $K_{\text{еф}}$  ГП з ПП у ССТ з ПЦТ тепlopостачання від швидкості  $v$ , напрямку  $\psi$  потоку повітря та його густини випромінювання  $I_b$ :

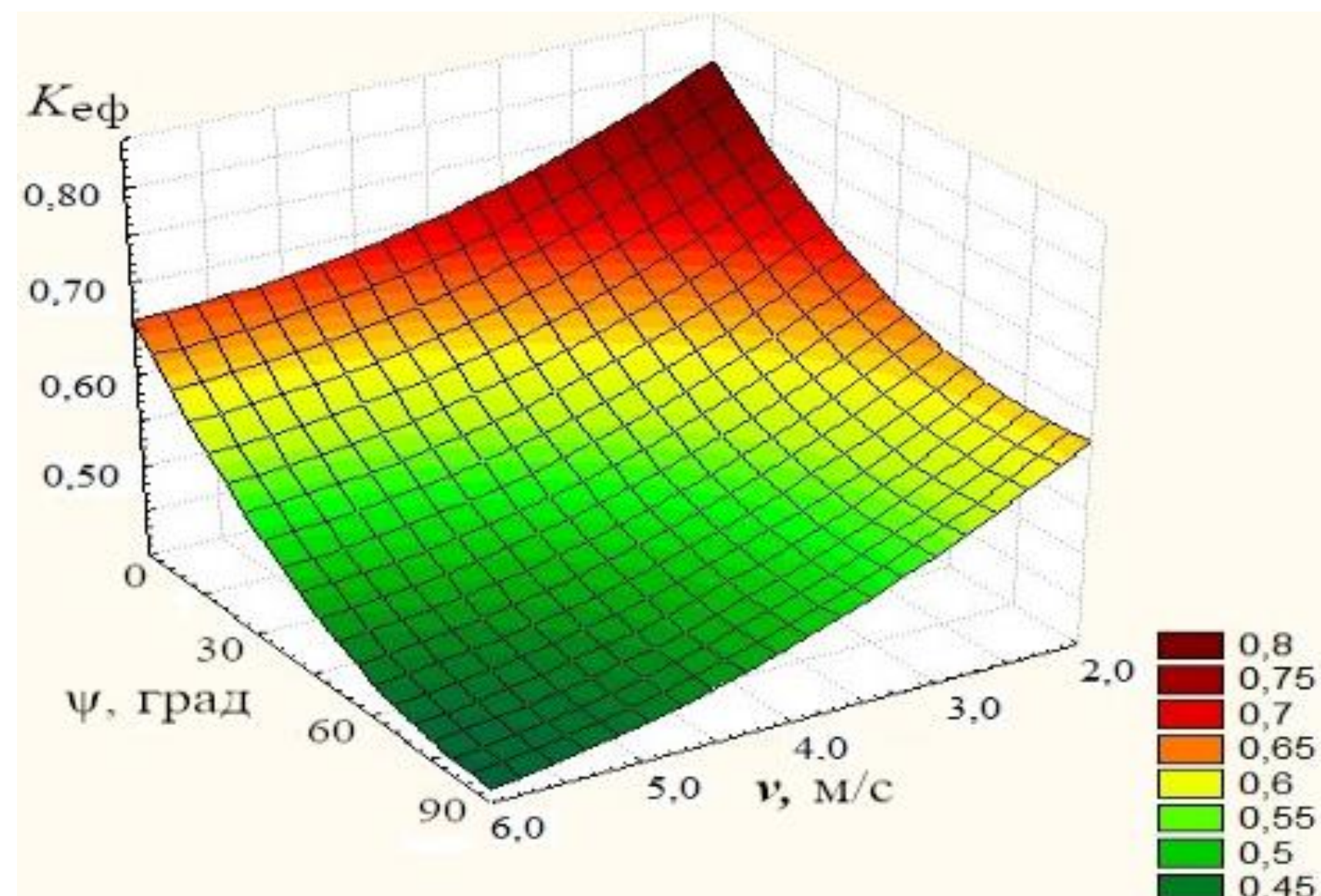


Рис. 1. Коефіцієнт теплової ефективності ГП з ПП у ССТ з ПЦТ за:  $I_b = 300$  Вт/м<sup>2</sup>

$$K_{\text{еф}} = 1,8 \cdot 10^{-8} \cdot I_b^2 - 2,708 \cdot 10^{-6} \cdot I_b \cdot (9,615 \cdot 10^{-6} \cdot \psi^2 + 3,5568 \cdot 10^{-5} \cdot \psi \cdot v - 4,5268 \cdot 10^{-2} \cdot \psi + 0,1022 \cdot v^2 - 1,6002 \cdot v + 1,7753) + 3,9927 \cdot 10^{-4} \cdot I_b + 5,9365 \cdot 10^{-8} \cdot \psi^2 + 2,196 \cdot 10^{-7} \cdot \psi \cdot v - 2,7949 \cdot 10^{-4} \cdot \psi + 6,3115 \cdot 10^{-4} \cdot v^2 - 9,8797 \cdot 10^{-3} \cdot v - 4,0105 \cdot 10^{-3} \cdot (9,615 \cdot 10^{-6} \cdot \psi^2 + 3,5568 \cdot 10^{-5} \cdot \psi \cdot v - 4,5268 \cdot 10^{-2} \cdot \psi + 0,1022 \cdot v^2 - 1,6002 \cdot v + 1,7753)^2 + 0,6264.$$

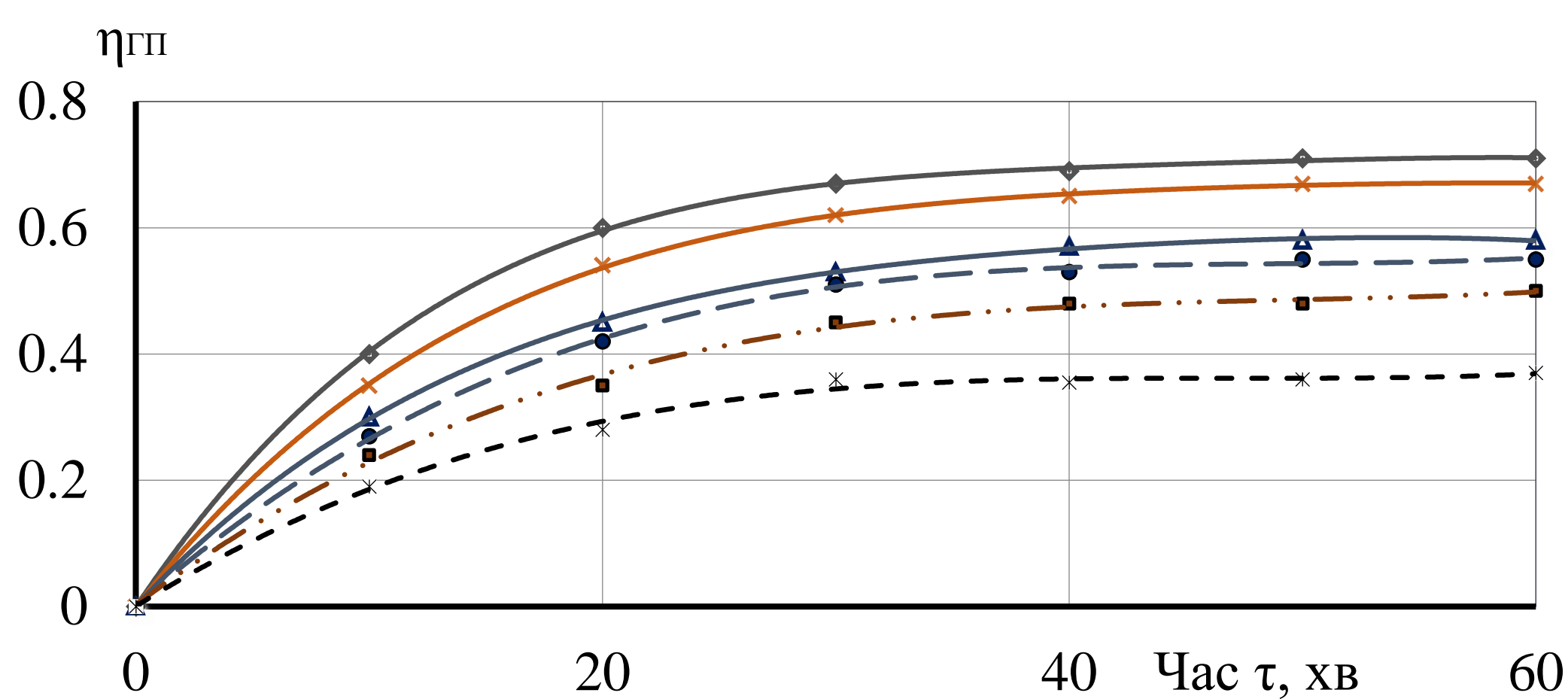


Рис. 2. Графік зміни ККД геліопокриття (з розташуванням трубок циркуляційного контуру над теплопоглиначем) при наявності прозорого покриття за різних режимів руху теплоносія

- ◆ ККД ГП з ПП за ППТ    × ККД ГП з ПП за ВЦТ    ▲ ККД ГП з ПП за ПЦТ
- ККД ГП без ПП за ППТ    ■ ККД ГП без ПП за ВЦТ    × ККД ГП без ПП за ПЦТ

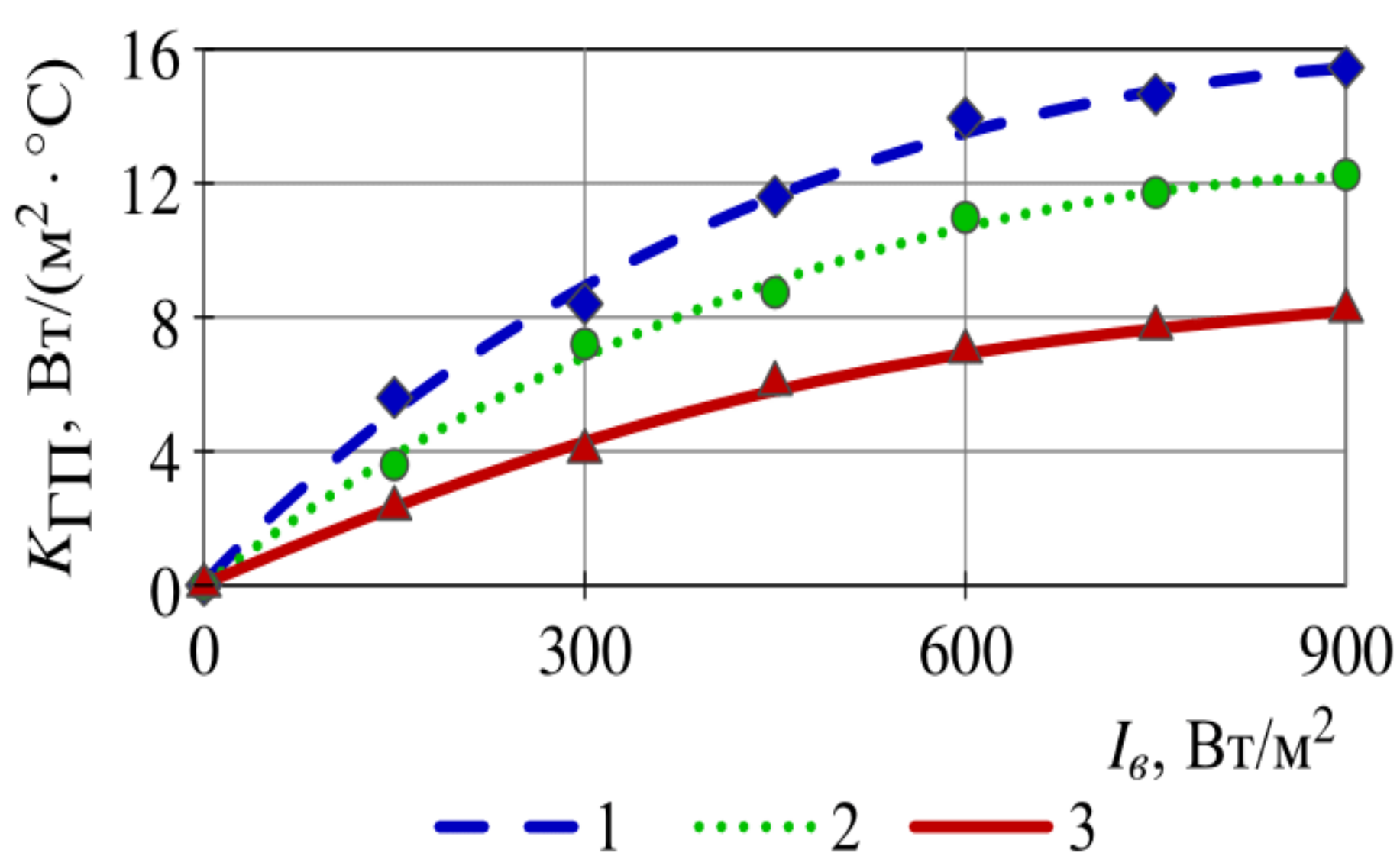


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тепловтрат геліопокриття  $K_{\text{ГП}}$  від густини потоку випромінювання  $I_b$  та швидкості потоку повітря:  
1 –  $v = 6$  м/с; 2 –  $v = 4$  м/с;  
3 –  $v = 2$  м/с

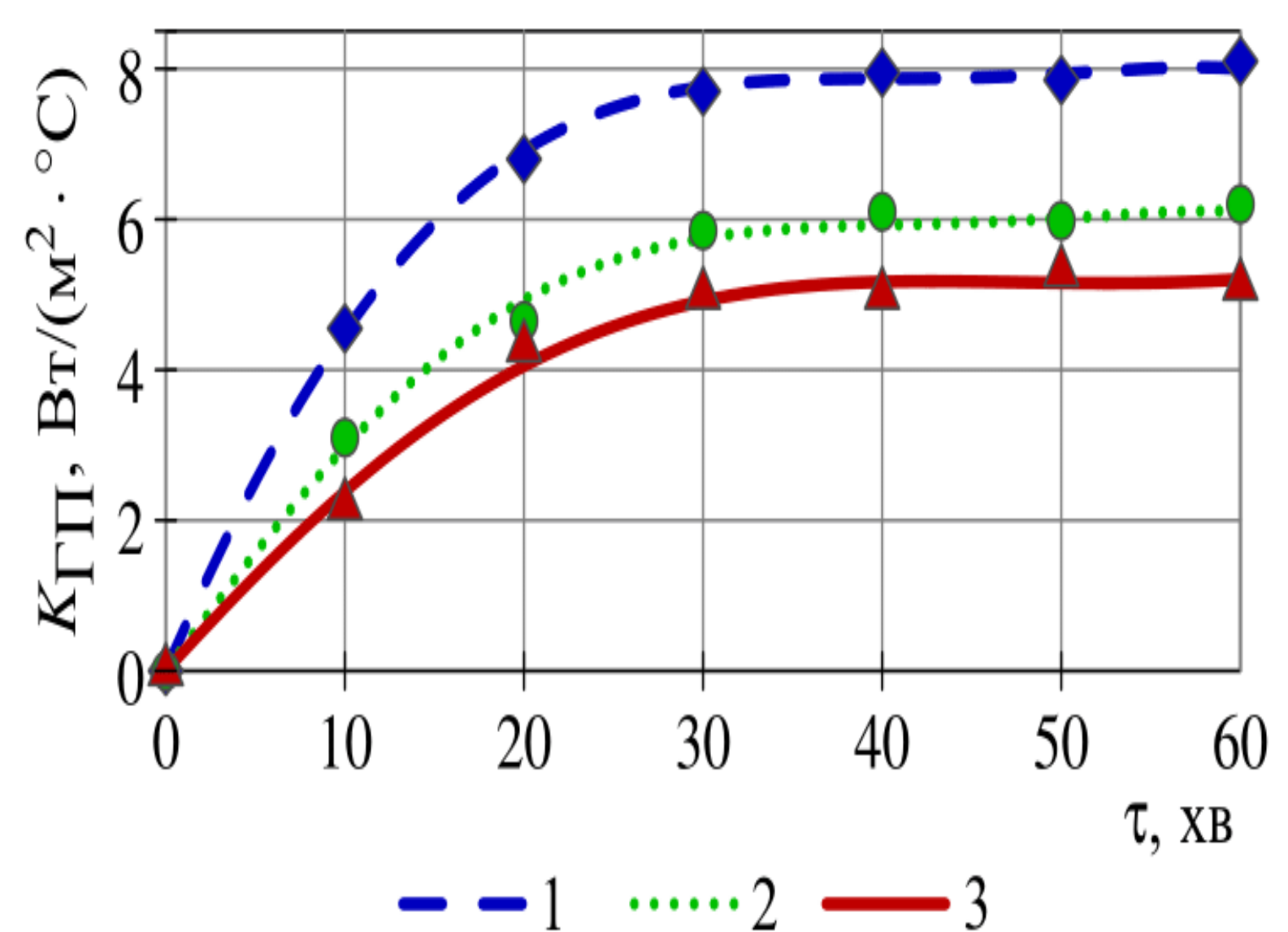
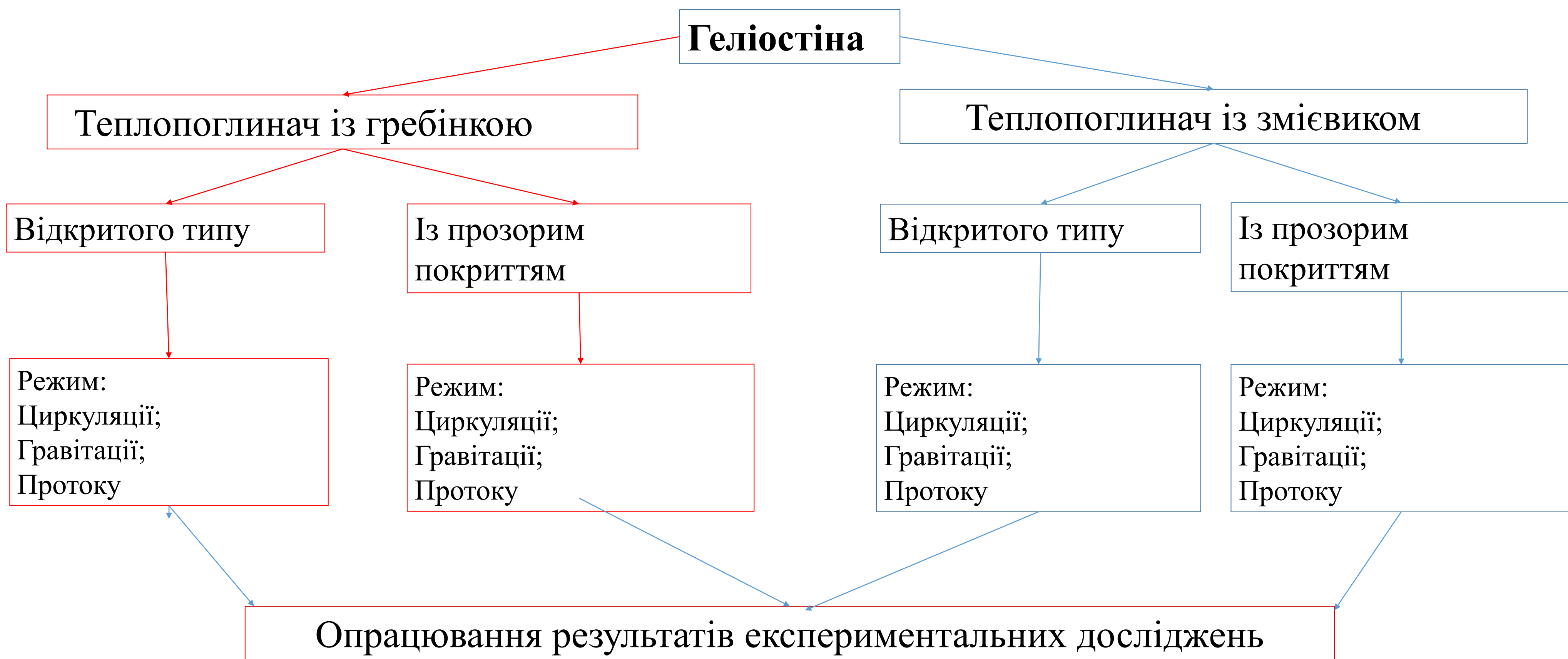


Рис. 4. Усереднене значення коефіцієнта тепловтрат геліопокриття  $K_{\text{ГП}}$ , Вт/м<sup>2</sup>, впродовж експерименту:  
1 – ВЦТ; 2 – ПЦТ; 3 – ППТ





### Фактори:

- **I етап:**
  - діаметр трубок контуру циркуляції, мм;
  - відстань між трубками контуру циркуляції, мм;
  - товщина теплопоглинача над трубками контуру циркуляції, мм;
  - швидкість теплоносія, м/с.
- **II етап:**
  - швидкість повітряного потоку  $v$ , м/с;
  - напрям повітряного потоку  $\alpha$ , °;
  - інтенсивність випромінювання  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>;
  - кут падіння променів  $\beta$ , °.
- **III етап:**
  - інтенсивність потоку випромінювання  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>;
  - кут надходження випромінювання  $\alpha$ , °;
  - об'єм баку акумулятора  $V$ , м<sup>3</sup>
  - витрата теплоносія, кг/с

### Функції відгуку:

- миттєва теплова потужність СК  $Q_{ГС}$ , Вт/м<sup>2</sup>;
- коефіцієнт корисної дії за геліоколектором(СК)  $\eta_{ГС}$ ;
- коефіцієнт корисної дії ССТ в цілому  $\eta_{ССТ}$ .

$$\eta_{ГС} = \frac{Q_{ГС}}{I_e} \quad \eta_{ССТ} = \frac{Q_{ТА}}{Q_B}$$

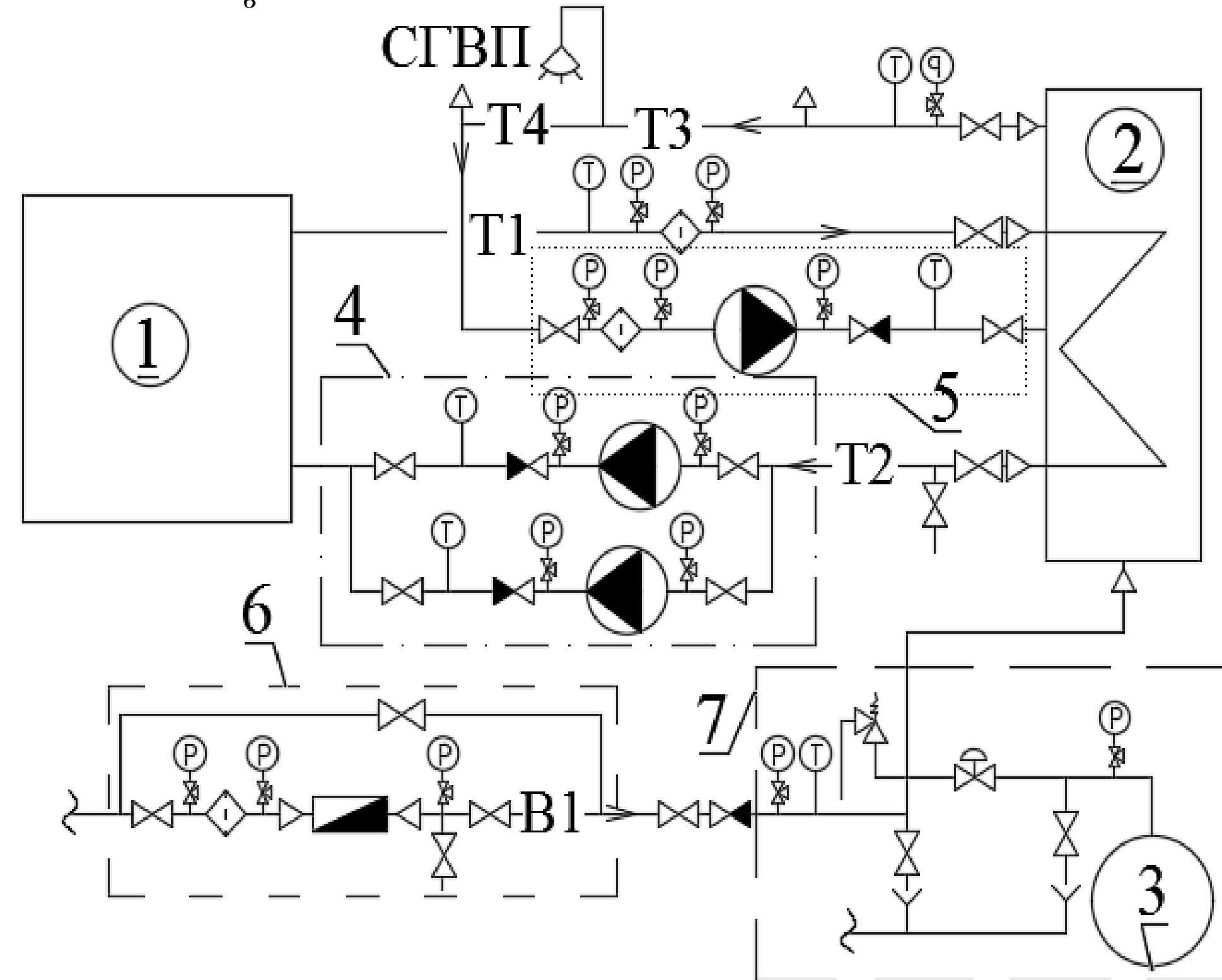


Рис.1. Схема (а) та фото (б) експериментальної установки (а): 1 – геліостіна; 2 – тепловий акумулятор; 3 – ЗКО (закритий компенсатор об'єму); 4 – насосна група циркуляції теплоносія; 5 – насосна група споживача; 6 – облік витрати теплоносія; 7 – дренажна група; Т1 – подавальний трубопровід; Т2 – зворотній трубопровід; Т3 – трубопровід системи гарячого водопостачання (СГВП); Т4 – трубопровід циркуляції СГВП; В1 – трубопровід холодної води

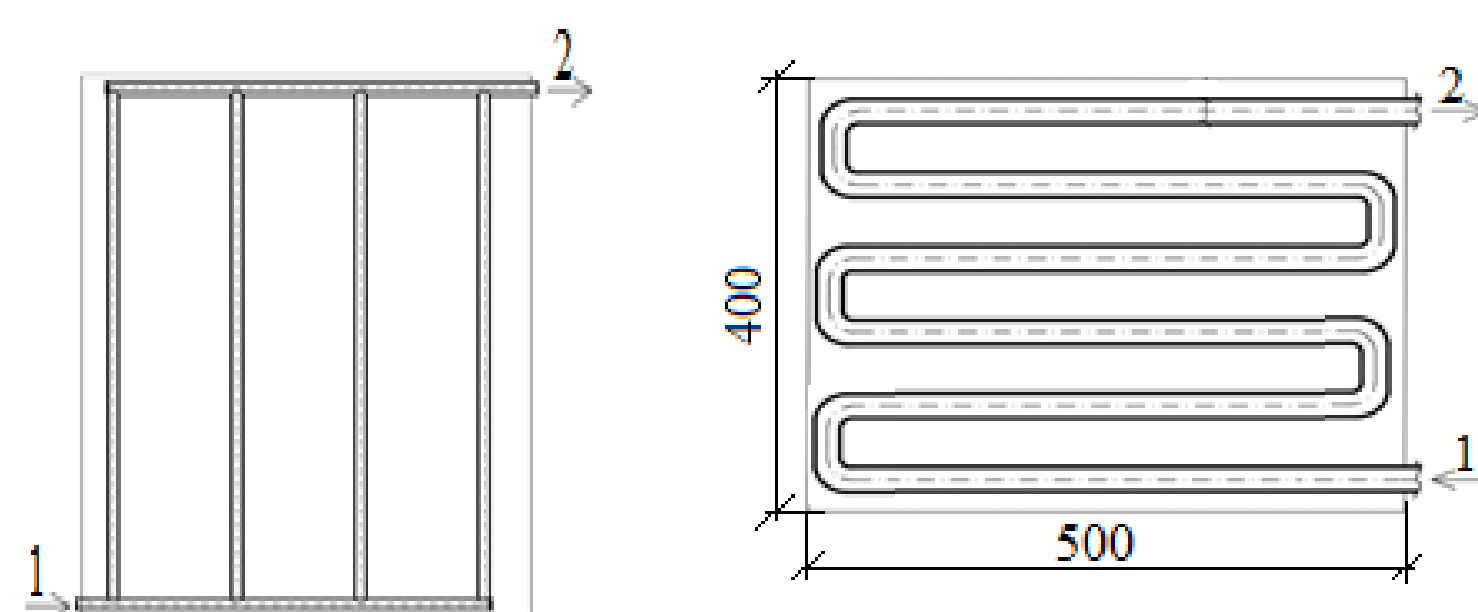
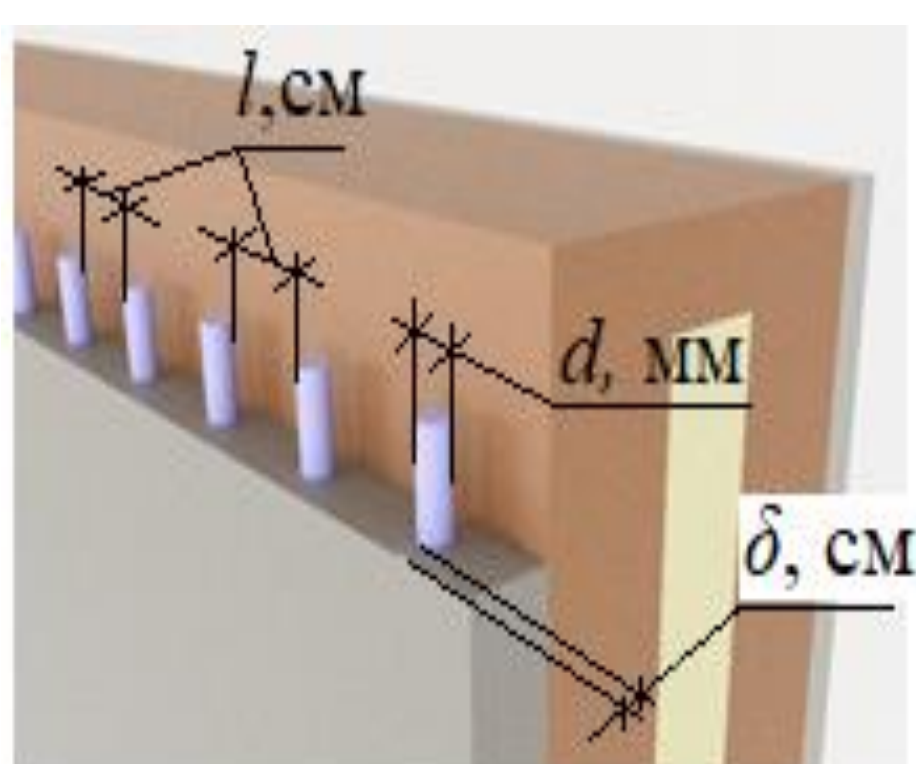


Рисунок 3.29 – Схема геліостіни (а) із теплопоглиначем з трубками контуру циркуляції теплоносія у вигляді гребінки (б), або змієвика (в): 1- вхідний трубопровід теплоносія в ГС; 2 – трубопровід виходу теплоносія із геліостіни

## Дослідження теплової ефективності геліостіни з теплопоглиначем із змійовиком (гребінкою)

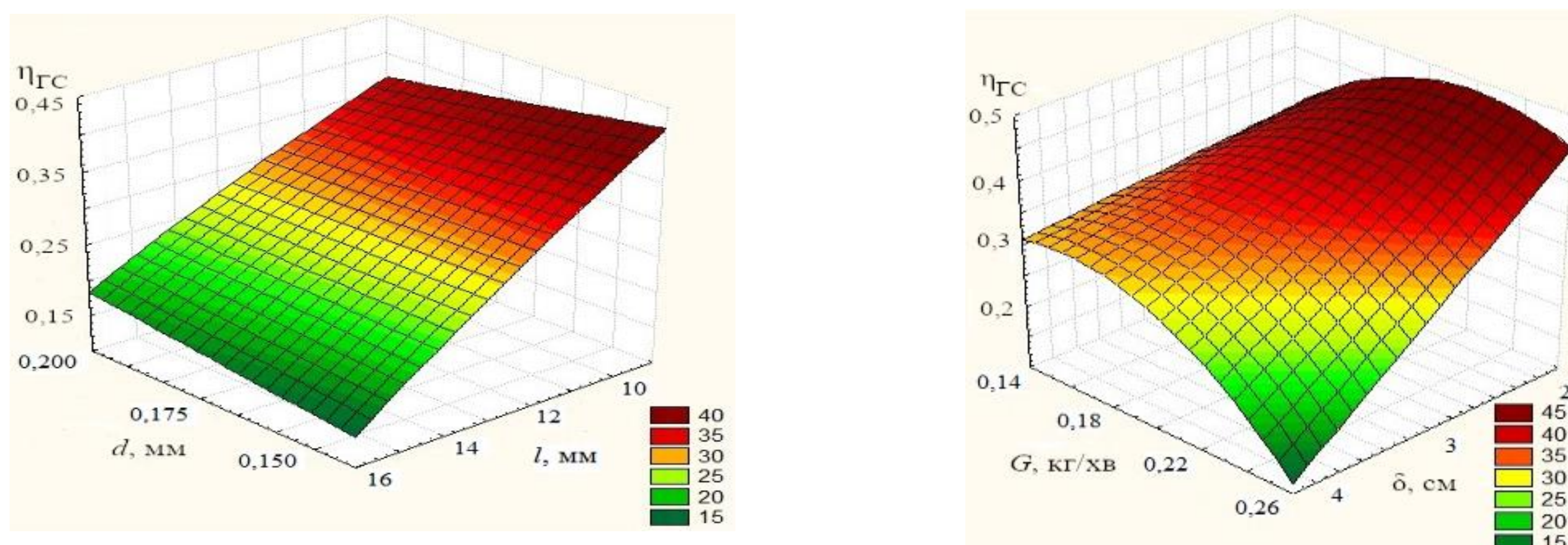


Рис. 1. Зміна ККД геліостіни з теплопоглиначем зі змійовиком в режимі ВЦТ в залежності від:  
 а – діаметру трубок контуру циркуляції  $d$  та відстані між ними  $l$  за:  
 $\delta = 2$  см і  $G = 0,15$  кг/хв; б – товщини над трубками контуру циркуляції  $\delta$  та  
 витрати теплоносія  $G$  за:  $d = 10$  мм і  $l = 10$  см

Регресійне рівняння:

$$\eta_{ГС} = 0,450 + 0,007x_1 - 0,014x_2 - 0,05x_3 + 0,036x_4 - 0,036x_1x_2 - 0,009x_1x_3 + 0,013x_1x_4 - 0,034x_2x_3 - 0,010x_2x_4 - 0,015x_3x_4 + 0,033x_1^2 + 0,012x_2^2 + 0,005x_3^2 - 0,032x_4^2.$$

## Експериментальна оцінка теплової ефективності геліостіни із гребінкою в системі теплопостачання

Таблиця 1 – Фактори, рівні та інтервали їх варіювання

Фактори	Позна-чення	Рівні відповідних факторів			Інтерва- л між рівнями
		-1	0	+1	
$I_B$ – густина потоку випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>	$x_1$	300	600	900	300
$G$ – витрата теплоносія, кг/хв	$x_2$	0,10	0,20	0,30	0,10
$m_{ТА}$ – маса теплоносія в ТА, кг	$x_3$	10,00	15,00	20,00	5,00

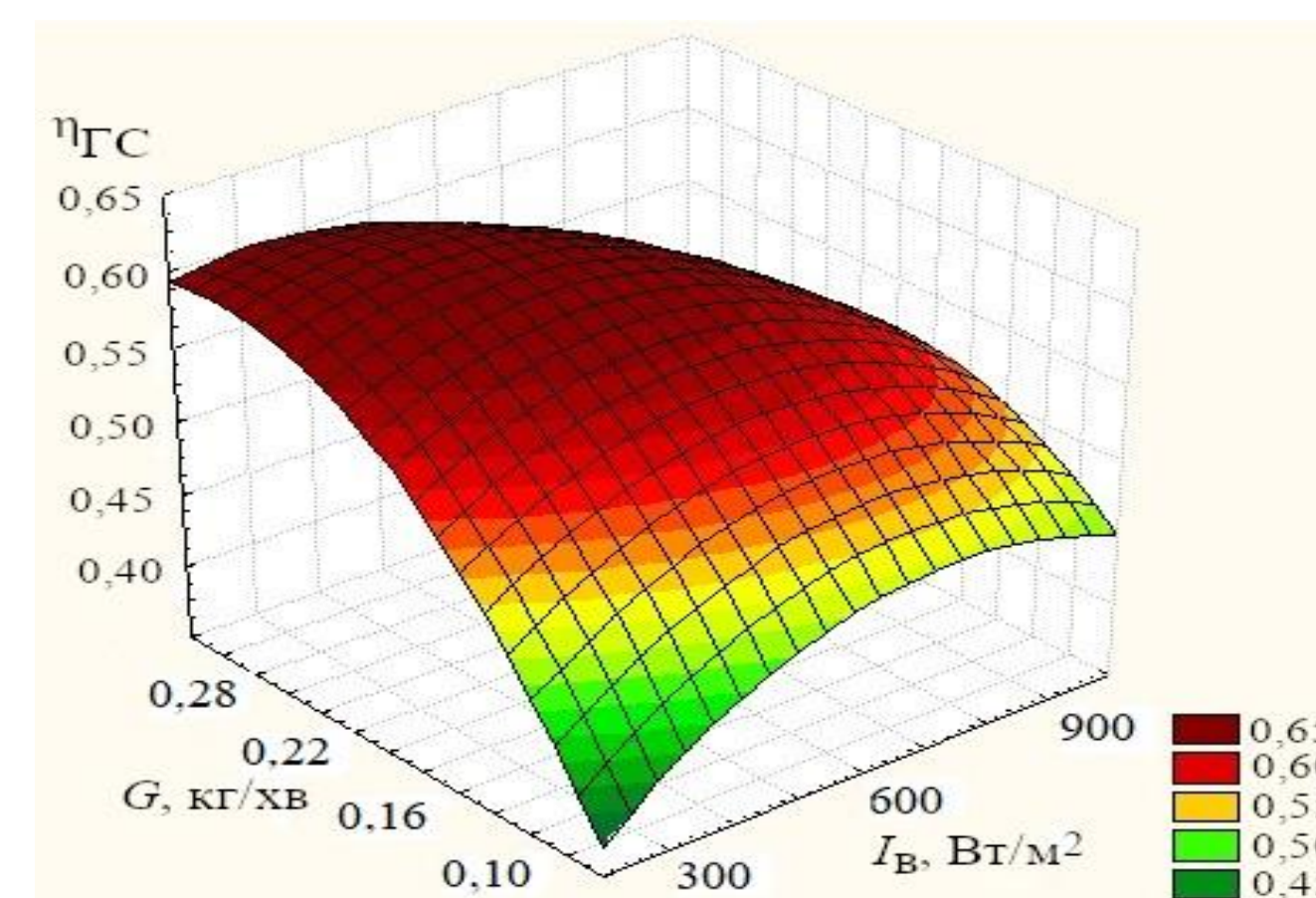


Рис. 2.– Зміна ККД геліостіни  $\eta_{ГС}$  в режимі ВЦТ за маси теплоносія в ТА із  $m_{ТА} = 15$  кг (б)

