

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

НЕТРАДИЦІЙНІ ТА ПОНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

**РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ГАРЯЧОГО
ВОДОПОСТАЧАННЯ БУДІВЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ
СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ**

РОЗРАХУНКОВА РОБОТА

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавр
за спеціальністю: 144 «Теплоенергетика»*

Укладачі: **В.В. Дубровська, В.І. Шкляр**

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент:	Гавриш А.С.	канд. техн. наук, доцент.
Відповідальний редактор	Суходуб І.О.	канд. техн. наук, доцент.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 3 від 01.12.2022 р.)
за поданням Вченої ради Навчально наукового інституту атомної та
теплової енергетики (протокол № 3 від 26.10.2022 р.)*

В навчальному посібнику наведено методику проведення розрахунків по визначенню основних характеристик сонячної водонагрівальної установки для житлової будівлі.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика».

Реєстр. № 22/23-225. Обсяг 2,3 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© В.В. Дубровська, В.І. Шкляр 2022
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. Мета розрахункової роботи.....	5
2. Завдання на розрахункову роботу	5
3. Порядок виконання та оформлення завдання	5
4. Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи	6
4.1. Визначення теплового навантаження об'єкту на ГВП.....	6
4.2. Визначення сонячного потенціалу місцевості.....	8
4.3. Розрахунок ступеня заміщення традиційного палива.....	16
4.4. Вибір обладнання сонячної установки для ГВП.....	25
4.5. Техніко-економічний аналіз використання сонячної установки	35
4.6. Спрощений розрахунок характеристик СУ за номограмою фірми Sintsolar.....	39
5. Висновки по роботі	39
6. Приклад розрахунку площі СК для системи ГВП	41
7. Вихідні характеристики для розрахунку сонячної системи ГВП	44
Висновки	46
Список рекомендованої літератури.....	46
Список посилань.....	47
Додатки.....	48

ВСТУП

Виснаження світових паливно-енергетичних ресурсів, постійно зростаючі потреби споживачів, що неминуче викликають підвищення цін на енергоносії, як на світовому ринку, так і в Україні, загострило проблему впровадження енергозберігаючих технологій.

Використання сонячної енергії для теплопостачання індивідуальних, комунальних та промислових об'єктів займає важливе місце в розвитку поновлювальної енергетики. Цьому сприяє наявність ресурсної та технологічної бази, кліматичних умов, які дозволяють використовувати сонячні установки (СУ) в будь-якому регіоні країни, досвід експлуатації достатньої кількості експериментальних геліотехнічних установок, що мають досить сприятливі терміни окупності.

Існуючі методи розрахунку таких систем дозволяють на основі використання кліматичної інформації та з урахуванням характеристик застосовуваного обладнання визначити їх основні параметри: коефіцієнт заміщення навантаження (частка сонячної енергії в покритті навантаження) за аналізований період (місяць, сезон, рік), корисну теплопродуктивність установки за цей період, площу сонячних колекторів в установці, економію палива, що забезпечується використанням сонячної енергії.

Основними причинами, що стримують впровадження систем альтернативного теплопостачання, є високий рівень початкових капітальних витрат, добова та сезонна нерівномірність виробництва енергії, а також жорстка залежність від кліматичних умов. З урахуванням кліматичних умов України, обов'язковою умовою для практичного використання систем альтернативного теплопостачання на базі джерела поновлювальної енергії є використання резервного (додаткового) традиційного джерела енергії.

1. МЕТА РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

Розрахункова робота спрямована на ознайомлення студентів з методикою вибору і розрахунку автономної системи гарячого водопостачання (ГВП) об'єкту на базі сонячного колектора (СК). Виконання розрахунків дозволить студентам поглибити знання з дисципліни «Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії», визначати сонячний потенціал для певної місцевості, розраховувати та обирати обладнання для покриття теплового навантаження об'єкту, навчитися користуватися довідковою літературою і каталогами фірм-виробників обладнання.

2. ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВУ РОБОТУ

Розрахувати автономну систему гарячого водопостачання котеджу з використанням сонячного колектору та традиційного джерела енергії. Будівля, в якій мешкає m людей, розташована в місцевості – M . Витрата гарячої води однією людиною становить N літрів води за добу. СК встановлений під кутом s до горизонту з орієнтацією на південь. В теплогенераторі (котлі) з коефіцієнтом корисної дії $\eta_{ТГ}$ використовується органічне паливо – P з теплотою згоряння – Q^P_H . Визначити енергетичну, екологічну та економічну доцільність впровадження даної системи.

3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗАВДАННЯ

Розрахункова робота складається з наступних розділів:

1. Визначення навантаження на ГВП даного об'єкту та сонячного потенціалу місцевості.

2. Вибір типу колектору та розрахунок його площі і кількості теплоти, яку ця установка може виробити за певний період року.
3. Розрахунок ступеня заміщення палива.
4. Проведення техніко-економічного аналізу використання сонячної установки.
5. Проведення спрощеного розрахунку характеристик СУ за номограмою фірми Sintsolar.
6. Висновки по роботі.

Пояснювальна записка до розрахункової роботи повинна бути виконана на аркушах А4 з рамкою і супроводжуватись відповідними схемами, рисунками та поясненнями до них.

4. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

Традиційною схемою більшості систем сонячного теплопостачання (ССТ) є двоконтурна з використанням СК і акумуляцією отриманої енергії в баку-акумуляторі (рис. 4.1).

4.1. Визначення теплового навантаження об'єкту на ГВП

Фактичне навантаження гарячого водопостачання житлових будинків, тобто кількість теплоти, необхідна для нагрівання води на потреби домашнього господарства, сильно залежить від звичок мешканців будівлі.

Добова витрата гарячої води G^D , л/доба, визначається з рівняння:

$$G^D = N \cdot m, \quad (4.1)$$

де N – норма споживання однією людиною гарячої води з температурою $55\text{ }^\circ\text{C}$ за добу, яка приймається за нормами проектування внутрішнього

водопроводу будівель [1]. Для сонячних систем гарячого водопостачання житлових будівель рекомендується приймати норму споживання гарячої води 85 л/(люд. доба);

m – кількість мешканців;

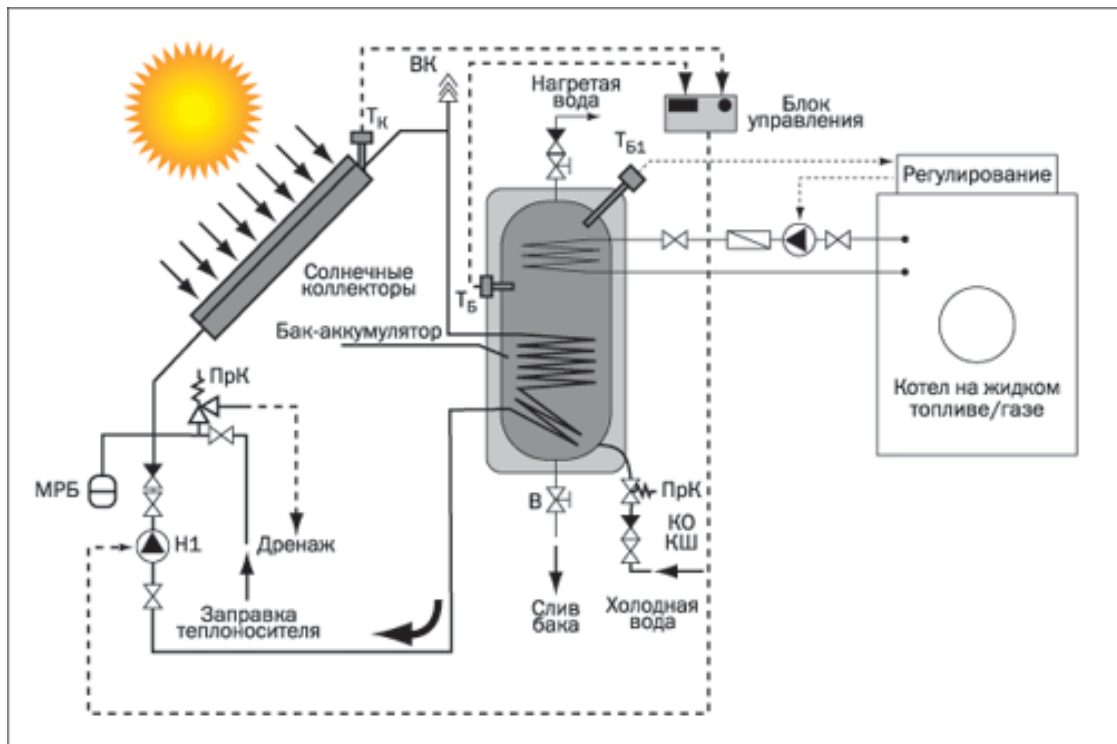


Рисунок 4.1. Двоконтурна схема системи сонячного теплопостачання з використанням СК і акумуляцією отриманої енергії в баку-акумуляторі

Річна витрата гарячої води G^{PIK} , л/рік, складає:

$$G^{PIK} = G^D \cdot 365. \quad (4.2)$$

Добова потреба в тепловій енергії – $Q_{ГВП}^D$ для гарячого водопостачання житлових будинків розраховується за формулою:

$$Q_{ГВП}^D = 1,163 \cdot G^D \cdot (t_{ГВ} - t_{ХВ}), \text{ (Вт}\cdot\text{год)/доба,}$$

$$Q_{ГВП}^D = 4,19 \cdot 10^{-6} \cdot G^D \cdot (t_{ГВ} - t_{ХВ}), \text{ ГДж/доба,} \quad (4.3)$$

де $t_{ГВ}$ – температура гарячої води, приймається 55 °С;

$t_{ХВ} = 15$ °С – температура холодної води в літній період та $t_{ХВ} = 5$ °С в

зимовий період. В роботі вважати, що температура холодної води стала і дорівнює 15 °С.

Графік середнього споживання води протягом доби наведено на рисунку 4.2.

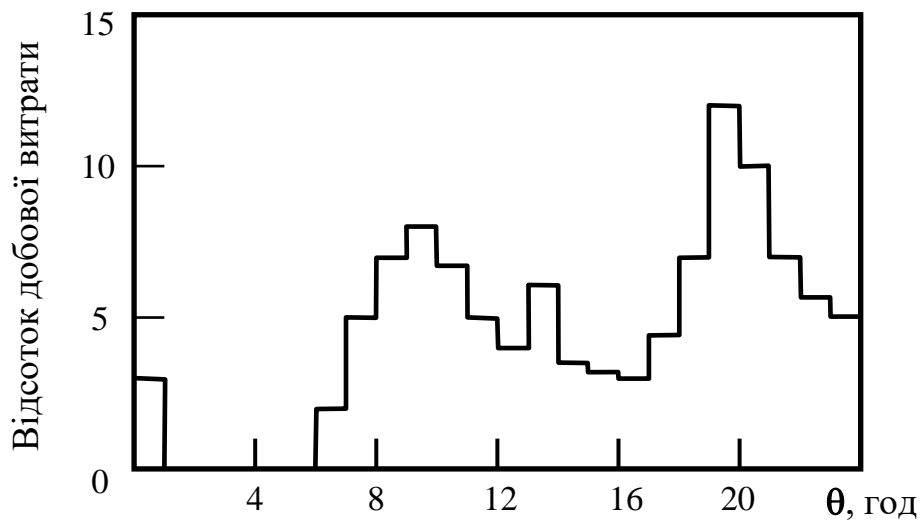


Рисунок 4.2. Графік середнього споживання води протягом доби

4.2. Визначення сонячного потенціалу місцевості

Для розрахунку наявної кількості сонячної енергії, яка потрапляє на поверхню СК, необхідно знати кути падіння сонячних променів на горизонтальну поверхню в даному місці та в кожний момент часу [2].