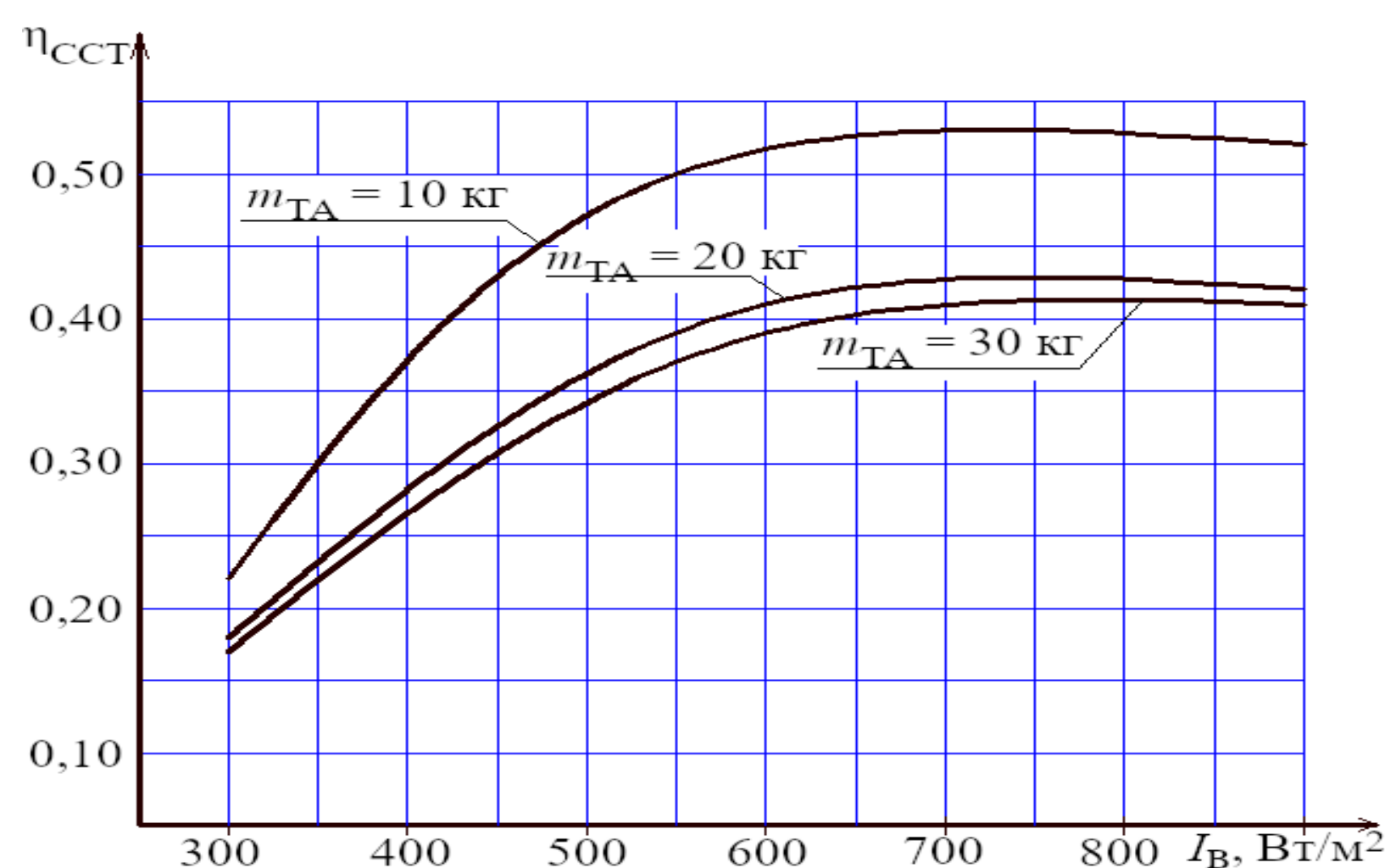


Рис. 3. Залежність ККД ССТ із геліостіною  $\eta_{ССТ}$  в режимі ПЦТ від густини потоку випромінювання  $I_B$  та маси теплоносія  $m_{ТА}$

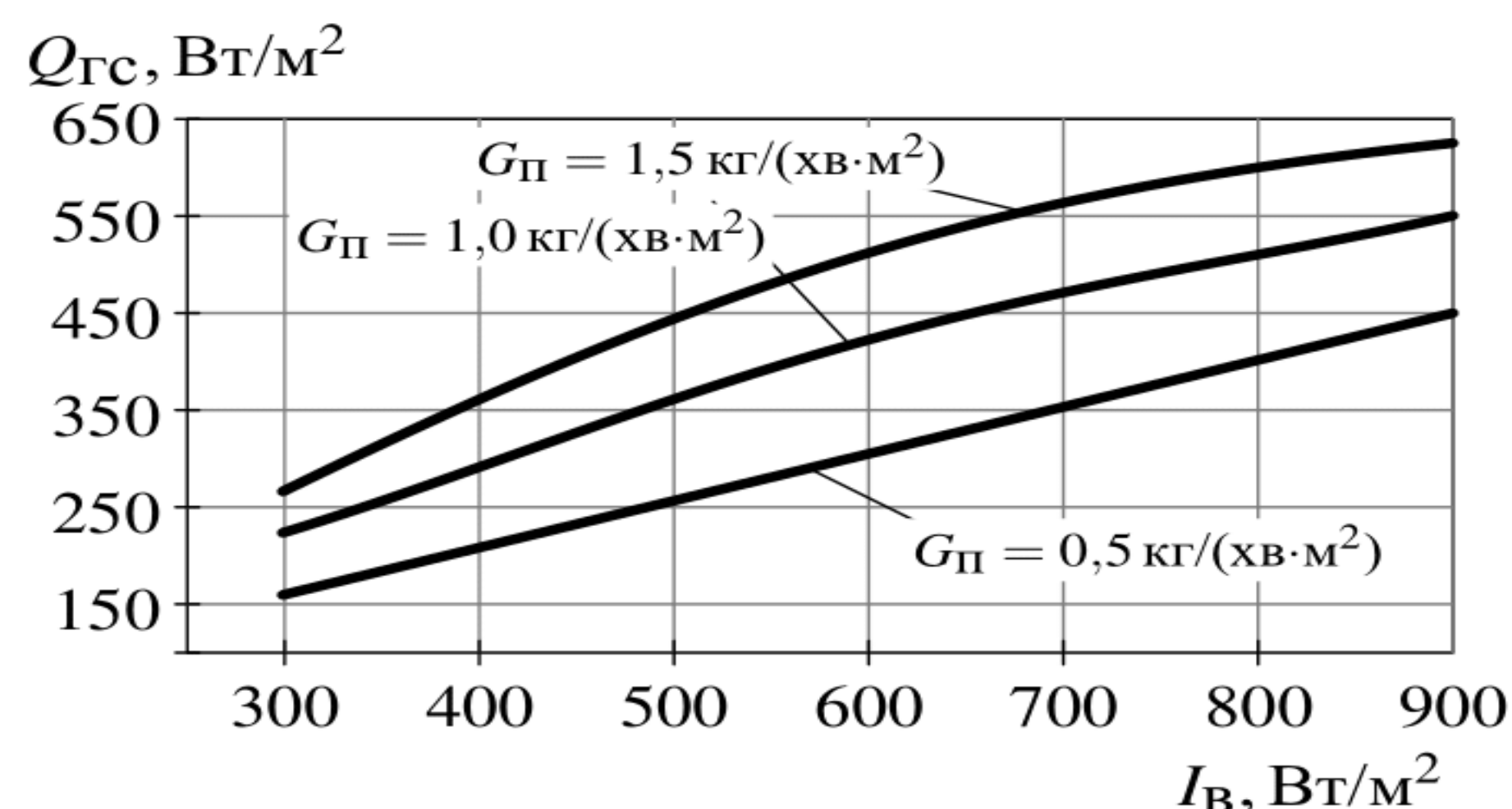


Рис. 4. Залежність миттєвої теплової потужності геліостіни  $Q_{ГС}$ , Вт/м<sup>2</sup>, в режимі прямої подачі теплоносія від густини потоку випромінювання  $I_B$ , Вт/м<sup>2</sup>, та питомої витрати теплоносія  $G_{П} = G/F_{ГС}$ , кг/(хв·м<sup>2</sup>)

Залежність ККД ССТ за накопиченням теплоти  $\eta_{ССТ}$  в СТ з природньою циркуляцією теплоносія від інтенсивності потоку випромінювання  $I_B$  та маси теплоносія в ТА  $m_{ТА}$

$$\eta_{ССТ} = -2,11 \cdot 10^{-7} \cdot I_B^2 - 1,6923 \cdot 10^{-5} \cdot I_B \cdot m_{ТА} + 6,75 \cdot 10^{-4} \cdot I_B + 2,2585 \cdot 10^{-3} \cdot m_{ТА}^2 - 6,5308 \cdot 10^{-2} \cdot m_{ТА} + 0,493.$$

Рівняння регресії:

$$Q_{ГС} = 0,005 - 8,333x_1 - 4,083x_2 + 62,834x_3 + 53,75x_4 - 4,25x_1x_2 + 0,375x_1x_3 + 0,5x_1x_4 - 0,25x_2x_3 - 2,625x_2x_4 + 41,5x_3x_4 + 129,265x_1^2 + 143,015x_2^2 + 137,265x_3^2 + 137,765x_4^2.$$

## Визначення впливу зовнішніх чинників на коефіцієнт корисної дії геліостіни

Складено центральний композиційний рототабельний план 2-го порядку

Таблиця 3.9 – Фактори, рівні та інтервали їх варіювання

Фактор	Позначення	Рівні відповідних факторів					Інтервал між рівнями
		-2	-1	0	+1	+2	
Швидкість потоку повітря $v$ , м/с	$x_1$	2	3	4	5	6	1
Напрямок потоку повітря $\psi$ , град	$x_2$	10	30	50	70	90	20
Густина потоку випромінювання $I_B$ , Вт/м <sup>2</sup>	$x_3$	100	300	500	700	900	200
Кут надходження променів $\beta$ , град	$x_4$	10	30	50	70	90	20

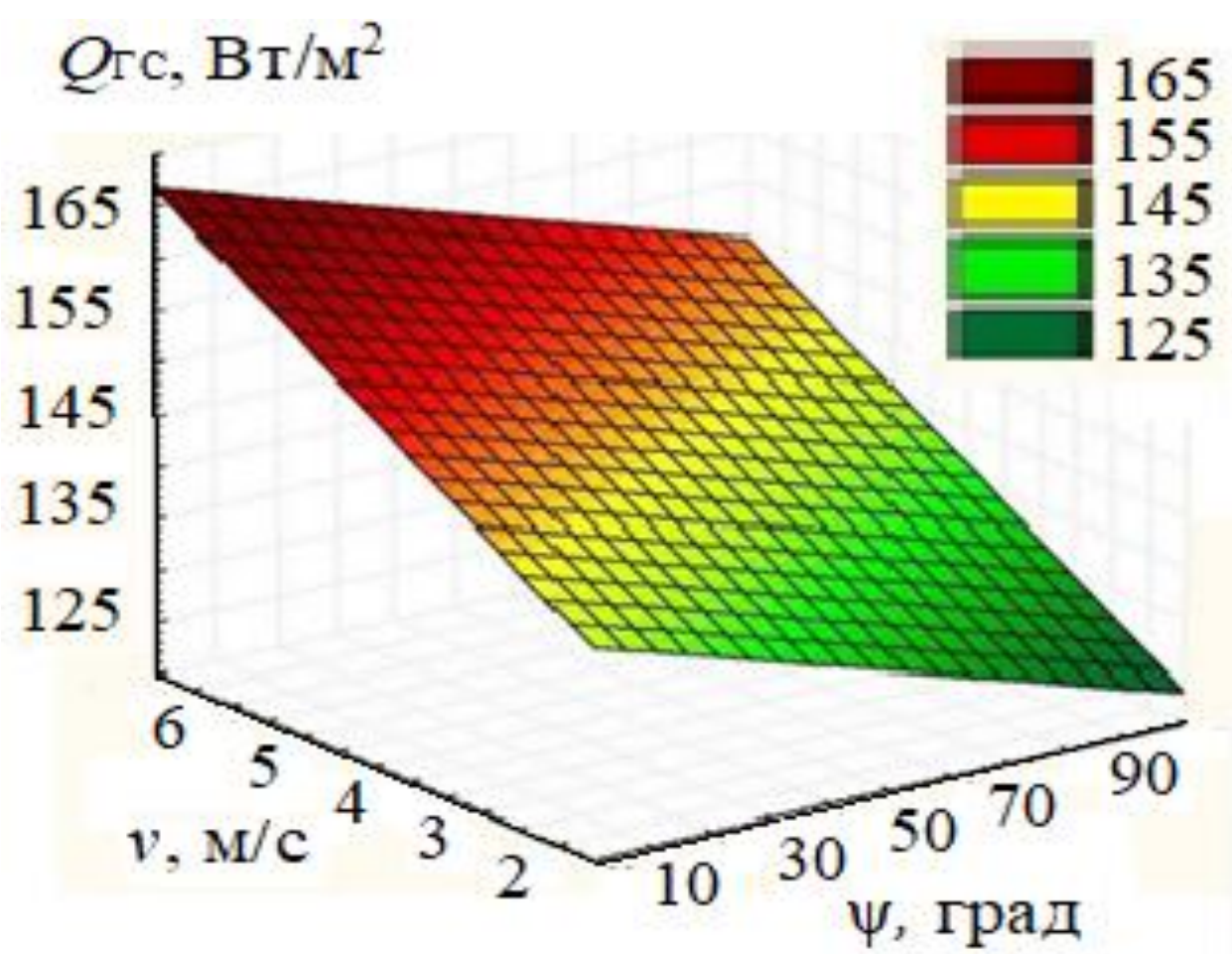


Рис.2. Залежність миттєвої теплової потужності ГС  $Q_{GS}$ , Вт/м<sup>2</sup> із гребінкою від напрямку та швидкості руху повітряного потоку за:  $d = 5$  мм;  $l = 5$  см;  $\delta = 1$  см;  $I_B = 700$  Вт/м<sup>2</sup> та  $\beta = 30^\circ$

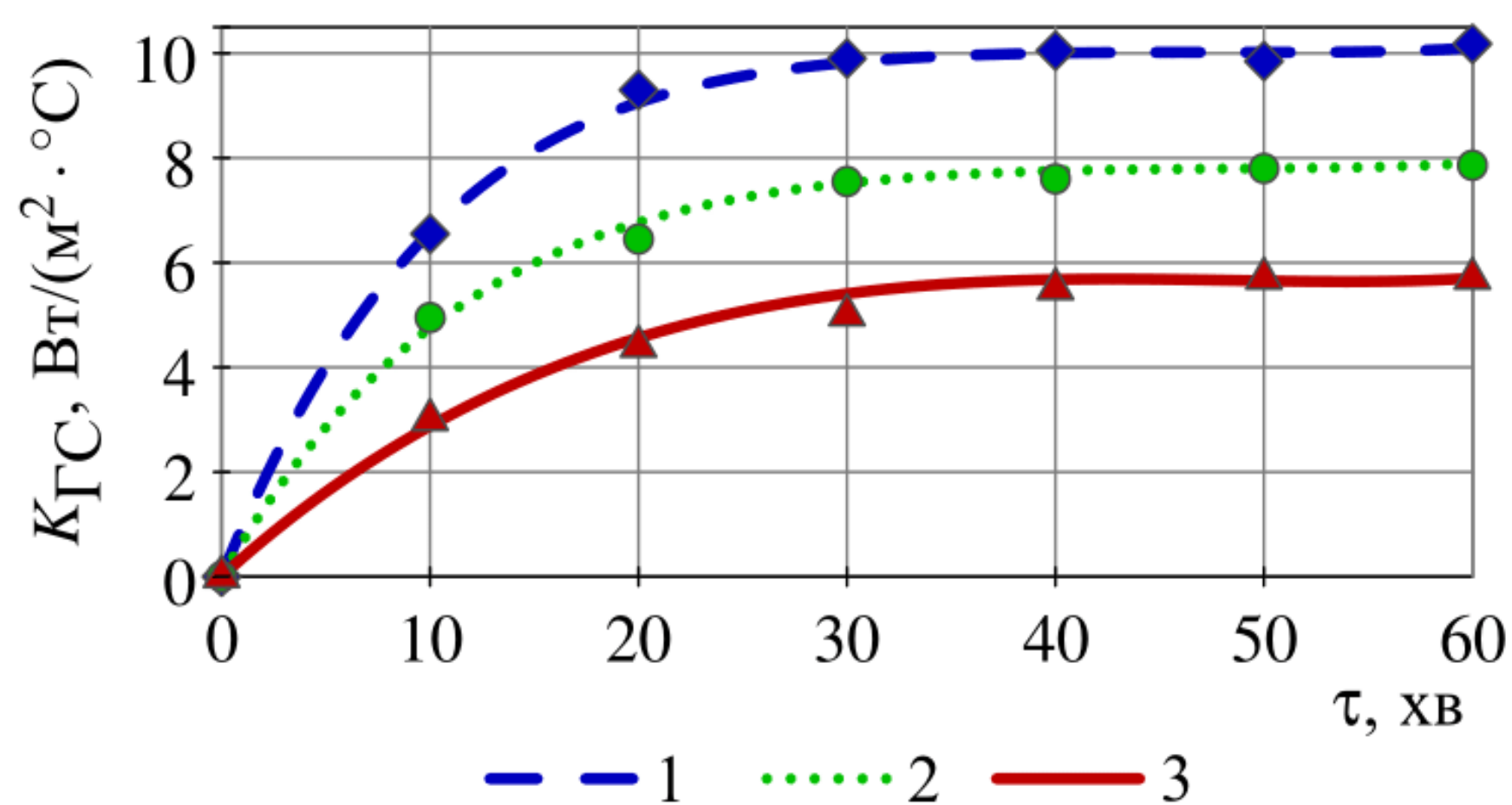


Рис.3. Усереднене значення коефіцієнта тепловтрат геліостіни  $K_{GS}$ , Вт/м<sup>2</sup> впродовж експериментів:  
1 – ВЦТ; 2 – ПЦТ; 3 - ППТ

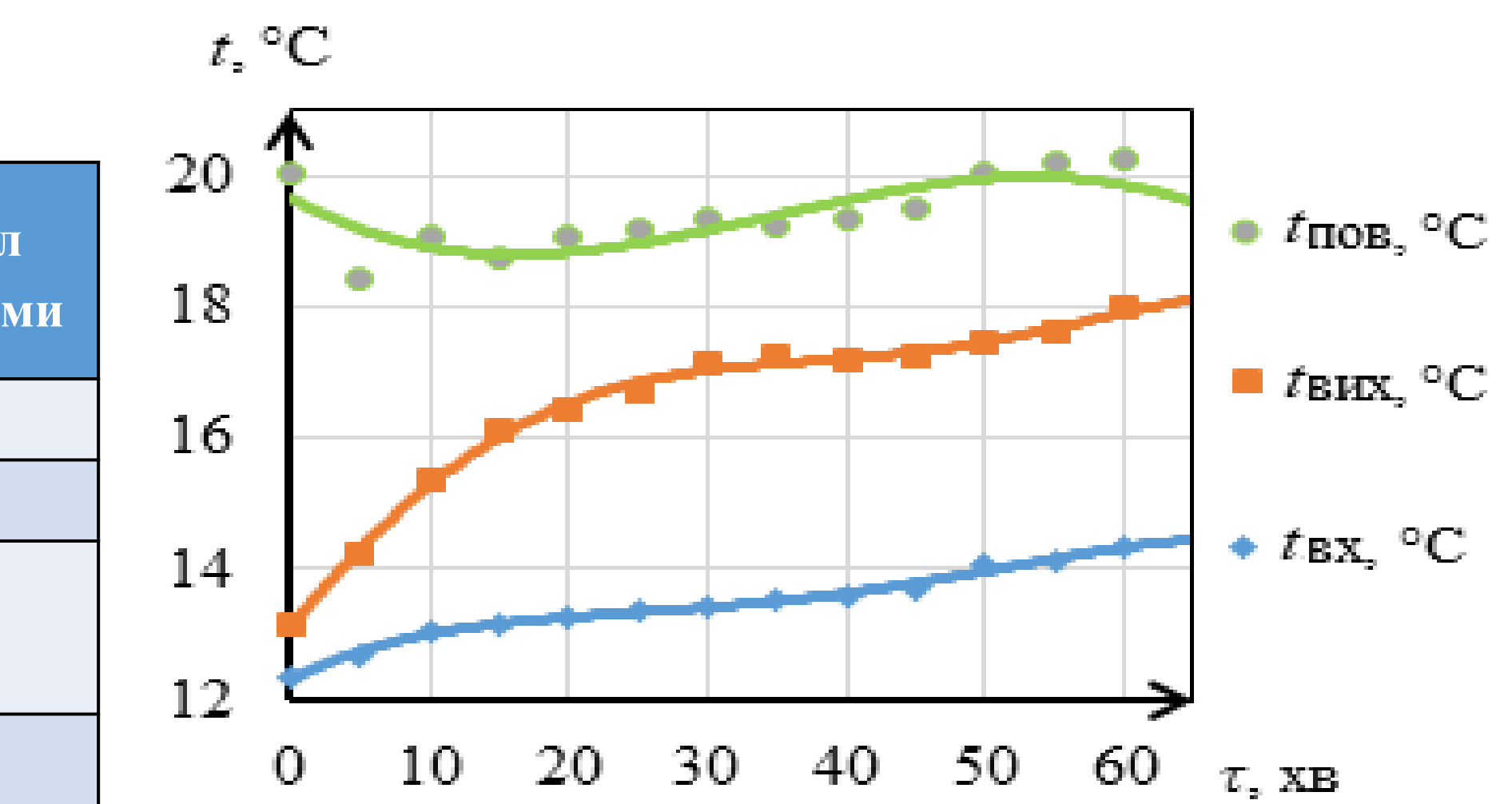


Рис.1. Температури теплоносія за дослідження ГС з теплопоглиначем із гребінкою в режимі ВЦТ за:  $d = 5$  мм;  $l = 5$  см;  $\delta = 1$  мм;  $G = 0,2$  кг/хв;  $v = 4$  м/с;  $m_{TA} = 15$  кг;  $\psi = 50^\circ$ ;  $\beta = 90^\circ$ ;  $I_B = 500$  Вт/м<sup>2</sup>

Регресійна модель питомої теплової потужності геліостіни:

$$y_1 = 0,005 - 8,333x_1 - 4,083x_2 + 62,834x_3 + 53,75x_4 - 4,25x_1x_2 + 0,375x_1x_3 + 0,5x_1x_4 - 0,25x_2x_3 - 2,625x_2x_4 + 41,5x_3x_4 + 129,265x_1^2 + 143,015x_2^2 + 137,265x_3^2 + 137,765x_4^2.$$

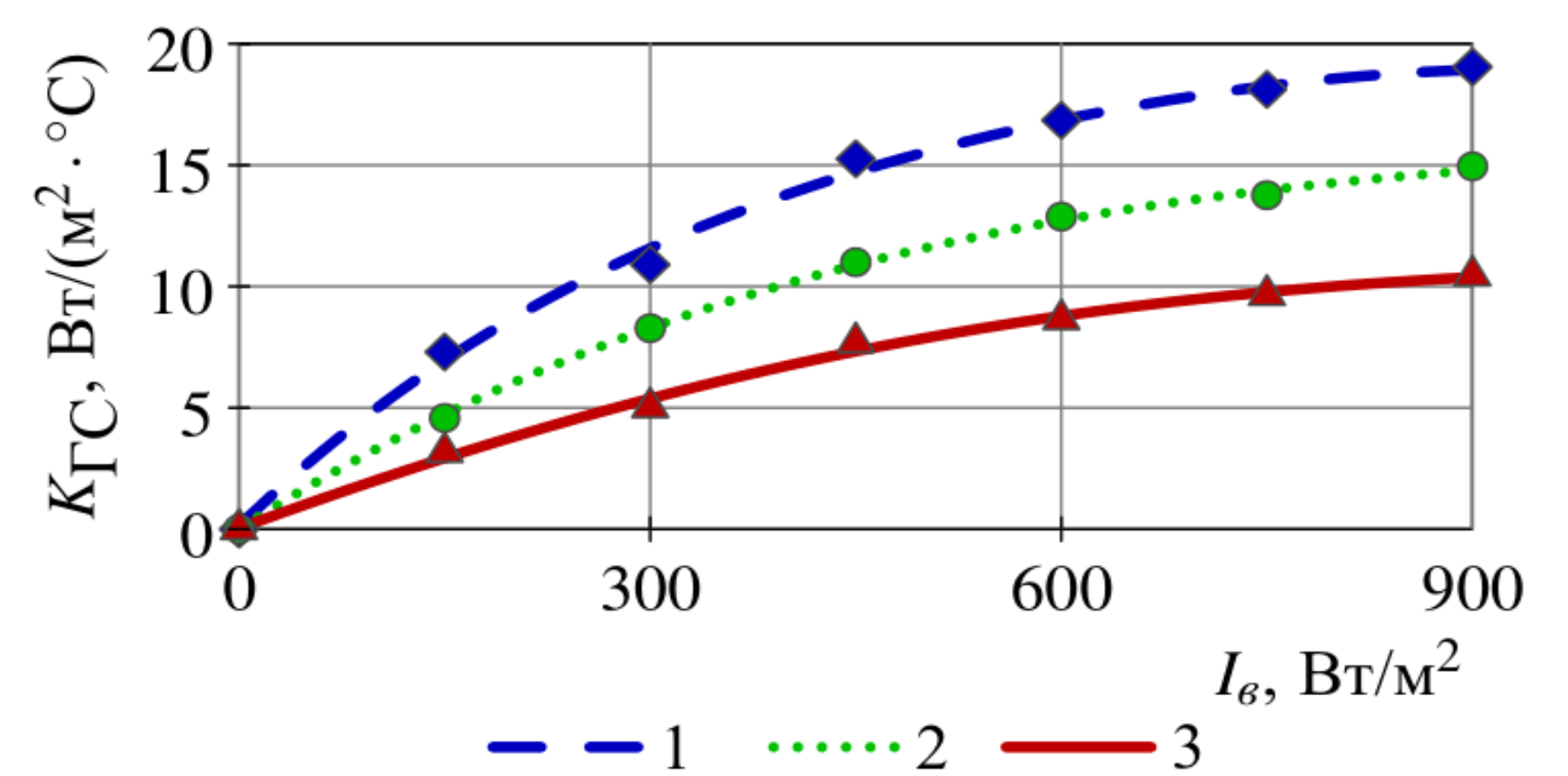


Рис.4. Залежність коефіцієнта тепловтрат геліостіни  $K_{GS}$  від густини потоку випромінювання  $I_B$  та швидкості потоку повітря  $v$ :  
1)  $v = 6$  м/с ; 2)  $v = 4$  м/с ; 3)  $v = 2$  м/с

## Розподіл температур на поверхні геліостіни

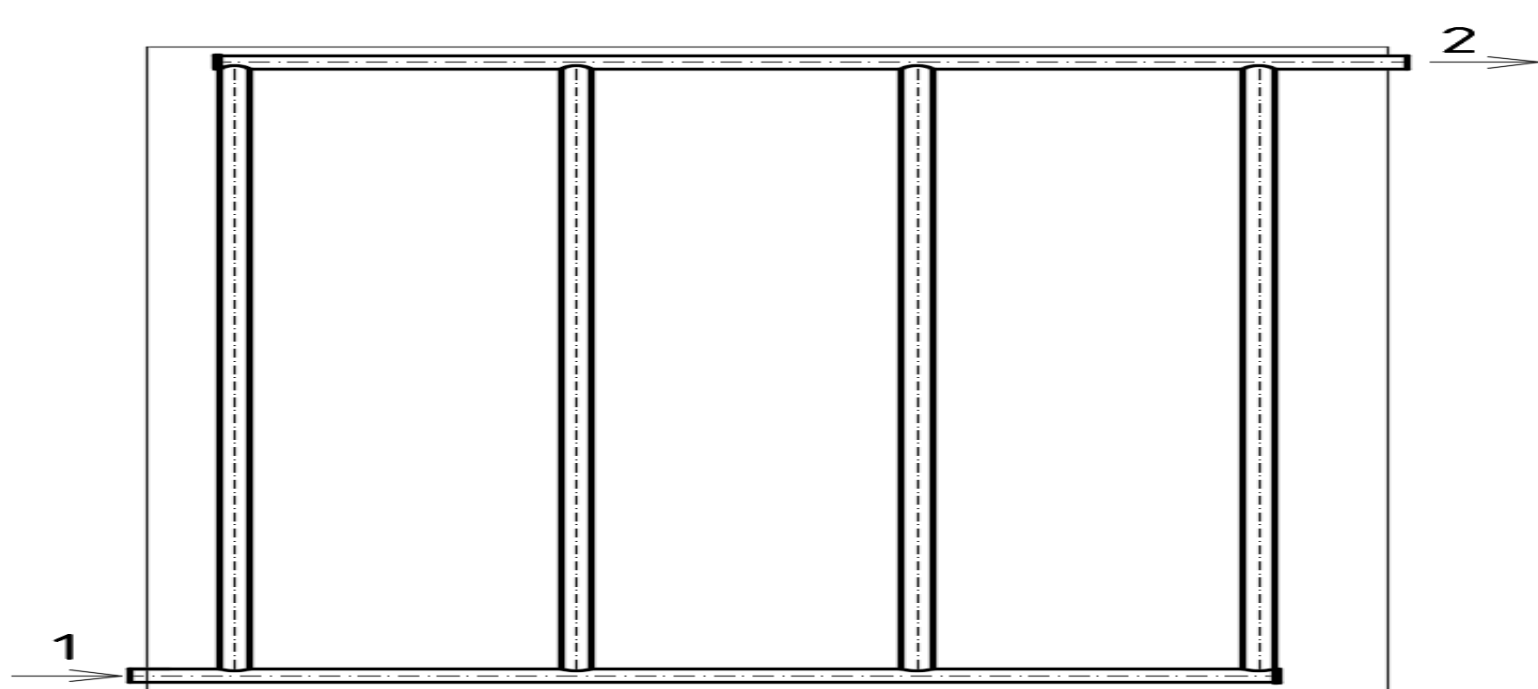


Рис.5. Схема конструкції геліостіни з гребінкою теплосприймачем

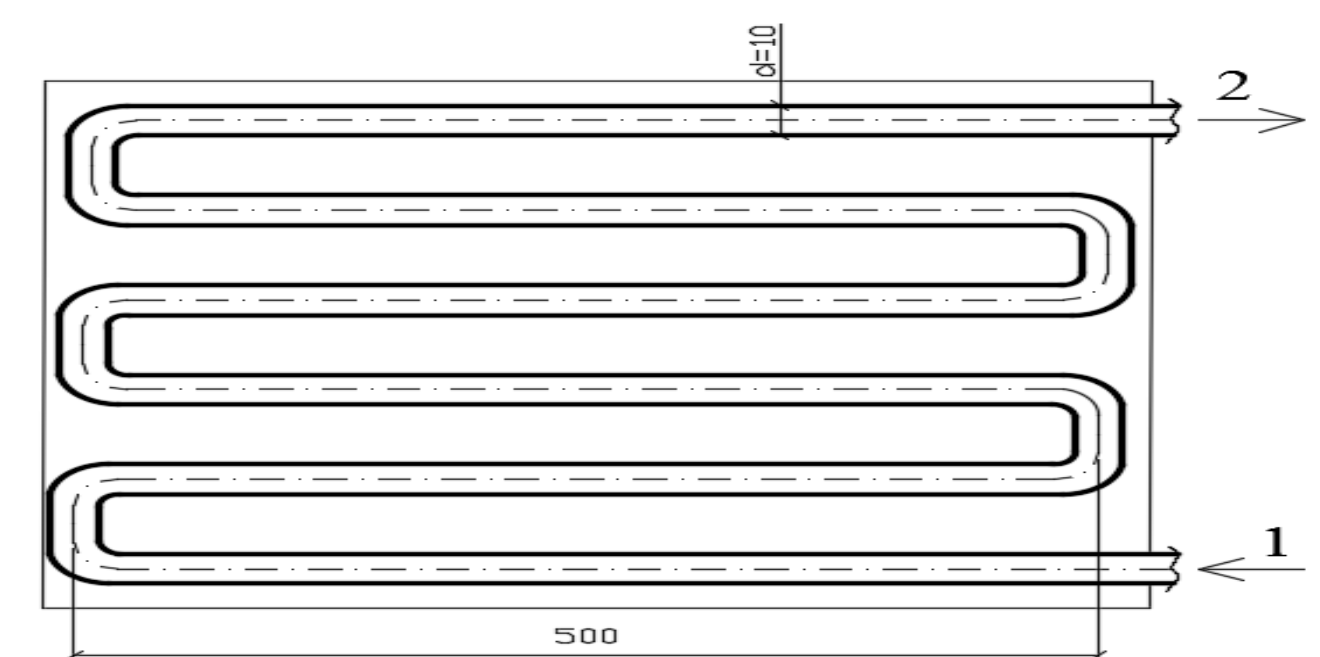


Рис.6. Схема конструкції геліостіни з змієвиком-теплосприймачем

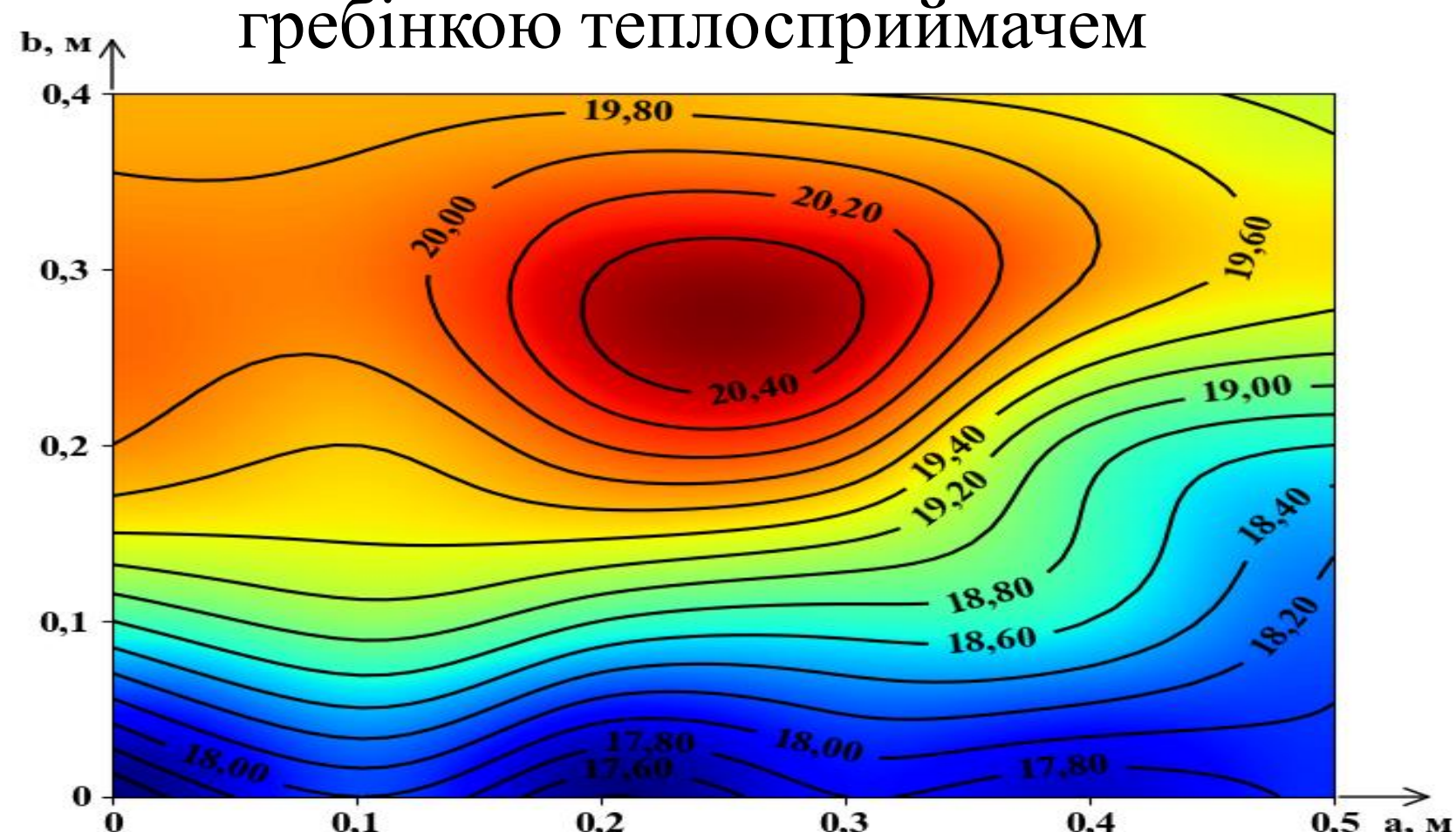


Рис.7. Розподіл температур на поверхні геліостіни з гребінкою теплосприймачем в режимі циркуляції при сталих  $d = 5$  мм;  $l = 20$  мм;  $x = 10$  см;  $I = 600$  Вт/м<sup>2</sup>;  $V = 0,015$  м<sup>3</sup>;  $\tau = 20$  хв

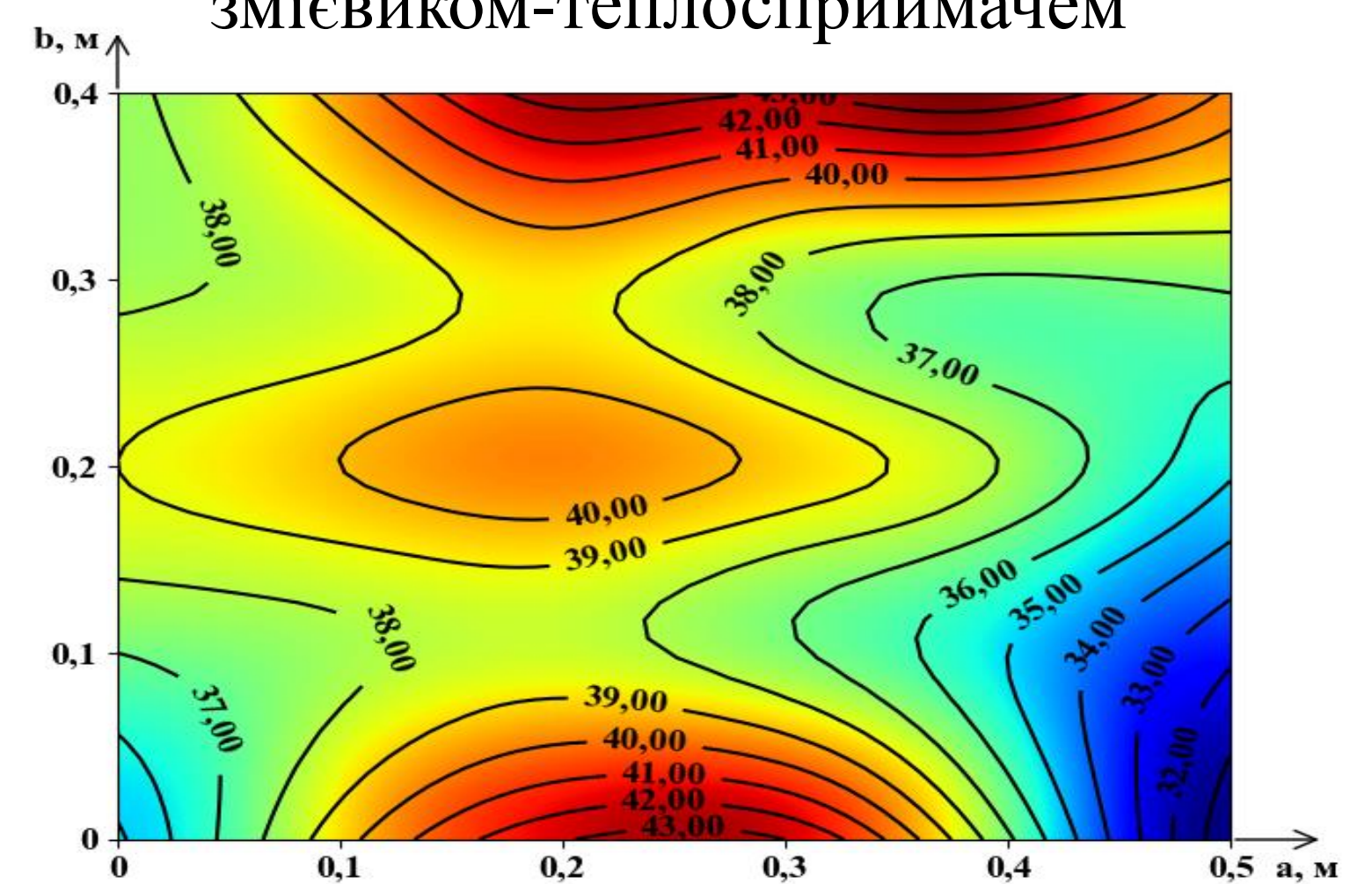


Рис.8. Розподіл температур на поверхні геліостіни із змієвиком-теплосприймачем в режимі циркуляції при сталих  $d = 10$  мм;  $l = 10$  мм;  $x = 20$  см;  $I = 600$  Вт/м<sup>2</sup>;  $V = 0,015$  м<sup>3</sup>;  $\tau = 20$  хв

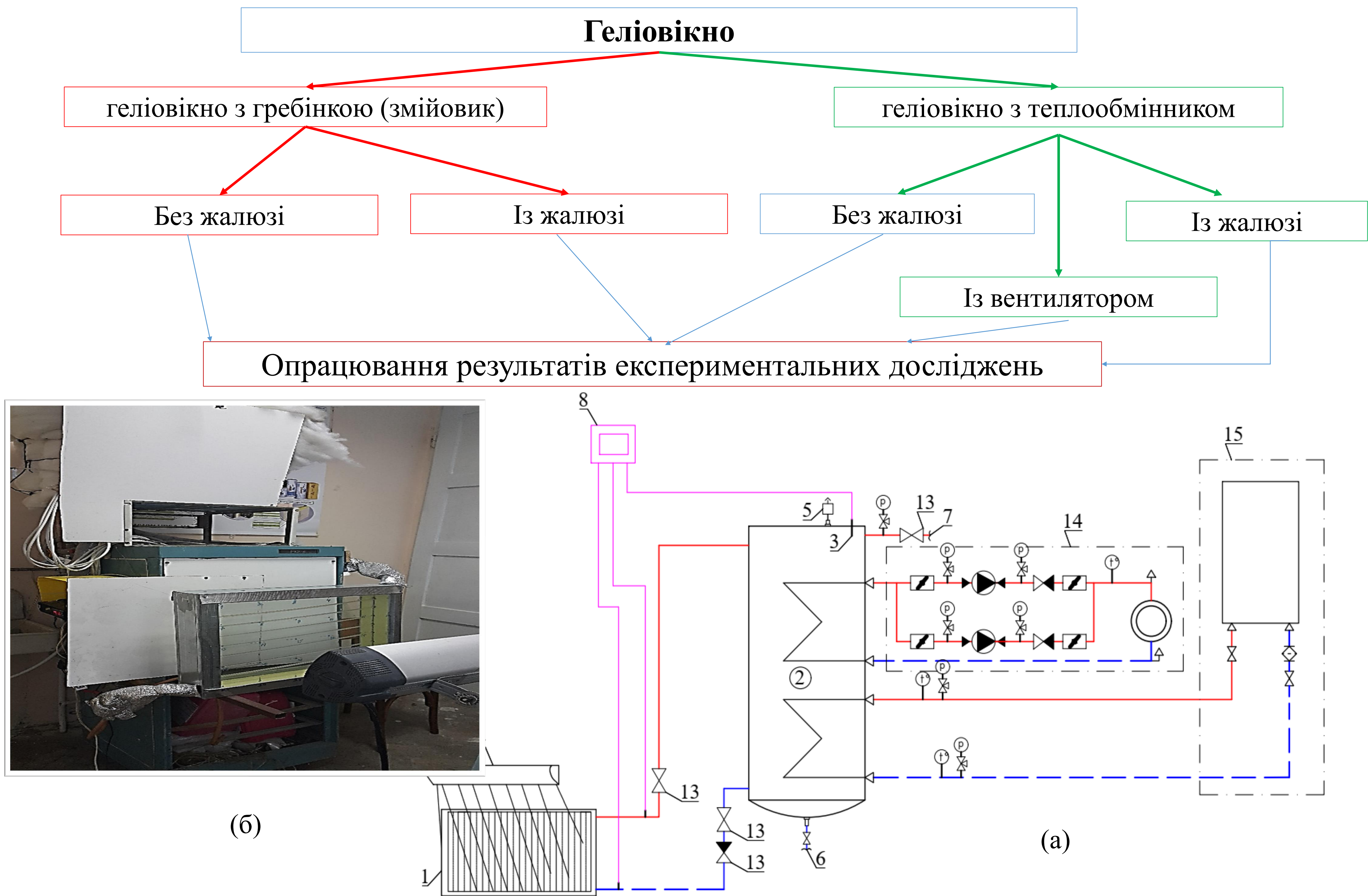


Рис.1 – Принципова схема (б) та фото (а) експериментальної установки для досліджень в режимі циркуляції та гравітації:  
 1 – геліопокриття; 2 – бак-акумулятор; 3 – опорні термометри; 4 – джерело випромінювання; 5 – повітровипускник;  
 6 – патрубок зливу теплоносія; 7 – патрубок подачі води споживачу; 8 – дисплей; 9 – прозоре покриття; 10 – трубки циркуляції теплопоглинача; 11 – теплогільничка (профнастил); 12 – теплоізоляція; 13 – запірно-регулювальна арматура;  
 14 – насосна група; 15 – насосна група котла

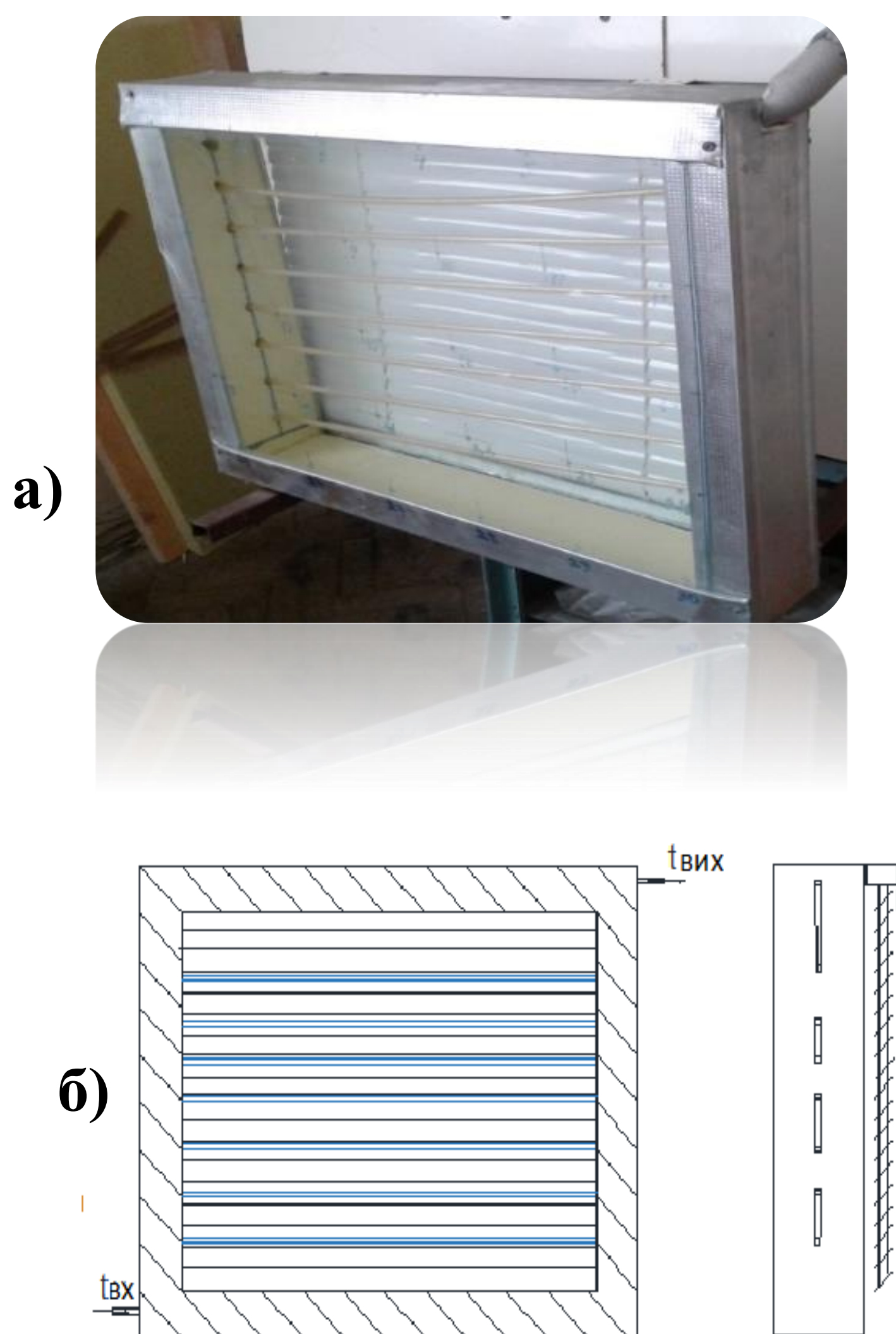


Рис. 2. Фото (а) та схема (б) геліовікна з гребінкою та жалюзіями

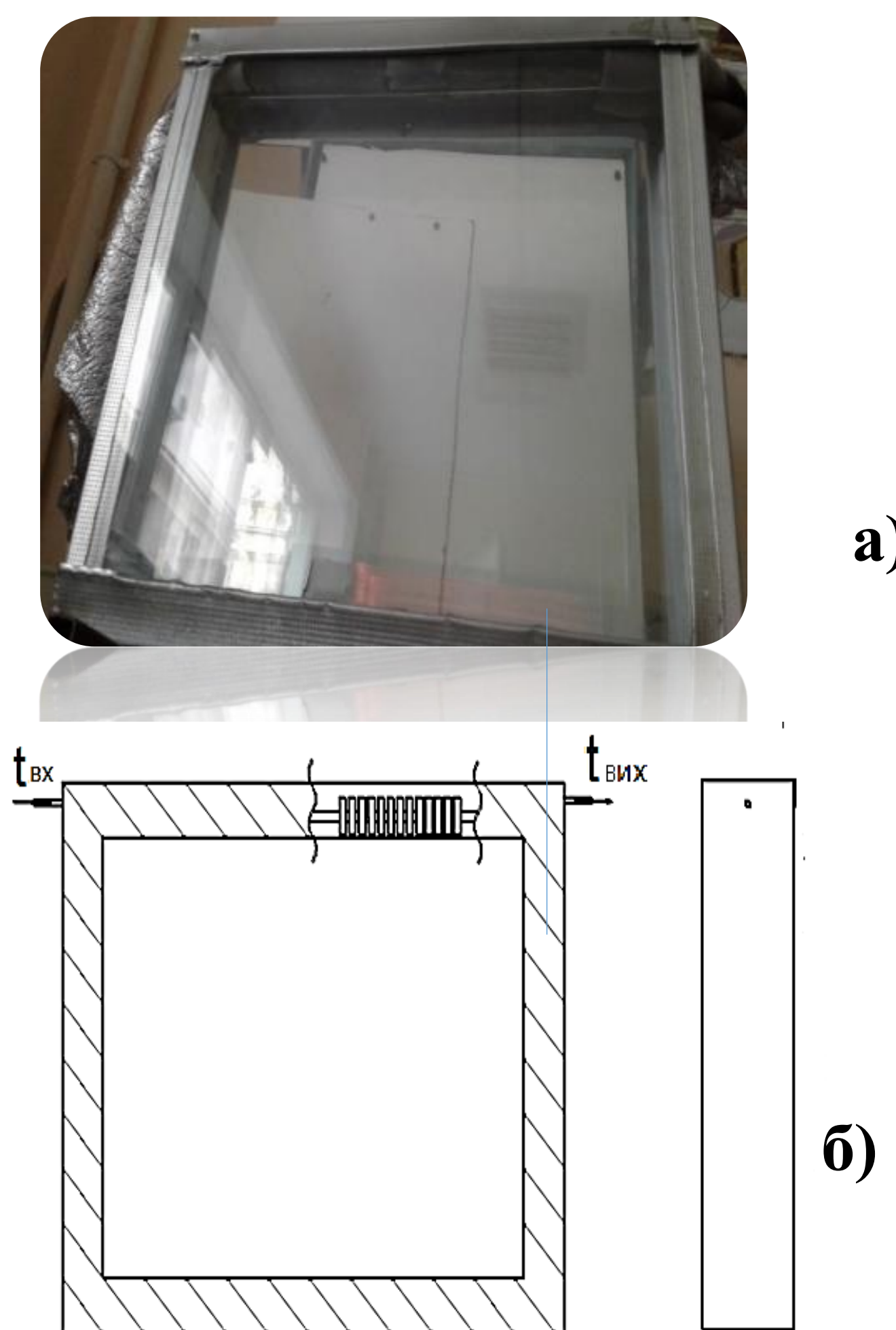


Рис. 3. Фото (а) та схема (б) геліовікна з теплообмінником

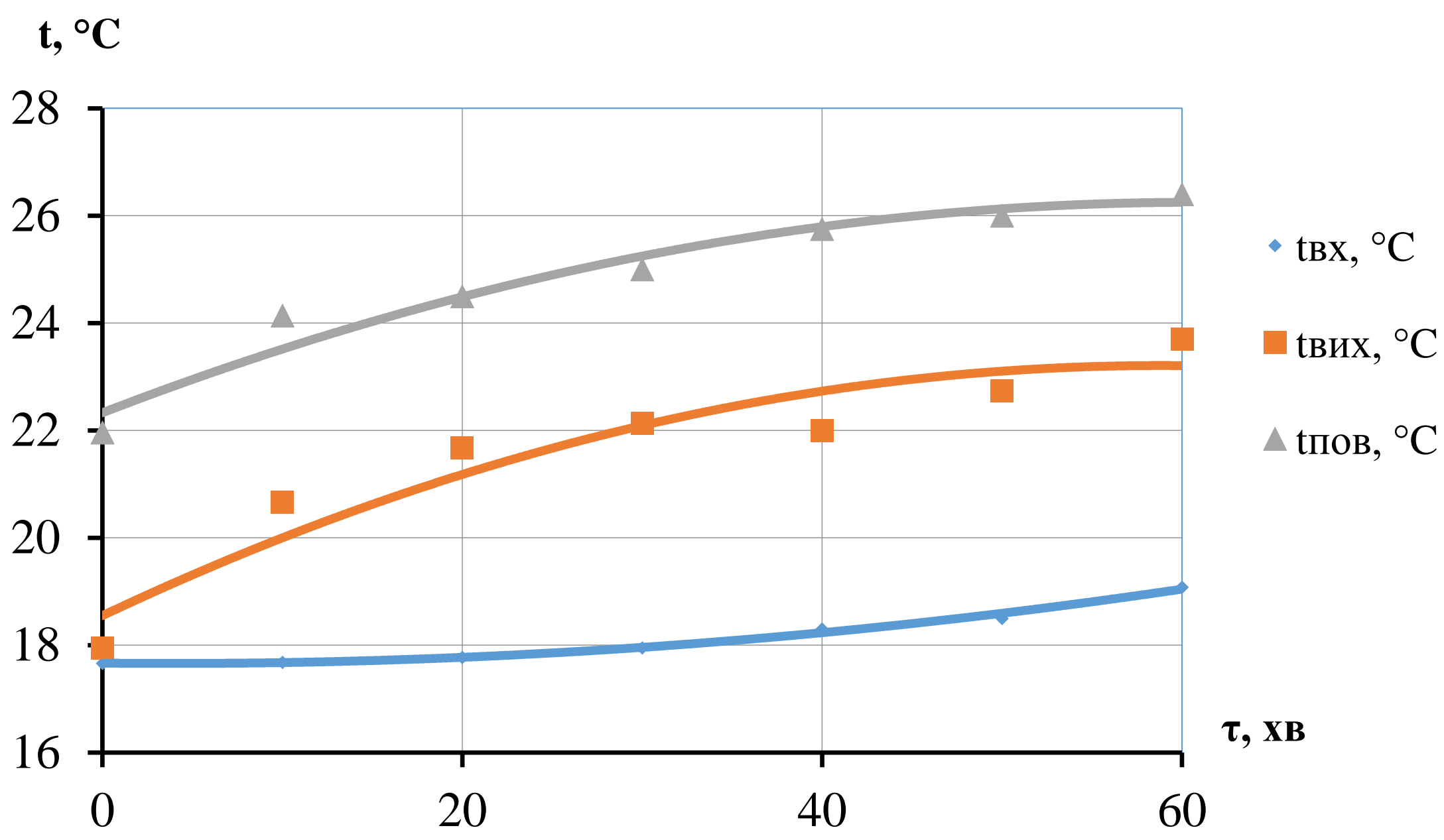


Рис. 1. Зміна температури теплоносія на вході і виході з геліовікна та температура оточуючого середовища впродовж експерименту

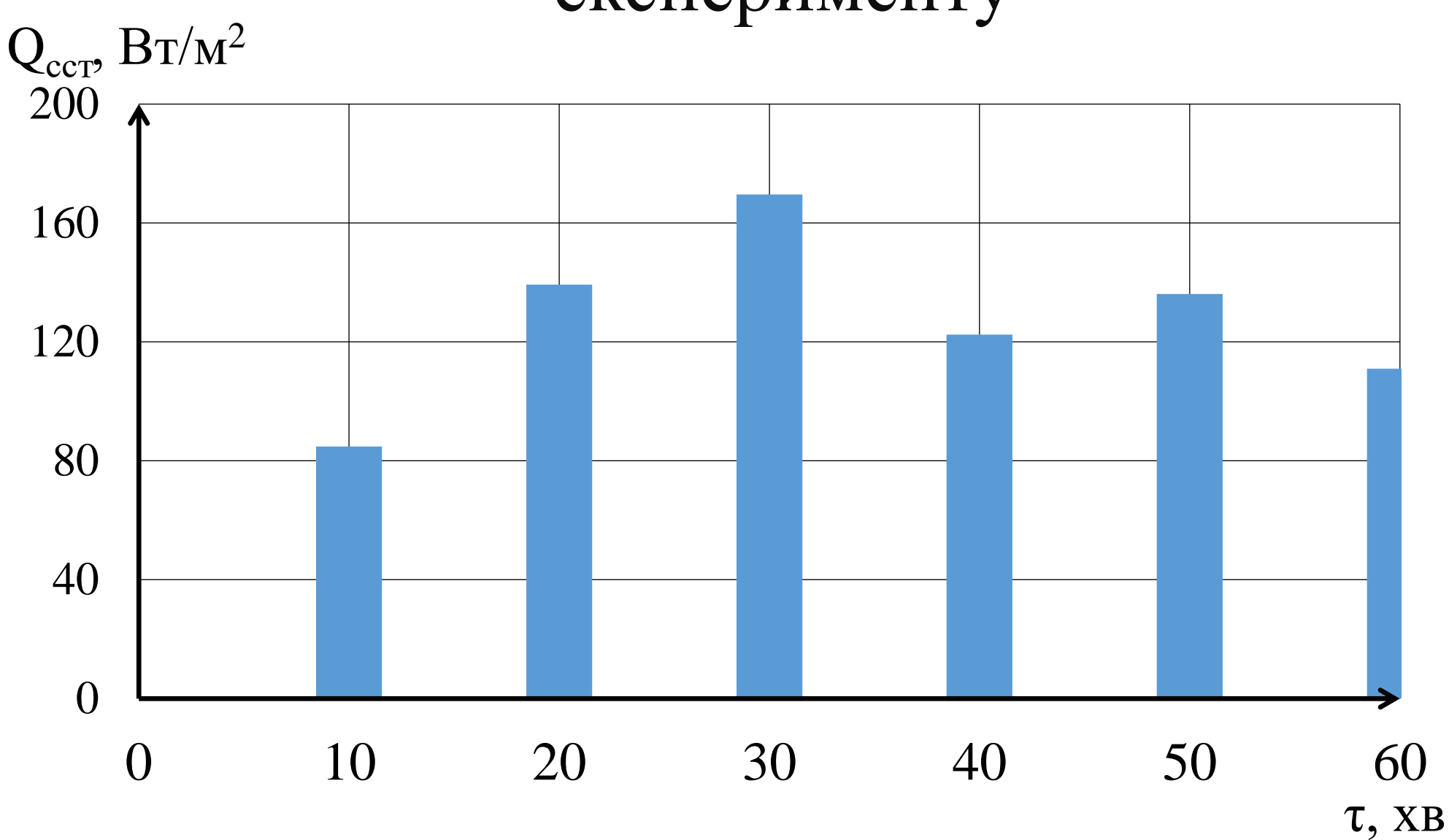


Рис. 3. Зміна питомої теплової потужності ССТ  $Q_{сст}$ ,  $Вт/м^2$

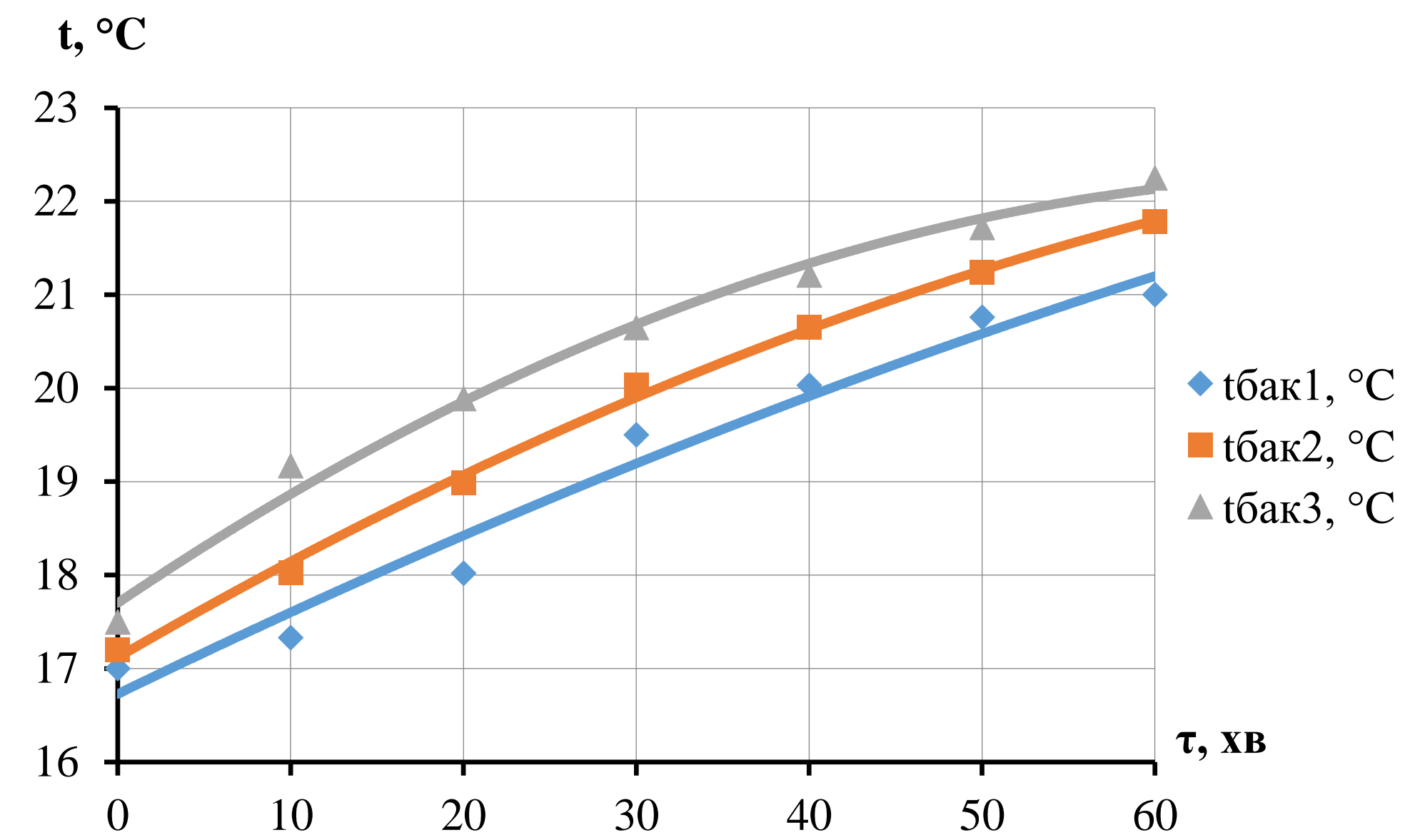


Рис. 2. Зміна температури у теплому акумуляторі залежно від часу нагріву

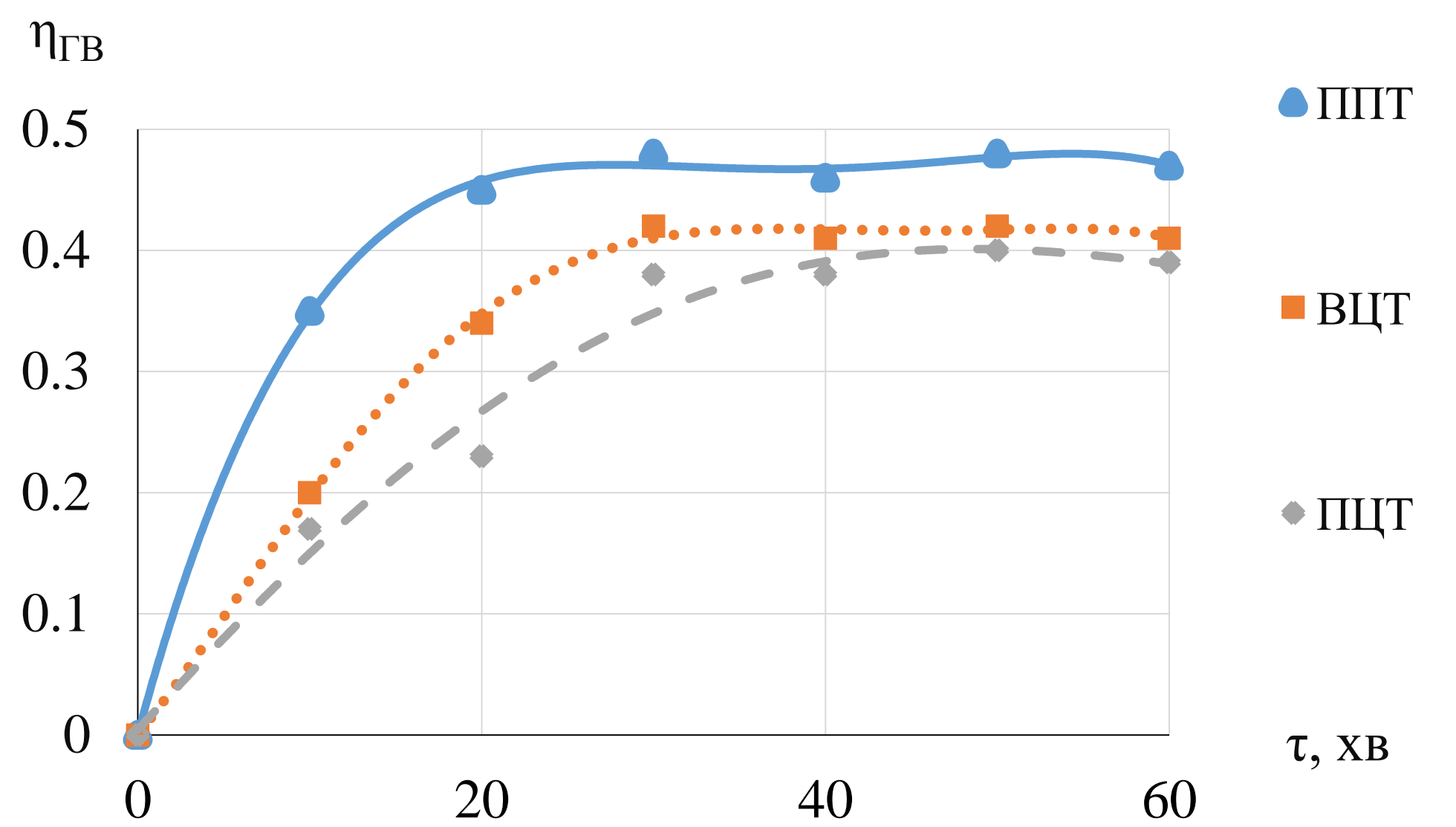


Рис. 4. Зміна  $\eta_{ГВ}$  геліовікна протягом експерименту залежно від режиму руху теплоносія

Результати експериментальних досліджень теплової ефективності геліовікна із жалюзі

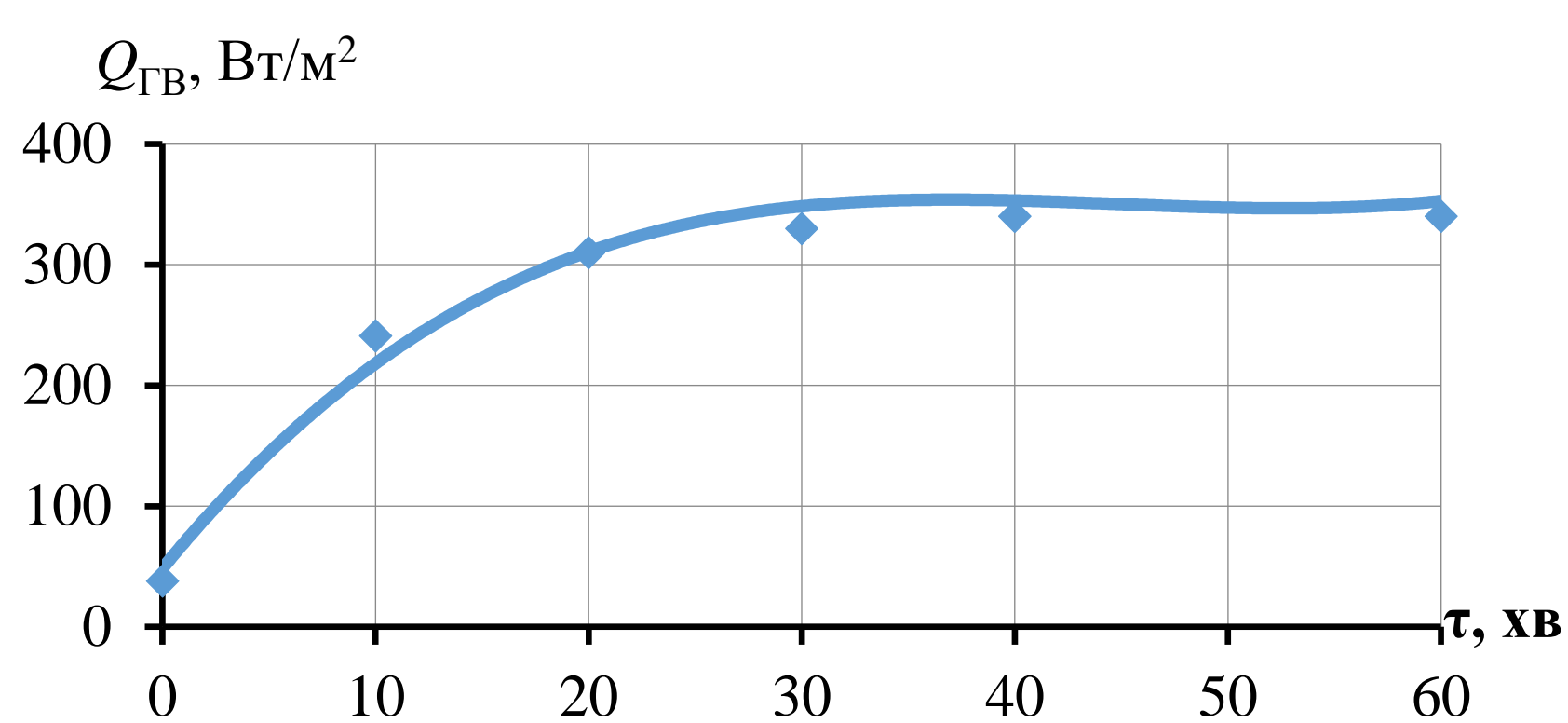


Рис. 5. Миттєва потужність СК  $Q_{ГВ}$ ,  $Вт/м^2$  (ВЦТ)

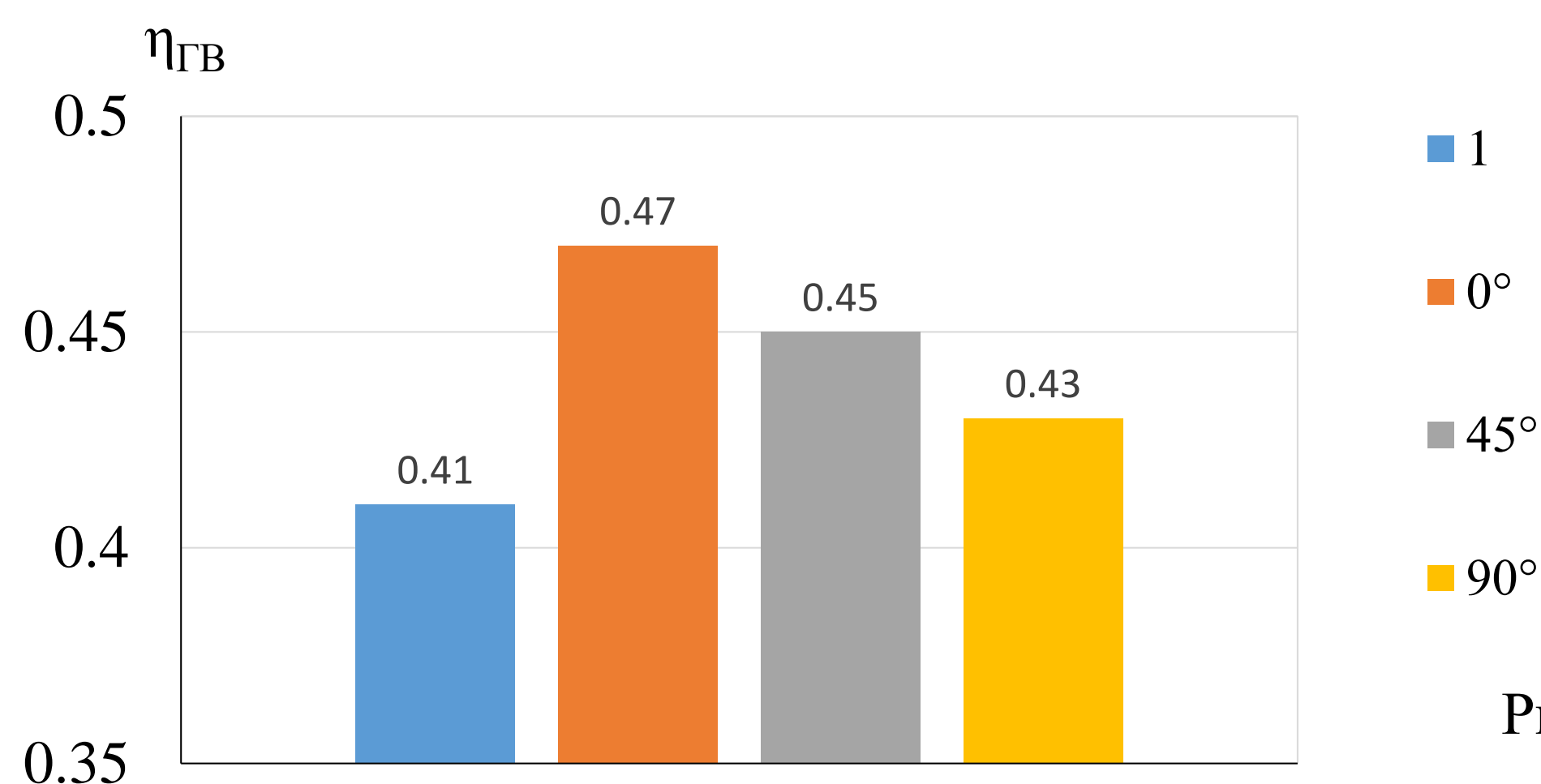


Рис.7. Усереднене значення ККД геліовікна (1 – ГВ без жалюзі)

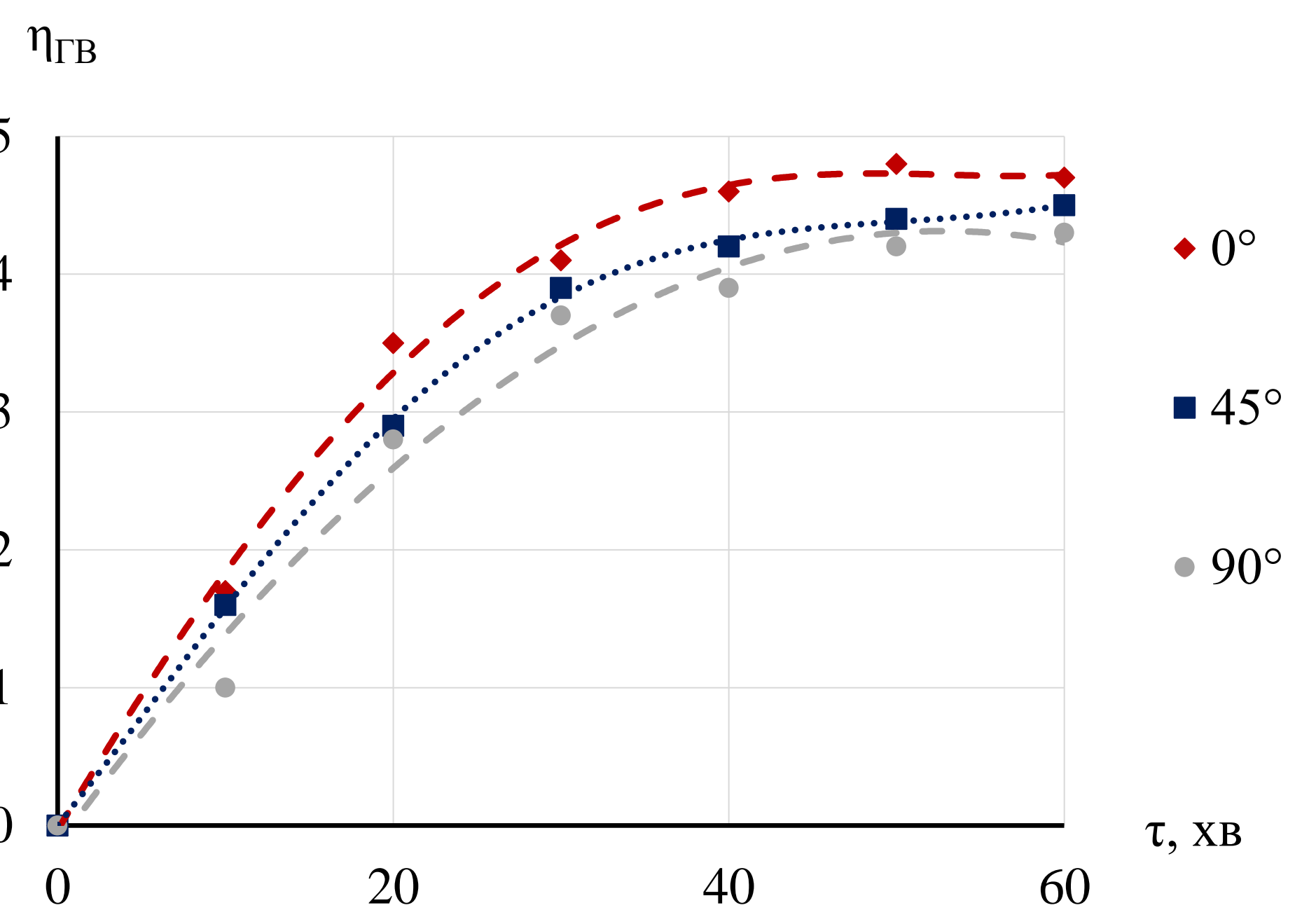


Рис.6. Зміна ККД  $\eta_{ГВ}$  геліовікна впродовж експерименту залежно від кута відкриття жалюзі

## Результати експериментальних досліджень

Таблиця 1

Значення	$Q_{ск}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$Q_{сст}$ , Вт/м <sup>2</sup> (мит)	$Q_{сст}$ (заг), Вт/м <sup>2</sup>	$\Sigma Q_{випр}$ , кДж/м <sup>2</sup>	$\eta_{ск}$	$\eta_{сст}$ (в цілому)	$\eta_{сст}$ (за накопич)
Середнє	170	140	517	630	0,57	0,69	0,68
Мінімальне	149	116	152	180	0,50	0,56	0,66
Максимальне	182	164	837	1080	0,61	0,83	0,74