Положення деякої точки А на земній поверхні відносно сонячних променів в даний момент часу визначається трьома основними кутами – широтою місця положення точки φ , годинним кутом ω і схиленням Сонця δ (рис. 4.3). Широта φ – це кут між лінією, що з'єднує точку А з центром Землі О, та її проекцією на площину екватора. Годинний кут ω – це кут, що вимірюється в екваторіальній площині між проекцією лінії ОА та проек-

цією лінії, що з'єднує центри Землі та Сонця. В сонячний полудень $\omega=0$, а 1 година відповідає 15° . Схилення Сонця δ – це кут між лінією, що з'єднує центри Землі та Сонця, та її проекцією на площину екватора.

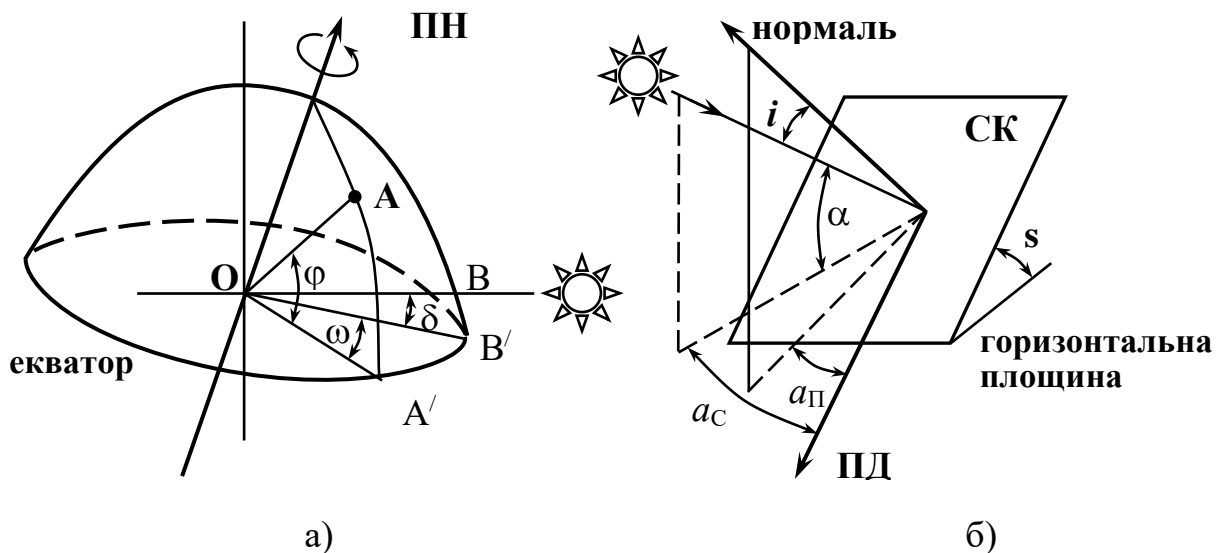


Рисунок 4.3. Куті, які характеризують положення точки на земній поверхні (а) і похилої поверхні колектору відносно сонячних променів (б): φ – широта місцевості; ω – годинний кут; i – кут падіння сонячних променів на похилу поверхню СК; δ – схилення Сонця; a_p – азимут похилої поверхні; α – кут висоти Сонця; a_s – азимут Сонця; s – кут нахилу поверхні СК

Схилення Сонця δ протягом року безперервно змінюється від $-23^\circ 27'$ в день зимового сонцестояння 22 грудня до $+23^\circ 27'$ в день літнього сонцестояння 22 червня і дорівнює нулю в дні весіннього й осіннього рівнодення (21 березня та 23 вересня).

Схилення Сонця в певний день визначається за табл. Д1 або за формулою:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right), \quad (4.4)$$

де n – порядковий номер дня, відрахований від 1 січня.

В якості n звичайно береться номер середнього розрахункового дня мі-

сяця для I-XII місяців року.

Дані для n та δ для середнього дня I-XII місяців наведені в таблиці 4.1.

Теплова потужність сонячної установки, розташованої в певній місцевості на широті φ , залежить від теплового потоку, який складається з прямого H_B та розсіяного H_D сонячного випромінювання, що поступає на горизонтальну площину. Сонячна радіація визначається з кліматичних довідників [3] або з табл. Д1.

Таблиця 4.1

місяць	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень
n	17	47	75	105	135	162
δ , град	-20,9	-13	-2,4	9,4	18,8	23,1

місяць	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
n	198	228	258	288	318	344
δ , град	21,2	13,5	2,2	-9,6	-18,9	-23

Величина питомої теплової енергії q_i , Вт·год/м², що надходить на 1 м² похилої поверхні сонячного колектора за i -ту годину безхмарного дня, визначається за формулою [4]:

$$q_i = H_B \frac{\cos(\varphi - s) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - s) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} + H_D = H_B \cdot R_B + H_D, \quad (4.5)$$

де H_B і H_D – питомі теплові потоки, Вт/м², прямого та розсіяного сонячного випромінювання, що падає на горизонтальну поверхню на широті населеного пункту при безхмарному небі і розраховується за даними таблиці Д1.

R_B – коефіцієнт перерахунку прямої сонячної радіації на похилу поверхню з південною орієнтацією.

s – кут нахилу поверхні сонячного колектору до горизонту.

Годинний кут ω дорівнює нулю в полудень для колекторів орієнтованих на південь; через кожен годину значення годинного кута змінюється

на 15° зі знаком плюс від 12 годин до ранку або мінус від 12 годин до вечора:

- 11-12 год $\omega=7,5^\circ$;
- 10-11 год $\omega=7,5^\circ+15=22,5^\circ$;
- 9-10 год $\omega=22,5^\circ+15=37,5^\circ$;
- 8-9 год $\omega=37,5^\circ+15=52,5^\circ$;
- 7-8 год $\omega=52,5^\circ+15=67,5^\circ$;
- і далі аналогічно.

При розрахунках за формулою (5) треба враховувати тільки ті значення, які задовольняють умовам:

- $\omega < 90^\circ$;
- $\omega < \omega_{C(3)} = \arccos(-\operatorname{tg}(\varphi - s) \cdot \operatorname{tg} \delta)$;
- $R_B > 0$.

де $\omega_{C(3)}$ – годинний кут сходу (заходу) сонця на похилу поверхню.

Питомий тепловий потік q'_i , Вт·год/м², що надходить на 1 м² похилої поверхні сонячного колектора за i -ту годину за реальних умов хмарності та втрат теплоти, визначається за рівнянням:

$$q'_i = q_i \cdot \eta_0 \cdot \eta_1, \quad (4.6)$$

де η_0 – коефіцієнт, що враховує реальні умови хмарності, який можна розрахувати за формулою:

$$\eta_0 = \frac{\sum H_p}{\sum (H_B + H_D)}, \quad (4.7)$$

де $\sum H_p$ – сумарна енергія прямого та розсіяного сонячного випромінювання, що падає на горизонтальну поверхню в населеному пункті за добу за реальних умов хмарності. Величина $\sum H_p$ наведена в кліматологічних довідниках [3].

$\sum (H_B + H_D)$ – сумарна енергія прямого та розсіяного сонячного випромінювання;

η_1 – коефіцієнт, що враховує ступінь прозорості атмосфери, величина його коливається від 0,8 в промислових районах до 1 в курортній зоні. Для гірських курортів $\eta_1 = 1,1$.

Коефіцієнти η_0 для деяких міст України, розраховані за формулою 4.7, наведені в таблиці Д2.

Питомий тепловий потік q_i^K , Вт·год/м², що корисно використовується в системі гарячого водопостачання щогодини за реальних умов хмарності та втрат теплоти, визначається за формулою:

$$q_i^K = q_i' \cdot \eta_K \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = q_i \cdot \eta_0 \cdot \eta_K \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \quad (4.8)$$

де η_2 – коефіцієнт, що враховує втрати, обумовлені нестационарним теплообміном при змінній хмарності. Рекомендується приймати $\eta_2 = 0,9$.

η_3 – коефіцієнт, що враховує втрати теплоти від сонячного колектора до споживача. Величина цього коефіцієнта приймається 0,85 для централізованих систем гарячого водопостачання, а для локальних водонагрівачів – 0,98.

η_K – коефіцієнт корисної дії сонячного колектора, який залежить від його конструкції.

Дані про залежність $\eta_K = f(t_K - t_0)$ повинні повідомлятися виробником сонячного колектору, де t_K – температура підігрітої в колекторі води, а t_0 – температура оточуючого колектор повітря. При відсутності цих даних рекомендується використовувати графіки на рисунках 4.4 та 4.5 або в діапазоні різниці температур 20-55 °С для плоского колектору визначати з залежності:

$$\eta_K = 0,82 - 0,007(t_K - t_0). \quad (4.9)$$

Температура t_K визначається проектом і зазвичай приймається рівною 55 °С.

Температура t_0 – це середньоденна температура атмосферного повітря розрахункового місяця, яка визначається за формулою:

$$t_0 = t_{CP} + 0,3 \cdot A_t, \quad (4.10)$$

де t_{cp} та A_t – середньодобова температура повітря та максимальна амплітуда коливань добових температур розрахункового місяця, приймаються за нормами [3]. Максимальна амплітуда температури повітря – різниця між максимальним і мінімальним значеннями температури повітря протягом доби за багатолітній період.

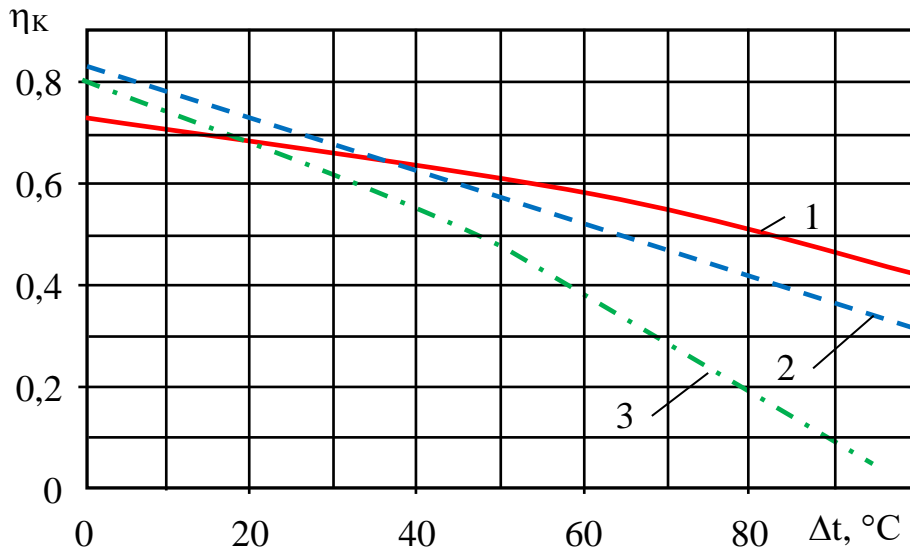


Рисунок 4.4. Залежність ККД сонячних колекторів від різниці температур нагрітої води та навколишнього повітря:
 1 – вакуумний трубчастий СК; 2 – плоский СК з селективним покриттям;
 3 – плоский СК