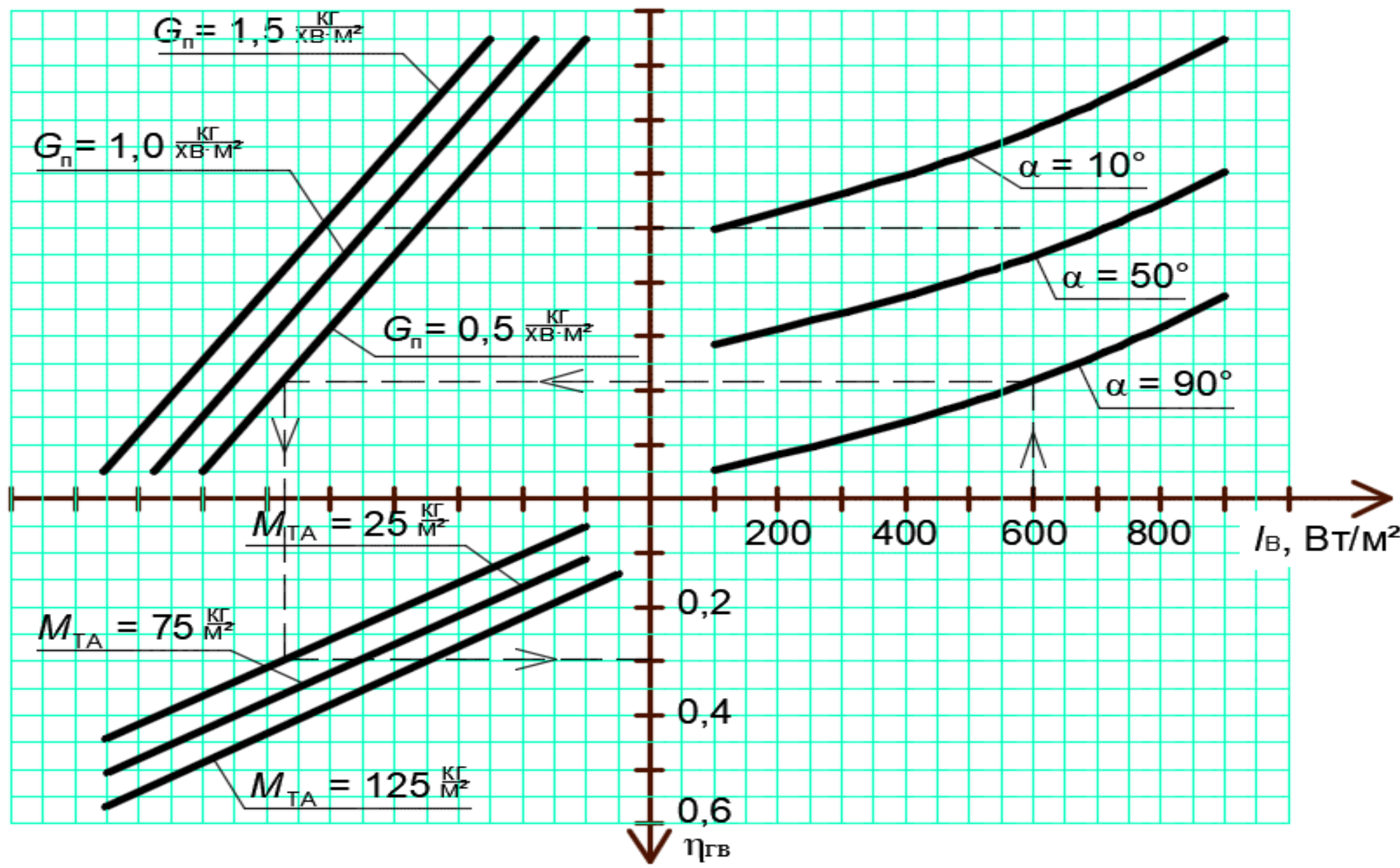


Рис.1. Номограма залежності ККД геліовікна  $\eta_{ГВ}$  від густини  $I_{в}$ , Вт/м<sup>2</sup> та кута надходження потоку випромінювання  $\alpha$ , град, питомої витрати теплоносія  $G_n = G/F_{ГС}$ , кг/(хв·м<sup>2</sup>), а також співвідношення маси теплоносія в ТА до площі геліовікна  $M_{ТА} = m_{ТА}/F_{ГВ}$ , кг/м<sup>2</sup>

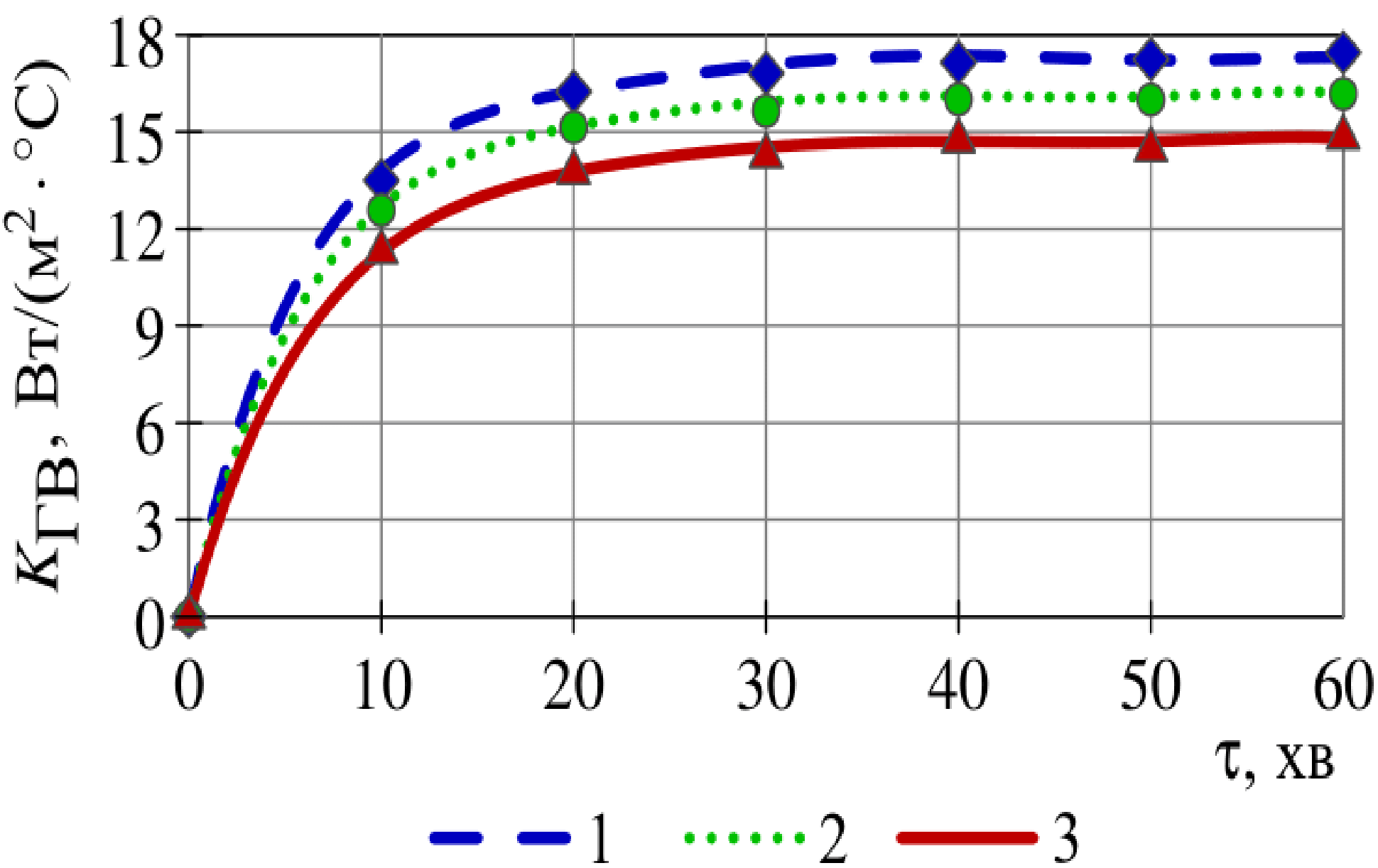


Рис.2. Усереднене значення коефіцієнта тепловтрат геліовікна  $K_{ГВ}$  впродовж експерименту: 1 – ВЦТ; 2 – ПЦТ; 3 – ППТ

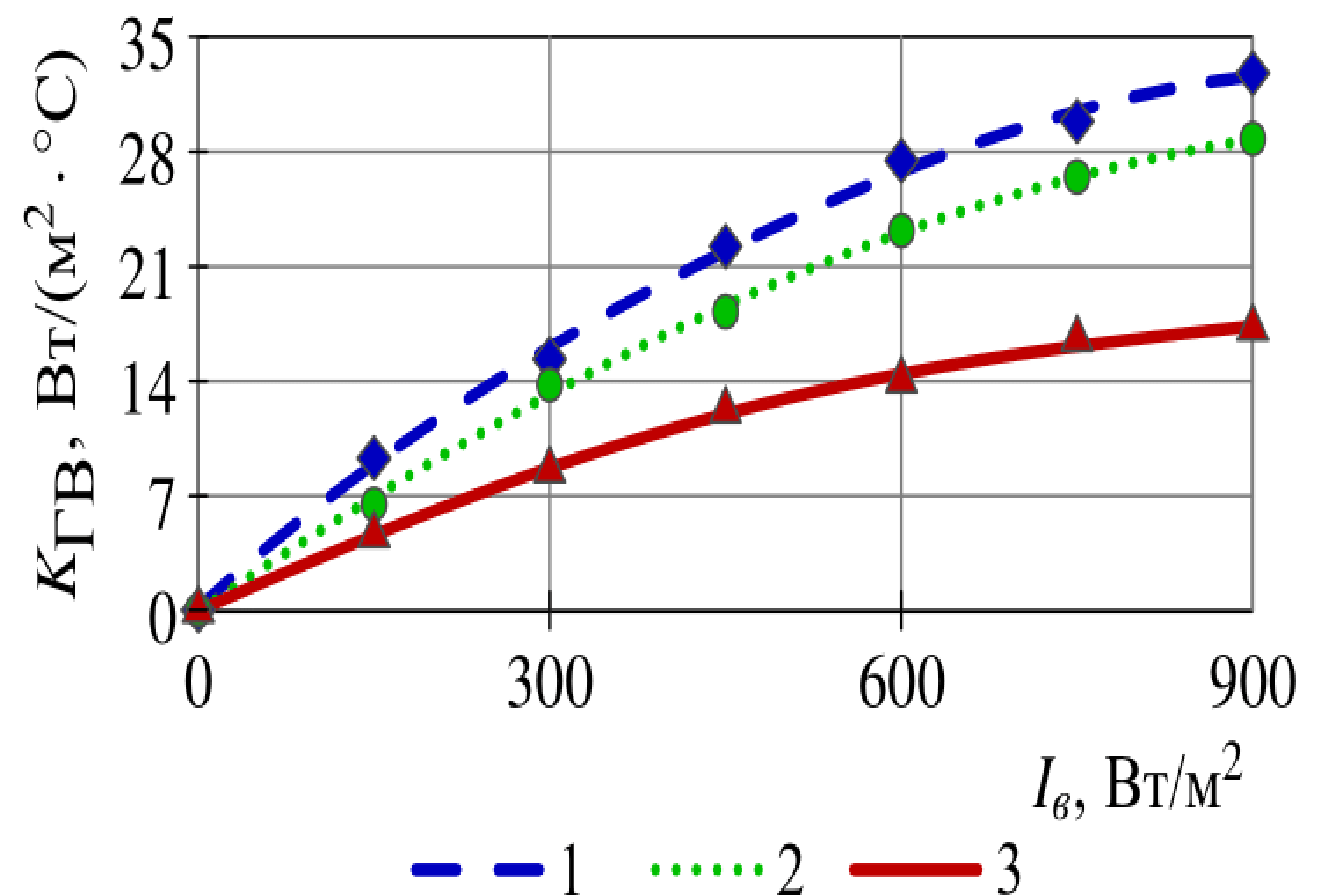


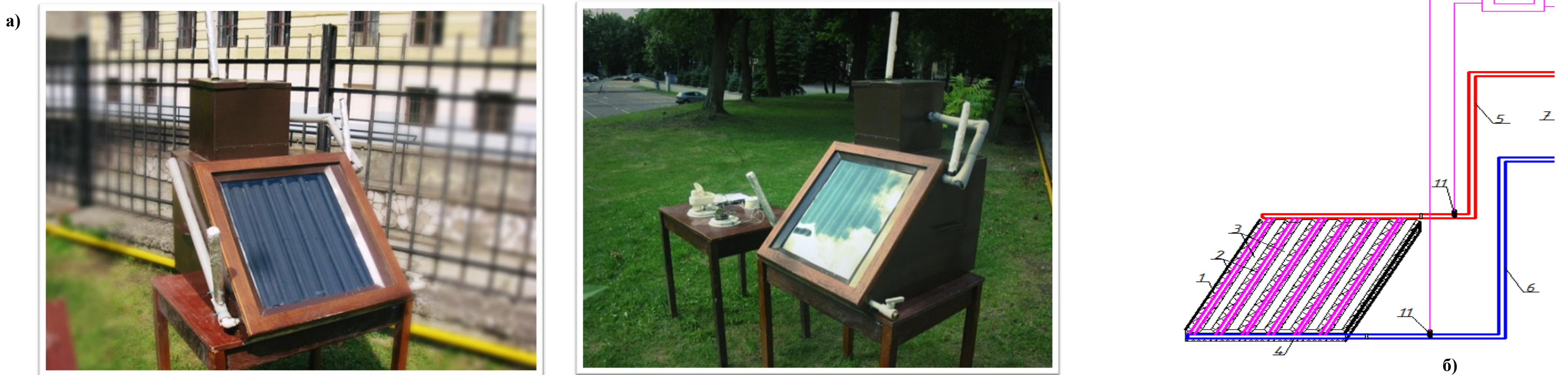
Рис.3. Залежність коефіцієнта тепловтрат геліовікна  $K_{ГВ}$  від густини потоку випромінювання  $I_{в}$  та швидкості потоку повітря: 1)  $v = 6$  м/с; 2)  $v = 4$  м/с; 3)  $v = 2$  м/с

Таблиця 2 - Порівняння ККД розроблених ІЕГІЗЗБ

Назва ЗОПСЕТ	Режим руху теплоносія	ККД
Геліопокриття	Вимушена циркуляція теплоносія	0,67
	Природна циркуляція теплоносія	0,57
	Пряма подача теплоносія	0,71
Геліостіна	Вимушена циркуляція теплоносія	0,59
	Природна циркуляція теплоносія	0,51
	Пряма подача теплоносія	0,67
Геліовікно	Вимушена циркуляція теплоносія	0,41
	Природна циркуляція теплоносія	0,39
	Пряма подача теплоносія	0,47



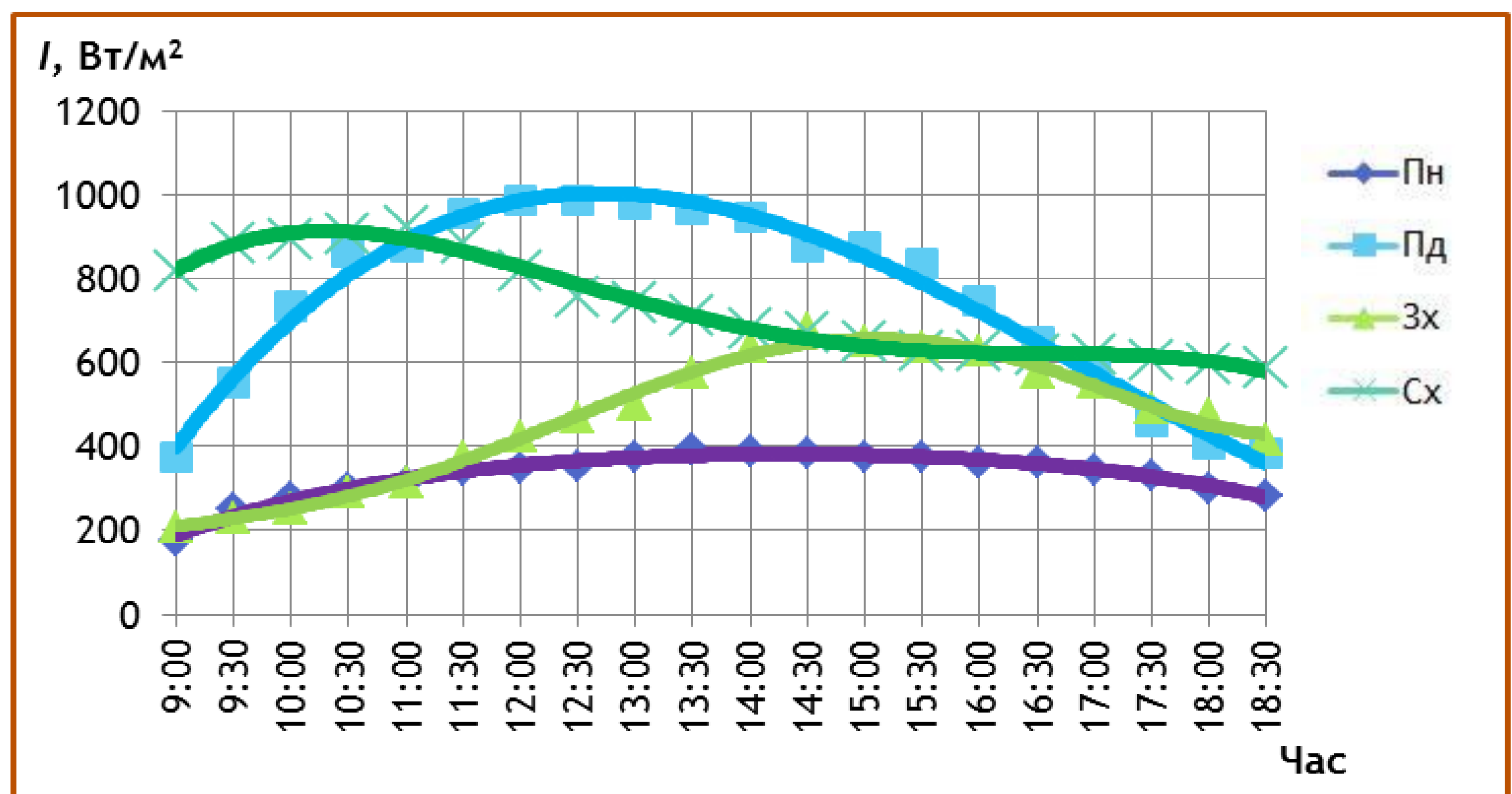
**Рис. 1** Фото (а) та схема (б) експериментальної установки для досліджень геліопокрівлі в режимі потоку:  
 1 – геліопокрівля; 2 – ємність з холодною водою; 3 – бак-акумулятор; 4 – термометри; 5 – патрубок подачі холодної води;  
 6 – патрубок відбору теплоносія; 7 – запірний вентиль.



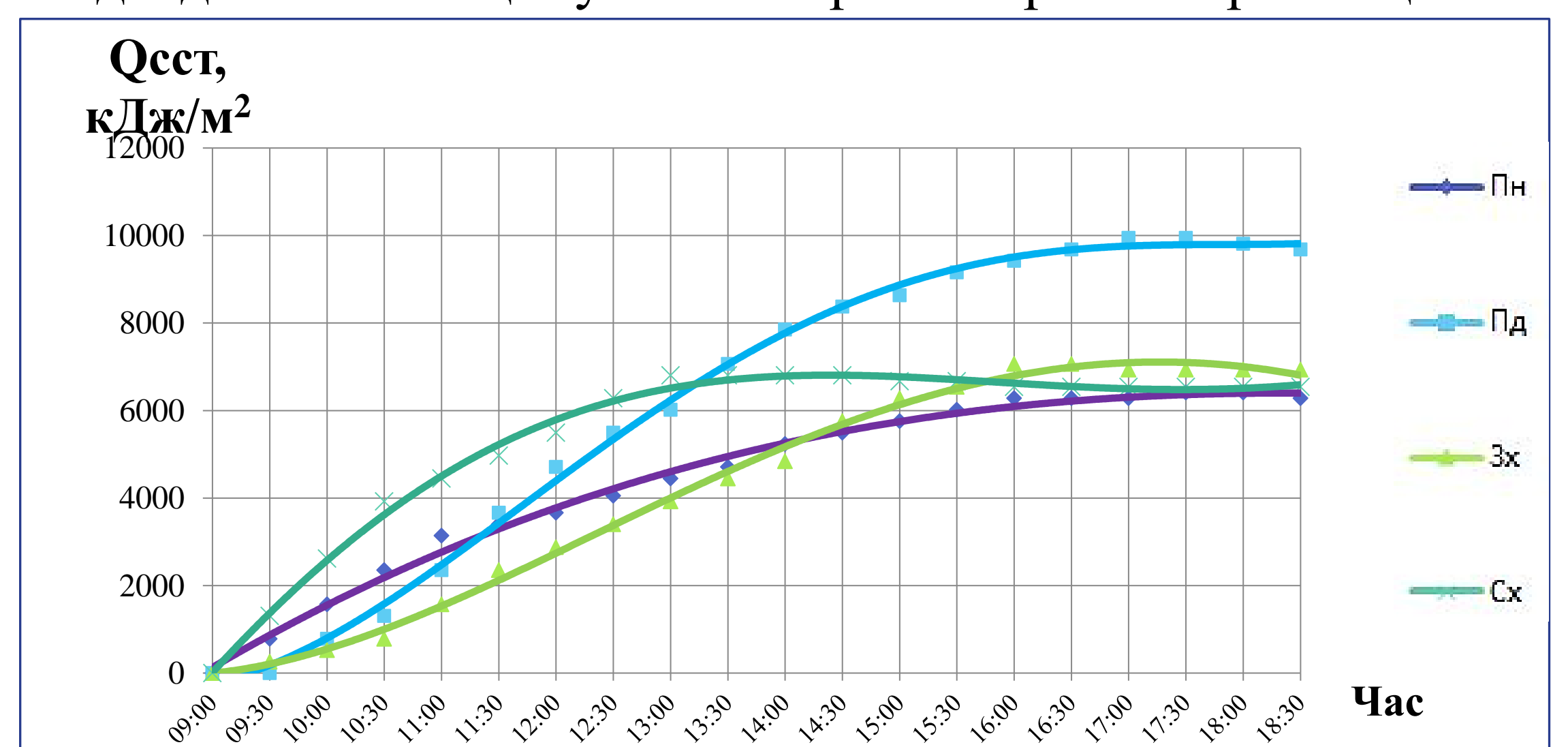
**Рис. 2** Фото (а) та схема (б) експериментальної установки для досліджень геліопокрівлі в режимі гравітації та циркуляції 1 – геліопокрівля; 2 – трубки контуру циркуляції; 3 – покрівельний матеріал будівлі; 4 – теплоізоляція; 5 – подаючий трубопровід; 6 – зворотний трубопровід; 7 – бак-акумулятор; 8 – патрубок відбору теплоносія; 9 – повітровипускний клапан; 10 – патрубок зливу теплоносія; 11 – термометри опору; 12 – джерело випромінювання; 13 – дисплей

**Таблиця 1**

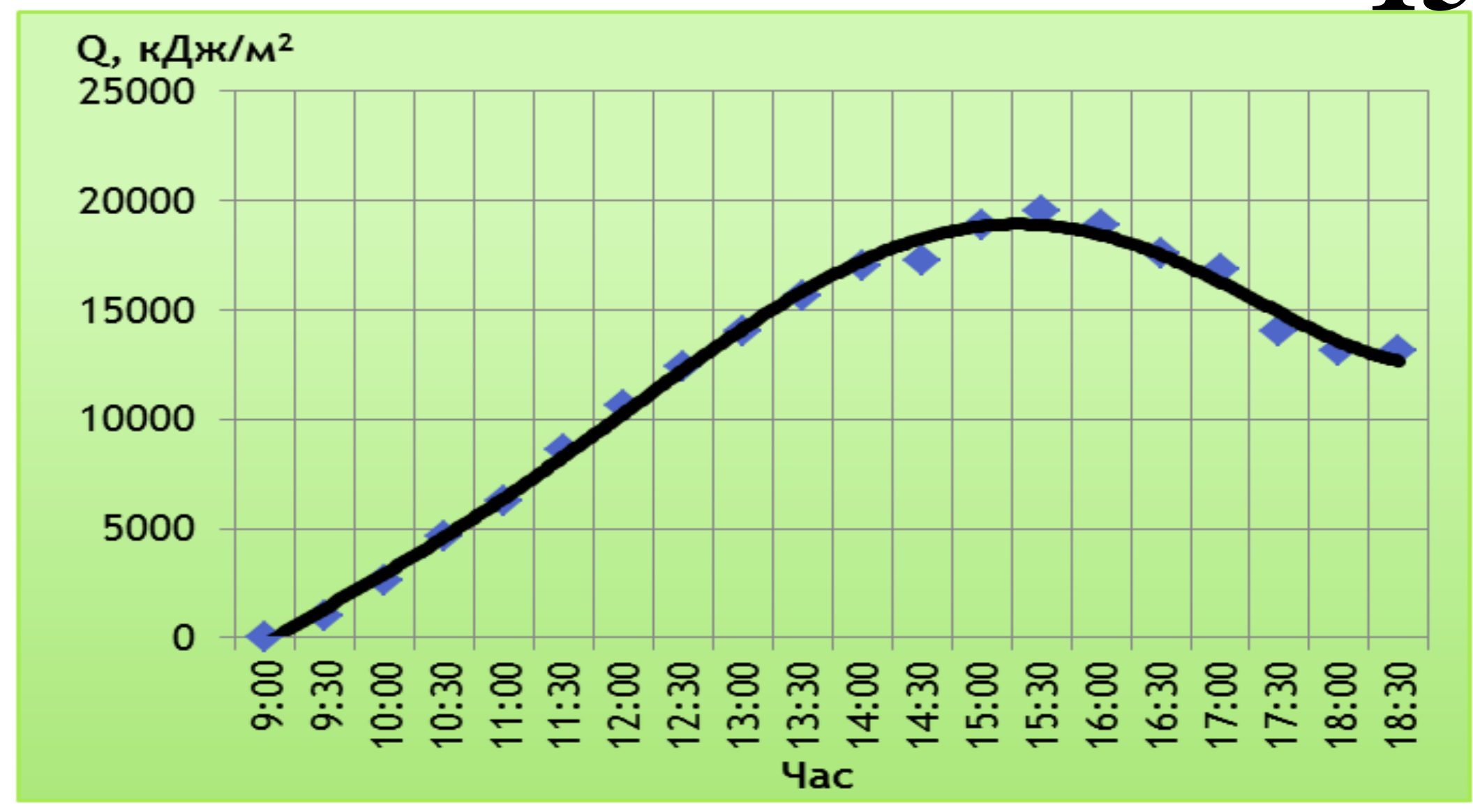
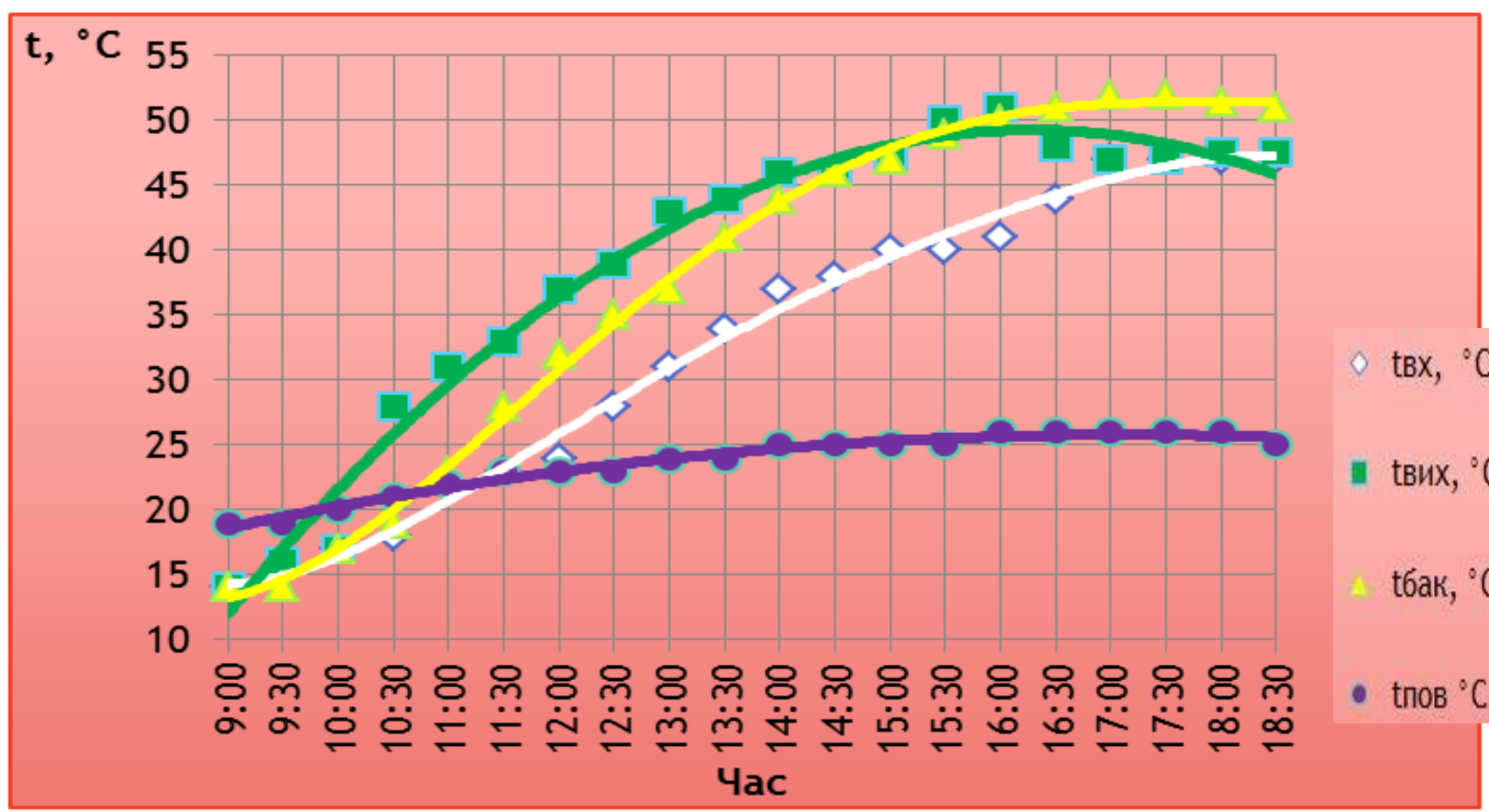
Дані вимірювань за південної орієнтації							
Час	$t_{вх}, ^\circ\text{C}$	$t_{вих}, ^\circ\text{C}$	$t_{бак}, ^\circ\text{C}$	$t_{пов}, ^\circ\text{C}$	$I(\text{пл.гз.}), \text{Вт/м}^2$	$I(\text{гор}), \text{Вт/м}^2$	$I_{розс}, \text{Вт/м}^2$
9:00	14	14	14	19	373	572	146
9:30	15	16	14	19	553	572	208
10:00	17	17	17	20	732	676	218
10:30	18	28	19	21	863	822	229
11:00	22	31	23	22	874	842	166
11:30	23	33	28	23	955	884	156
12:00	24	37	32	23	986	926	177
12:30	28	39	35	23	986	936	156
13:00	31	43	37	24	976	936	187
13:30	34	44	41	24	965	946	187
14:00	37	46	44	25	945	936	177
14:30	38	46	46	25	874	894	166
15:00	40	47	47	25	874	884	125
15:30	40	50	49	25	836	832	73
16:00	41	51	50	26	749	676	62
16:30	44	46	51	26	650	572	146
17:00	47	47	52	26	587	458	146
17:30	47	47	52	26	458	333	104
18:00	47	47,5	51,5	26	405	322	114
18:30	47	47,5	51	25	384	312	94



**Рис. 3** Інтенсивність теплового потоку сонячної енергії, що надходить на площину геліопокрівлі за різних орієнтацій

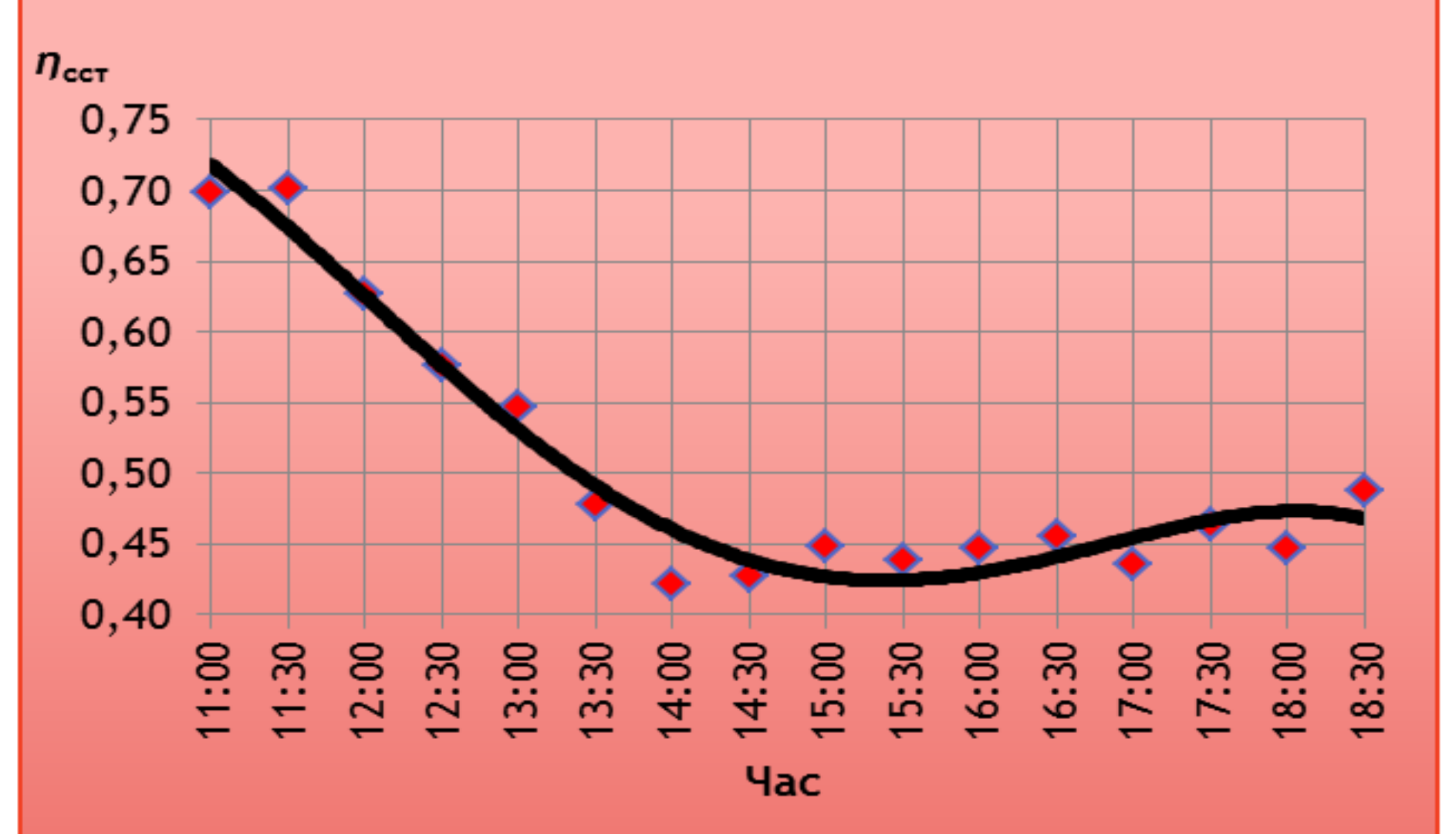
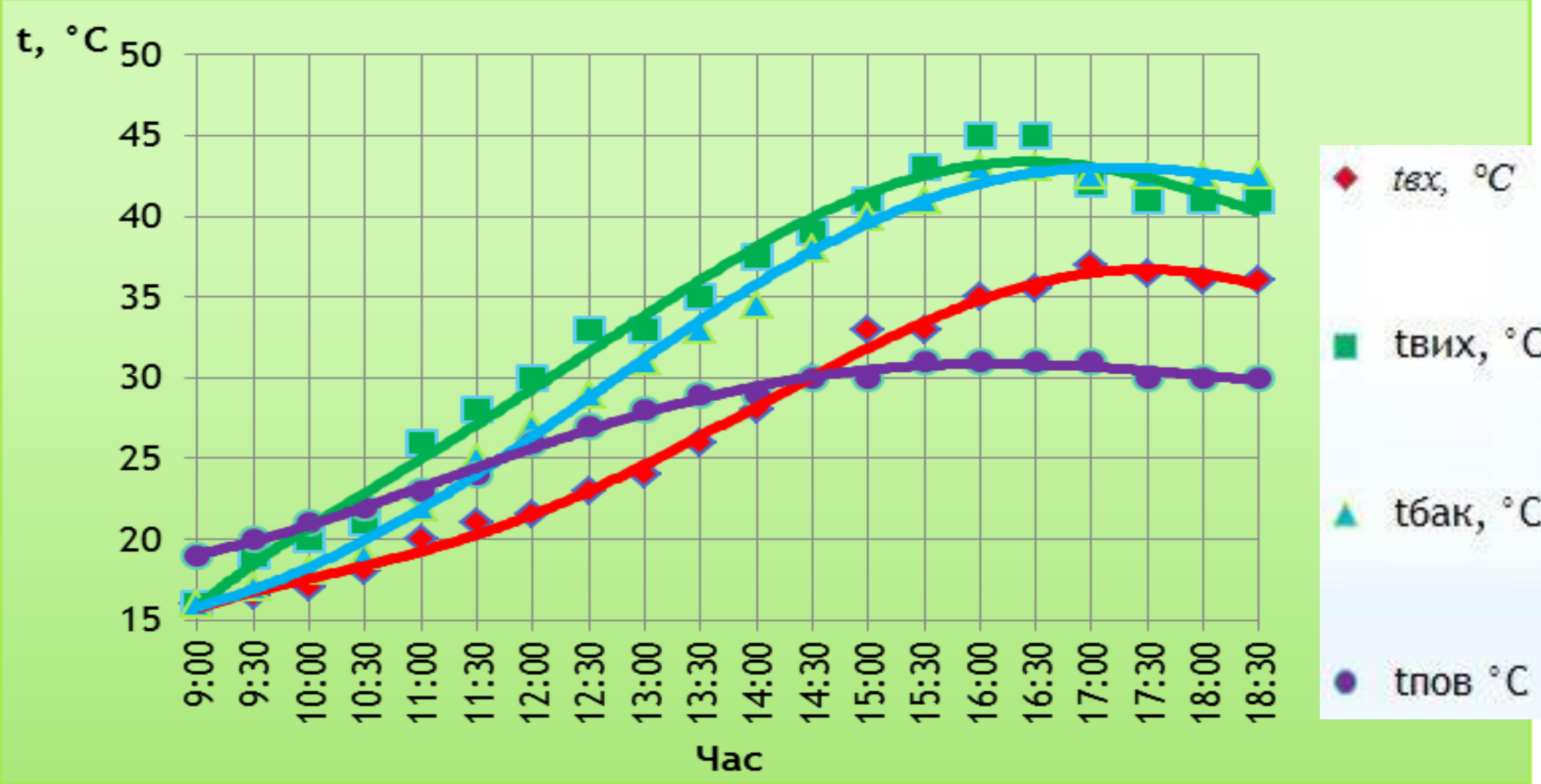