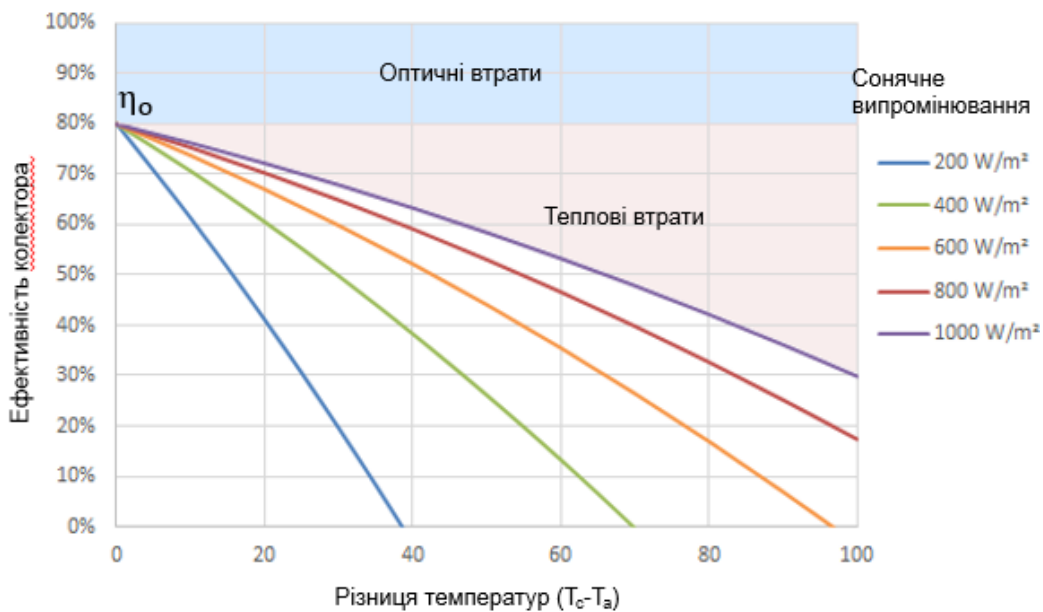


Рисунок 4.5. Характеристики ККД для плоского колектора в залежності від надходження сонячної радіації

Температури t_0 для деяких міст України, які розраховані за формулою (4.10), наведені в таблиці Д2.

Площа A , м², сонячних колекторів визначається за формулою:

$$A = \beta \frac{Q_{ГВП}^Д}{\left(\sum_i q_i^K \right)^{max}}, \quad (4.11)$$

де β – коефіцієнт інвестора, величина якого планується в залежності від бажаного ступеню заміщення сонячною енергією традиційних енергоносіїв, $0,5 < \beta < 1,0$;

$\left(\sum_i q_i^K \right)^{max}$, (Вт·год)/(м² доба) – сума добових значень питомої енергії випромінювання, розрахованих за формулою (6) у самому теплому місяці періоду, протягом якого повинен працювати сонячний водопідігрівач.

Об'єм бака-акумулятора V , м³, визначається за добовими графіками підігріву води в установці й водоспоживання, а при їх відсутності – в залежності від кліматичного району за формулою [5]:

$$V = (0,06...0,08) A. \quad (4.12)$$

Приймають більше значення для І кліматичного району (рис.4.6).

Кількість теплової енергії W_j^M , (кВт·год)/місяць, виробленої сонячним водопідігрівачем, розраховується окремо для кожного j -го місяця роботи за формулою:

$$W_j^M = 10^{-3} \cdot z_j \cdot \sum_i q_i^K \cdot A, \quad (4.13)$$

де z_j – кількість днів у j -ому місяці;

A – площа, м², встановлених сонячних колекторів.

$\sum_i q_i^K$ – сума добових значень питомої енергії випромінювання, розрахованих за формулою (4.6) для j -го місяця.

Річне виробництво теплоти W^{PIK} , (кВт·год)/рік, в сонячній установці

визначається як сумарна кількість теплової енергії, що виробляється в кожному j -ому місяці:

$$W^{\text{PIK}} = \sum_j^n W_j^{\text{M}}, \quad (4.14)$$

де n – період роботи сонячної установки, місяців.

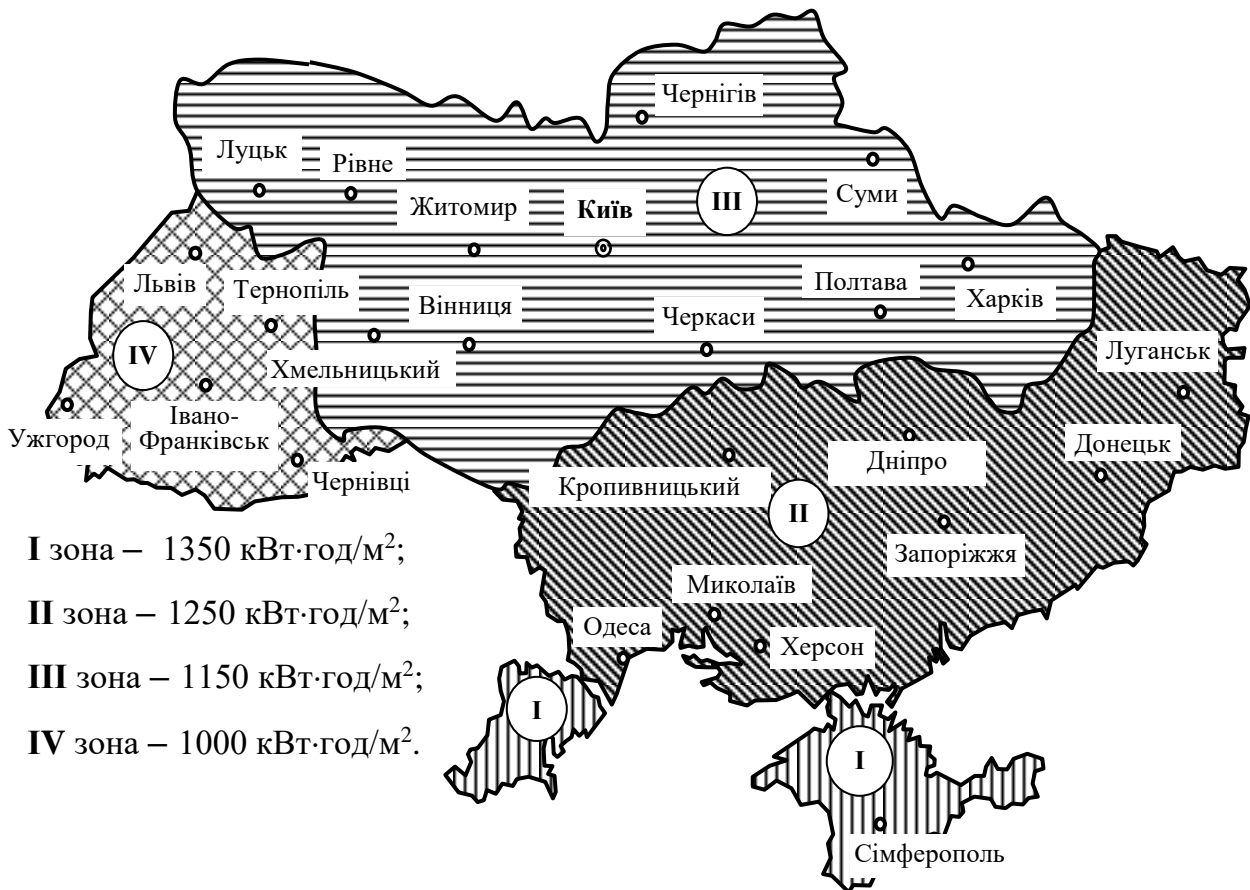


Рисунок 4.6. Інтенсивність сонячного випромінювання на території України

Питоме виробництво теплової енергії, віднесене до 1 м² сонячного колектору, складає:

$$w = \frac{W^{\text{PIK}}}{A}. \quad (4.15)$$

4.3. Розрахунок ступеня заміщення традиційного палива

При проектуванні систем ГВП з використанням сонячних колекторів необхідно виходити з того, що економічно доцільно покривати за рахунок сонячної енергії лише певну частку f_{PIK} річного теплового навантаження Q^{PIK} , а іншу її частину, а саме $(1 - f_{PIK}) Q^{PIK}$, повинно забезпечувати резервне (додаткове) джерело енергії. Величина f_{PIK} залежить від характеристик геліосистеми та кліматичних даних, а також від вартості системи та палива, але зазвичай вона не перевищує 0,5, а для сезонних установок може досягати 0,75 та більше (за сезон) [4].

Коефіцієнт заміщення можна обчислити за декількома методиками: за методикою Харченко [6], Даффі [7] та за допомогою програмного забезпечення RETScreen [8].

Ступінь заміщення теплового навантаження за певний період можна визначити з рівняння:

$$f = \frac{Q_H - Q_{ДЖ}}{Q_H} = \frac{W}{Q_H}, \quad (4.16)$$

де W – теплопродуктивність сонячної установки за певний період;

Q_H – сума навантажень опалення та гарячого водопостачання за певний період;

$Q_{ДЖ}$ – загальна місячна кількість енергії отриманої від дублюючого джерела за певний період.

Вважаємо, що в рівнянні (4.16) втрати теплоти в баку-акумуляторі у порівнянні з W , Q_H і $Q_{ДЖ}$ невеликі і дорівнюють нулю.

За методикою Харченко місячна частка сонячної енергії (ступінь заміщення палива) f^M в покритті навантаження на ГВП для житлових будинків обчислюється за формулою:

$$f^M = \frac{W^M}{Q_H^M} = \frac{(Q_H^M - Q_{ДЖ}^M)}{Q_H^M} = 1 - \frac{Q_{ДЖ}^M}{Q_H^M}, \quad (4.17)$$

де $Q_H^M = Q_{ГВП}^M = Q^Д \cdot z_j$ – місячне теплове навантаження на ГВП;

W^M та $Q_{ДЖ}^M$ – місячна кількість теплової енергії, яка забезпечується сонячною установкою та додатковим джерелом енергії.

Річна частка сонячної енергії f^{PIK} в покритті навантаження визначається:

$$f^{PIK} = \frac{\sum_1^n (W^M)_j}{\sum_1^n (Q_H^M)_j} = \frac{\sum_1^n (f_j \cdot (Q_H^M)_j)}{\sum_1^n (Q_H^M)_j}. \quad (4.18)$$

Зменшення річної витрати традиційного палива B , кг/рік (m^3 /рік), при використанні сонячного колектору знаходять з рівняння:

$$B = \frac{\sum_1^n (f_j \cdot (Q_H^M)_j)}{Q_H^P \cdot \eta_{ТГ}}, \quad (4.19)$$

де Q_H^P – нижча теплота згоряння палива (масова або об'ємна);

$\eta_{ТГ}$ – коефіцієнт корисної дії теплогенератора (котла).

Розглянемо визначення коефіцієнту заміщення f за методикою [7].

Метод враховує середньомісячні значення метеорологічних параметрів і може бути використаний для визначення довгострокових теплових характеристик ССТ в залежності від основних конструктивних параметрів цієї системи.

Корисна енергія Q_K , яка відводиться з колектора в даний момент часу – це різниця кількості сонячної енергії, поглиненої пластиною колектора, і кількості енергії, що втрачається в оточуюче середовище. Рівняння для розрахунку плоского колектора має вигляд:

$$Q_K = A F_R \left[I_T (\tau\alpha)_n - U_L (t_P^{Bx} - t_{HC}) \right], \quad (4.20)$$

де A – площа сонячного колектора, m^2 ;

F_R – коефіцієнт відведення теплоти від колектора;

I_T – густина потоку сумарної сонячної радіації у площині колектору, Вт/м²;

τ – пропускна здатність прозорих покриттів по відношенню до сонячного випромінювання;

α – поглинальна здатність пластини колектора по відношенню до сонячного випромінювання;

$(\tau\alpha)_n$ – оптичний ККД сонячного колектора, визначений з досліджень при надходженні сонячної радіації по нормалі до поверхні колектора;

U_L – повний коефіцієнт теплових втрат колектора, Вт/(м²·°С);

t_P^{Bx} – температура рідини на вході у колектор, °С;

t_{HC} – температура навколишнього середовища, °С.

Сонячна радіація, яка падає на колектор, в будь-який момент часу складається з трьох частин: прямої радіації, дифузної радіації і радіації, відбитої від землі або оточуючих предметів, кількість якої залежить від кута нахилу колектора до горизонту і характеристик цих предметів. Пряма сонячна радіація являє собою пучок майже паралельних променів, які не зазнають зміни напрямку при проходженні крізь атмосферу. Дифузна сонячна радіація надходить на поверхню Землі з різних напрямків.

В рівнянні (4.20) добуток повного коефіцієнта втрат U_L і різниці температур $(t_P^{Bx} - t_{HC})$ являє собою втрати теплоти від поглинальної пластини за умови, що її температура всюди дорівнює температурі рідини на вході. При нагріванні рідини пластина колектора має більш високу температуру, ніж температура рідини на вході, що є необхідною умовою переносу теплоти від пластини до рідини, тому фактичні втрати теплоти від колектора більші зна-

чення добутку $U_L(t_P^{Bx} - t_{HC})$. Різниця втрат враховується за допомогою коефіцієнта відведення теплоти F_R .

Повний коефіцієнт втрат U_L дорівнює сумі коефіцієнтів втрат крізь прозору ізоляцію, днище і бічні стінки. Для колектора сума останніх двох коефіцієнтів складає приблизно 0,5 – 0,75 Вт/(м² К). Коефіцієнт втрат крізь прозору ізоляцію залежить від температури поглинальної пластини, кількості і матеріалу прозорих покриттів, ступеня чорноти пластини в інфрачервоній частині спектру, температури оточуючого середовища і швидкості вітру.

Коефіцієнт відведення теплоти F_R дорівнює відношенню фактичної корисної енергії, коли температура рідини в колекторі збільшується у напрямку потоку, до корисної енергії, коли температура всієї поглинальної пластини дорівнює температурі рідини на вході. Цей коефіцієнт залежить від витрати рідини через колектор і конструкції поглинальної пластини (товщини, властивостей матеріалу, відстані між трубками і т.п.) і майже не залежить від інтенсивності сонячної радіації і температур поглинальної пластини і оточуючого середовища.

Основні характеристики сонячних колекторів визначаються в результаті випробувань за стандартною методикою на експериментальному стенді в стаціонарних умовах, які повинні відповідати реальним умовам роботи колектора. В процесі досліджень заміряють густину потоку падаючої сонячної радіації I_T , температуру зовнішнього повітря t_{HC} , витрату G і температуру рідини на вході t_P^{Bx} і виході t_P^{Bux} з колектору та розраховують корисну енергію з рівняння:

$$Q_K = A \cdot G \cdot c_p (t_P^{Bux} - t_P^{Bx}), \quad (4.21)$$

де G – масова витрата на 1 м² площі колектору;

c_p – теплоємність рідини.

За результатами досліджень визначається ефективність колектору:

$$\eta = \frac{Q_K}{A \cdot I_T} \quad (4.22)$$

Результати випробувань краще всього представити у вигляді графіка залежності миттєвої ефективності колектору від параметра $\chi = \frac{t_P^{Bx} - t_{HC}}{I_T}$

(рис. 4.7). В основі такої форми представлення дослідних даних лежить рівняння (4.20). Якщо поділити обидві частини цього рівняння на $I_T A$, отримаємо наступний вираз ефективності колектору:

$$\eta = \frac{Q_K}{I_T A} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(t_P^{Bx} - t_{HC})}{I_T}. \quad (4.23)$$

За умови $U_L = \text{const}$ залежність ефективності колектору від параметра χ лінійна. При цьому значення $F_R(\tau\alpha)_n$ – це ордината точки перетину прямої даного колектору з вертикальною віссю, а $F_R U_L$ дорівнює від'ємному значенню кутового коефіцієнта прямої.

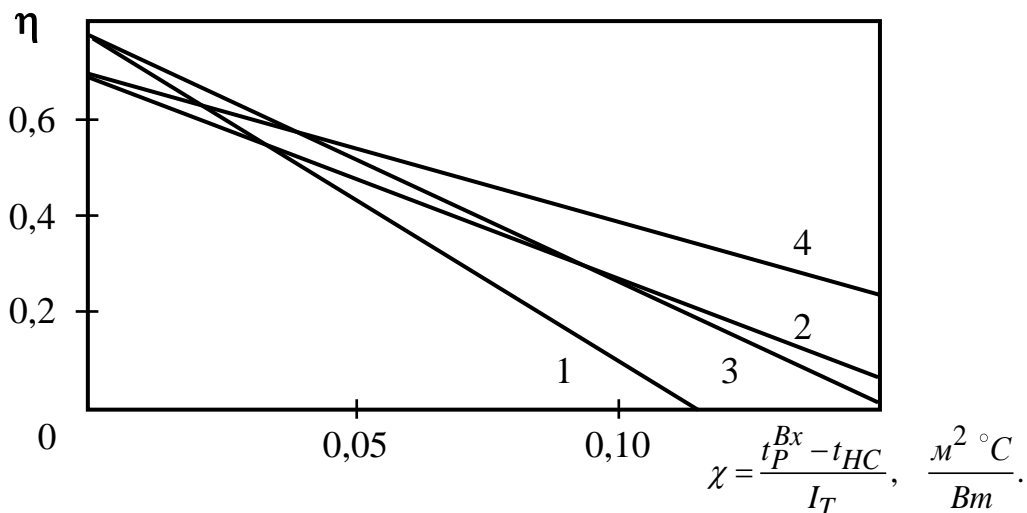


Рисунок 4.7. Ефективність колекторів різного типу з рідинним теплоносієм:
 1 – з одним прозорим покриттям та матово-чорною поглинальною поверхнею; 2 – з двома прозорими покриттями та неселективною поглинальною поверхнею; 3 – з одним прозорим покриттям та селективною поглинальною поверхнею; 4 – з двома прозорими покриттями та селективною поглинальною поверхнею.

При відсутності результатів досліджень колектора певного виробника значення $F_R U_L$ і $F_R(\tau\alpha)_n$ можна оцінювати з рис. 4.8.

В місцевості, де можливе замерзання рідини в колекторі, сонячні установки часто виконують двоконтурними з проміжним теплообмінником, який розташований в баку-акумуляторі (див. рис. 1). При цьому в контурі колектора використовують розчин антифризу, а в контурі акумулятора – воду. Хоча цей теплообмінник не є частиною колектора, доцільно ввести поняття ефективного коефіцієнта відведення теплоти F'_R , підстановка якого в рівняння (20) замість F_R дозволяє розрахувати характеристики колектору з урахуванням впливу теплообмінника. $\frac{F'_R}{F_R}$ – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив теплообмінника. Він приймає значення від 0 до 1 та характеризує зменшення корисної енергії колектору за рахунок застосування двоконтурної схеми відведення теплоти з проміжним теплообмінником.

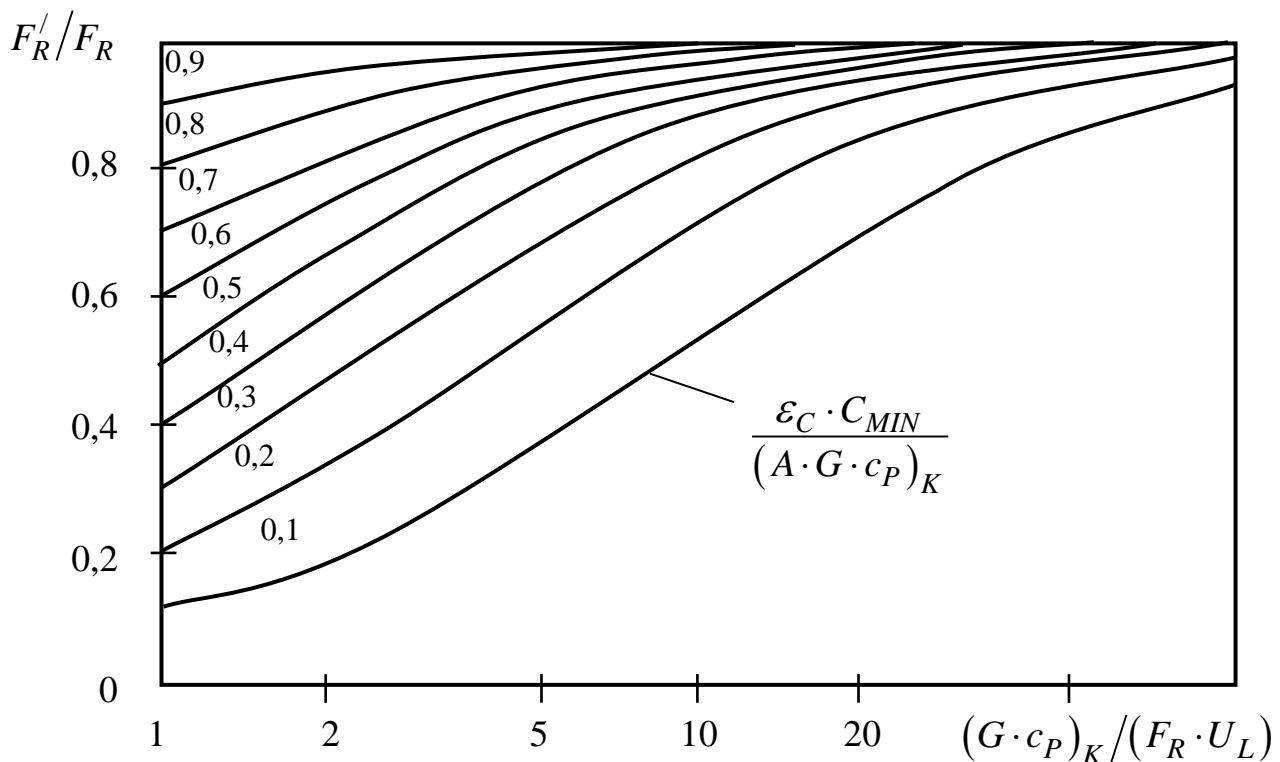


Рисунок 4.8. Поправочний коефіцієнт, який враховує вплив теплообмінника бака-акумулятора на відведення теплоти з колектору

Значення поправочного коефіцієнта $\frac{F'_R}{F_R}$ визначають в залежності від параметрів колектора, масових витрат в теплообміннику та його ефективності ε_C :

$$\frac{F'_R}{F_R} = \left[1 + \left(\frac{A F_R U_L}{(G c_P)_K} \right) \left(\frac{(G c_P)_K}{\varepsilon_C C_{MIN}} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (4.24)$$

де $(G c_P)_K$ – водяний еквівалент теплоносія контуру колектору; $C_{MIN} = (G c_P)_{MIN}$ – менший з двох водяних еквівалентів у теплообміннику. Якщо масові витрати рідин у теплообміннику однакові, то C_{MIN} розраховують по потоку рідини у контурі колектору, так як теплоємність розчину антифризу менша за теплоємність чистої води. Залежність коефіцієнта F'_R/F_R від параметрів $(G \cdot c_P)_K / (F_R \cdot U_L)$ та $\varepsilon_C \cdot C_{MIN} / (A \cdot G \cdot c_P)_K$ показана на рис. 8.

Фізичний зміст коефіцієнта $\frac{F'_R}{F_R}$ полягає у тому, що його величина визначає розмір компенсації за створення окремого циркуляційного контуру для відведення теплоти з колекторів. Наприклад: при $\frac{F'_R}{F_R} = 0,97$ площа сонячних колекторів двоконтурної установки повинна бути на 3% більше, ніж аналогічної одноконтурної установки, щоб забезпечити ту ж саму кількість корисної енергії.