**Рис. 4** Кількість питомої теплової енергії накопиченої в баці-акумуляторі за різних орієнтацій



**Рис. 1** Температура теплоносія ГП та температура оточуючого середовища за південної орієнтації

**Рис. 2** Кількість тепла, що надходила від випромінювання на геліоколектор за південної орієнтації



**Рис. 3** Температура теплоносія ГП та температура оточуючого середовища за західної орієнтації

**Рис. 4** Зміна ККД гравітаційної системи із геліопокриттям впродовж світлового дня за умов західної орієнтації

Зведені середні значення результатів експериментальних досліджень Таблиця 1

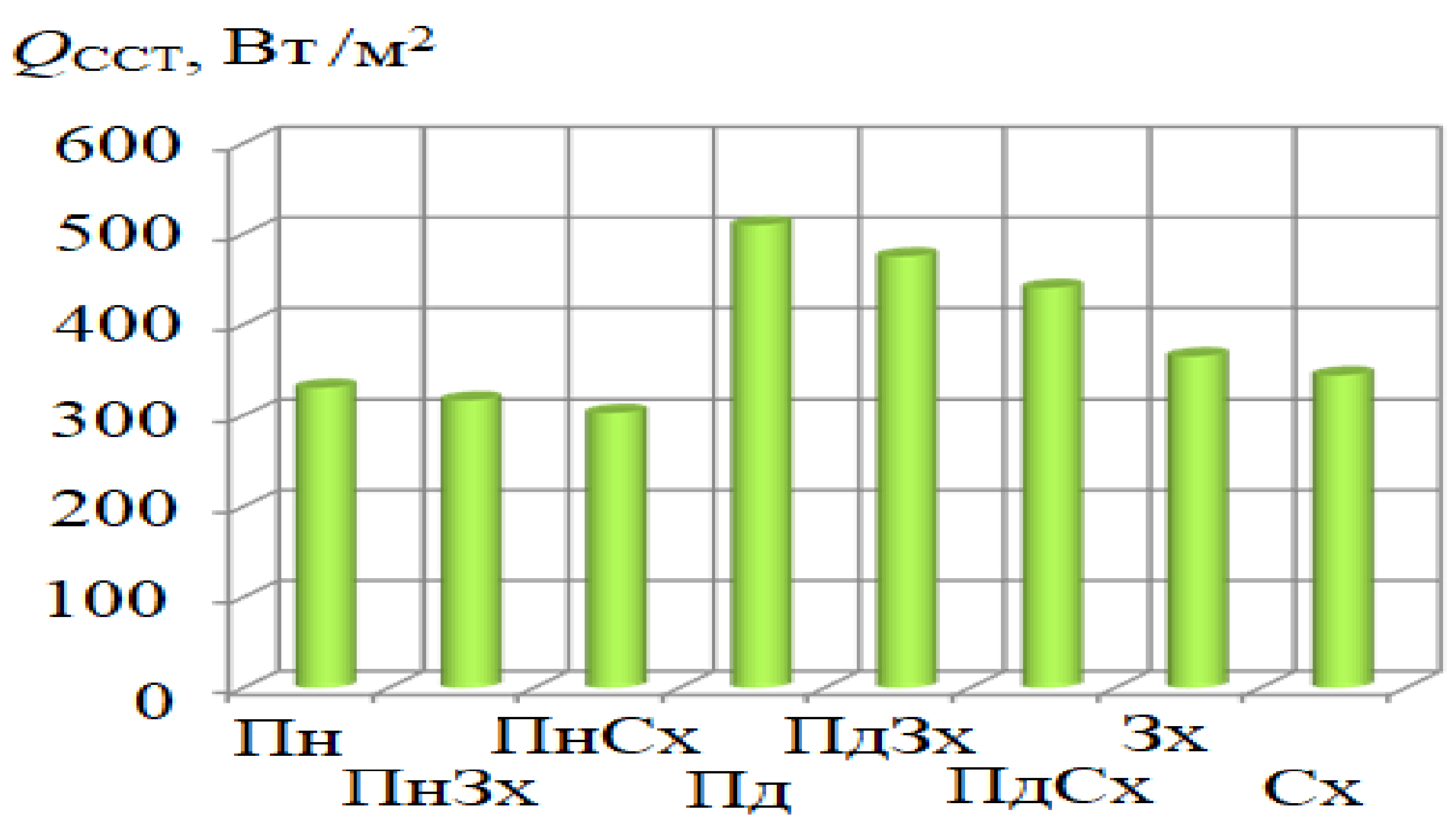
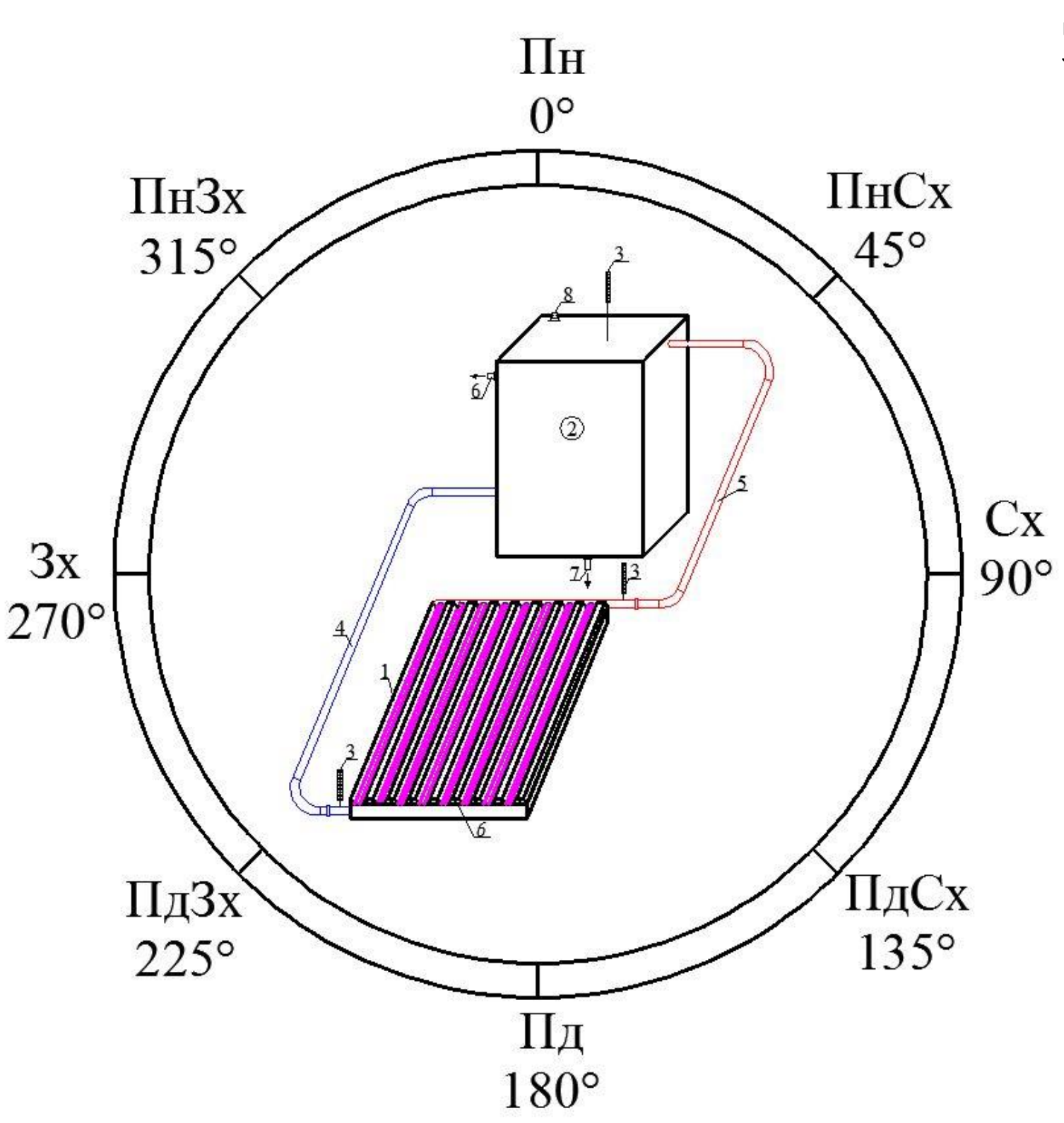


Рисунок 26 – Середньоденна теплова потужність системи сонячного теплопостачання з геліопокриттям  $Q_{сст}$  Вт/м<sup>2</sup>, при орієнтаціях за сторонами горизонту



Зміна  $t_{бак,max}$ ,  $Q_{сст,max}$  та ККД геліопокриття у ССТ Таблиця 2

Орієнтація за горизонтами світу	$t_i/t_{півд}$ , %	$Q_i/Q_{півд}$ , %	Середні значення миттєвого ККД гравітаційної ССТ
0, Пн	65	64	0,3
45, ПнСх	71	63	0,3
90, Сх	81	68	0,3
135, ПдСх	94	87	0,3
180, Пд	100	100	0,4
225, ПдЗх	97	91	0,4
270, Зх	83	71	0,3
315, ПнЗх	69	62	0,3



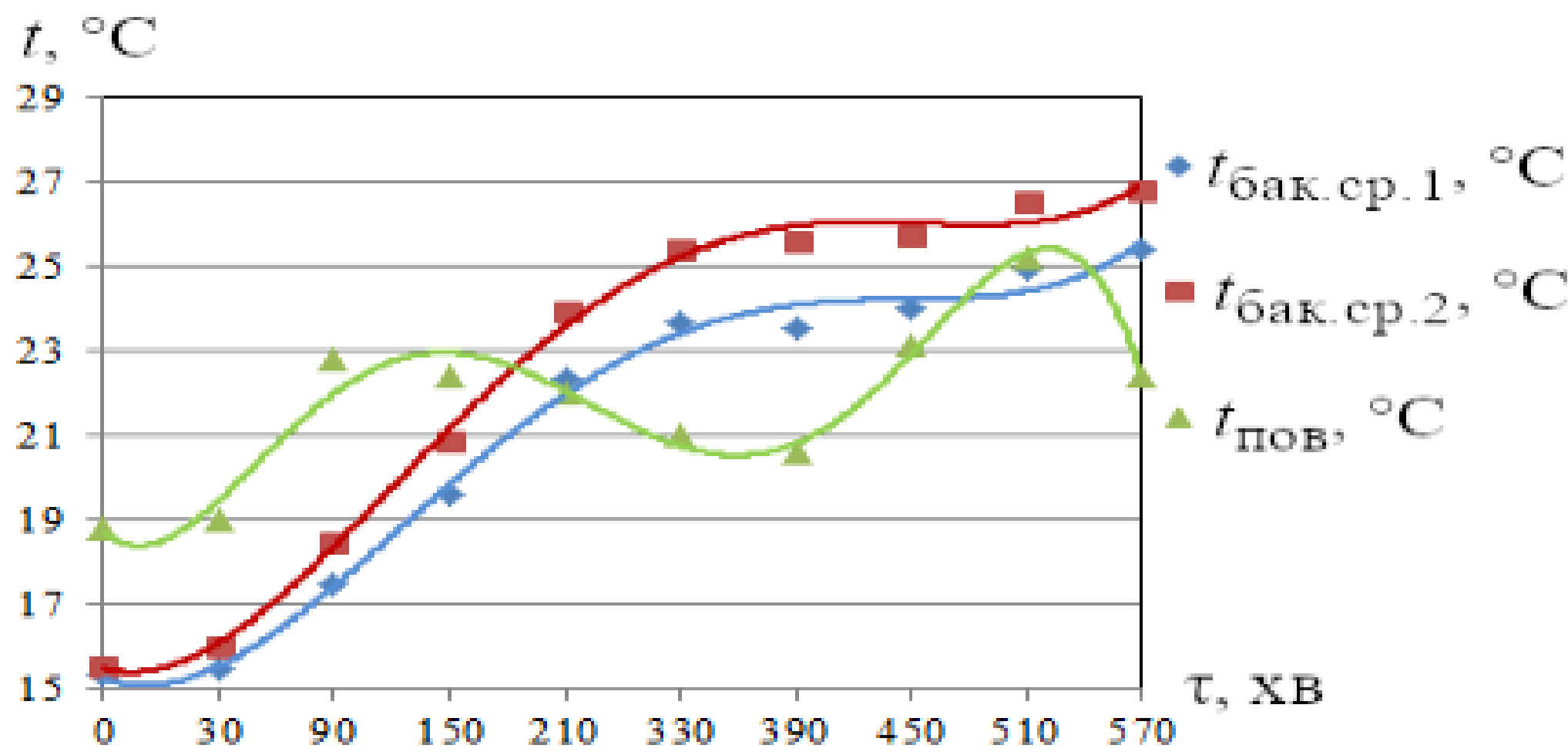


а)

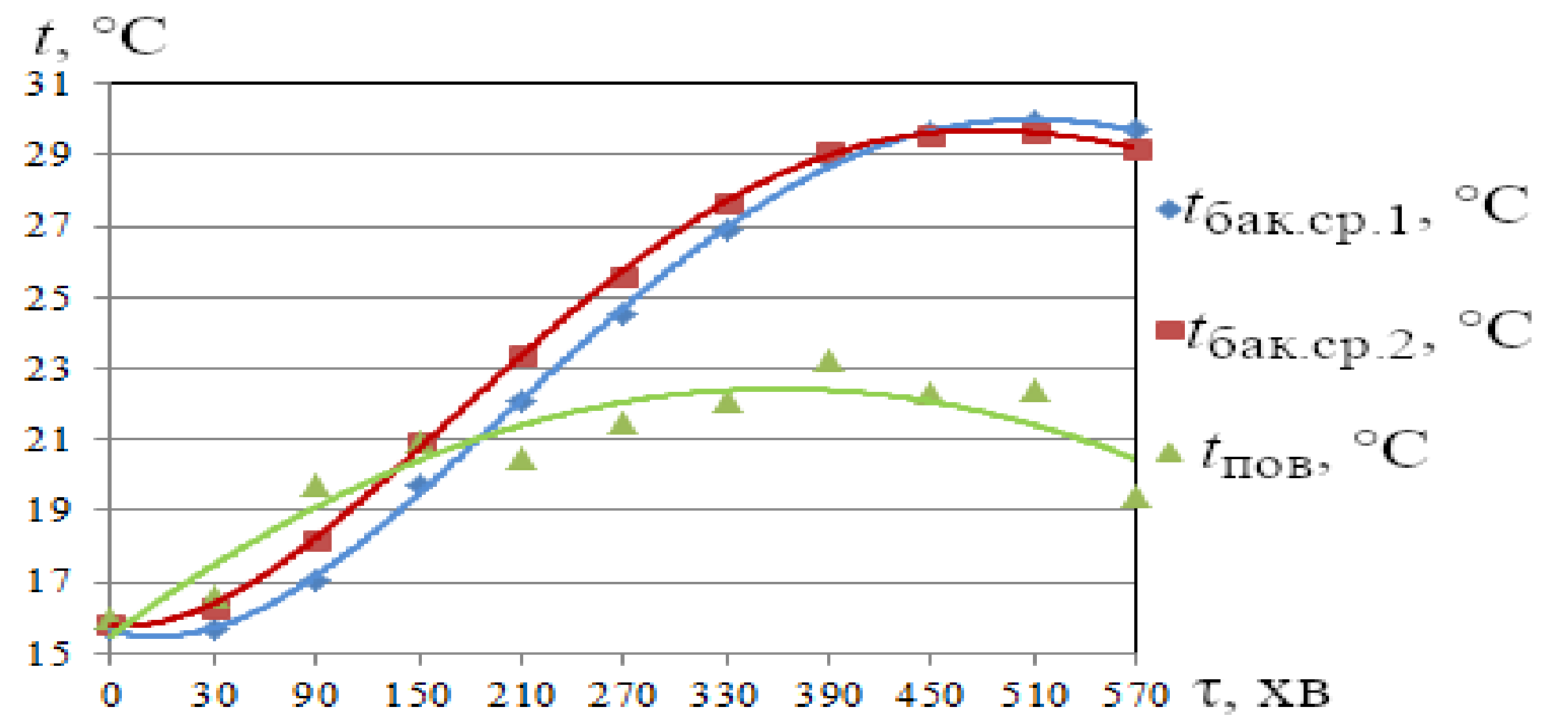


б)

Рис.1.– Фото експериментальної установки для дослідження теплових характеристик ГС в реальних умовах



а)



б)

Рис.2. Зміна середньої температури теплоносія у теплових акумуляторах впродовж експерименту за досліджень: а)- ГС без прозорого покриття (№1) та із прозорим покриттям із скла з селективним напиленням (№2); б) - геліостіна без прозорого покриття (№ 1) та геліостіна із прозорим покриттям (№ 2)

Залежність для визначення коефіцієнта ефективності геліостіни:

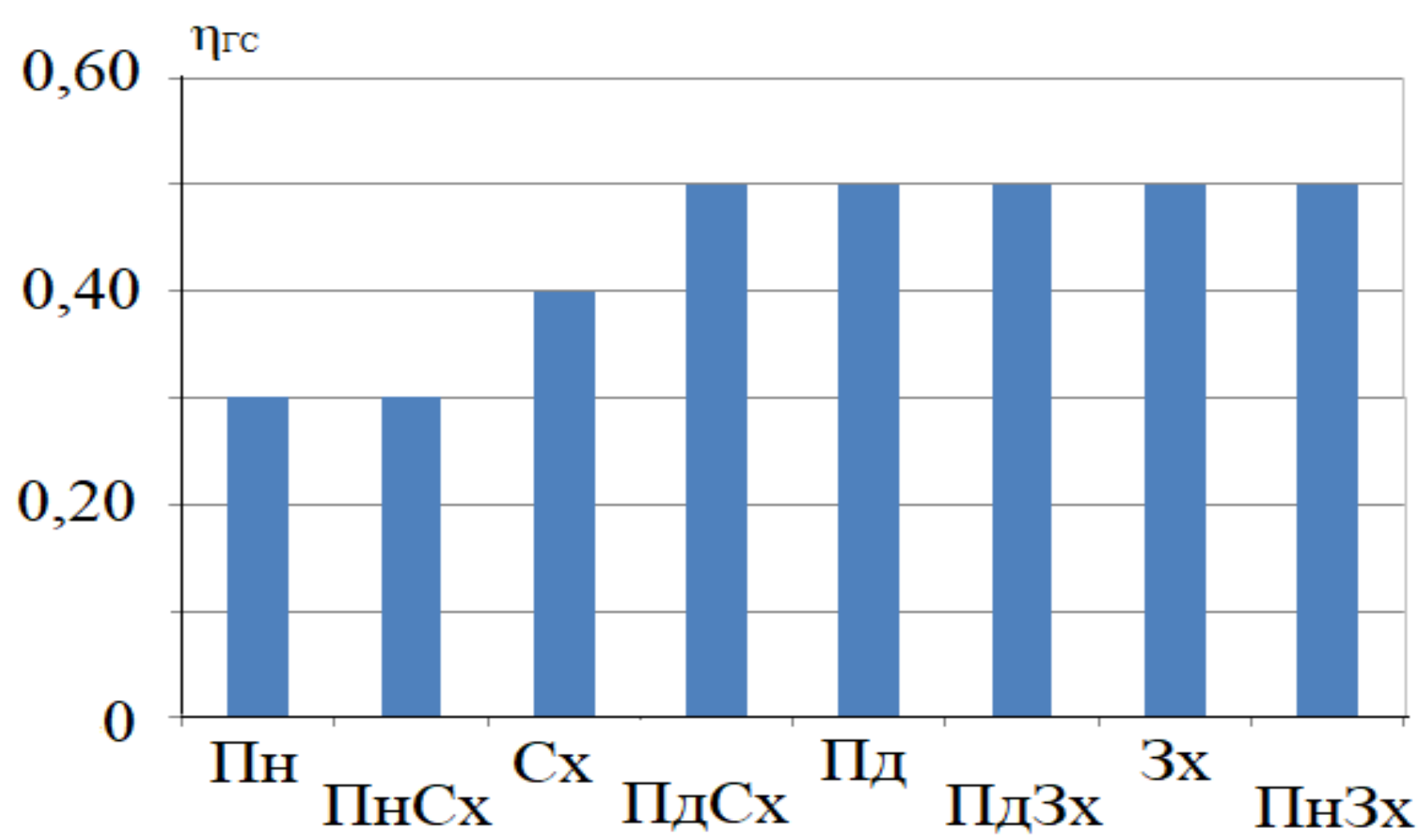


Рис. 3. Залежність ККД геліостіни в режимі гравітації залежно від орієнтації

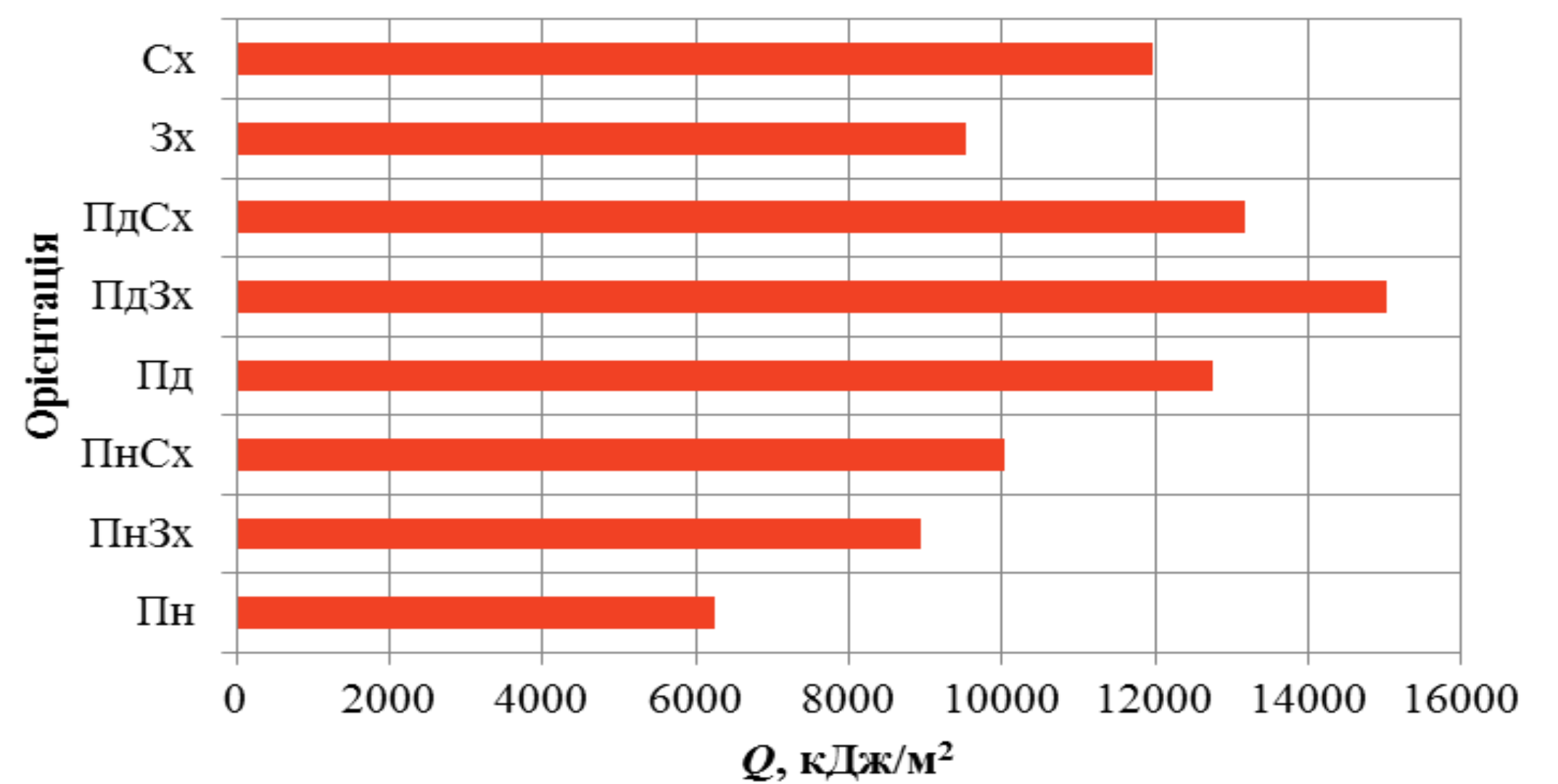


Рис. 4. Залежність кількості теплоти, що надходить з тепловим потоком на геліостіну від випромінювання

Дослідження теплової ефективності ССТ з геліовікном в реальних умовах

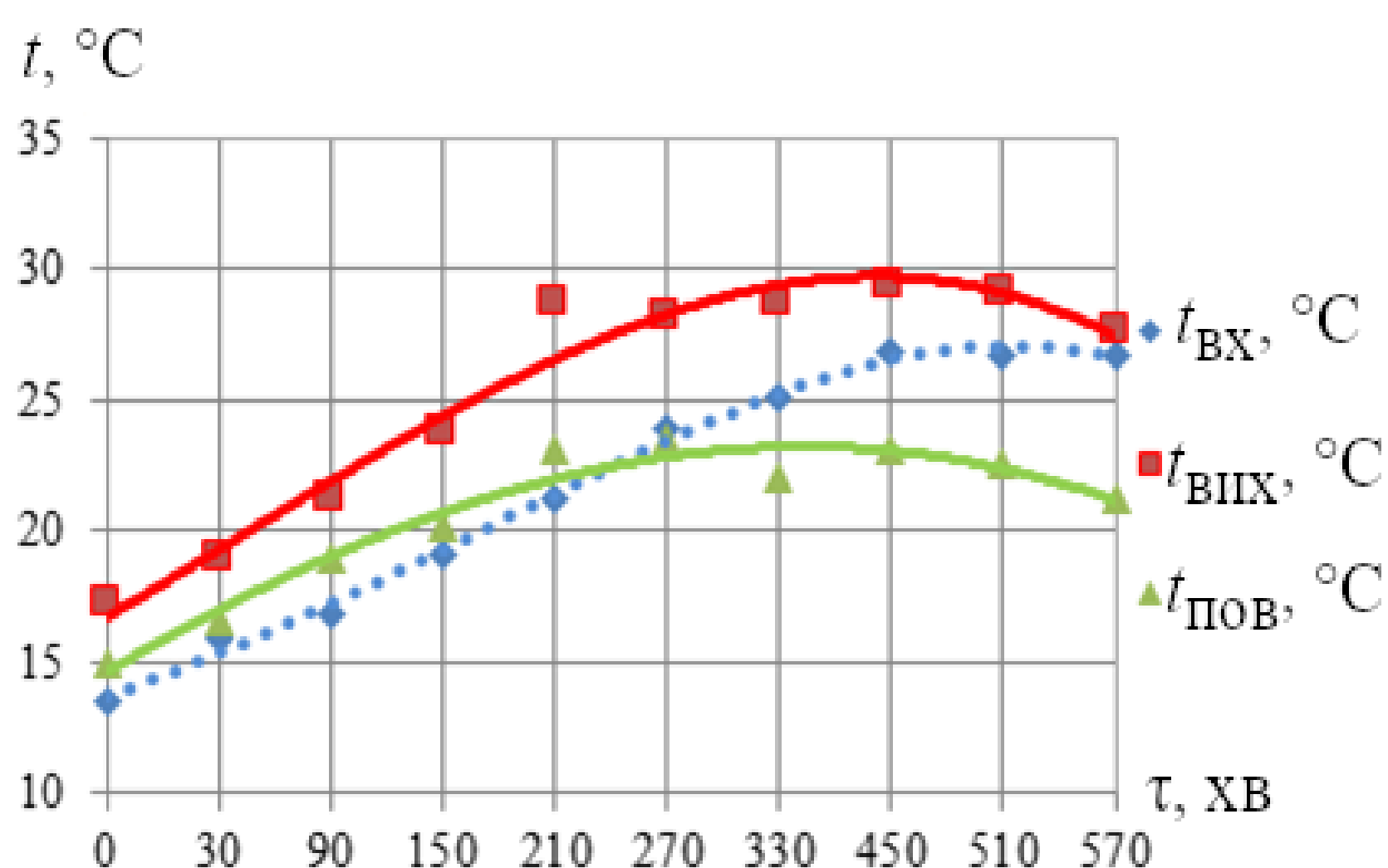


Рис.5. Зміна ТТ у вхідному та вихідному патрубках ГВ  $t_{вх}$ ,  $t_{вих}$ , °C, а також температури повітря оточуючого середовища  $t_{пов}$ , °C, за умов південної орієнтації

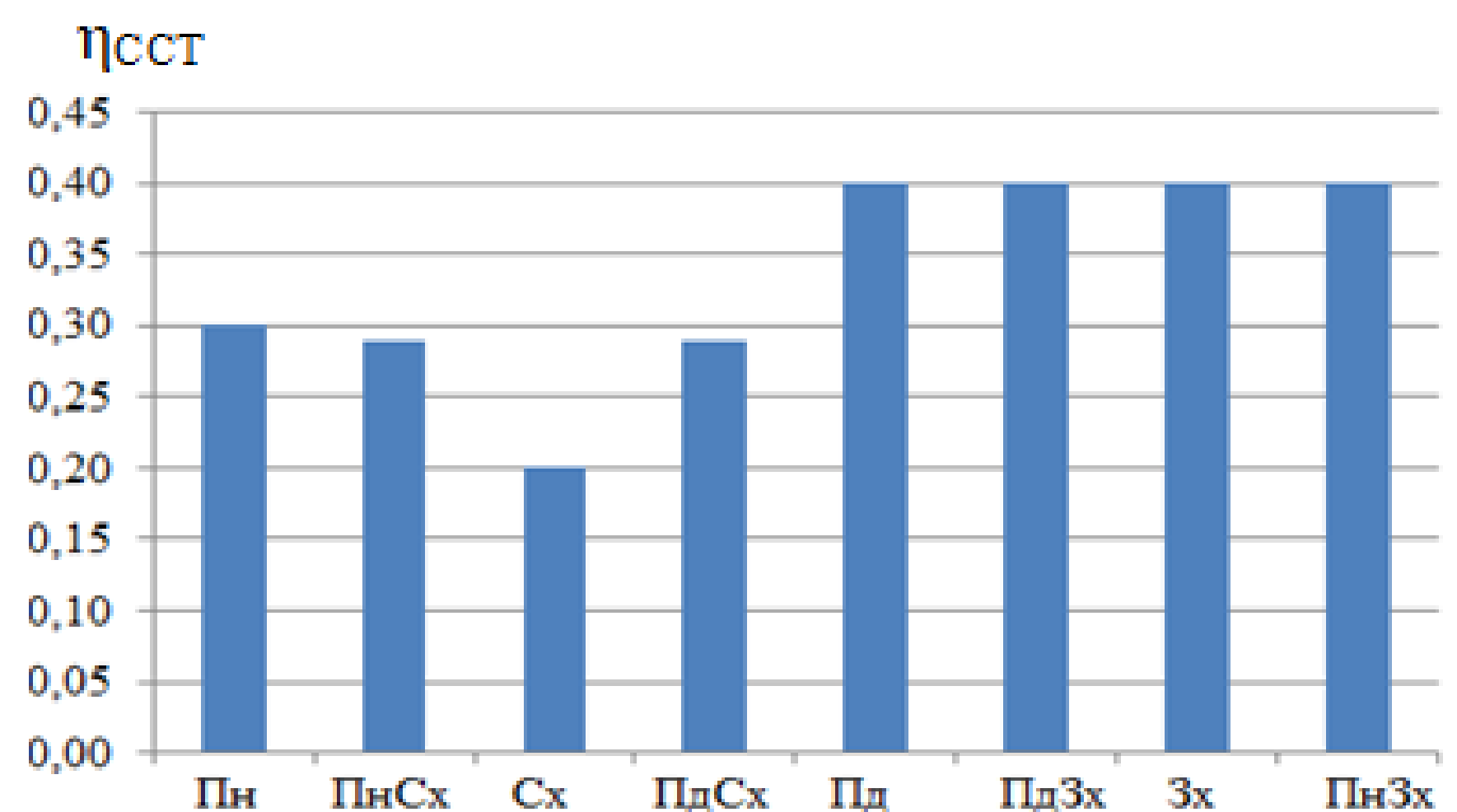
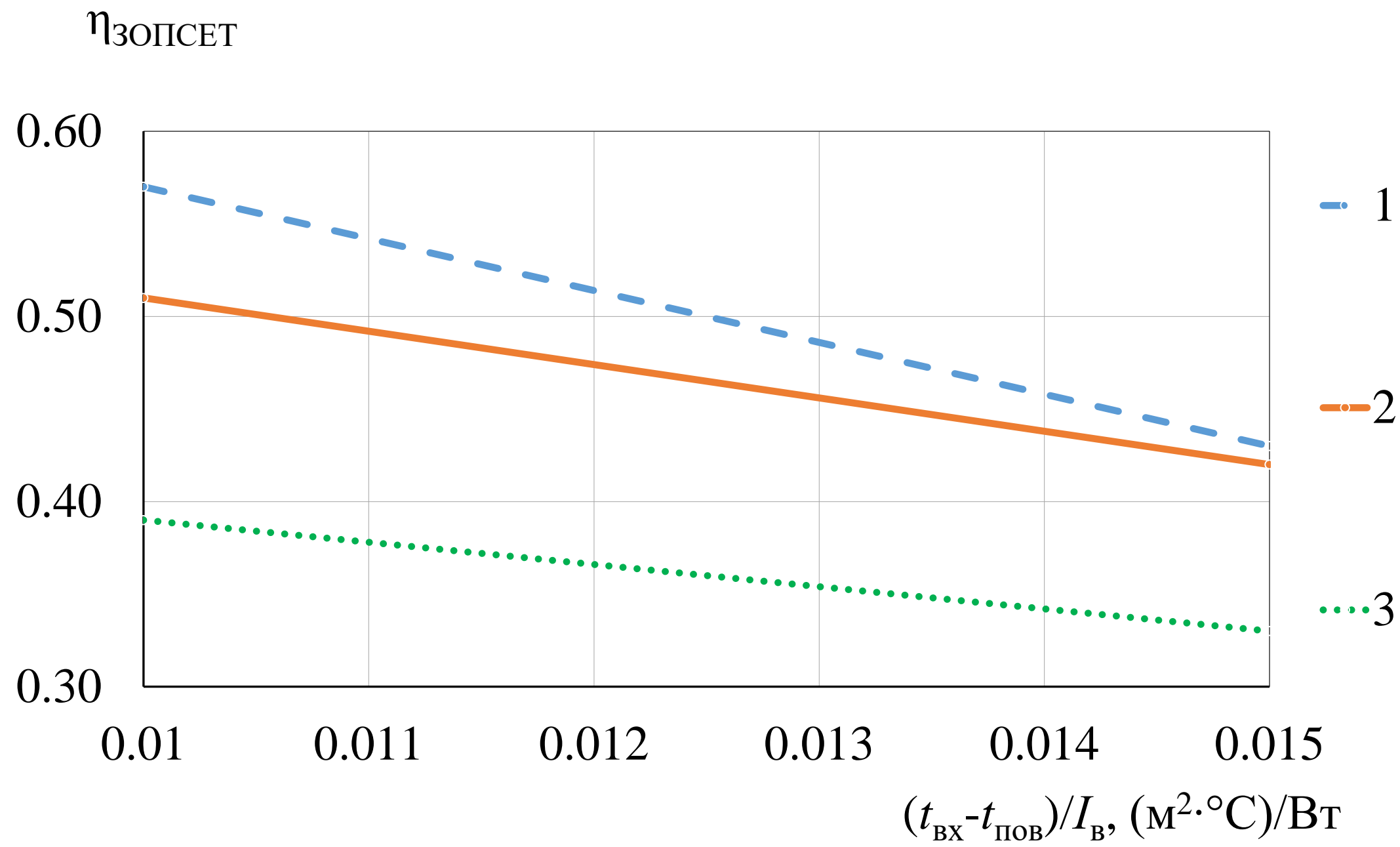


Рис. 6. Залежність ССТ із геліовікном від орієнтації

# Визначення ККД геліозахисень на основі експериментальних даних та ексергетичний аналіз розроблених ІЕГІЗЗБ



$$\eta_K = \eta_0 - K_K \frac{T_{T1} - T_n}{I_K}$$

де,  $\eta_K$  – коефіцієнт корисної дії,  $\eta_0$  – оптичний коефіцієнт,  $K_K$  – коефіцієнт тепловтрат,  $T_{T1}$  – температура зворотного теплоносія,  $T_n$  – температура подачі теплоносія,  $I_K$  – інтенсивність сонячного випромінювання

Рис.1. Залежність ККД ЗОПСЕТ  $\eta_{\text{ЗОПСЕТ}}$  від параметра  $(t_{\text{ВХ}}-t_{\text{ПОВ}})/I_{\text{В}}$ ,  $(\text{М}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ : 1 – геліопокриття; 2 – геліостіни; 3 – геліовікна

На основі рисунку 1 отримано аналітичні залежності ККД геліостіни, геліопокриття та геліовікна:

$$\eta_{\text{ГС}} = -18(t_{\text{ВХ}}-t_{\text{ПОВ}})/I_{\text{В}} + 0,69; \quad \eta_{\text{ГВ}} = -12(t_{\text{ВХ}}-t_{\text{ПОВ}})/I_{\text{В}} + 0,51; \quad \eta_{\text{ГП}} = -28(t_{\text{ВХ}}-t_{\text{ПОВ}})/I_{\text{В}} + 0,85.$$

## Ексергетичний аналіз розроблених ІЕГІЗЗБ

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

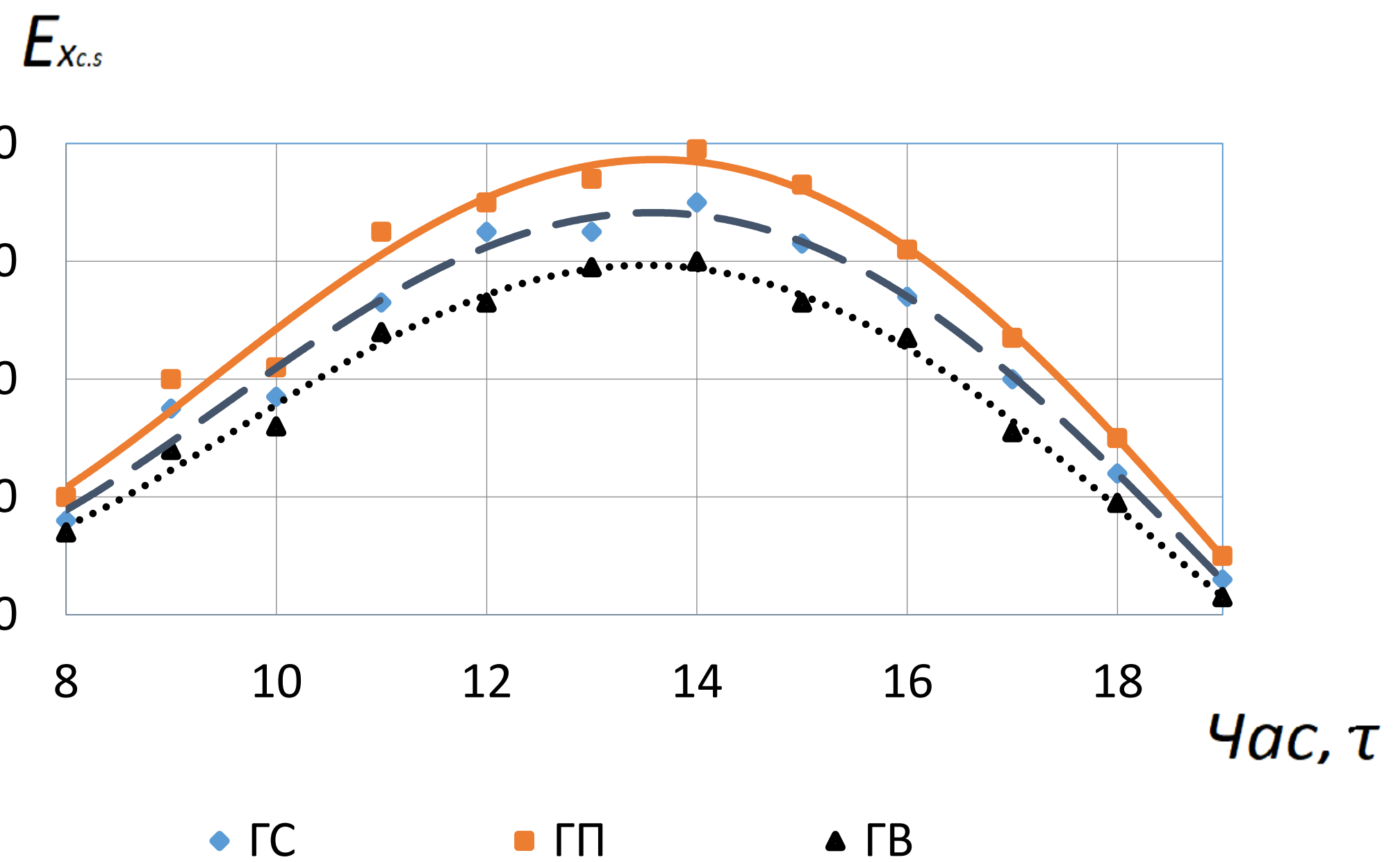


Рис. 2. Ексергія, отримана при проходженні сонячного випромінювання крізь скляну пластину