За методикою [7], коефіцієнт заміщення f емпірично можна пов'язати з двома безрозмірними комплексами:

$$X = \frac{A F'_R U_L (100 - \bar{t}_{HC}) \Delta\theta}{Q_H^M}, \quad (4.25)$$

$$Y = \frac{A F'_R (\bar{\tau}\alpha) \bar{H}_T z_j}{Q_H^M}, \quad (4.26)$$

де $\Delta\theta$ – число секунд в місяці;

100 – базисна температура, °С;

\bar{t}_{HC} – середньомісячна температура навколишнього середовища, °С;

Q_H^M – місячне теплове навантаження на теплопостачання, Дж/місяць;

\bar{H}_T – середньомісячний денний прихід сумарної сонячної радіації на похилу поверхню колектора, Дж/(м² доба):

$$\bar{H}_T = 3,6 \cdot 10^3 \sum_i q'_i, \quad (4.27)$$

z_j – число днів в місяці;

$(\overline{\tau\alpha})$ – середньомісячний оптичний ККД сонячного колектора (приведена поглинальна здатність).

Безрозмірні комплекси X та Y мають певний фізичний зміст:

- Y можна трактувати як відношення кількості енергії, яка поглинається колектором протягом місяця, до повного місячного теплового навантаження;
- X – відношення місячних теплових втрат колектора при базисній температурі до повного місячного теплового навантаження.

Для зручності розрахунків значень X та Y формули (4.25) та (4.26) можна записати в іншому вигляді:

$$X = \frac{A F_R U_L \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) (100 - \bar{t}_{HC}) \Delta\theta}{Q_H^M}, \quad (4.28)$$

$$Y = \frac{A F_R (\tau\alpha)_n \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) \left[\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n} \right] \bar{H}_T z_j}{Q_H^M}, \quad (4.29)$$

де $\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n}$ – коефіцієнт, який враховує орієнтацію поверхні колектора.

Якщо кут нахилу СК до горизонту знаходиться в проміжку між ($\varphi-15^\circ$, $\varphi+15^\circ$), а його орієнтація відмінна від південної не більше ніж

на 15° , то коефіцієнт $\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n}$ для всіх місяців опалювального сезону дорівнює 0,96 для колекторів з одинарним склінням або 0,94 – з подвійним склінням. Для більш точного визначення даного коефіцієнта застосовується методика [4].

Якщо теплове навантаження $Q_H^M = Q_{ГВП}^M$ складається тільки з навантаження на ГВП, то наведена методика має бути скорегована введенням поправочних коефіцієнтів.

Тому, якщо місячні значення X помножити на поправочний коефіцієнт, то даний метод використовується для визначення місячних значень f для системи сонячного гарячого водопостачання. Поправочний коефіцієнт для системи гарячого постачання дорівнює:

$$\frac{X_{СК}}{X} = \frac{11,6 + 1,18 \cdot t_{ГВ} + 3,86 \cdot t_{ХВ} - 2,32 \cdot t_{НС}}{100 - t_{НС}}. \quad (4.30)$$

Залежність між X , Y та f можна представити у графічному вигляді (рис. 9) або наступним рівнянням:

$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3, \quad (4.31)$$

де $0 < Y < 3$ та $0 < X < 18$.

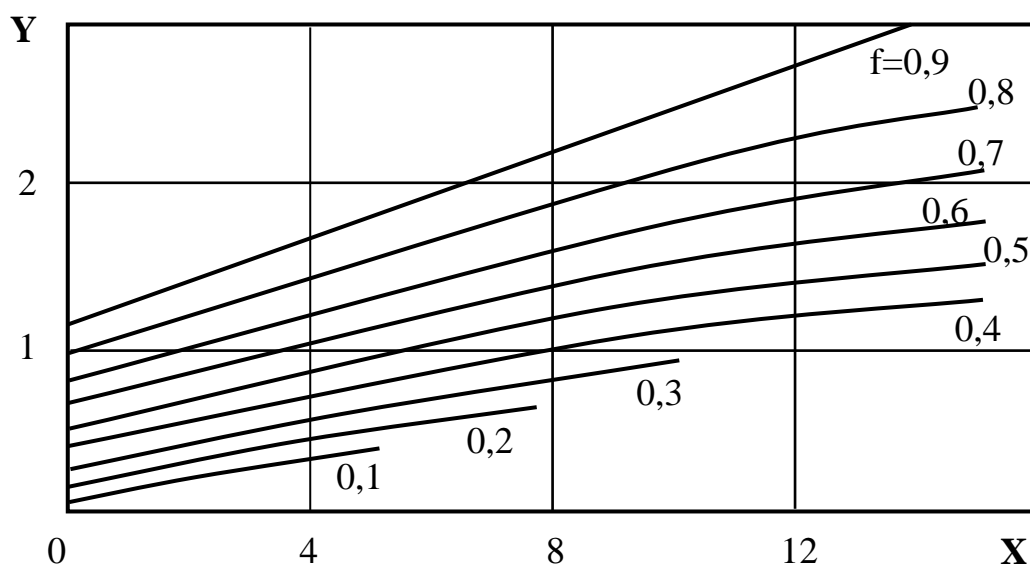


Рисунок 4.9. Визначення коефіцієнта заміщення f для сонячної установки з рідким теплоносієм

Іншим способом розрахунку значення коефіцієнту заміщення є застосування **програмного забезпечення RETScreen** [8]. Основним призначенням цієї програми є енергетичний, техніко-економічний і екологічний аналіз проєктів з використанням чистої енергії: пасивного сонячного опалення, малих ГЕС, комбінованого виробництва теплоти та електроенергії, опалення з використанням біомаси, повітряного сонячного опалення, водяного сонячного опалення та ін.

Кліматичні дані, які використовуються для розрахунків в програмному забезпеченні RETScreen, вибираються в залежності від місця розташування об'єкту, наприклад для Києва рис. 4.10, та заповнюються таблиці вихідних даних та характеристики СК рис. 4.11.

Результати розрахунків наведено на рис. 4.12.

4.4. Вибір обладнання сонячної установки для ГВП

За результатами розрахунків теплового навантаження на ГВП, сонячного потенціалу місцевості та площі колектора обрати тип та кількість колекторів, бак-акумулятор та допоміжне обладнання або комплект сонячної системи ГВП виробництва провідних фірм.

RETScreen - База кліматичних даних

Країна: Україна

Провінція/штат: Київ/Zhulyany

Джерело: Грунтовий+NASA

Широта: 50,4 °N

Довгота: 30,6 °E

Кліматична зона: Прохолодна - Волога

Підняття: 167 м

Розрахункова температура опалення: -15,1 °C

Розрахункова температура охолодження: 27,8 °C

Амплітуда коливань температури землі: 22,2 °C

Місяць	Температура повітря	Відносна вологість	Опади	сонячної радіації - на горизонтальній поверхні	Атмосферний тиск	Швидкість вітру	Температура землі	Градусо-дні опалювального сезону 18 °C	Градусо-дні з від'ємною температурою 10 °C
	°C			%			мм	кВтгод/м²/ден	кПа
Січень	-5,6	82,3%	38,13	0,79	100,0	3,5	-6,8	732	0
Лютий	-4,2	78,9%	36,68	1,27	100,0	3,6	-5,6	622	0
Березень	0,7	73,5%	39,68	2,56	99,8	3,6	0,3	536	0
Квітень	8,7	66,1%	44,10	3,21	99,4	3,2	8,7	279	0
Травень	15,1	63,1%	53,01	4,98	99,5	3,1	15,5	90	158
Червень	18,2	69,5%	81,00	5,44	99,3	2,9	19,2	0	246
Липень	19,3	69,7%	69,44	5,70	99,3	2,6	21,5	0	288
Серпень	18,6	69,3%	56,11	4,62	99,5	2,6	20,6	0	267
Вересень	13,9	75,2%	57,60	3,04	99,6	2,8	14,4	123	117
Жовтень	8,1	78,3%	39,68	1,80	100,0	2,9	7,5	307	0
Листопад	2,1	84,9%	45,90	0,73	99,9	3,2	0,5	477	0
Грудень	-2,3	84,7%	43,71	0,58	99,8	3,4	-5,2	629	0
Щорічний	7,8	74,6%	605,04	2,90	99,7	3,1	7,6	3 795	1 076
Джерело	Грунтовий	Грунтовий	NASA	Грунтовий	Грунтовий	Грунтовий	NASA	Грунтовий	Грунтовий
Виміряно в					м	10	0		


Windows taskbar: 15°C Partly sunny, 18:13 12.10.2022

Рисунок 4.10. Кліматичні дані для м. Києва за програмою RETScreen

Окремий вимір - Дім - Сонячний водонагрівач

- ▶ Паливо і графіки
 - ▶ Електрика та палива
 - ▶ Розклади
- ▶ Обладнання
 - ▶ Опалення
 - ▶ Опалювальна система
- ▶ Кінцеве призначення
 - ▶ Гаряча вода
 - ▶ Гаряча вода
- ▶ Оптимізація постачання
 - ▶ Опалення
 - ▶ Сонячний водонагрівач - Дім
- ▶ Резюме
 - ▶ Включити вимірювання?
 - ▶ Порівняння

Електронне навчання



Види палива

Вид палива	Природний газ - м ³ ▼	+
Вартість палива - одиниця виміру	\$/м ³	
Вартість палива	0,24	

▼ Теплота згорання і вартість палива

Електроенергія

Тип	Ціна на електроенергію - щорічний	
Опис	Електроенергія - кВт·год ▼	
Тариф - одиниця виміру	\$/кВт·год ▼	
Тариф - щорічний	0,046	

Рисунок 4.11. Вихідні дані та характеристики СК

Окремий вимір - Дім - Сонячний водонагрівач

Паливо і графіки

- Електрика та палива
- Розклади

Обладнання

- Опалення
 - Опалювальна система

Кінцеве призначення

- Гаряча вода
 - Гаряча вода

Оптимізація постачання

- Опалення
 - Сонячний водонагрівач - Дім

Резюме

- Включити вимірювання?
- Порівняння

Електронне навчання

Розклади

Опис 24/7 +

Зайнятий

Температура - опалення приміщень °C ▾

Температура - кондиціонування приміщень °C ▾

Незайнятий

Температура - опалення приміщень °C ▾

Температура - кондиціонування приміщень °C ▾

Коефіцієнт зайнятості -

Понеділок	год/день	24
Вівторок	год/день	24
Середа	год/день	24
Четвер	год/день	24
П'ятниця	год/день	24
Субота	год/день	24
Неділя	год/день	24
Коефіцієнт зайнятості -	год/рік	8 760
	%	100%

Температура переключення опалення/охолодження °C ▾

Тривалість опалювального сезону д 71,2

Тривалість сезону охолодження д 294

Продовження рисунку 4.11. Вихідні дані та характеристики СК

Окремий вимір - Дім - Сонячний водонагрівач

- Паливо і графіки
 - Електрика та палива
 - Розклади
- Обладнання
 - Опалення
 - Опалювальна система
- Кінцеве призначення
 - Гаряча вода
 - Гаряча вода
- Оптимізація постачання
 - Опалення
 - Сонячний водонагрівач - Дім
- Резюме
 - Включити вимірювання?
 - Порівняння

Опалювальна система

Електронне навчання

Опис: Опалювальна система

Примітка:

Опалювальна система

	Базовий випадок	Запропонований випадок	
Вид палива	Природний газ - м ³	Природний газ - м ³	
Вартість палива	0,24	0,24	\$/м ³
<input type="checkbox"/> Опалювальне обладнання			
Сезона ефективність	80%	80%	
Додаткові капітальні затрати	\$	\$	
Додаткова економія на експлуатації і обслуговуванні	\$	\$	

Продовження рисунку 4.11. Вихідні дані та характеристики СК

Окремий вимір - Дім - Сонячний водонагрівач

Паливо і графіки

- Електрика та палива
- Розклади

Обладнання

- Опалення
 - Опалювальна система

Кінцеве призначення

- Гаряча вода
 - Гаряча вода

Оптимізація постачання

- Опалення
 - Сонячний водонагрівач - Дім

Резюме

- Включити вимірювання?
- Порівняння

Гаряча вода

Опис:

Примітка:

Метод

Метод 1

Метод 2

Плавальний басейн

Електронне навчання

Гаряча вода - Метод 1

	Базовий випадок	Запропонований випадок	Зекономлена енергія
<input checked="" type="checkbox"/> Тип навантаження - калькулятор	Дім		
Кількість одиниць	Житель		
	4		
Коефіцієнт зайнятості	%		
	100%		
Щоденне споживання гарячої води - оціночно	л/день		
	240		
Використання гарячої води	л/день		
	340	340	
Температура	°C		
	55	55	
Метод підведеної температури	Заданий користувачем		
Температура води - мінімум	°C		
	15		
Температура води - максимум	°C		
	15		
Робочі години	год/день		
	24	24	
Ефективність утилізації тепла	%		
<input type="checkbox"/> Відсоток місяців використання			
Додаткові капітальні затрати	\$	1 500	\$
Додаткові капітальні затрати - інше	\$		
Додаткові капітальні затрати - разом	\$	1 500	
Додаткова економія на експлуатації і обслуговуванні	\$		
Опалювальна система	Опалювальна система		
	Опалювальна система	Опалювальна система	
Опалення	кВт·год		
	5 791	5 791	0
			0%

Продовження рисунку 4.11. Вихідні дані та характеристики СК

Окремий вимір - Дім - Сонячний водонагрівач

Паливо і графіки

- Електрика та палива
- Розклади

Обладнання

- Опалення
 - Опалювальна система

Кінцеве призначення

- Гаряча вода
 - Гаряча вода

Оптимізація постачання

- Опалення
 - Сонячний водонагрівач - Дім

Резюме

- Включити вимірювання?
- Порівняння

Сонячний водонагрівач

Опис: Сонячний водонагрівач - Дім

Примітка:

Електронне навчання

Сонячний водонагрівач

Характеристики навантаження

Гаряча вода: + - Гаряча вода

Температура: °C 55

Опалення: кВт-год 5 791

Оцінка ресурсів

Режим слідування за сонцем: Зафіксоване

Нахил: ° 35

Азимут: ° 0

Показат дані

Сонячний водонагрівач

Тип: Полірований

Виробник: Buderus

Модель: Logasol SKS 3.0

Загальна площа сонячного колектору	м² 2,402
Площа розкриття сонячного колектора	м² 2,169
Коефіцієнт Fr (tau alpha)	 0,729
Коефіцієнт Fr UL	(Вт/м²)/°C 4,352
Температурний коефіцієнт для Fr UL	(Вт/м²)/°C² 0
Кількість колекторів - запропоноване	 2
Кількість колекторів	 4
Площа сонячного колектора	м² 9,6
Потужність	кВт 6,1
Інші втрати	% 2%

Рисунок 4.12. Результати розрахунків установки з сонячним колектором

Баланс системи та інше

Акумулявання	так/ні	Так
Ємність акумуляторів /	л/м ²	48
Ємність акумуляторів	л	416
Теплообмінник	так/ні	Ні
Інші втрати	%	2%
Потужність насоса / площа сонячного колектс	Вт/м ²	9,5
Ціна на електроенергію	\$/кВт-год	0,046
Початкові затрати	\$/м ² -проліт	400
Додаткові капітальні затрати - разом	\$	3 470
Затрати на експлуатацію й обслуговування (ек	\$	

Резюме

Споживання електроенергії - насос	кВт-год	105
Зекономлена енергія	кВт-год	2 971
Доля сонячної енергії	%	51,3%

Продовження рисунку 4.12 Результати розрахунків установки з сонячним колектором

Аналіз викидів

Базова система електропостачання (базова лінія)

Країна - регіон	Вид палива	Коефіцієнт викидів ПГ (до втрат) кгCO ₂ /кВт·год	Втрати при транспортуванні та розподіленні %	Коефіцієнт викидів ПГ кгCO ₂ /кВт·год
Україна	Всі види	0,355	8,0%	0,386

Викиди ПГ

Базовий випадок	tCO ₂	1,3
Запропонований випадок	tCO ₂	0,7
Загальне щорічне скорочення викидів ПГ	tCO ₂	0,6

Викиди ПГ (tCO₂)

Базовий випадок Запропонований випадок

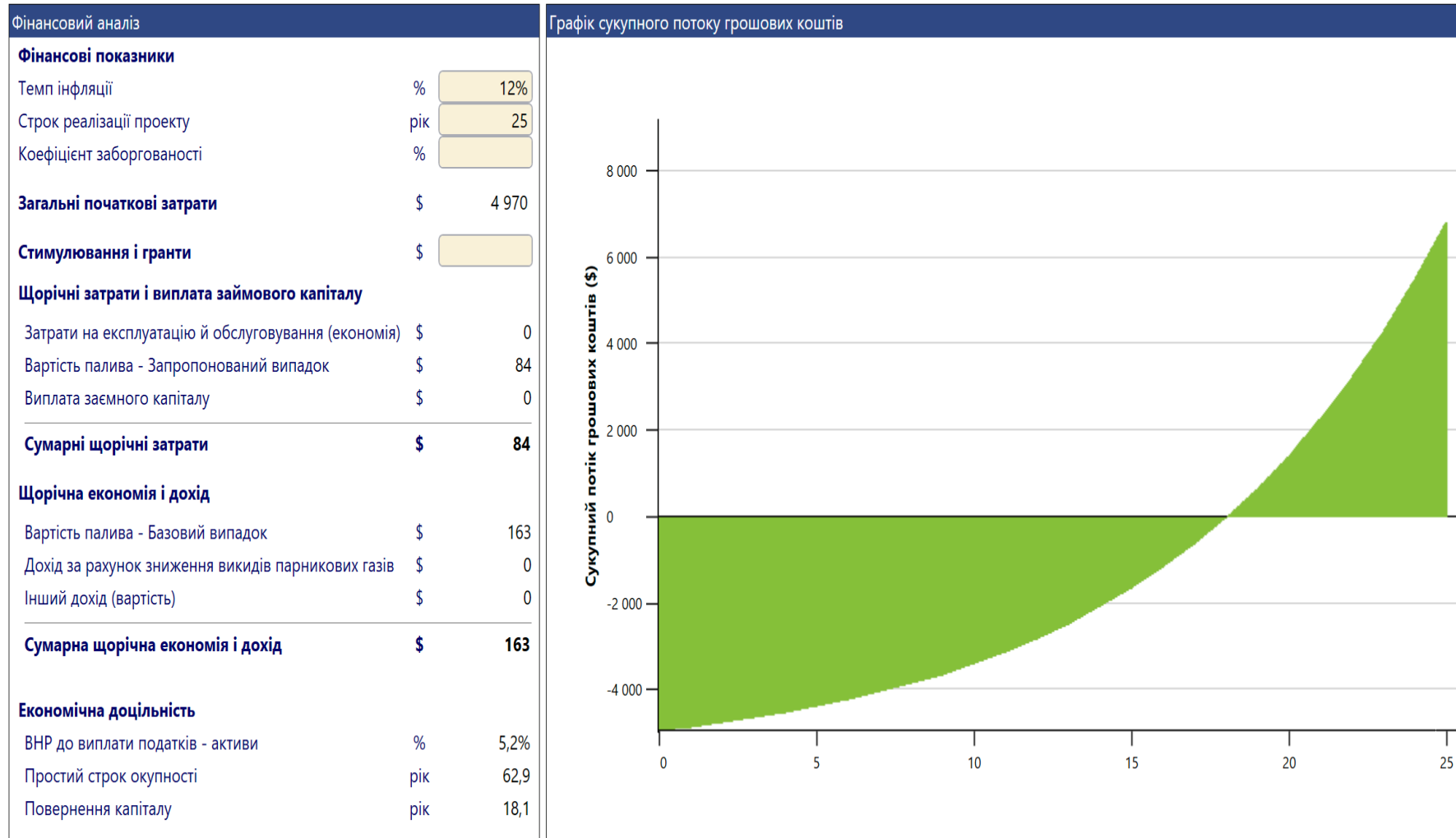
Умовні позначення

- Загальне щорічне скорочення викидів ПГ (48%)

0,6 tCO₂ еквівалентно 268,8

Літри невикористаного бензину

Продовження рисунку 4.12. Результати розрахунків установки з сонячним колектором



Продовження рисунку 4.12. Результати розрахунків установки з сонячним колектором

4.5. Техніко-економічний аналіз використання сонячної установки

Для перевірки ефективності та доцільності впровадження запропонованого варіанту виконують техніко-економічний та екологічний аналіз.

Економічну доцільність проекту можна попередньо оцінювати, а також порівнювати з альтернативними проектами на підставі розрахунку простого терміну окупності капітальних вкладень *PP* (Payback Period) , що є відношенням початкових інвестицій до річної економії коштів (вважаючи її незмінною протягом періоду експлуатації).

Для розрахунку терміну окупності необхідно визначити наступні величини:

– капітальні витрати (Invested Capital, *IC*) – витрати на придбання та установку всіх необхідних елементів сонячної установки: сонячного колектора; бака-акумулятора, насосного модуля; контролера з необхідною арматурою, а також витрати на монтаж установки;

– потік коштів (Cash Flow, *CF_t*). Для кожного розрахункового періоду *t* (зазвичай року) потік коштів визначається як різниця між вигодою (Profit, *P_t*) та зміною (різницею після та до запровадження проекту) експлуатаційних витрат (Maintenance Costs, *MC_t*). Вигода означає економію коштів на гарячу воду, електроенергію чи паливо завдяки реалізації проекту, а експлуатаційні витрати включають в себе витрати на обслуговування установки, а також на електричну енергію, спожиту насосом, контролером та іншим додатковим обладнанням. Для автономної та централізованої системи ГВП для кожного року потік коштів розраховується за наступними рівняннями, відповідно:

$$CF = B \cdot C_F - (MC'' - MC'), \quad (4.32)$$

$$CF = G^{PIK} \cdot C_{GB} \cdot f^{PIK} - (MC'' - MC'), \quad (4.33)$$

де *B* та *C_F* – відповідно річна витрата та вартість одиниці палива (або електричної енергії) на нагрівання води;

MC' , MC'' – відповідно експлуатаційні витрати до та після встановлення сонячної установки;

$C_{ГВ}$ – тариф на гарячу воду для даного споживача.

Простий термін окупності обчислюється за формулою:

$$PP = \min(n) \left\{ \sum_{t=1}^n CF_t \geq IC \right\} \quad (4.34)$$

У випадку незмінності потоку коштів у всіх розрахункових періодах, простий термін окупності можна розрахувати як відношення капітальних витрат та річного потоку коштів:

$$PP = \frac{IC}{CF}. \quad (4.35)$$

Простий термін окупності не відображає реальні терміни окупності проекту, тому його доцільно використовувати тільки для порівняння інвестиційної привабливості проектів між собою. Для більш точної оцінки економічної привабливості проекту необхідно врахувати зміну цінності грошових коштів з часом. Для цього використовується ставка дисконтування i , яка визначається за очікуваним рівнем інфляції та/або вартістю альтернативного вкладення коштів (наприклад, ставкою банківського відсотку), з врахуванням невизначеності та можливих ризиків.