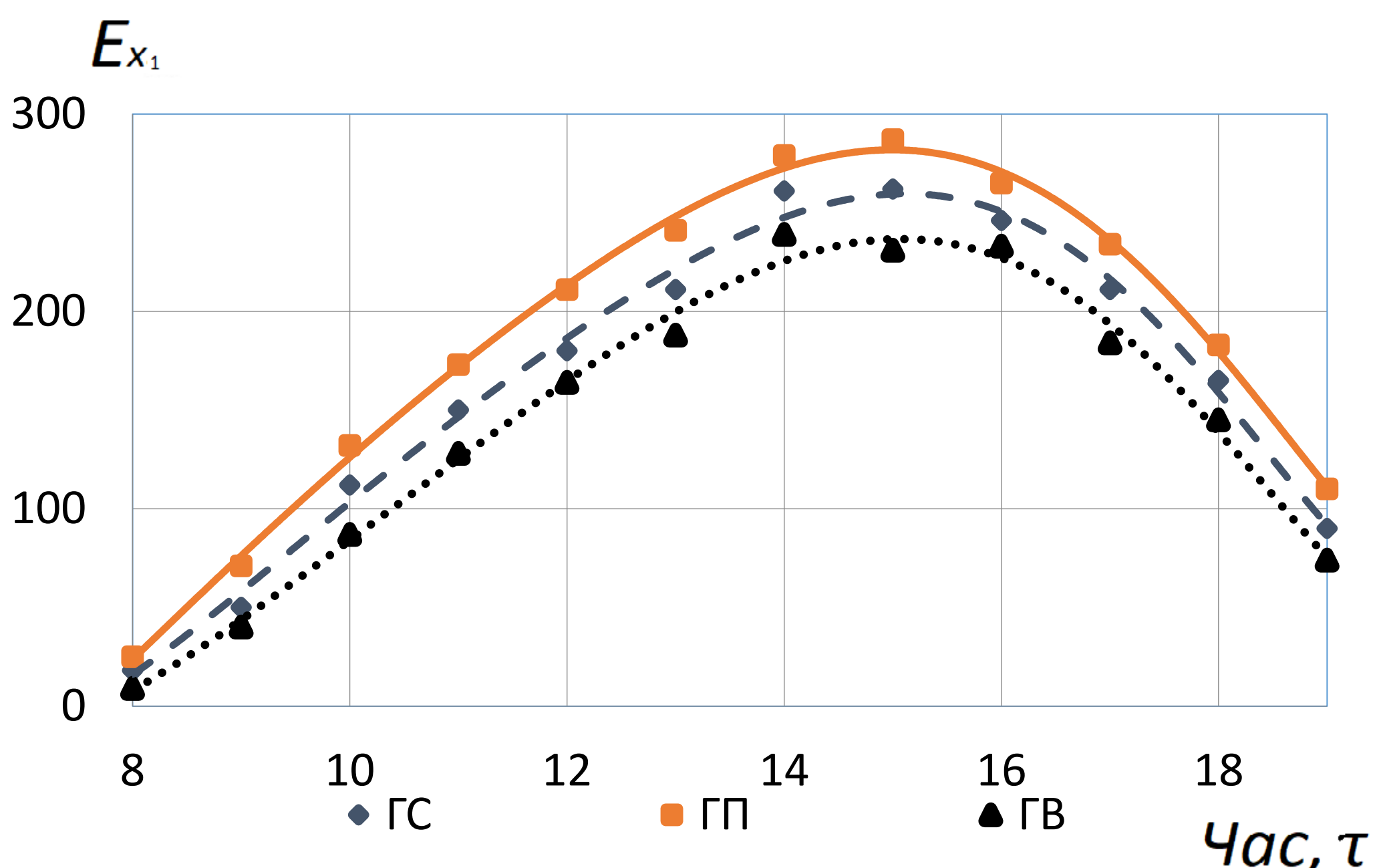


Рис. 3. Зміна ексергії на вході в геліозахисення

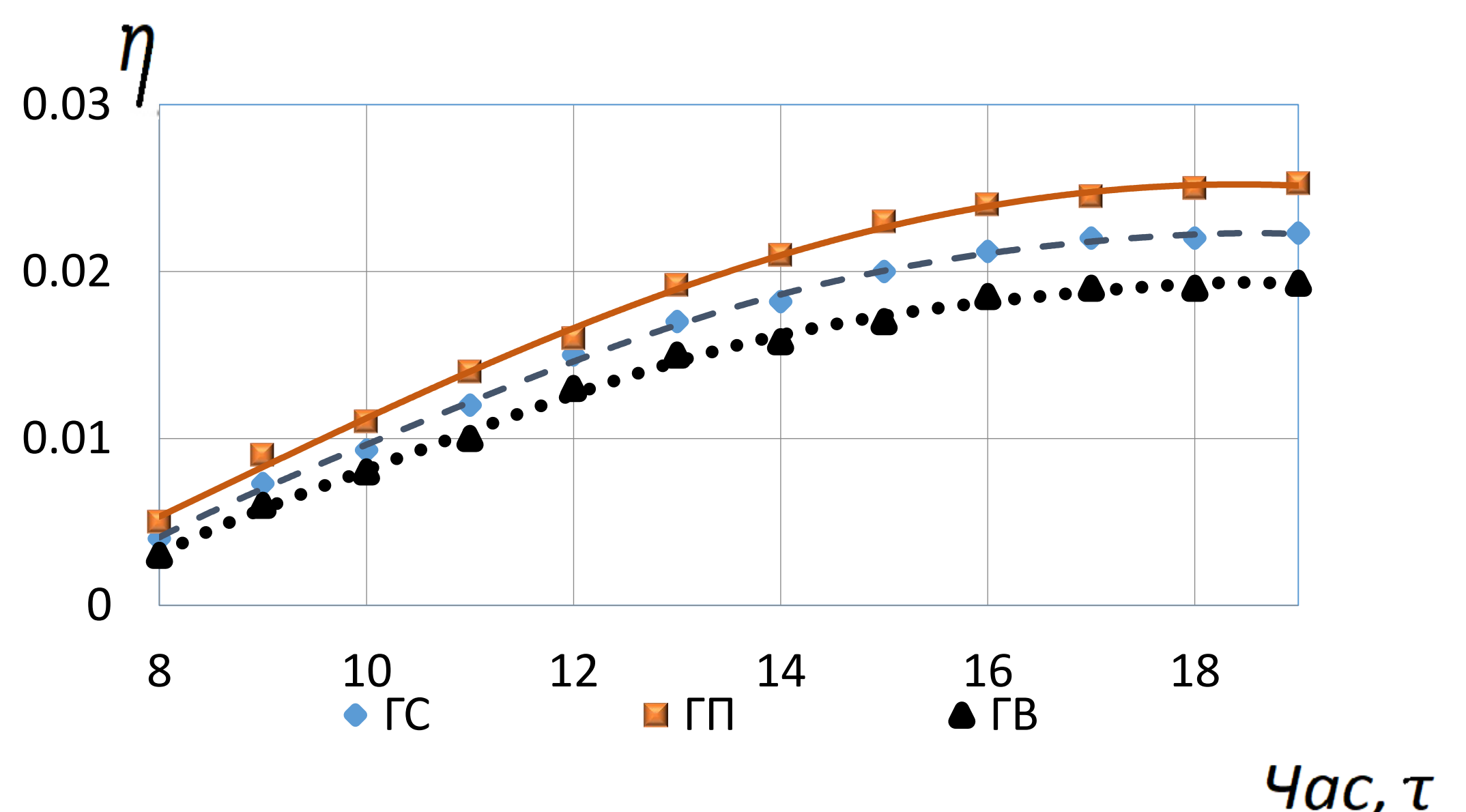


Рис. 4. Зміна коефіцієнта ексергетичної ефективності геліозахисень

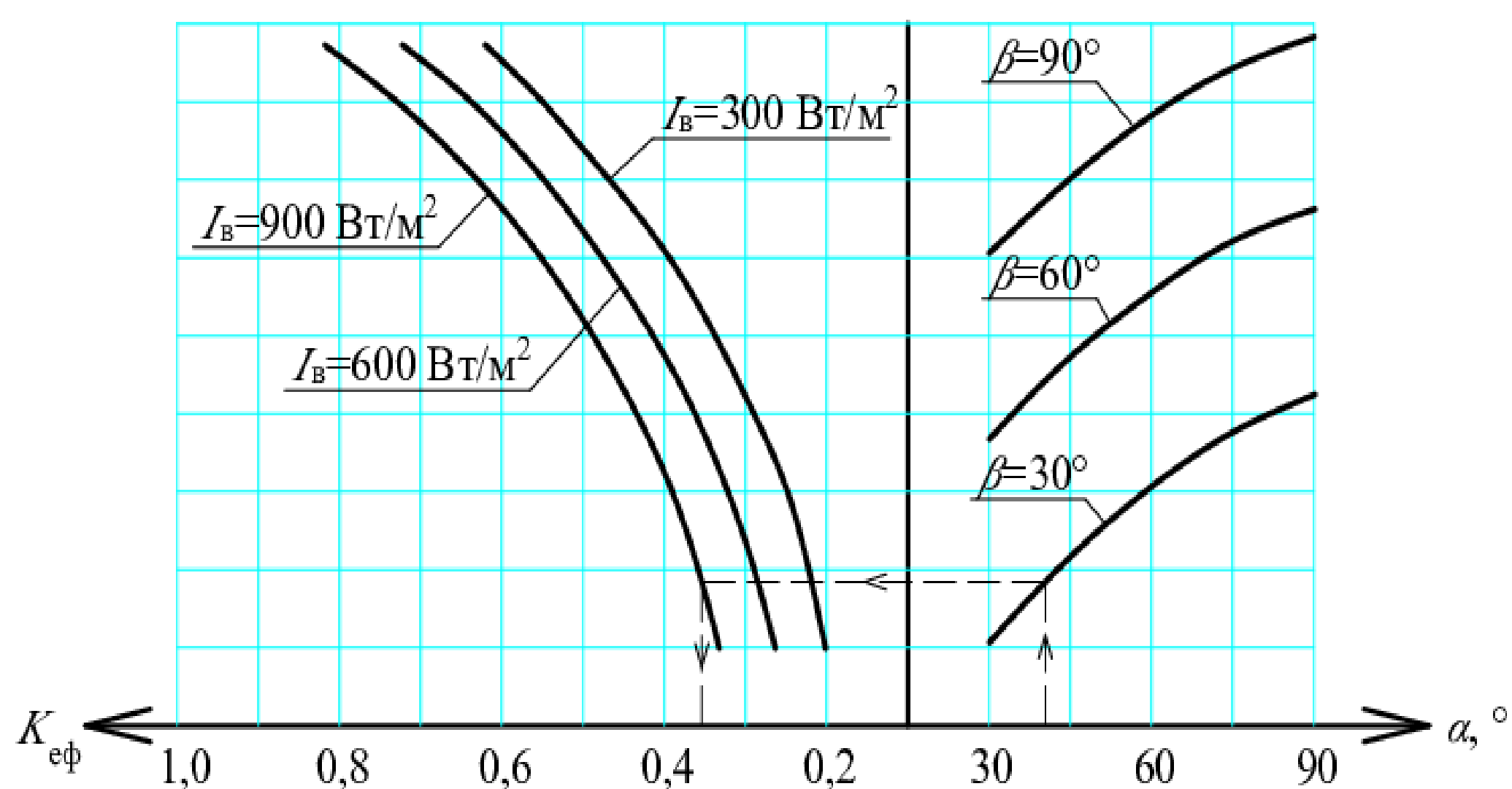


Рис. 1. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття  $K_{ef}$  у гравітаційній системі тепlopостачання від кутів падіння теплового потоку  $\alpha$  і  $\beta$  та інтенсивності теплового потоку  $I_b$

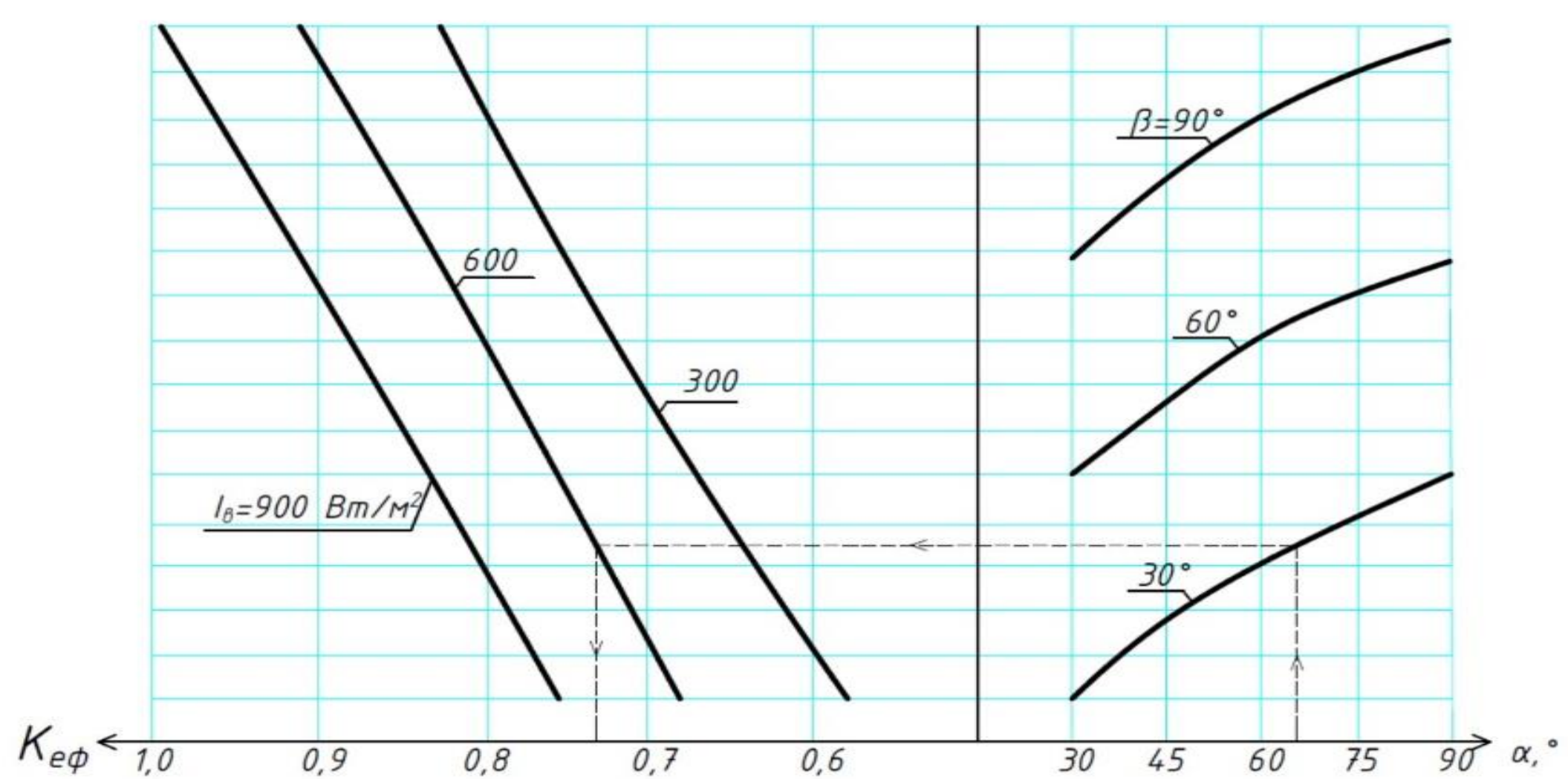


Рис. 2. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям  $K_{ef}$  у гравітаційній системі тепlopостачання від кутів падіння теплового потоку  $\alpha$  і  $\beta$  та інтенсивності теплового потоку  $I_b$

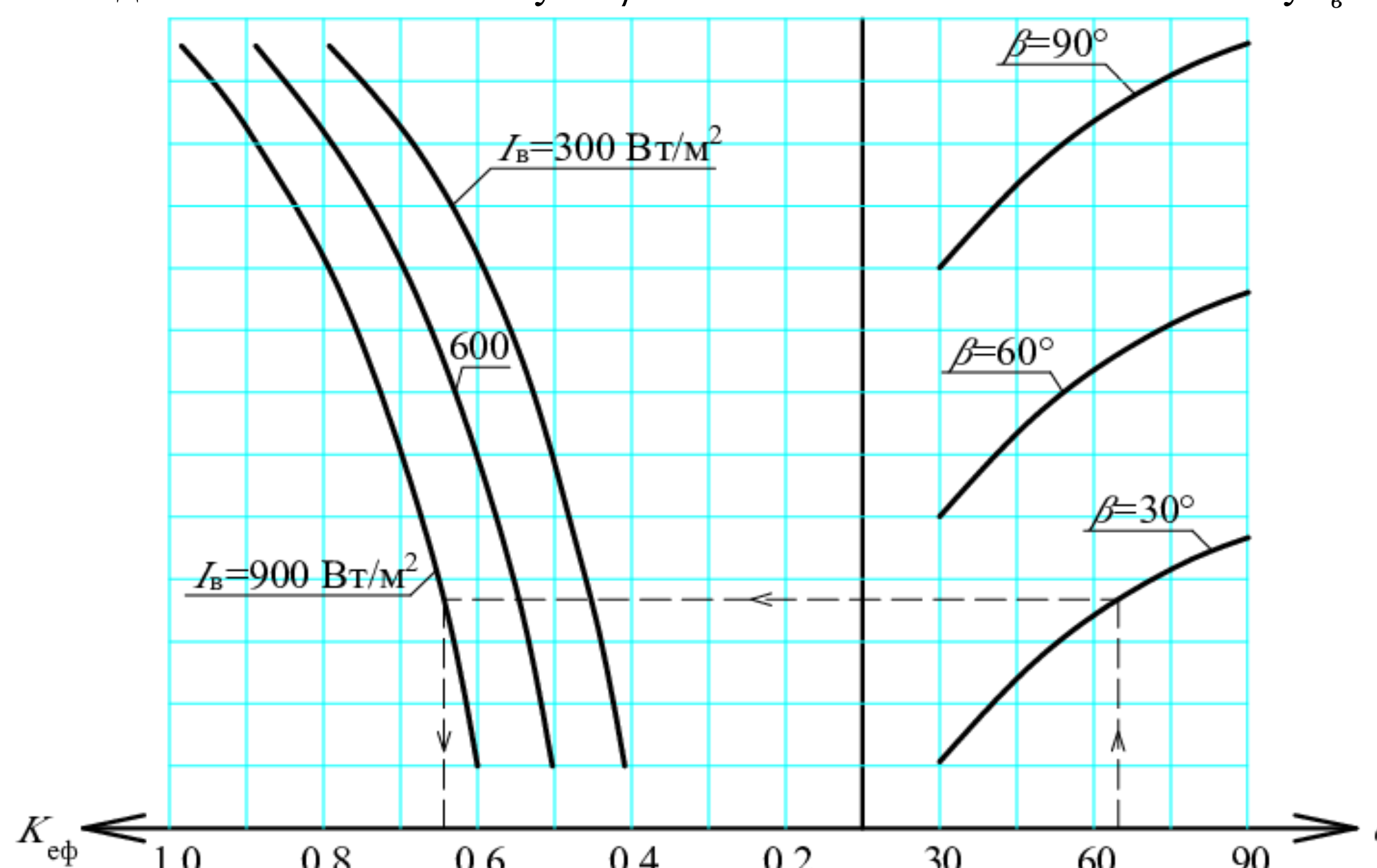


Рис. 3. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія  $K_{ef}$  у гравітаційній системі тепlopостачання від азимутального кута повороту геліопокрівлі  $\alpha$ , кута нахилу геліопокрівлі  $\beta$  та інтенсивності теплового потоку  $I_b$

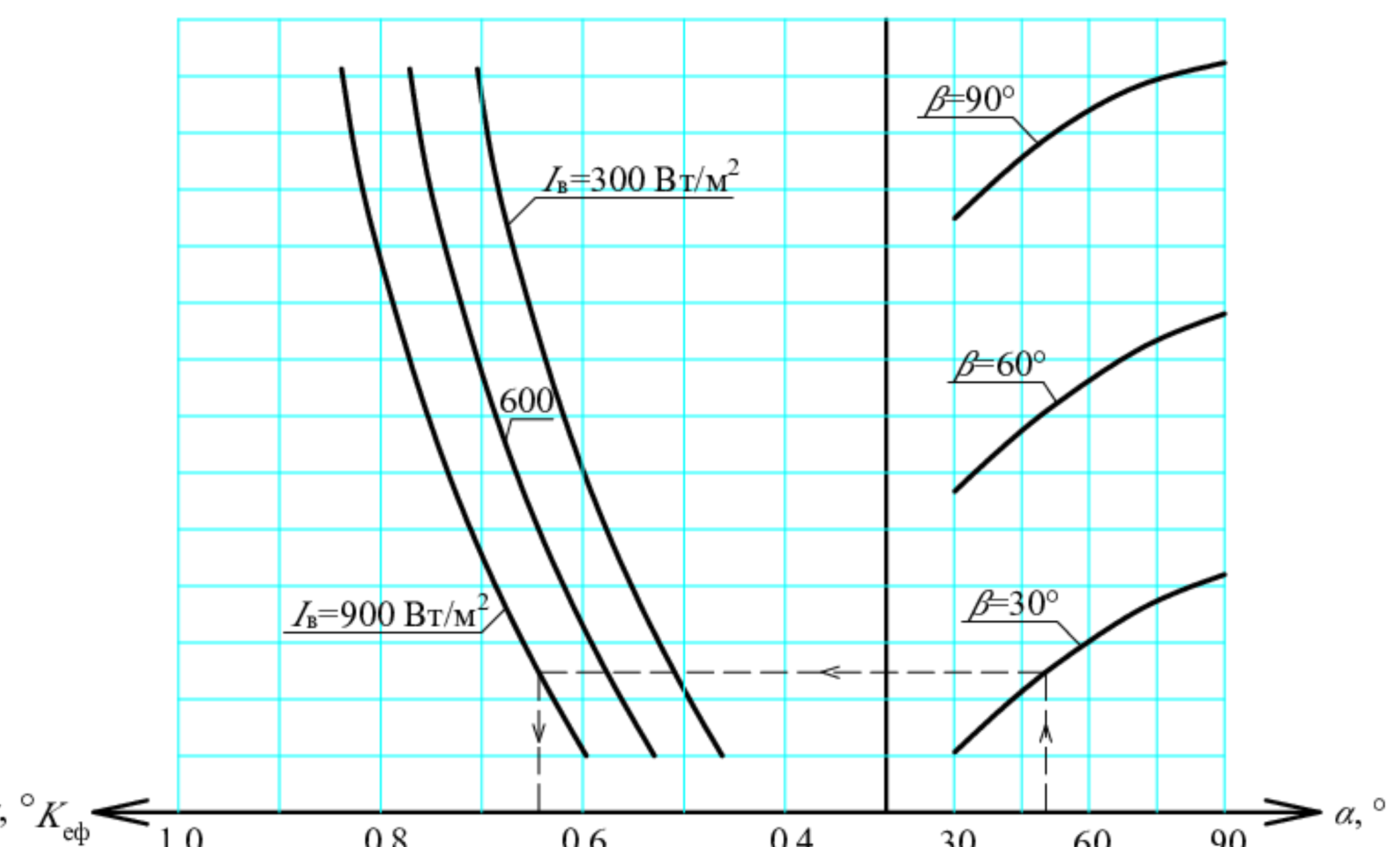


Рис. 4. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок контуру циркуляції  $K_{ef}$  від азимутального кута повороту геліопокрівлі  $\alpha$ , кута нахилу геліопокрівлі  $\beta$  та інтенсивності теплового потоку  $I_b$

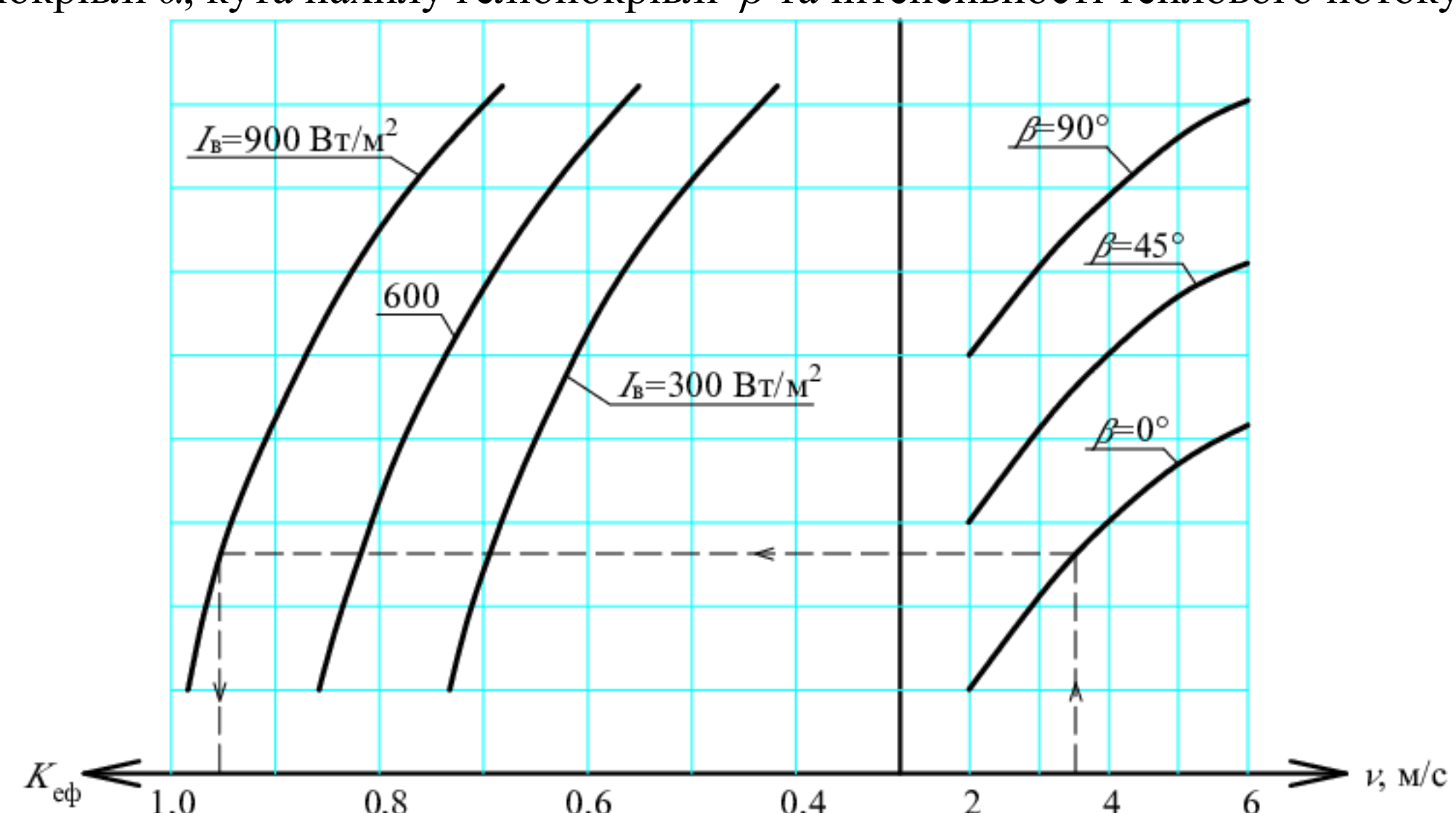


Рис. 5. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям  $K_{ef}$  у гравітаційній системі тепlopостачання від швидкості  $V$ , напрямку  $\beta$  повітряного потоку та інтенсивності теплового потоку  $I_b$

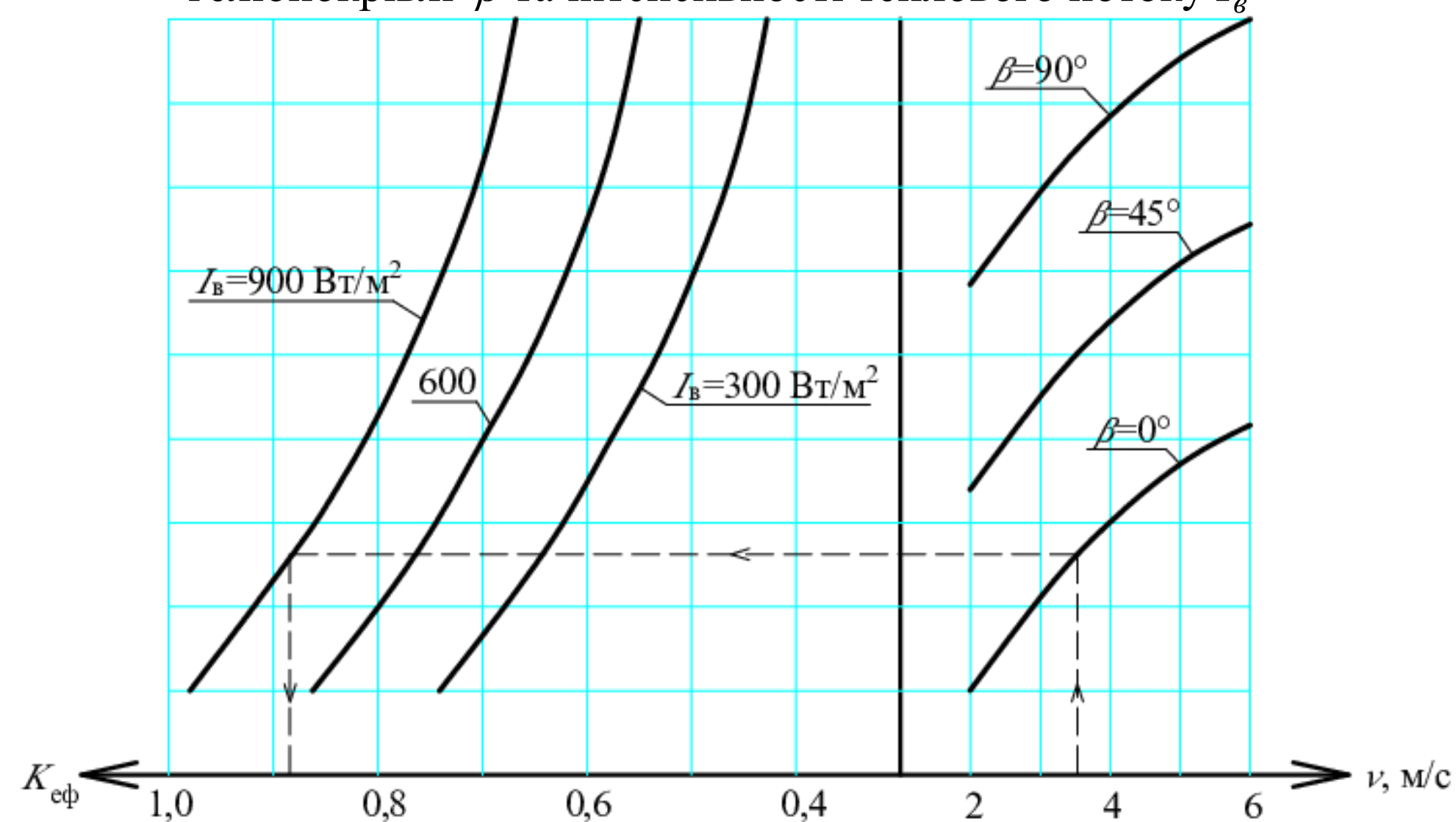


Рис. 6. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття  $K_{ef}$  у гравітаційній системі тепlopостачання від швидкості  $V$ , напрямку  $\beta$  повітряного потоку та інтенсивності теплового потоку  $I_b$

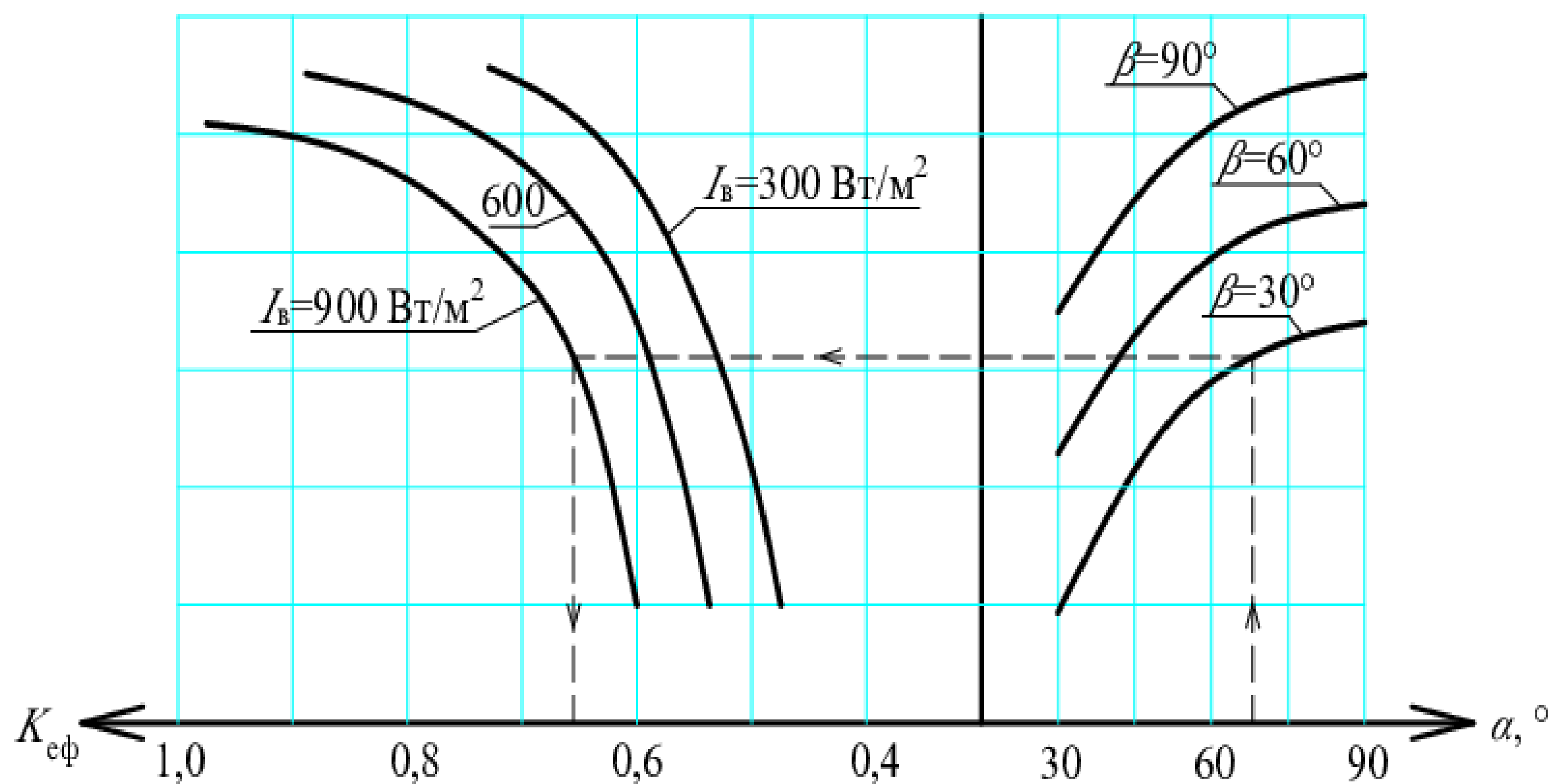


Рис. 7. Номограма залежності ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям  $K_{ef}$  у механічній системі тепlopостачання від кутів падіння теплового потоку  $\alpha$  і  $\beta$  та інтенсивності теплового потоку  $I_b$

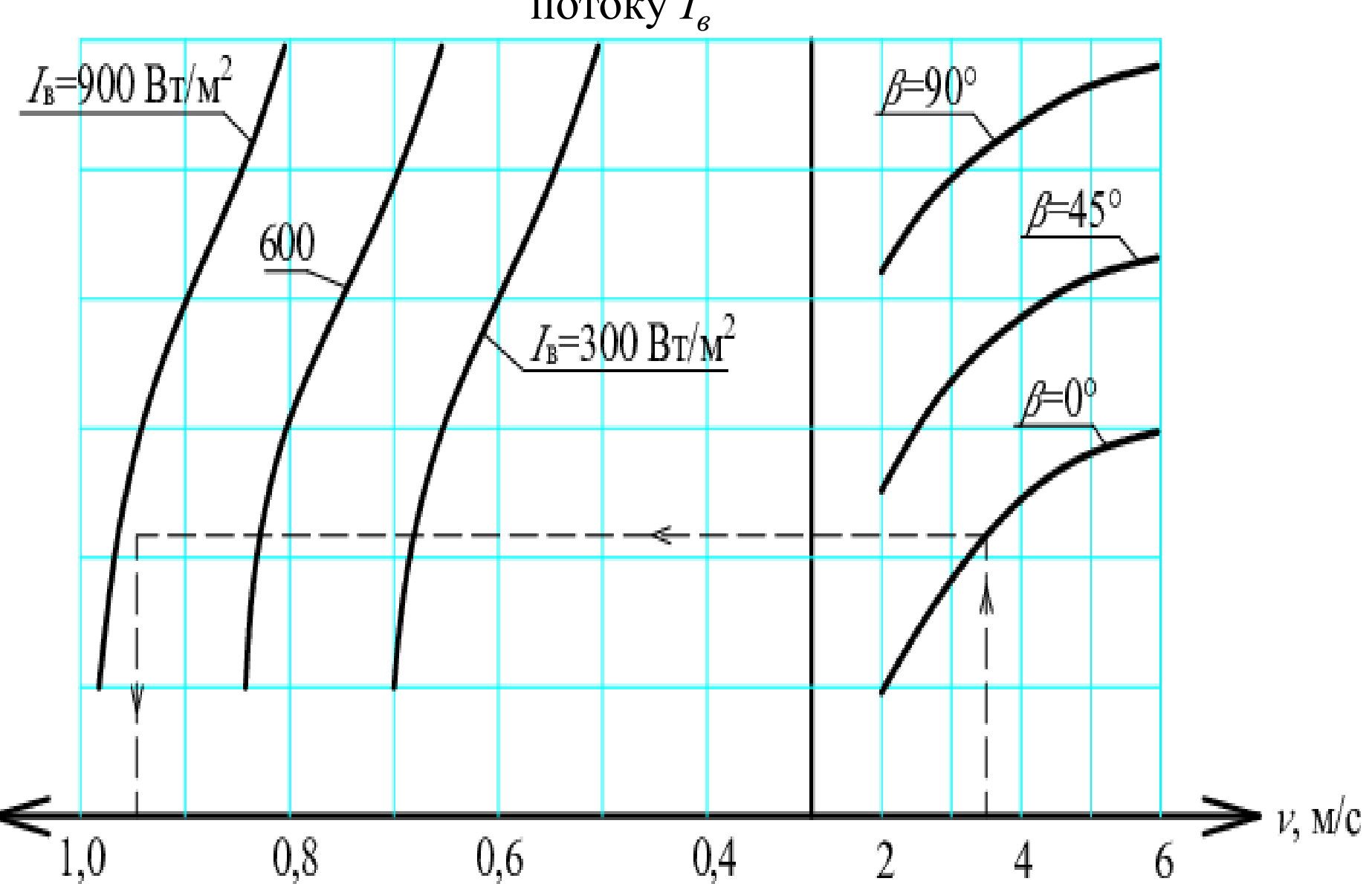


Рис. 8. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття  $K_{ef}$  у механічній системі тепlopостачання при впливі на неї повітряного потоку від швидкості  $V$ , напрямку  $\beta$  повітряного потоку та інтенсивності теплового потоку  $I_b$

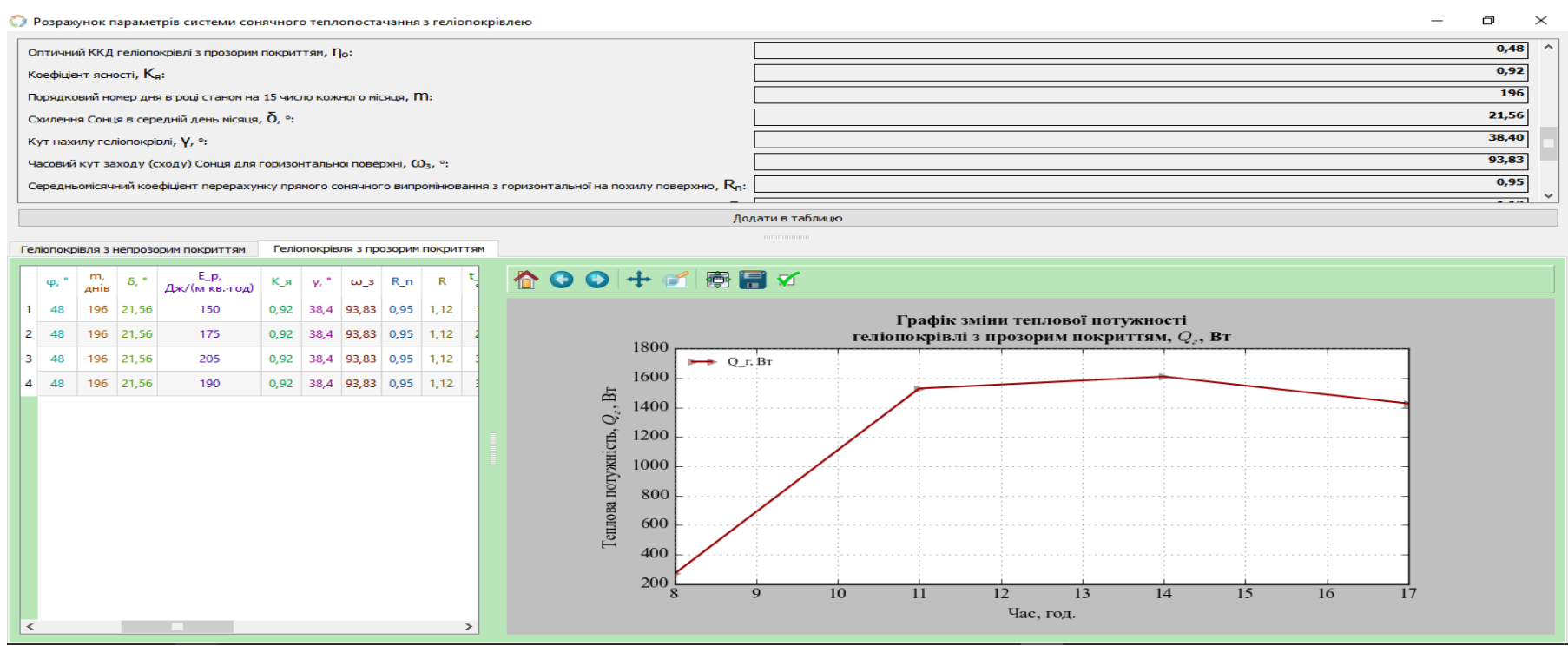


Рис.1 Вигляд робочого вікна програми для проведення обчислень по методиці розрахунку теплової потужності ІЕГІЗЗБ впродовж дня

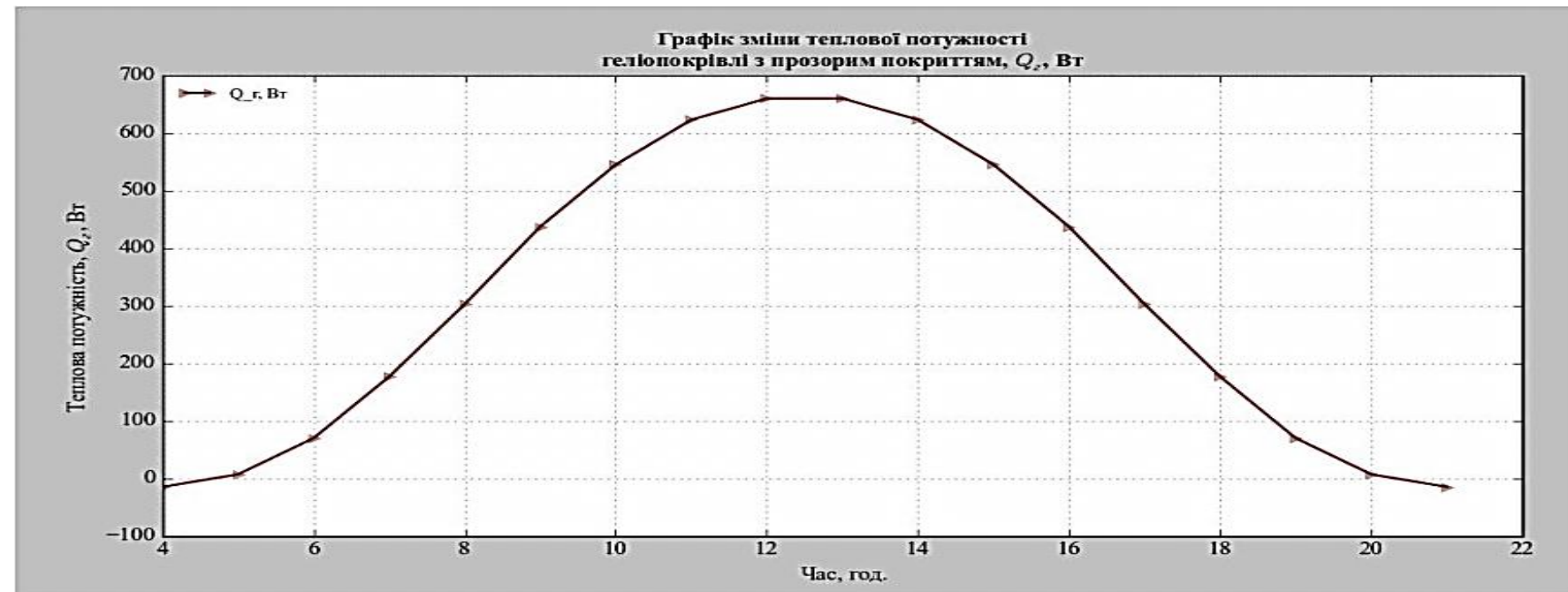


Рис. 2 Зміна теплової потужності ГС впродовж дня

Питома тепла потужність геліоколектора, Вт/м<sup>2</sup>:

$$Q_{\text{ЗОПСЕТ}} = I_{\text{ЗОПСЕТ}} \cdot \tau \cdot \rho \cdot F_{\text{ЗОПСЕТ}} \left( 1 - a_{\text{п}} \cdot \left( \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{пов}}}{K_{\text{я}}} \right) + b_{\text{п}} \cdot \left( \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{пов}}}{K_{\text{я}}} \right)^2 \right) \cdot K_{\text{еф}}$$

Робоче вікно програми розрахунку комбінованої системи сонячного теплопостачання із ІЕГІЗЗБ

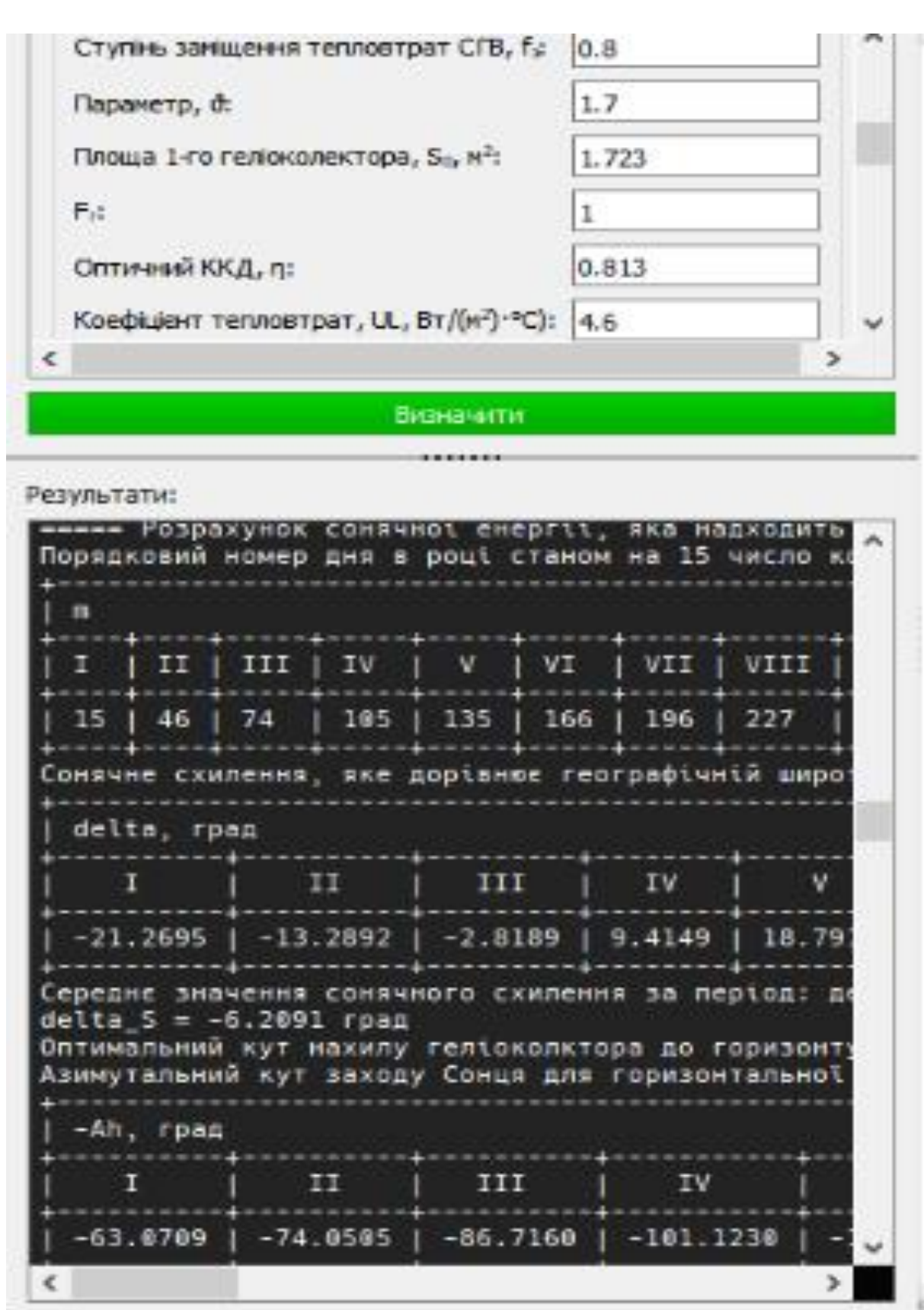


Рис.4 Робоче вікно програми

Маса викидів парникових газів ( $m_{\text{CO}_2}$ ), кг

$$m_{\text{CO}_2} = \sum (E_{\text{del},i} \times K_{\text{del},i}) / 1000$$

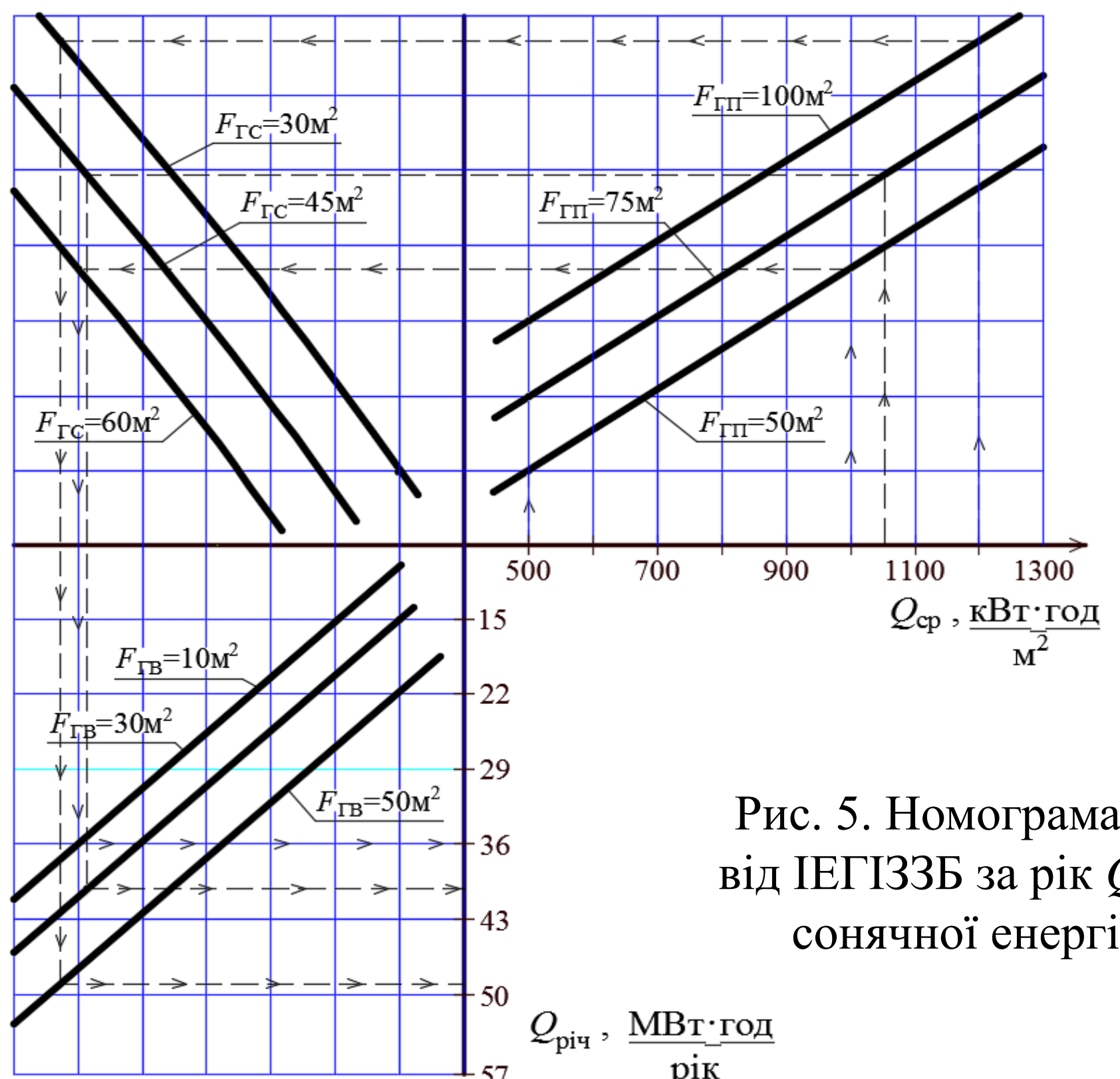
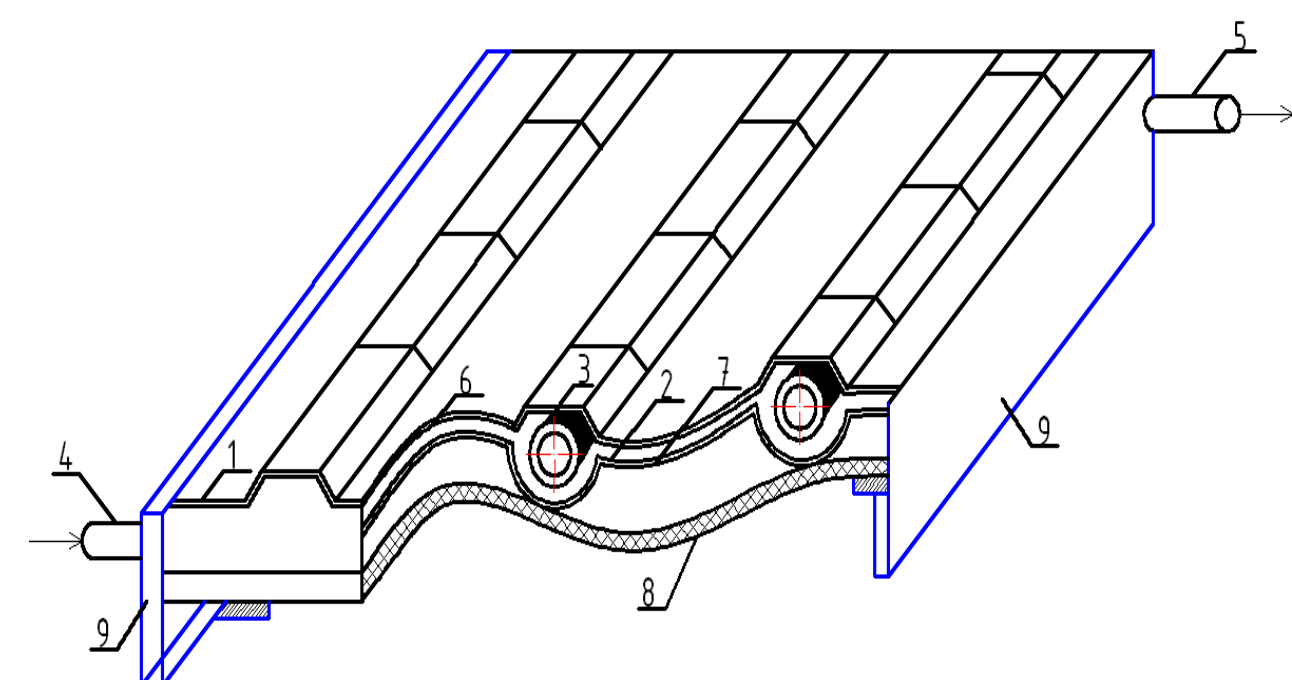


Рис. 5. Номограма для визначення теплових надходжень від ІЕГІЗЗБ за рік  $Q_{\text{річ}}$ , МВт·год/рік, залежно від кількості сонячної енергії, що надійшла на їх поверхню,  $Q_{\text{ср}}$ , (кВт·год)/м<sup>2</sup>

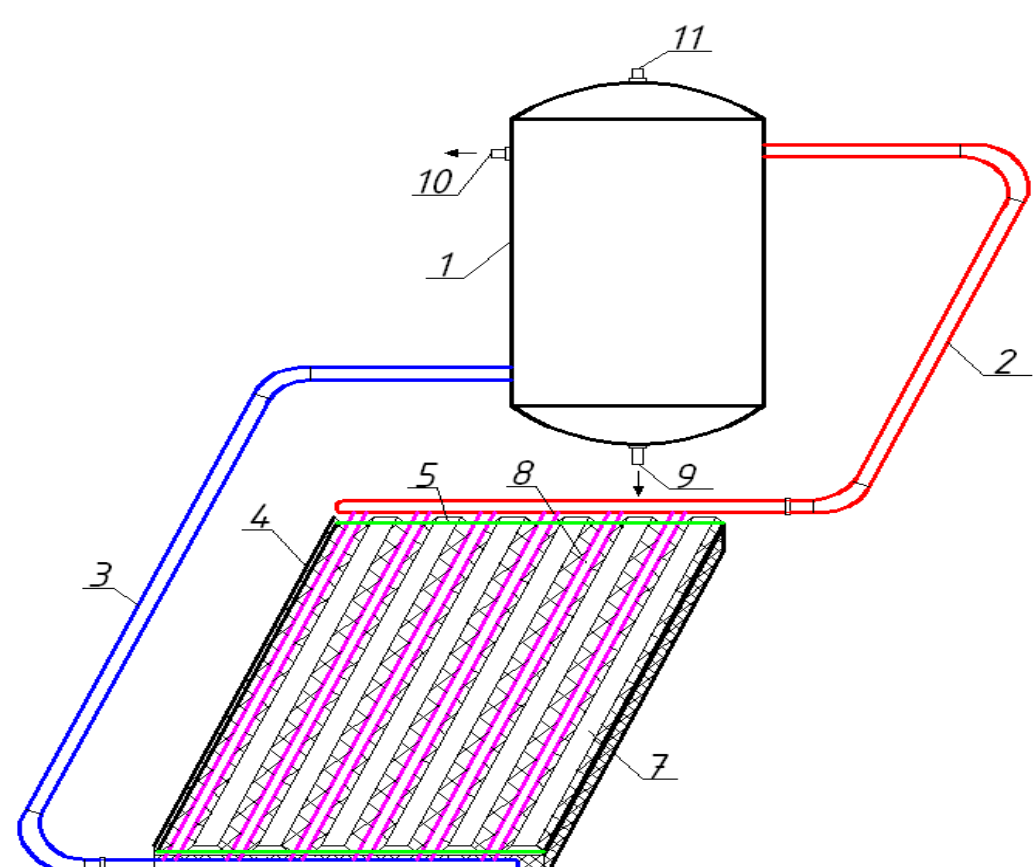
# Запропоновані конструкції ІЕГІЗЗБ та системи сонячного теплопостачання на їхній основі

Геліюпокрівля



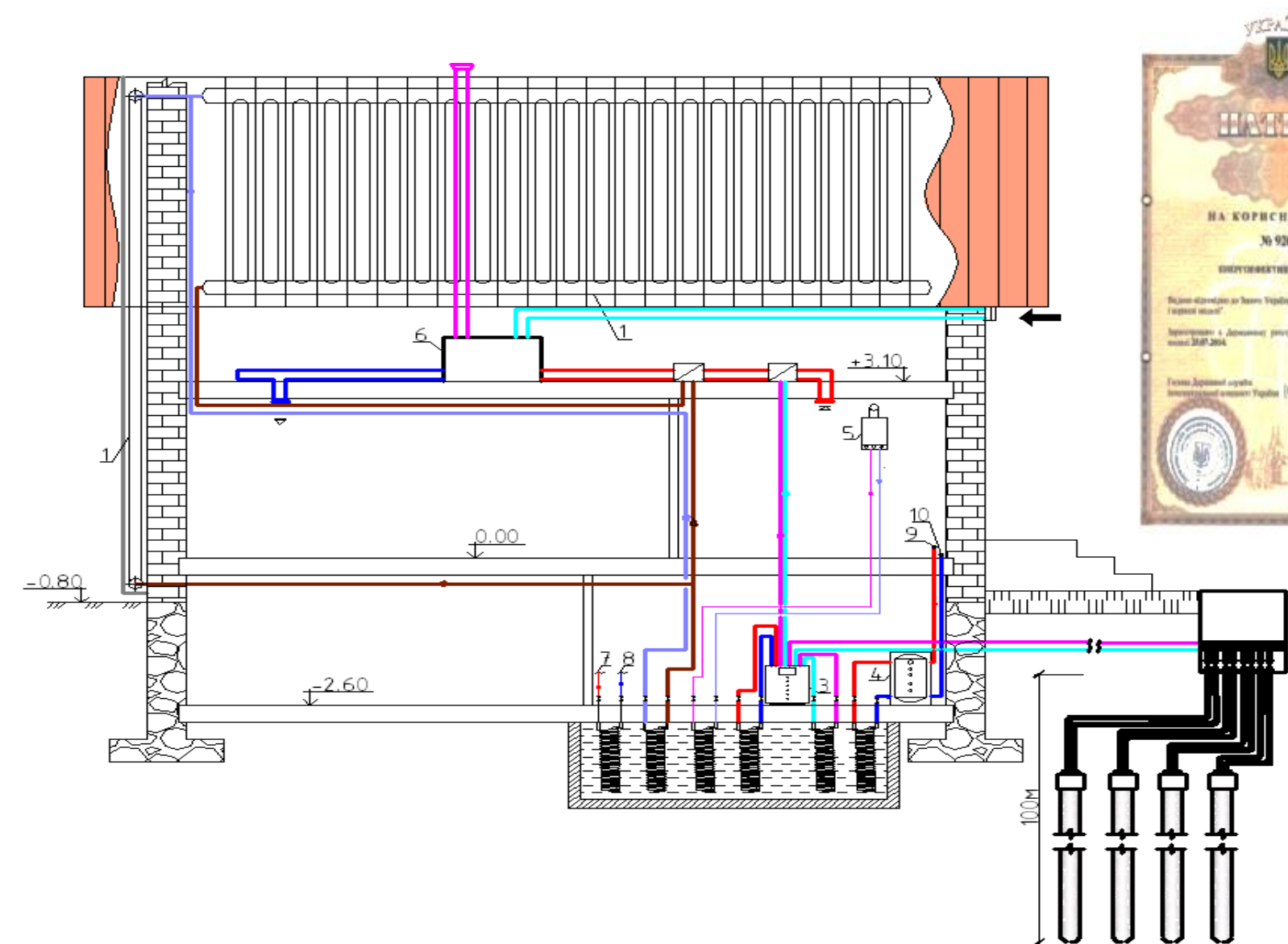
- 1 – покрівельний матеріал будівлі;
- 2 – нижнє гофроване покриття;
- 3 – трубки контуру циркуляції;
- 4, 5 – вхідний та вихідний патрубки;
- 6 – шар селективного матеріалу;
- 7 – дзеркальний шар;
- 8 – теплоізоляційний шар;
- 9 – крокви;

Гравітаційна геліосистема з геліюпокрівлею



- 1 – бак-акумулятор;
- 2 – подаючий трубопровід;
- 3 – зворотній трубопровід;
- 4 – геліюпокрівля;
- 5 – прозоре покриття;
- 6 – теплоізоляційний шар;
- 7 – покрівельний матеріал;
- 8 – трубки для теплоносія;
- 9 – патрубок для спуску води;
- 10 – патрубок для відбору води;
- 11 – повітровипускник

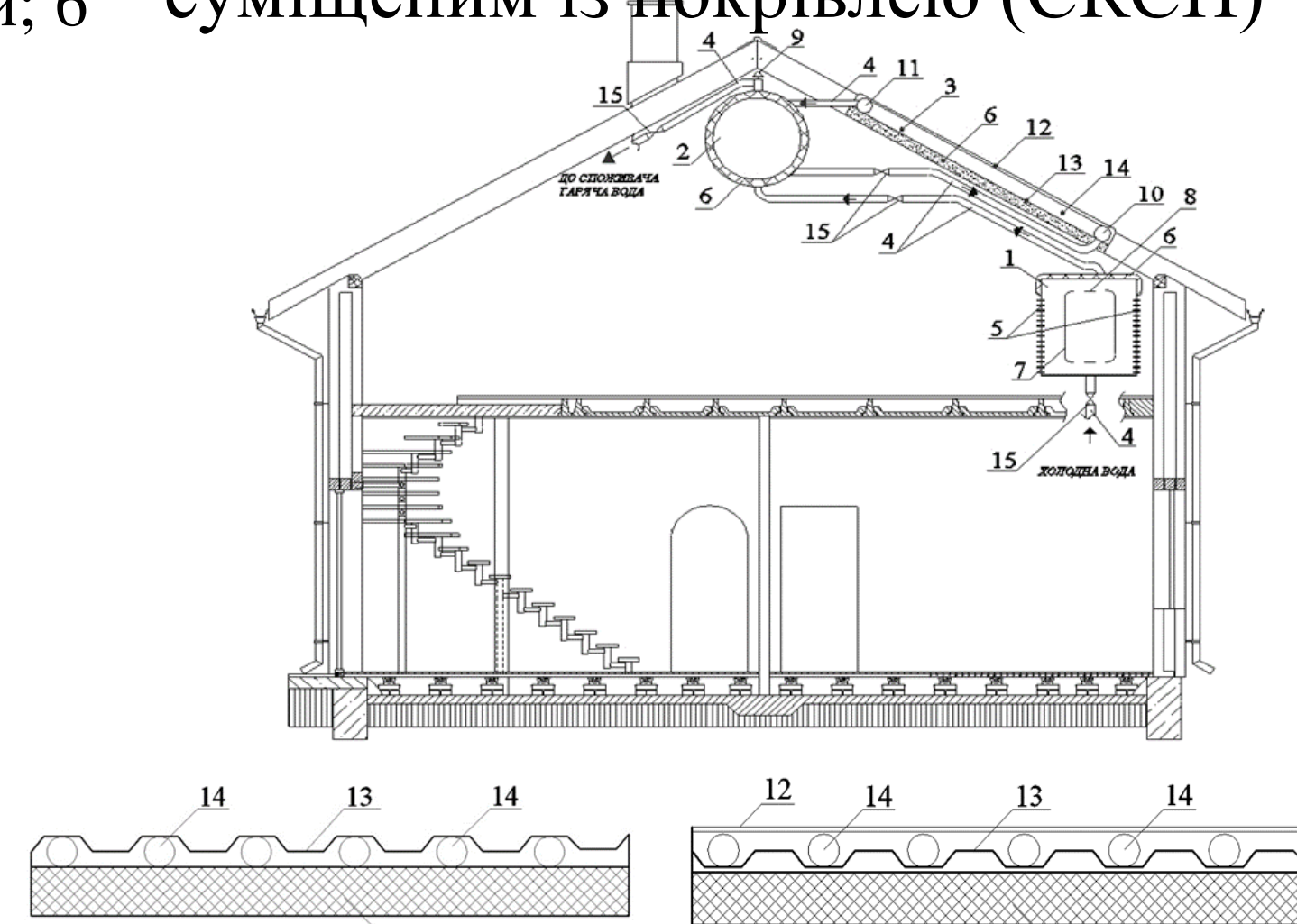
Енергоефективний будинок



- 1 – геліюпокрівля;
- 2 – ємнісний водонагрівач;
- 3 – тепловий насос;
- 4 – буферна ємність;
- 5 – електричний котел;
- 6 – рекуператор;
- 7 – система гарячого водопостачання;
- 8 – подача холодної води;
- 9 – подаючий трубопровід системи опалення;
- 10 – зворотній трубопровід системи опалення.

## Практичне застосування розроблених геліюколекторів

Комбінована система сонячного теплопостачання із геліюколектором суміщеним із покрівлею (СКСП)



Схематичне зображення геліюколектора

- 1 – бак попереднього підігріву холодної води,
- 2 – бак-акумулятор гарячої води,
- 3 – сонячного колектора,
- 4 – трубопроводи,
- 5 – ребра,
- 6 – теплоізоляція,
- 7 – вставка у формі пустотілого циліндра,
- 8 – перфорація,
- 9 – автоматичний повітровипускник,
- 10 – вхідний патрубок,
- 11 – вихідний патрубок,
- 12 – прозоре покриття,
- 13 – гофрований поглинач сонячної енергії,
- 14 – трубки для теплоносія,
- 15 – запірно-регулююча арматура

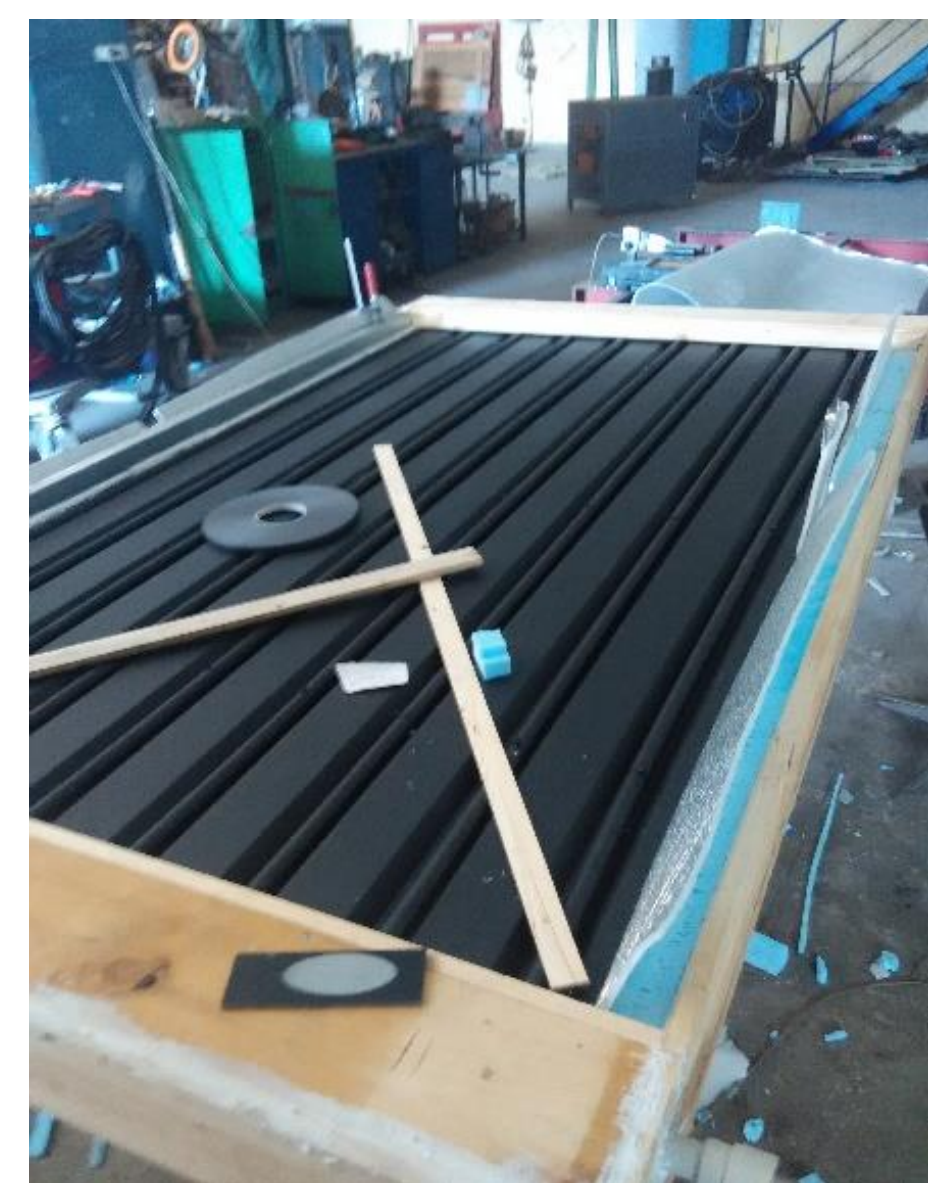


Рис.1 Процес виробництва геліюпокриття на ПП «Гізконтакт» у м.Харкові

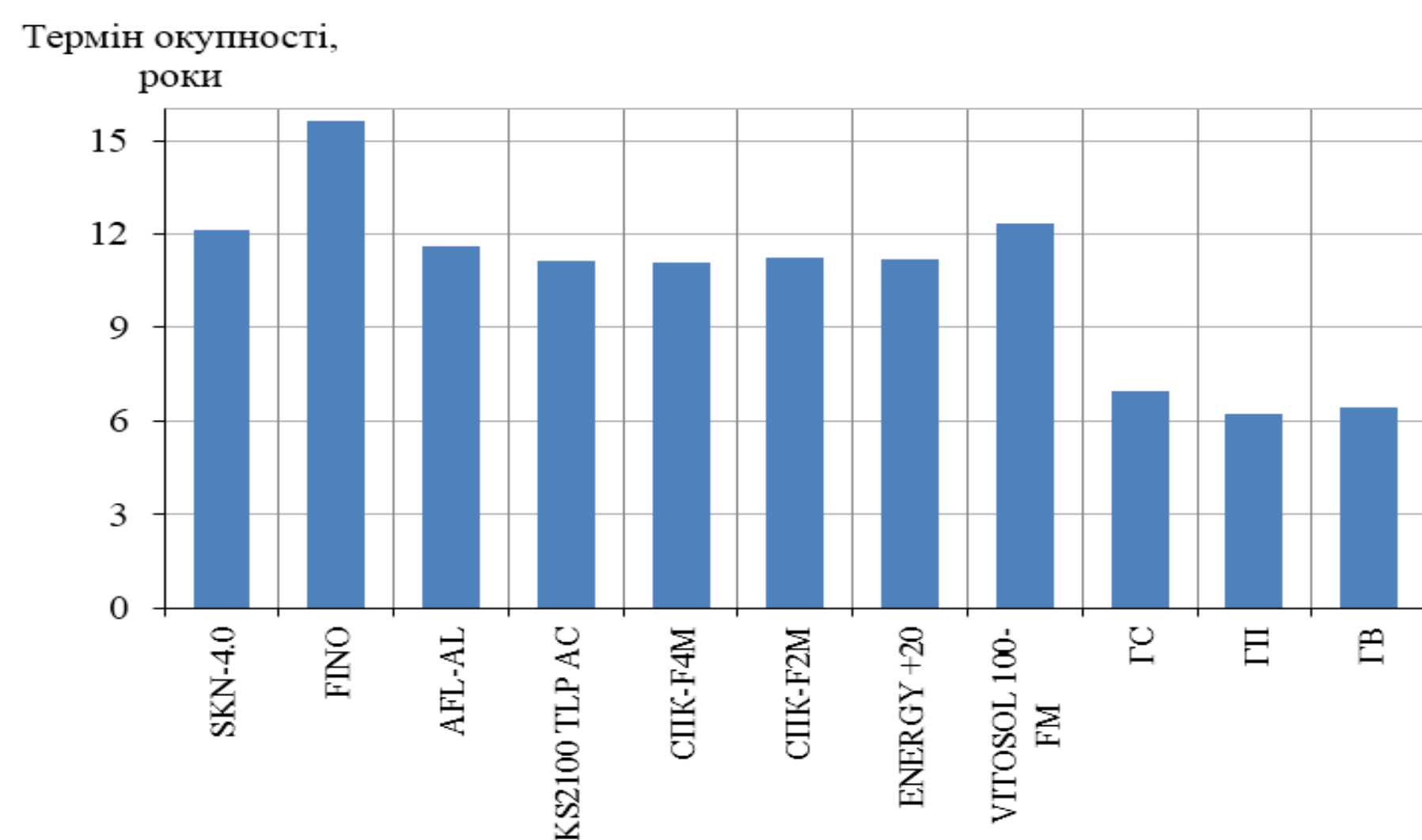
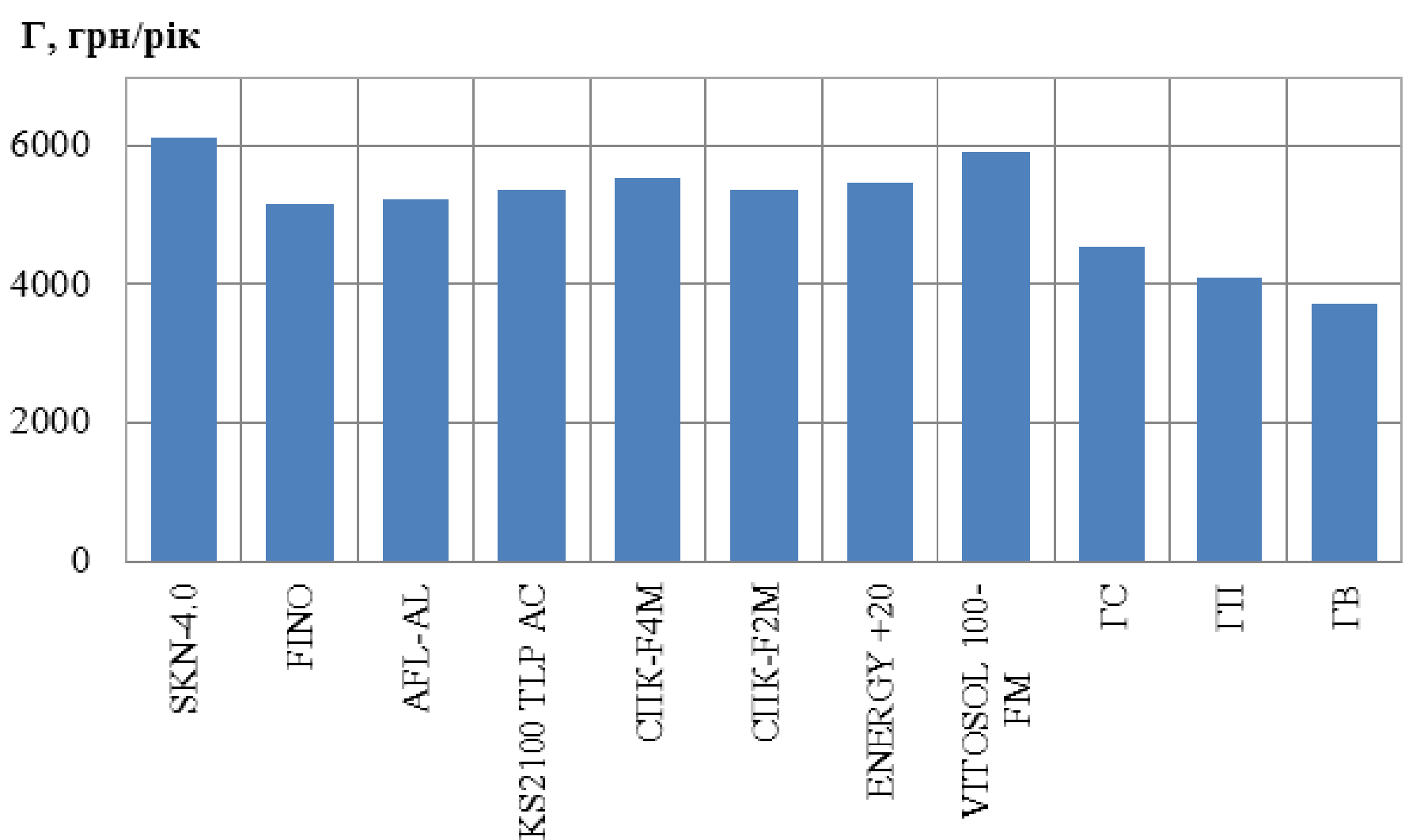
Рис.2 Натурні випробування геліюпокриття на ПП «Гізконтакт» у м.Харкові