При дисконтуванні виконується перерахунок сум майбутніх грошових потоків на їх вартість в поточний момент. Формула дисконтування записується наступним чином:

$$PV = FV_t \cdot (1 + i)^{-t}, \quad (4.36)$$

де PV (Present Value), FV_t (Future Value) – відповідно теперішня і майбутня вартість у t -му періоді, грн.;

i – ставка дисконтування, відносні одиниці;

t – час з впровадження проекту (порядковий номер року);

$(1 + i)^{-t}$ – коефіцієнт дисконтування для t -ого періоду.

Основні характеристики для оцінки економічної привабливості проекту з урахуванням дисконтованої вартості включають чисту приведену вартість (прибуток) NPV (Net Present Value), індекс прибутковості PI (Profitability Index), дисконтований термін окупності DPP (Dynamic Payback Period) та внутрішню норму прибутковості IRR (Internal Rate of Return). Для розрахунку цих параметрів необхідно задатися терміном реалізації проекту N (наприклад, очікуваний термін роботи сонячного колектора), а також визначити потік коштів CF_t для кожного періоду часу (найчастіше року) t з моменту запровадження проекту. Для початкового (нульового) року потік коштів зазвичай є рівним початковим капіталовкладенням IC зі знаком « \rightarrow », а для наступних років обчислюється згідно рівнянь (4.32) та (4.33).

Чистий приведений прибуток, який можна розглядати як загальний прибуток інвестора, визначається як:

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t} = -IC + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t}. \quad (4.37)$$

Якщо $NPV > 0$ в кінці терміну реалізації проекту, то він є економічно привабливим (прибутковим), якщо $NPV < 0$, то проект є неокупним. Якщо NPV дорівнює нулю, то надходжень від проекту вистачить лише для відновлення вкладеного капіталу.

Індекс прибутковості визначається як відношення суми майбутніх потоків коштів до початкового капіталовкладення:

$$PI = \frac{1}{IC} \cdot \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t} = 1 + \frac{NPV}{IC}. \quad (4.38)$$

Індекс прибутковості характеризує прибуток на одиницю вкладених у проект коштів, тобто ефективність капіталовкладення. Проект є прибутковим при $PI > 1$ і збитковим при $PI < 1$. При виборі альтернативних варіантів з приблизно однаковими значеннями NPV перевагу віддають заходу з більшим PI .

Дисконтований термін окупності визначається як найменший період часу, коли інвестиції в проект будуть компенсовані дисконтованим прибутком від його реалізації:

$$DPP = \min(n) \left\{ \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} \geq IC \right\}. \quad (4.39)$$

Дисконтований термін окупності завжди є більшим за простий термін окупності (який визначається при $i = 0$), для неокупних проектів $DPP > N$ або взагалі відсутній (нескінченний).

Внутрішня норма прибутковості IRR визначається як ставка дисконтування, при якій $NPV = 0$:

$$IRR = i^* \left\{ -IC + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i^*)^t} = 0 \right\}. \quad (4.40)$$

Для економічно доцільних проектів $IRR \geq i$.

Розрахунки терміну окупності та дисконтованих характеристик зручно виконувати в пакеті MS Excel згідно форми, яка наведена у таблиці 2.

Таблиця 4.2. Розрахунки терміну окупності та дисконтованих характеристик

Період	Коефіцієнт дисконтування	Витрати	Вигода	Потік коштів	Кумулятивний потік коштів	Дисконтований потік коштів	Кумулятивний дисконтований потік коштів
t	$(1+i)^{-t}$	$IC, \Delta MC_t$	P_t	CF_t	$\sum_{j=0}^t CF_j$	$\frac{CF_t}{(1+i)^t}$	$\sum_{j=0}^t \frac{CF_j}{(1+i)^j}$
0	1	IC	0	$-IC$	$-IC$	$-IC$	$-IC$
1	$(1+i)^{-1}$	$MC_1'' - MC_1'$	P_1	$P_1 - \Delta MC_1$	$-IC + CF_1$	$\frac{CF_1}{1+i}$	$-IC + \frac{CF_1}{1+i}$
..
..
N	$(1+i)^{-N}$	$MC_N'' - MC_N'$	P_N	$P_N - \Delta MC_N$	$\sum_{j=0}^N CF_j$	$\frac{CF_N}{(1+i)^N}$	$\sum_{j=0}^N \frac{CF_j}{(1+i)^j}$

4.6. Спрощений розрахунок характеристик СУ за номограмою фірми Sintsolar

Сьогодні фірми-виробники пропонують номограмами, які дозволяють недосвідченому споживачу обрати приблизну площу сонячного колектора з урахуванням його потреб. Спрощений розрахунок характеристик елементів сонячної системи ГВП можна проводити, наприклад, за допомогою номограми фірми Sintsolar [9] (рис. 4.13).

За відомими даними: кількість мешканців в будівлі та їх потреби у гарячій воді за добу визначають об'єм бака-акумулятора. Прийняти ступінь заміщення палива згідно розрахунків (див. розділ 4.3). Враховуючи місце розташування будівлі на території країни, орієнтацію і кут нахилу сонячного колектора, визначити площу колектора.

5. ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

За результатами розрахунків зробити висновки про енергетичну, екологічну та економічну доцільність використання сонячної системи гарячого водопостачання в даній місцевості.

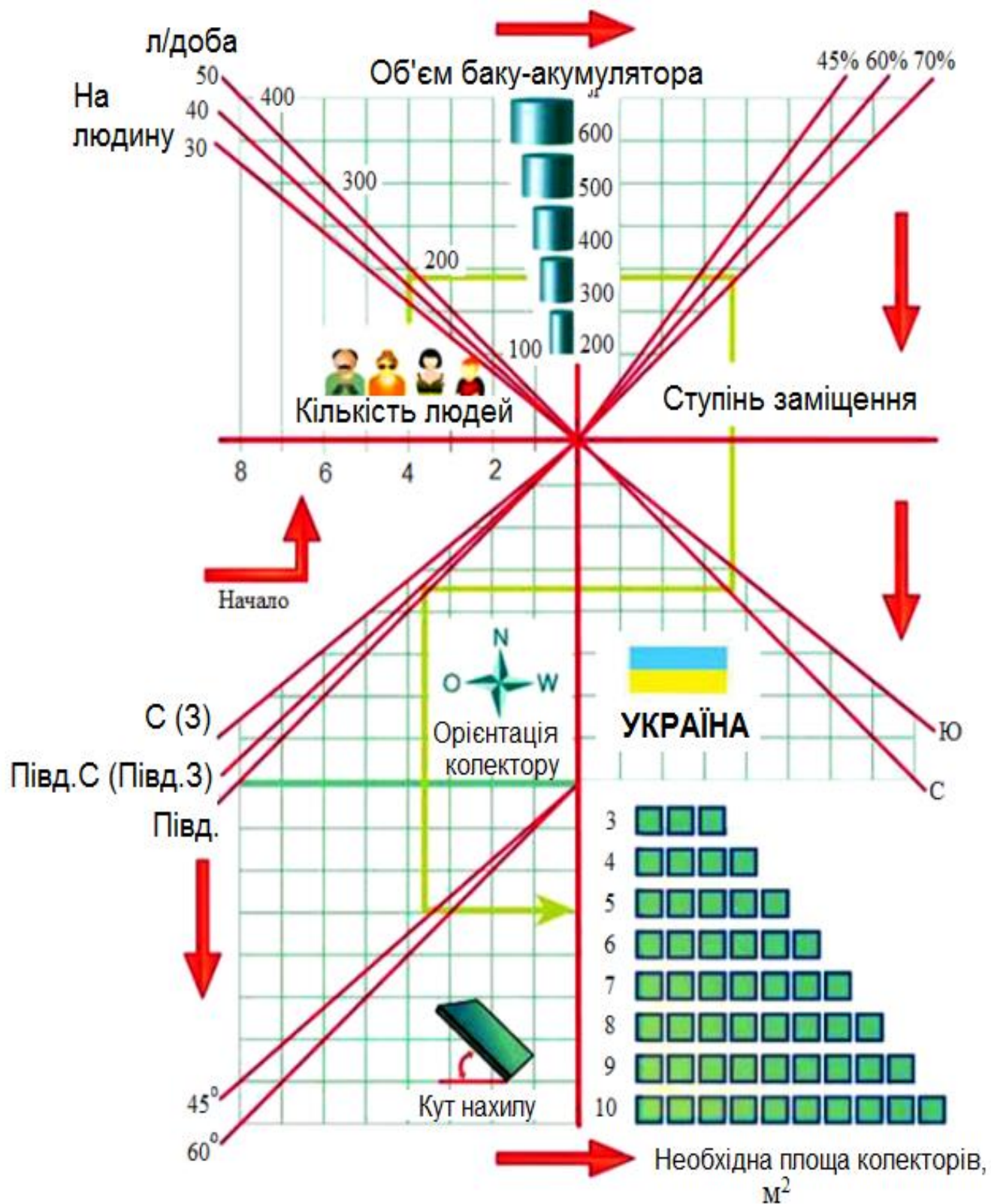


Рисунок 4.13. Номограма фірми Sintsolar для вибору елементів

6. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ПЛОЩІ СК ДЛЯ СИСТЕМИ ГВП

Для родини з чотирьох чоловік, яка мешкає в котеджі під Києвом передбачається встановити сонячну систему гарячого водопостачання, яка працює з квітня по вересень.

Добова потреба в тепловій енергії для ГВП $Q_{ГВП}^Д$ визначається за формулою (4.3):

$$Q_{ГВП}^Д = 1,163 \cdot 85 \cdot 4 \cdot (55 - 15) = 15817 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{ доба}.$$

Сонячні колектори будуть встановлені під кутом 35° до горизонту і орієнтовані на південь. Розрахувати необхідну площу колекторів і кількість теплоти, яку ця установка може виробити за теплий період року з квітня по вересень включно.

Розрахуємо теплові потоки за кожну годину для шести місяців роботи сонячної системи і занесемо їх в таблицю 6.1.

Величини в першу (H_B) і другу (H_D) колонки розрахункової таблиці заносяться з табл. Д1 відповідно географічній широті міста Києва (50°). Величина енергії q_i , що надходить на поверхню сонячного колектора розрахована за формулою (4.5) при значеннях кутів $\varphi = 50^\circ$, $s = 35^\circ$, $\omega = 7,5^\circ$ в інтервалі часу 11-12 годин та зі збільшенням ω на 15° для кожного попереднього годинного інтервалу. Схилення Сонця δ приймаємо для кожного місяця сталим і вибираємо його з таблиці Д1.

Розрахунки зручно виконувати за допомогою програми Excel. При визначенні тригонометричних функцій значення кутів повинні бути виражені в радіанах.

Коефіцієнт корисної дії сонячного колектора η_k розрахований за формулою (4.9). Приймаємо: $\eta_1 = 0,9$; температури $t_k = 55^\circ\text{C}$; t_o – за даними табл. Д2. Для невеликої локальної установки коефіцієнт втрат теплоти прийнято $\eta_2 = 0,98$. Коефіцієнт, що враховує втрати, обумовлені нестационарним теплообміном при змінній хмарності – $\eta_3 = 0,9$.