Рис.3 Процес виробництва геліюпокриття у м. Львів

Рис.4 Натурні випробування геліюпокриття у м. Львові

# Економічне обґрунтування застосування ССТ з розробленими ІЕГІЗЗБ

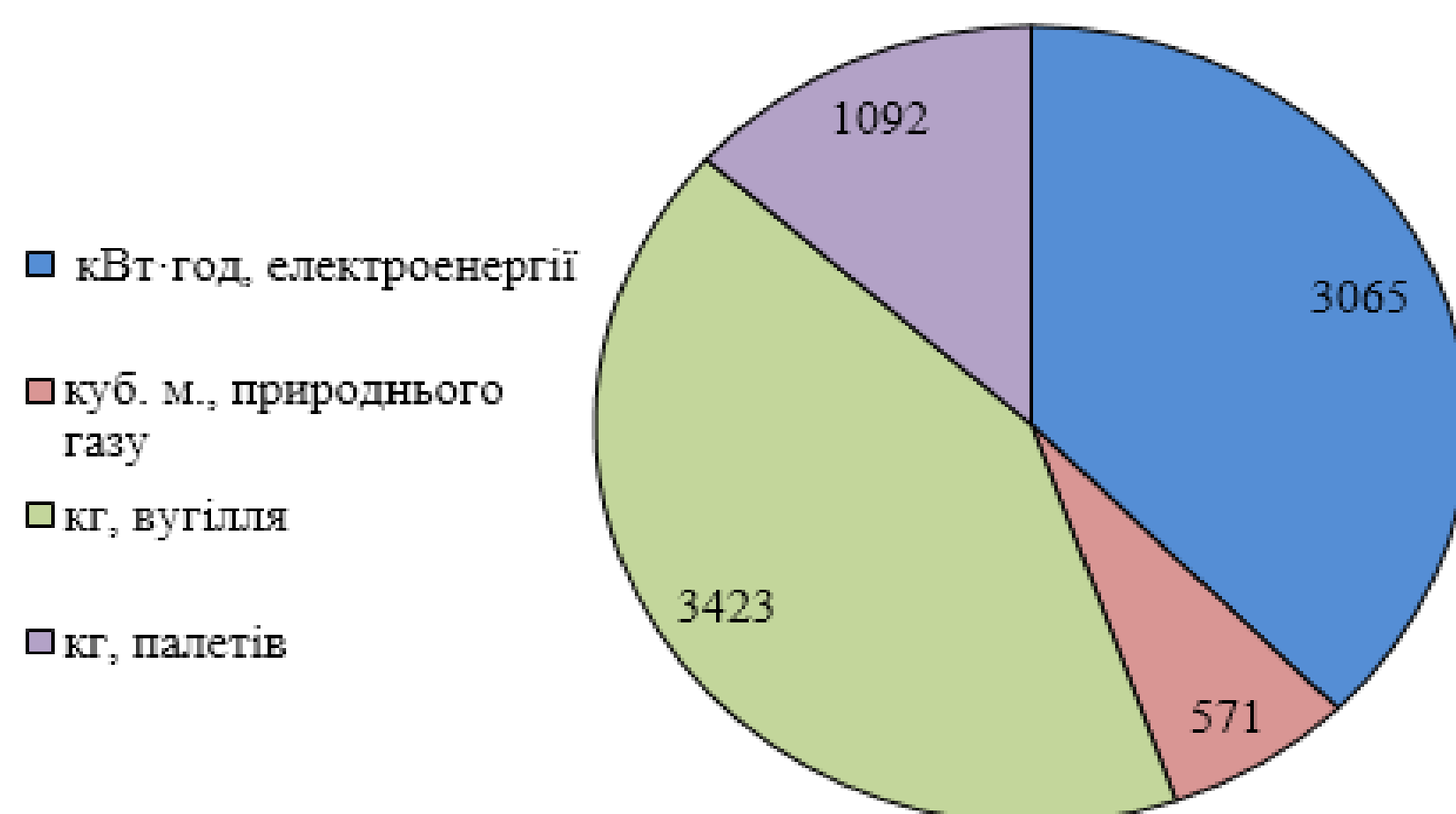


**Рис.1** Можливість річного збереження коштів споживачем за встановлення запропонованих геліоколекторів в ССТ

**Рис.2** Термін окупності існуючих на ринку геліоколекторів та ІЕГІЗЗБ

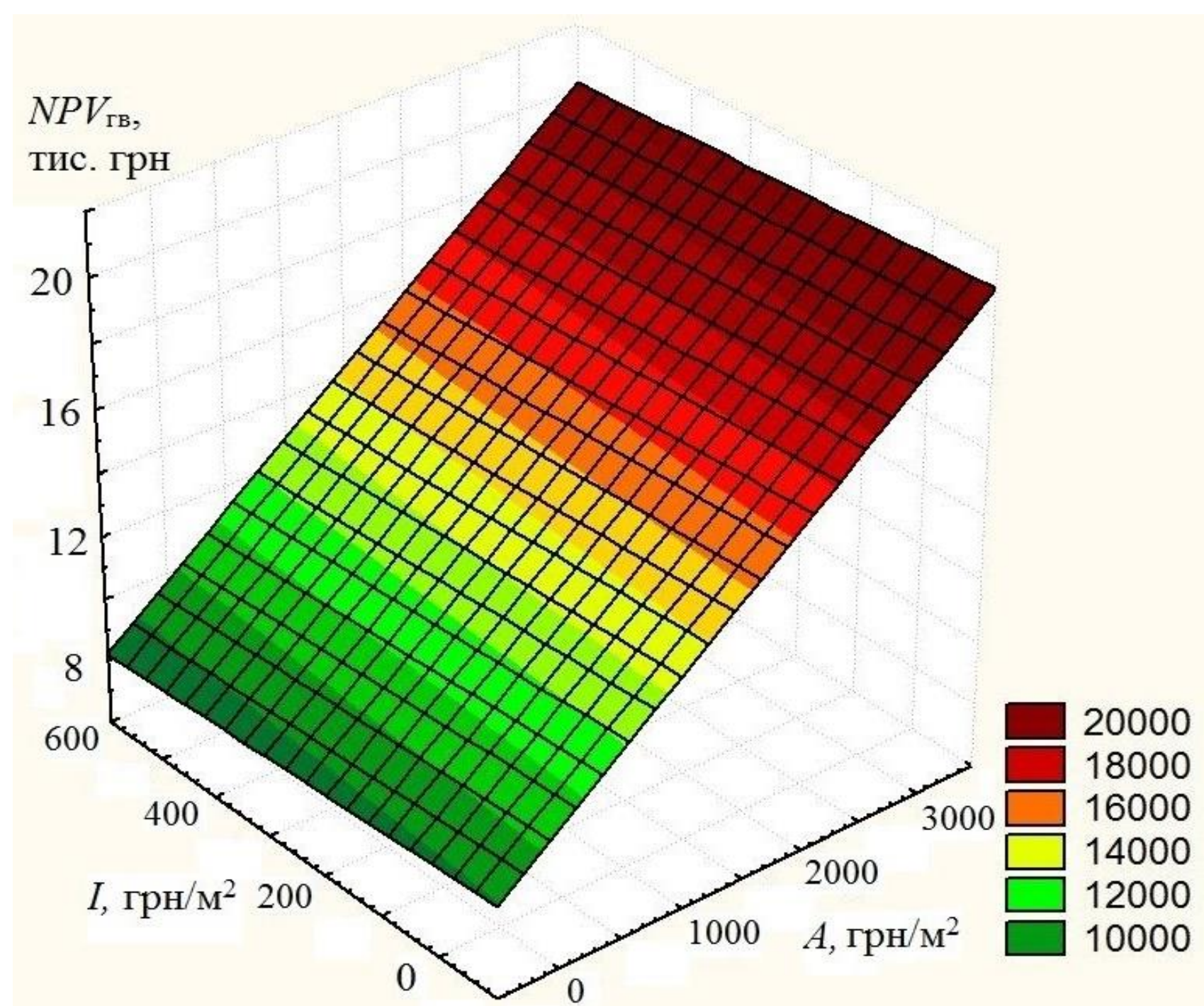
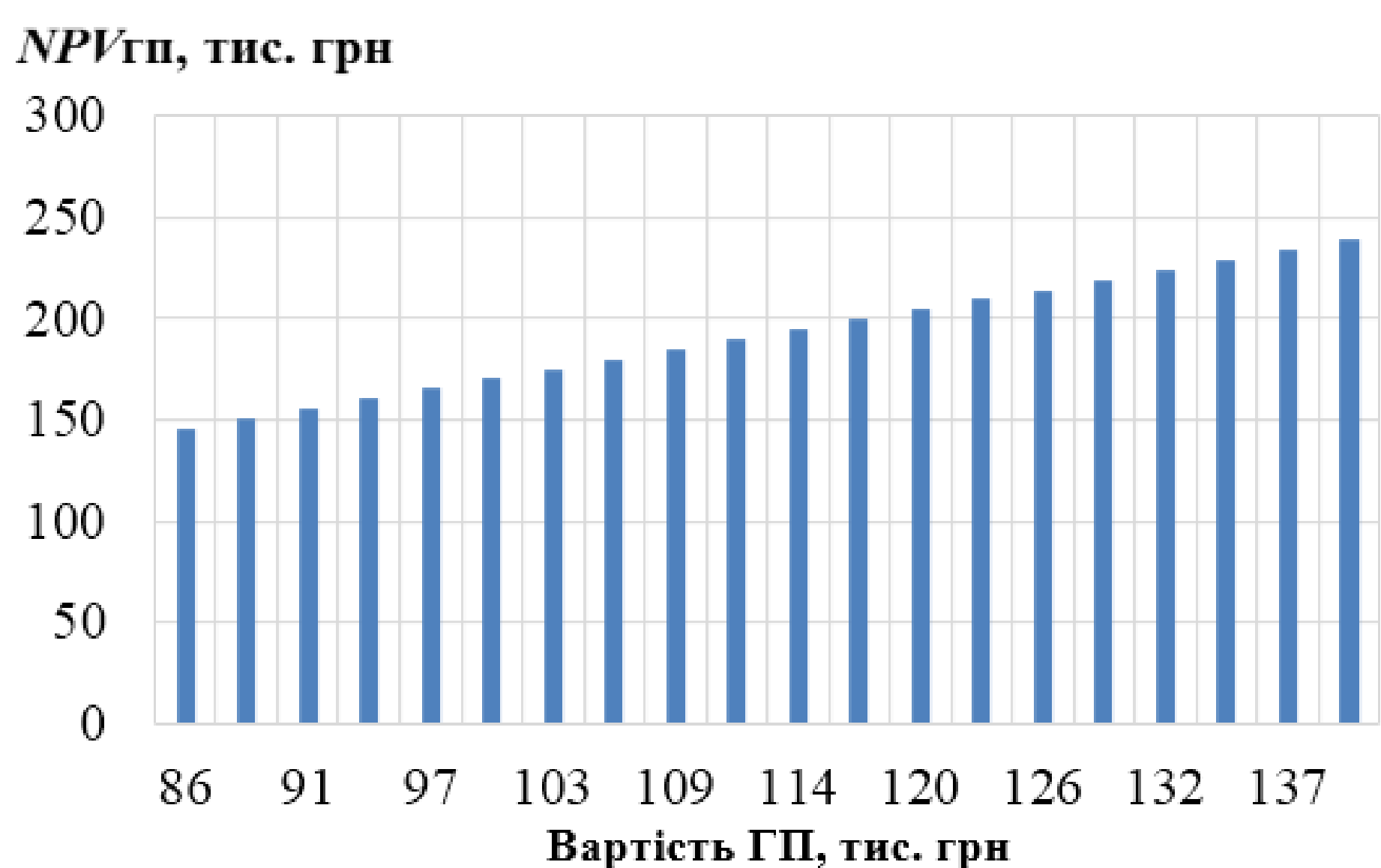
$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - IC$$

$CF_t$  – річні чисті грошові потоки;  
 $IC$  – вихідні інвестиції;  
 $k$  – ставка дисконтування;  
 $n$  – термін існування проекту.



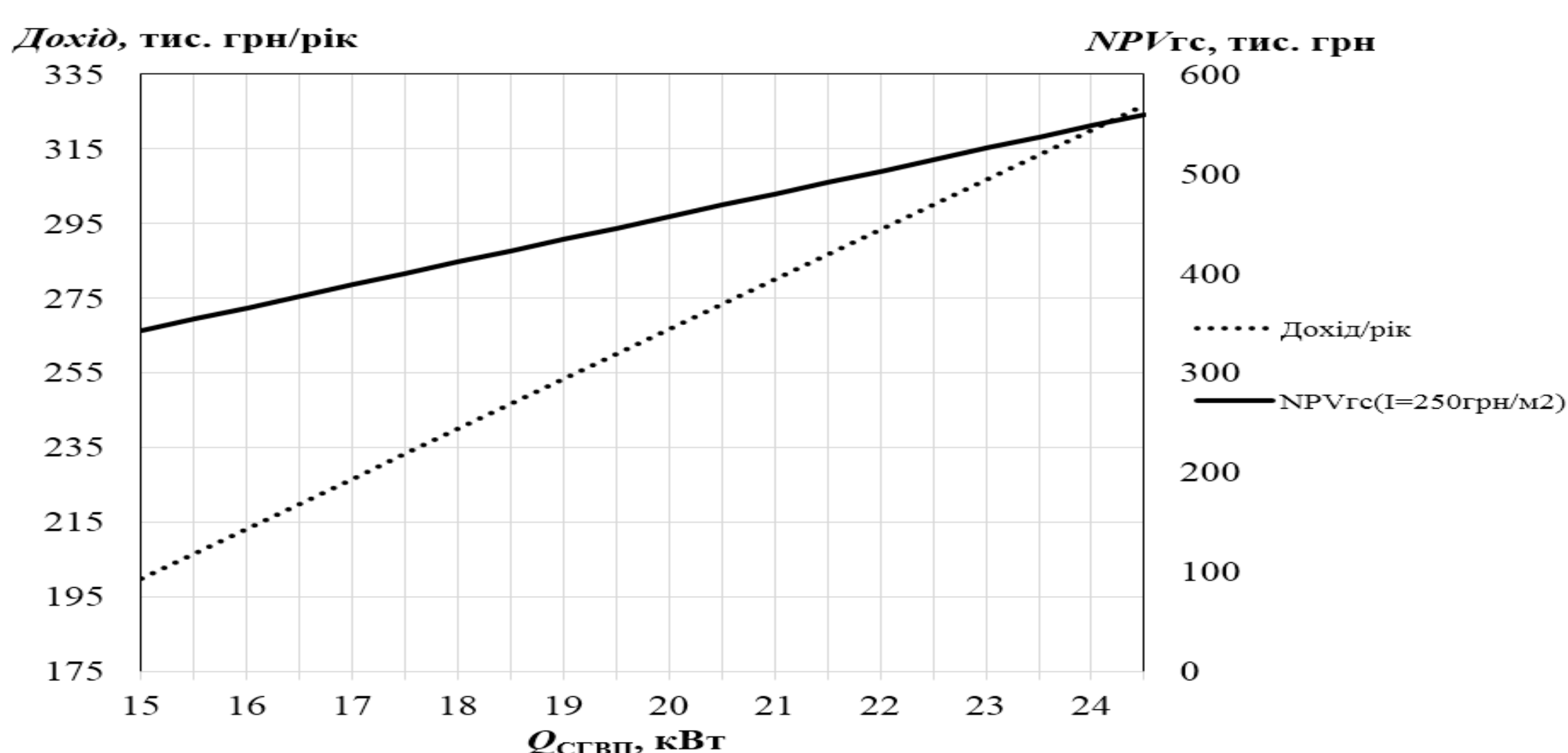
**Рис.3** Економія природнього газу системою сонячного теплопостачання із геліопокриттям за рік

**Рис.4** Річна економія енергоресурсів з використанням ІЕГІЗЗБ (на прикладі геліопокриття)



**Рис. 5.** Варіювання коштів за чистої теперішньої вартості NPV<sub>ГП</sub>, тис. грн від вартості геліопокриття та за інвестування в систему сонячного теплопостачання 500 грн в рік

**Рис. 6.** Рисунок 6.5 – Залежність чистої теперішньої вартості геліовікна NPV<sub>ГВ</sub>, тис. грн від варіювання інвестицій в СТ із ГВ I, грн/м<sup>2</sup> та затрат на амортизацію A, грн/м<sup>2</sup>



**Рис.7.** Оцінка проекту системи сонячного теплопостачання з геліостіною

## Потенціал одержання теплової енергії та зменшення викидів вуглекислого газу від реалізації систем теплозабезпечення на основі ІЕГІЗЗБ за нового будівництва в Україні

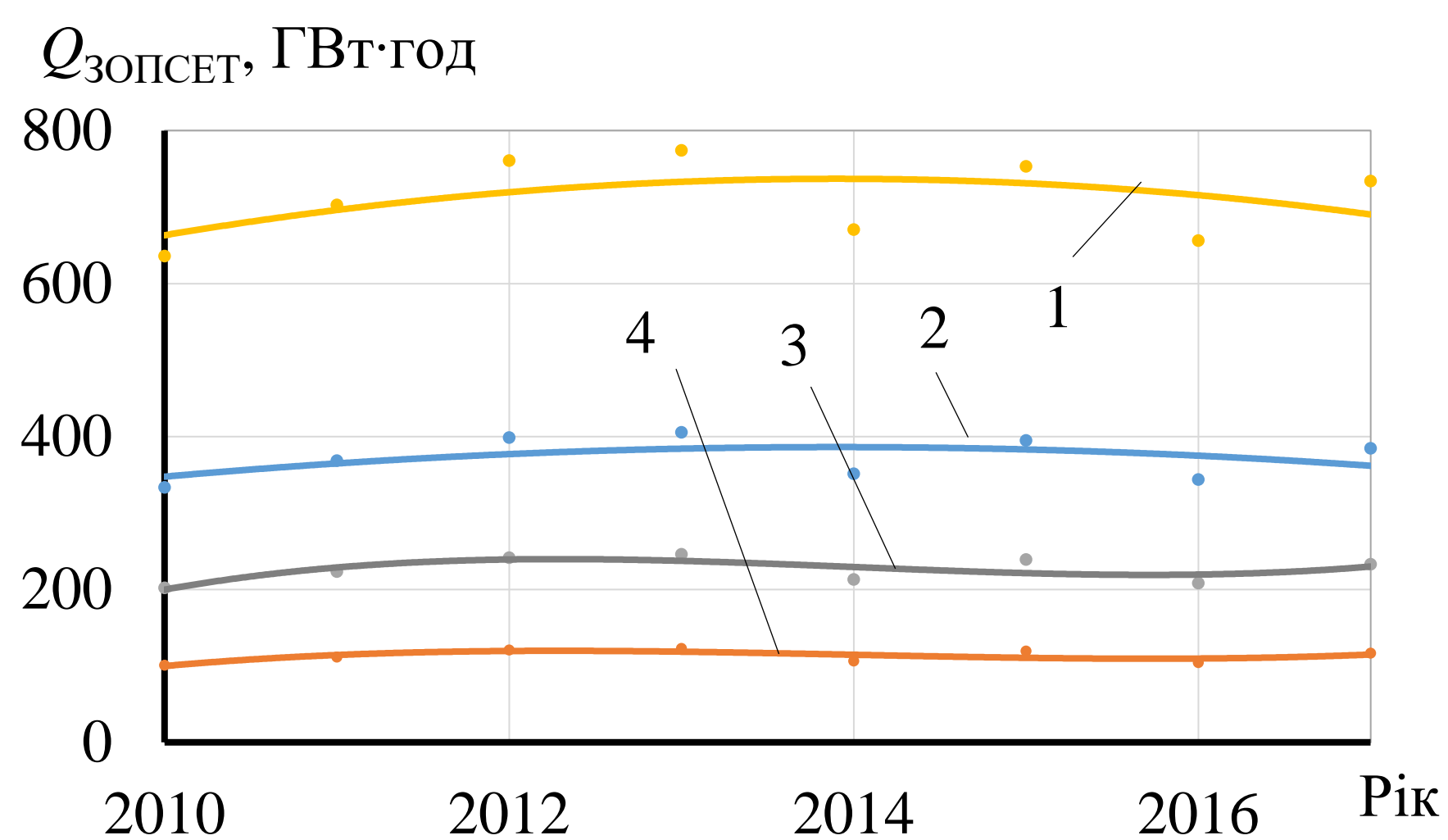


Рис. 1. Технічно можливий потенціал середньої за рік теплової енергії  $Q_{\text{ЗОПСЕТ}}$ , ГВт·год отриманої від СТ із ІЕГІЗЗБ при новому будівництві в Україні від:

- 1 – усіх ІЕГІЗЗБ разом;
- 2 – геліостін; 3 – геліопокриттів;
- 4 – геліовікон

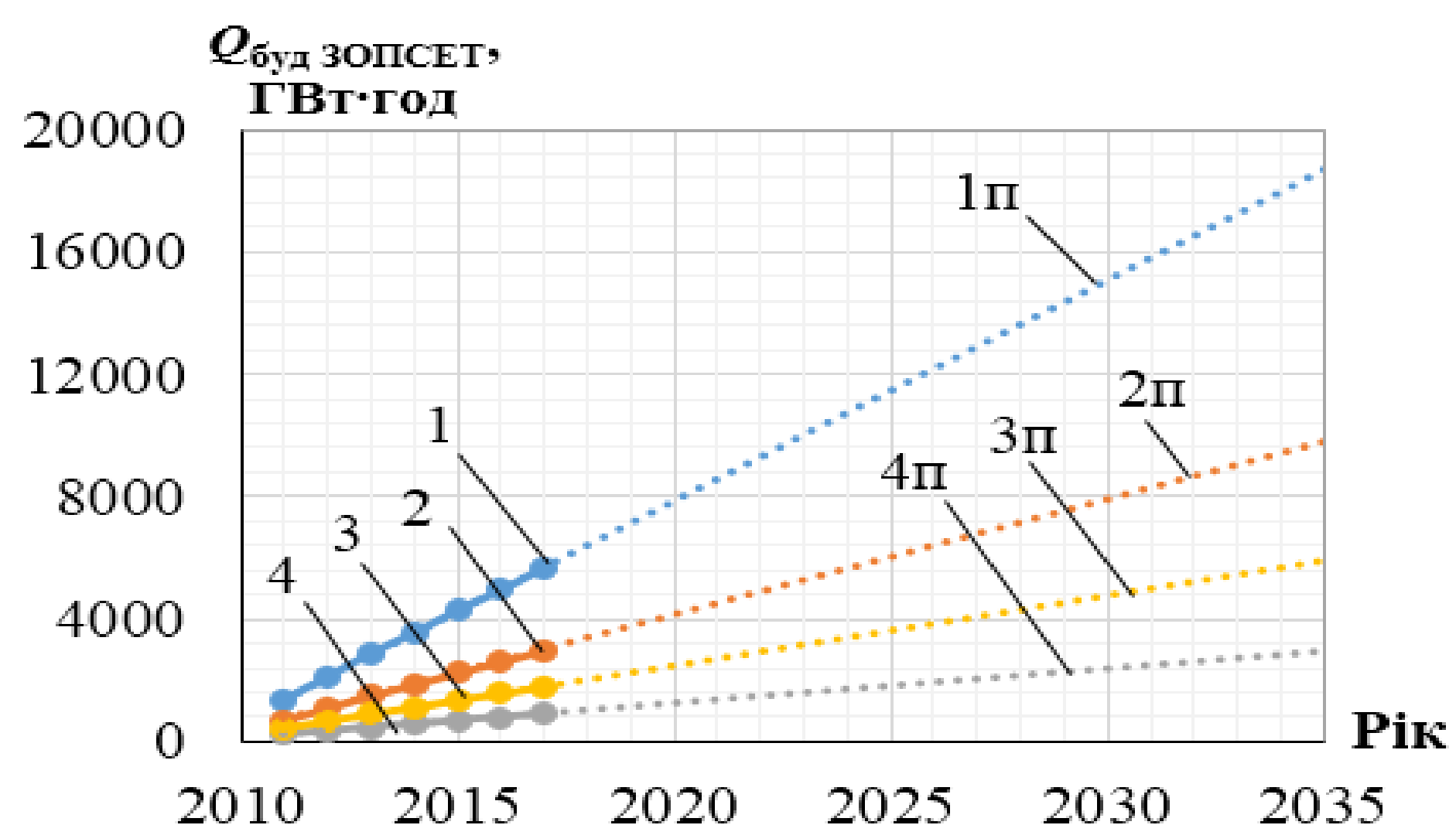


Рис. 2. Загальна кількість теплової енергії отримана за рік із накопиченням від СТ із ІЕГІЗЗБ при новому будівництві в Україні  $Q_{\text{буд.ЗОПСЕТ}}$ , ГВт·год, з технічно можливим прогнозом вироблення теплової енергії від ЗОПСЕТ до 2035 року від: 1 – усіх ІЕГІЗЗБ разом; 2 – геліостін; 3 – геліопокриттів; 4 – геліовікон (1п, 2п, 3п, 4п – відповідний прогноз)

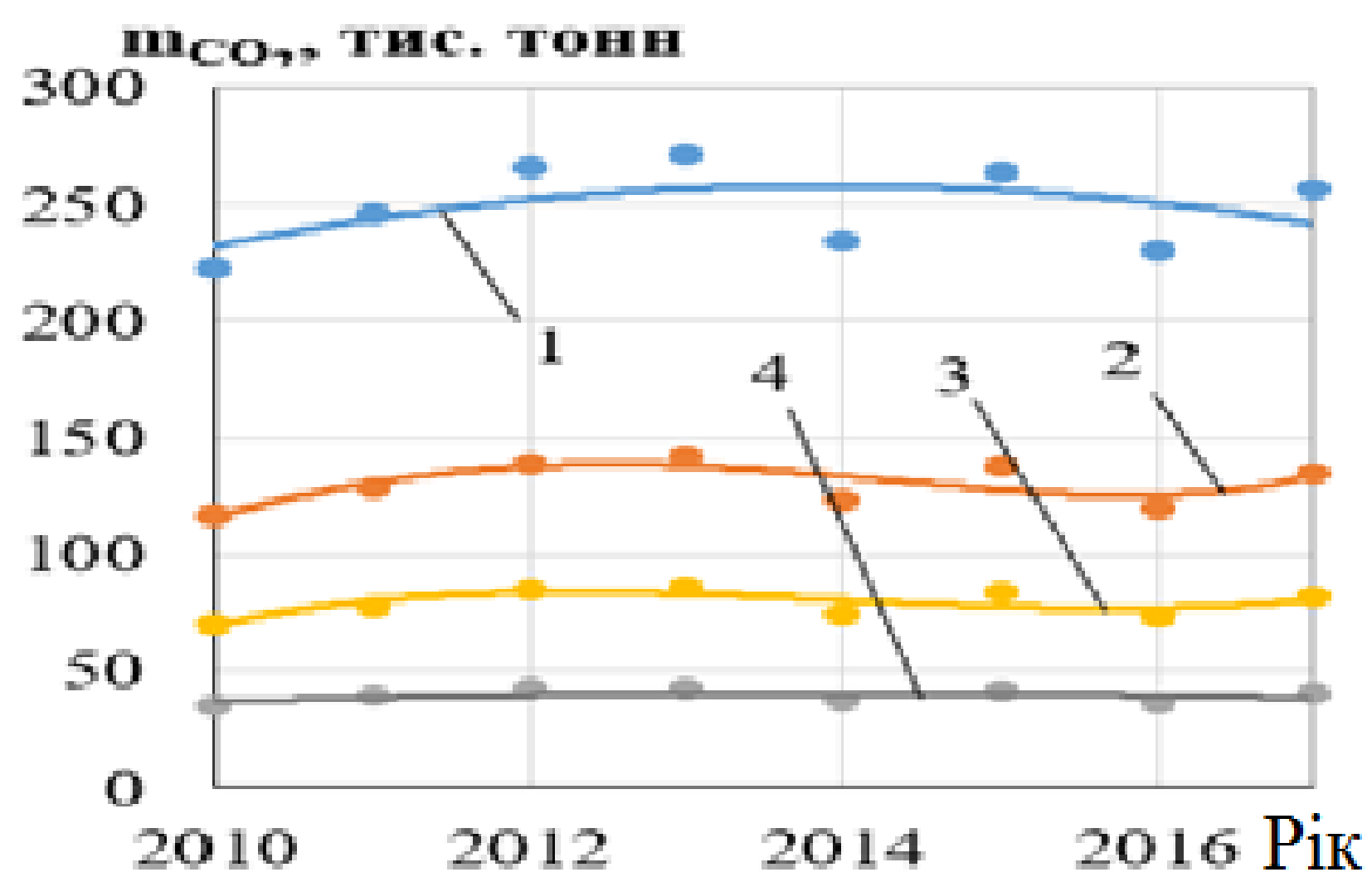


Рис. 3. Кількість вуглекислого газу  $m_{\text{CO}_2}$ , тис. тонн, що могла бути зменшена за застосування ІЕГІЗЗБ у при новому будівництві в Україні: 1 – усіх ІЕГІЗЗБ разом; 2 – геліостін; 3 – геліопокриттів; 4 – геліовікон

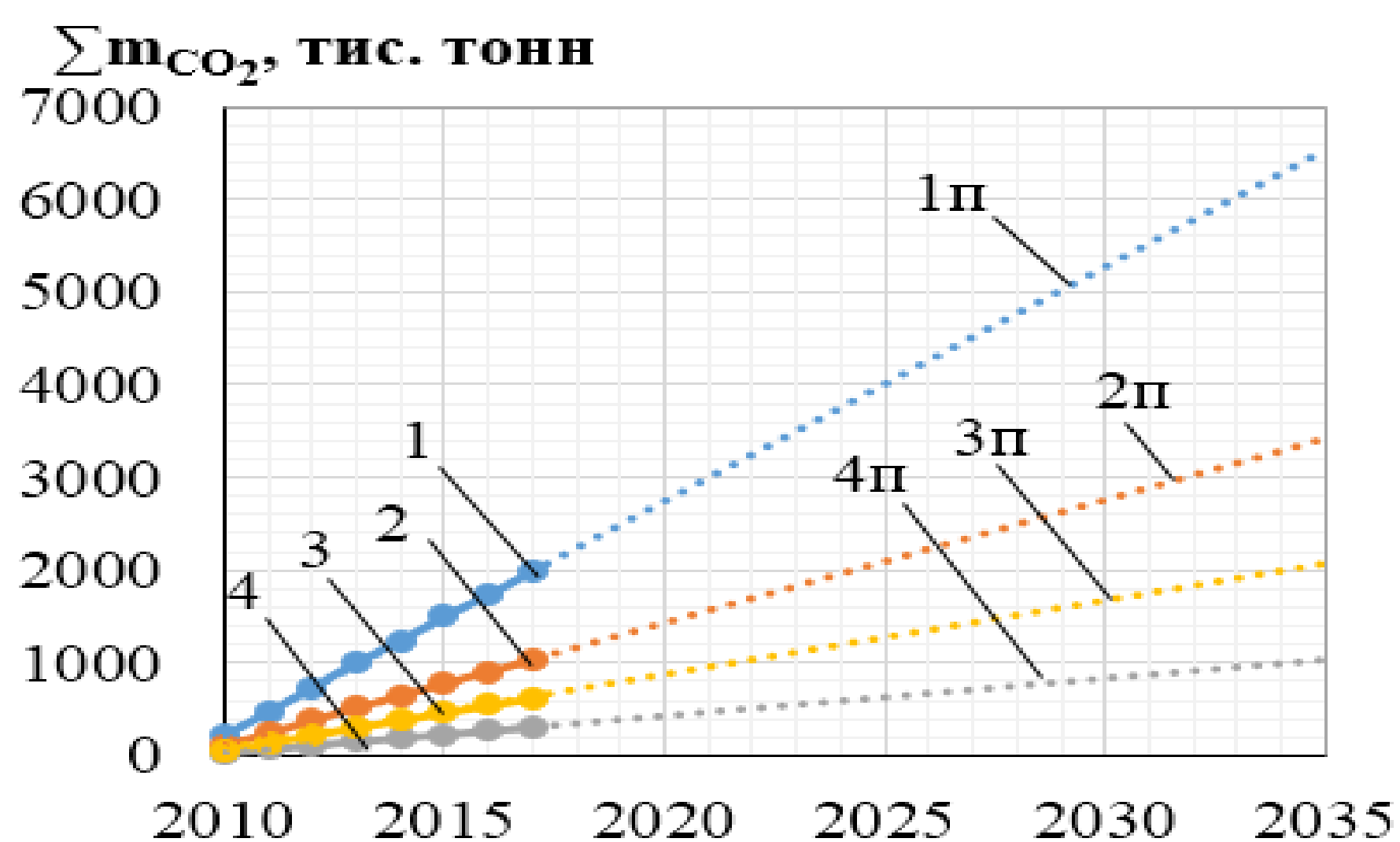


Рис. 4. Кількість вуглекислого газу  $\sum m_{\text{CO}_2}$ , тис. тонн, що могла бути зменшена за застосування ІЕГІЗЗБ при новому будівництві в Україні та з технічно можливим прогнозом його зменшення до 2035 року: 1 – усіх ІЕГІЗЗБ разом; 2 – геліостін; 3 – геліопокриттів; 4 – геліовікон (1п, 2п, 3п, 4п – відповідний прогноз)

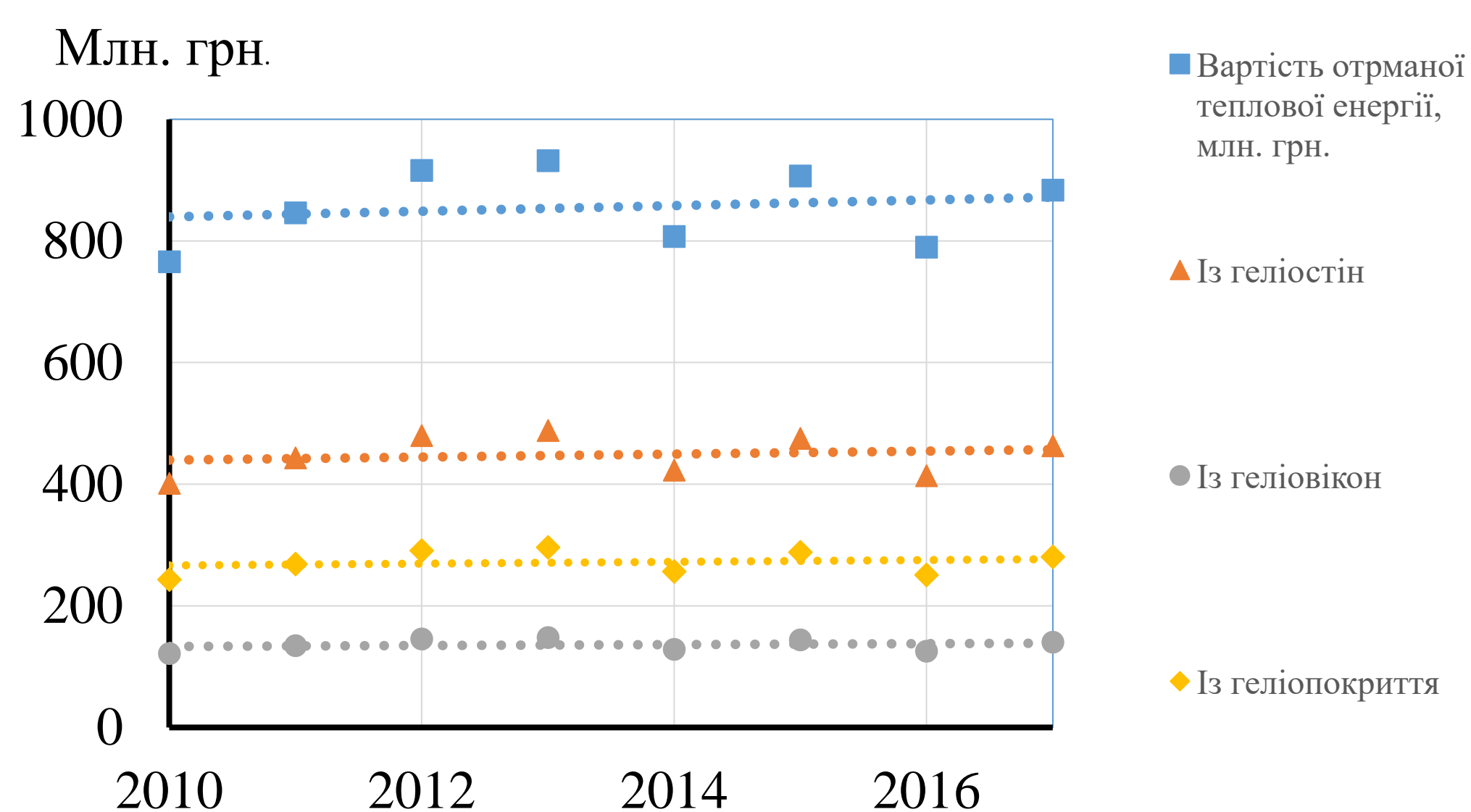


Рис. 5. Вартість отриманої енергії від СТ із ІЕГІЗЗБ

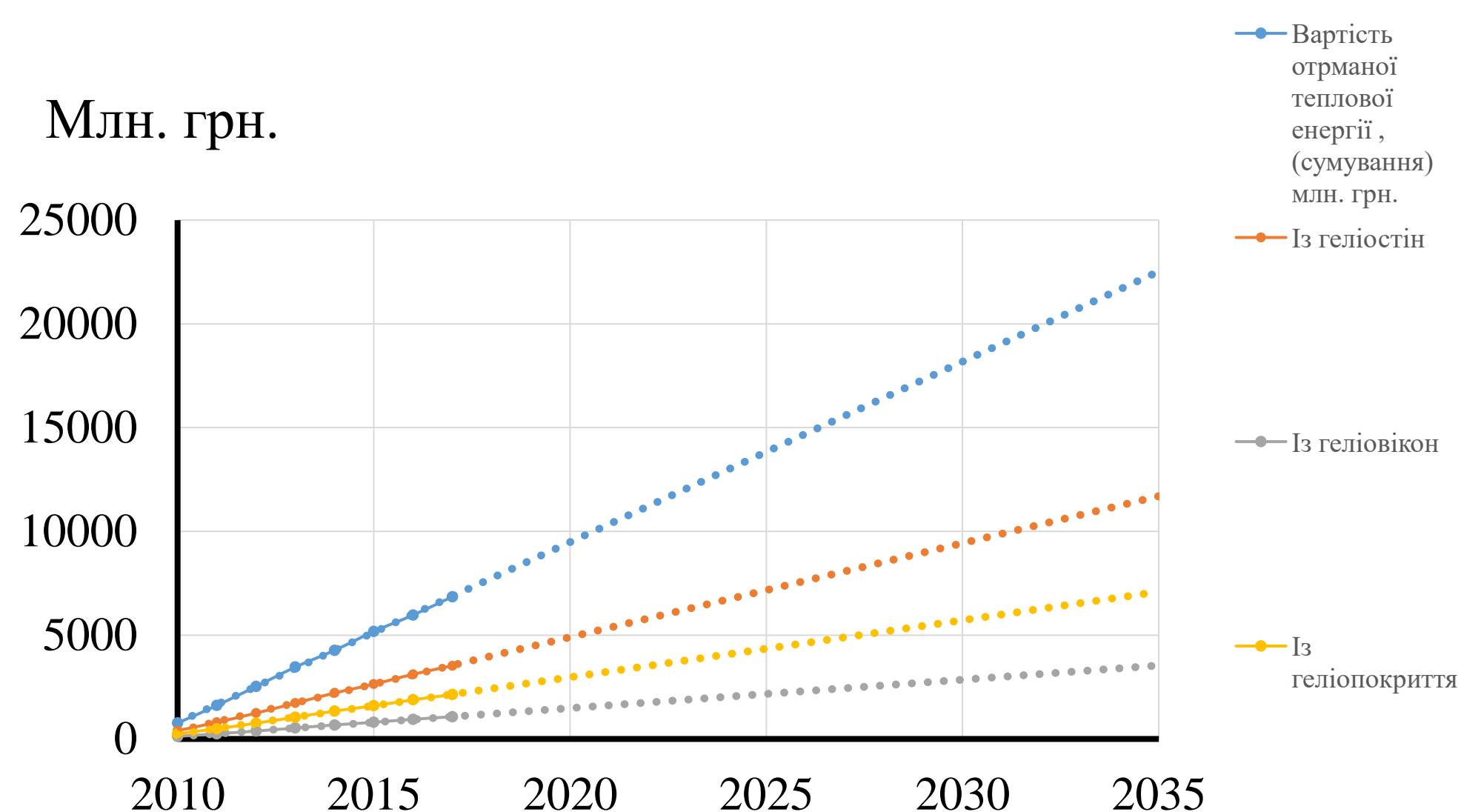


Рис. 6. Вартість отриманої енергії від СТ із ІЕГІЗЗБ із сумуванням

## ВИСНОВКИ

Відповідно до даної наукової роботи, у результаті проведених комплексних експериментальних досліджень теплофізичних параметрів зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову та систем теплопостачання на їхній основі встановлено вплив на їхні теплові характеристики динамічних режимів теплоносія, енергетичних, кінетичних характеристик довкілля та одержано відповідні графоаналітичні залежності.

Результати досліджень представленої наукової роботи використовувались під час створення комбінованих систем теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі ІЕГІЗЗБ. Було розроблено конструкції ІЕГІЗЗБ, зокрема геліостіни, геліопокриття, геліовікна, і створено методики розрахунку їхніх теплових характеристик. Крім того, вдосконалено інженерний метод розрахунку систем теплозабезпечення енергоефективних будівель, який враховує теплотехнічні характеристики запропонованих огорожень, умови експлуатації та вплив зовнішніх факторів і характерних кліматичних особливостей України в умовах відбудови.

Теоретично та експериментально підтверджено ефективність застосування запропонованих технічних рішень, зокрема встановлено, що коефіцієнт корисної дії (ККД) геліовікна становить 0,39–0,47, відповідно геліостіни – 0,51–0,67 та геліопокриття – 0,57–0,71. Розроблена комбінована система теплопостачання та конструкції ІЕГІЗЗБ захищені патентами України на корисну модель та – на винахід.

Тому варто відмітити, що як результат виконання цієї наукової роботи, набула подальшого розвитку методологія розрахунку теплових процесів у комбінованих системах теплозабезпечення енергоефективних будівель з урахуванням ІЕГІЗЗБ, яка базується на поєднанні експериментальних та аналітичних досліджень із врахуванням кліматичних особливостей кліматичних районів, що є особливо актуальним на сьогодні для відбудови України у воєнний та післявоєнний час.