Таблиця 6.1. Результати розрахунків

Приймаємо:		$\eta_1=0,9$		$\eta_2=0,98$		$\eta_3=0,9$
Години	H_B	H_D	q_i	η_0	η_K	q_i^K
	Вт/м ²		Вт·год/м ²			Вт·год/м ²
1	2	3	4	5	6	7
квітень						
6-7	125	70	168	0,61	0,533	43
7-8	251	87	361			93
8-9	375	104	555			143
9-10	522	125	782			202
10-11	585	129	882			228
11-12	647	132	972			251
6-18	Всього		Вт·год/(м ² добу)			1920
травень						
6-7	215	84	220	0,68	0,582	69
7-8	345	94	410			129
8-9	473	104	601			189
9-10	612	125	811			255
10-11	668	128	902			283
11-12	724	132	983			309
6-18	Всього		Вт·год/(м ² добу)			2467
червень						
6-7	250	84	228	0,75	0,603	82
7-8	373	97	410			147
8-9	494	111	592			213
9-10	625	132	788			283
10-11	686	132	880			316
11-12	745	132	958			344
6-18	Всього		Вт·год/(м ² добу)			2769
липень						
6-7	216	84	213	0,72	0,617	75
7-8	362	97	412			145
8-9	494	111	607			214
9-10	584	125	754			266
10-11	666	128	872			307
11-12	724	132	954			336
6-18	Всього		Вт·год/(м ² добу)			2687

Продовження таблиці 6.1

1	2	3	4	5	6	7
серпень						
6-7	146	63	167	0,74	0,61	60
7-8	275	84	363			130
8-9	404	104	565			202
9-10	517	118	740			265
10-11	579	122	837			300
11-12	640	125	925			331
6-18	Всього		Вт·год/(м ² добу)			2578
вересень						
6-7	63	49	120	0,67	0,575	37
7-8	181	66	308			94
8-9	299	84	501			153
9-10	445	97	728			223
10-11	512	101	832			255
11-12	578	104	932			285
6-18	Всього		Вт·год/(м ² добу)			2093

Сума величин по кожному годинному інтервалу від 6 до 12 годин подвоюється, щоб отримати величину добового виробництва теплової енергії в сонячних колекторах.

Аналізуючи результати розрахунку, приходимо до висновку, що більше всього теплової енергії виробляється в червні – 2769 Вт·год за добу з кожного квадратного метра сонячного колектору.

Необхідна площа A сонячного колектору обчислюється за формулою (4.11):

$$A = 15817/2769 = 5,71 \text{ м}^2.$$

Приймається до встановлення 6 колекторів площею 1 м² кожний.

Кількість теплової енергії W_M , кВт·год, виробленої в сонячному водопідігрівачі за реальних умов хмарності розраховується окремо для кожного місяця за формулою (4.13).

$$\text{В квітні: } W_1^M = 10^{-3} \cdot 30 \cdot 1920 \cdot 6 = 426 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

$$\text{В травні: } W_2^M = 10^{-3} \cdot 31 \cdot 2467 \cdot 6 = 566 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

В червні: $W_3^M = 10^{-3} \cdot 30 \cdot 2769 \cdot 6 = 615$ кВт·год.

В липні: $W_4^M = 10^{-3} \cdot 31 \cdot 2687 \cdot 6 = 616$ кВт·год.

В серпні: $W_5^M = 10^{-3} \cdot 31 \cdot 2578 \cdot 6 = 591$ кВт·год.

В вересні: $W_6^M = 10^{-3} \cdot 30 \cdot 2093 \cdot 6 = 465$ кВт·год.

Всього, за 6 теплих місяців року може бути вироблено $W^{PIK} = 3279$ (кВт·год)/рік теплової енергії, що еквівалентно 2,82 Гкал/рік. Питоме виробництво теплової енергії, віднесене до одного квадратного метру сонячного колектору, складає:

$$3279/6 = 546 \text{ кВт}\cdot\text{год} / (\text{м}^2\cdot\text{рік}) = 0,47 \text{ Гкал}/(\text{м}^2\cdot\text{рік}).$$

7. ВИХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ГВП

Для родини з m чоловік, яка мешкає в котеджі під містом A , передбачається встановити сонячну систему гарячого водопостачання (табл. 7.1), яка працює заданий період року. Сонячні колектори будуть встановлені під кутом s до горизонту і орієнтовані на південь. Температура нагрітої в колекторі води $t_k = 55$ °С. Обрати тип колектора, розрахувати його площу і кількість теплоти, яку установка може виробити за даний період року. Розрахувати коефіцієнти заміщення палива, річну економію палива та зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище. Визначити термін окупності сонячного колектору. Провести спрощений розрахунок площі колектора за номограмою і порівняти отримані результати.

Таблиця 7.1. Вихідні дані

Варі- ант	Місто	Період	m	N	s	Вид палива	Q^p_H
		міс.	чол.	л/доба	град.		МДж/кг (МДж/нм ³)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Донецьк	III-X	5	50	30	вугілля	18,70
2	Житомир	III-X	4	75	35	прир. газ	36,34
3	Запоріжжя	III-XI	6	100	35	мазут	37,05
4	Івано- Франківськ	III-XI	8	50	40	вугілля	20,03
5	Тернопіль	IV-XI	8	50	30	прир. газ	36,27
6	Ужгород	III-XI	7	75	40	мазут	36,69
7	Харків	III-IX	5	100	40	вугілля	21,53
8	Херсон	II-XI	4	50	35	прир. газ	31,08
9	Хмельницький	III-X	6	75	40	мазут	37,72
10	Черкаси	III-X	8	100	30	вугілля	18,03
11	Чернігів	IV-IX	7	50	35	прир. газ	35,84
12	Одеса	II-XI	6	50	40	мазут	36,84
13	Полтава	III-X	8	75	30	вугілля	18,52
14	Рівне	III-X	7	100	30	прир. газ	35,51
15	Севастополь	I-XII	5	50	40	мазут	37,39
16	Сімферополь	I-XI	4	75	40	вугілля	16,81
17	Суми	IV-IX	6	100	30	прир. газ	37,77
18	Чернівці	III-X	5	75	40	мазут	36,63
19	Ялта	I-XII	4	100	40	вугілля	19,97
20	Бердянськ	I-XI	6	50	35	прир. газ	37,76
21	Вінниця	III-XI	8	75	30	мазут	37,43
22	Ізмаїл	II-XII	7	75	35	вугілля	20,81
23	Керч	II-XII	5	100	35	прир. газ	36,74
24	Феодосія	I-XII	4	80	30	мазут	37,04
25	Кропивницький	III-XI	6	75	30	вугілля	18,71
26	Луганськ	III-XI	8	100	40	прир. газ	37,50
27	Луцьк	III-X	7	50	35	мазут	38,92
28	Львів	IV-X	5	75	35	вугілля	19,52
29	Маріуполь	II-XI	4	100	40	прир. газ	37,04
30	Київ	IV-IX	4	50	30	мазут	37,04

ВИСНОВКИ

Розрахункова робота дозволить розширити знання та уміння проводити теплові та економічні розрахунки автономної сонячної системи гарячого водопостачання об'єкту, навчитися використовувати довідкову літературу і каталогами фірм-виробників обладнання. Ознайомлює з розрахунками по визначенню доцільності встановлення такого обладнання.

Дає можливість засвоїти три методики визначення ступеня заміщення палива, а саме: методом Харченка, методом Даффі та за допомогою програмного забезпечення RETScreen.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Солнечные установки горячего водоснабжения. Пособие по проектированию – К., Изд. КиевЗНИИЭП, 2006, – 26с.
2. Дж. А. Даффи, У.А. Бекман. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии // Перевод с английского под. ред. Ю.Н. Малевского. – М.: «Мир», 1977. – 420 с.
3. Настанова з улаштування систем сонячного тепlopостачання в будинках житлового і громадського призначення. ДСТУ-Н Б-В.2.5-43:2010.–К., Мін-РегіонБуд, 2010.
4. Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко. – М. : Атомиздат, 1991. – 208 с.
5. Бекман, У. Расчет систем солнечного теплоснабжения : пер. с англ. / У. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи. – М., Энергоиздат, 1982. – 80 с.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Внутрішній водопровід та каналізація. ДБН В.2.5-64:2012.–К., Мін-РегіонБуд, 2012.
2. Солнечные установки горячего водоснабжения. Пособие по проектированию – К., Изд. КиевЗНИИЭП, 2006, –26с.
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. – Київ, Укрархбудінформ, 2010 – 127 с.
4. Дж. А. Даффи, У.А. Бекман. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии // Перевод с английского под. ред. Ю.Н. Малевского. – М.: «Мир», 1977. – 420 с.
5. Настанова з улаштування систем сонячного тепlopостачання в буди-нках житлового і громадського призначення. ДСТУ-Н Б-В.2.5-43:2010.–К., Мін-РегіонБуд, 2010.
6. Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Хар-ченко. – М. : Атомиздат, 1991. – 208 с.
7. Бекман, У. Расчет систем солнечного теплоснабжения : пер. с англ. / У. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи. – М., Энергоиздат, 1982. – 80 с.
8. Clean energy project analysis. RETScreen engineering & cases Textbook. 3rd edition (<http://www.etscreen.net/>).
9. <http://sintsolar.com.ua/>.

ДОДАТКИ

Таблиця Д1. Питома теплова енергія, Вт /м², прямого **H_B** та розсіяного **H_D** сонячного випромінювання, що надходить на 1 м² горизонтальної поверхні при безхмарному небі

Місяць, схилення	φ	H	Години доби до полудня							
			4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Січень δ = -20,9°	44°	H _B					63	196	272	349
		H _D					49	70	80	91
	46°	H _B					56	161	234	307
		H _D					49	70	80	91
	48°	H _B					42	140	203	265
		H _D					49	70	80	91
	50°	H _B					35	119	185	251
		H _D					42	56	73	91
52°	H _B					28	91	154	216	
	H _D					35	56	70	84	
Лютий δ = - 13°	44°	H _B				62	203	300	391	482
		H _D				24	70	84	94	105
	46°	H _B				47	182	265	356	447
		H _D				21	77	105	114	112
	48°	H _B				33	161	237	332	426
		H _D				19	77	105	114	112
	50°	H _B				21	147	216	297	377
		H _D				17	77	98	114	119
52°	H _B				15	126	203	269	335	
	H _D				12	70	91	105	119	
Березень δ = - 2,4°	44°	H _B			35	185	335	454	541	629
		H _D			35	63	91	105	112	119
	46°	H _B			35	171	307	426	513	604
		H _D			35	66	98	112	119	126
	48°	H _B			28	161	293	405	492	580
		H _D			42	70	98	119	126	133
	50°	H _B			28	154	279	391	471	552
		H _D			42	70	98	119	126	133
52°	H _B			28	147	265	377	450	524	
	H _D			35	66	98	112	126	140	

Продовження таблиці Д1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Квітень $\delta = + 9,4^0$	44°	H _B			112	258	405	559	635	712
		H _D			70	91	111	126	133	140
	46°	H _B			112	251	390	538	615	691
		H _D			77	94	112	133	136	140
	48°	H _B		7	112	248	384	531	597	663
		H _D		28	76	91	105	133	136	140
	50°	H _B		7	126	251	377	524	587	649
		H _D		28	70	87	105	126	129	133
52°	H _B		14	126	251	377	503	569	635	
	H _D		28	70	84	98	126	129	133	
Травень $\delta = 18,8^0$	44°	H _B		42	203	342	482	663	716	782
		H _D		35	77	94	112	119	126	133
	46°	H _B	2	42	210	342	475	649	695	768
		H _D	2	42	77	94	112	119	133	133
	48°	H _B	8	49	216	346	475	622	677	740
		H _D	8	42	77	94	112	133	136	140
	50°	H _B	14	56	216	346	475	615	670	726
		H _D	14	42	84	94	105	133	129	133
52°	H _B	24	63	223	349	475	615	639	712	
	H _D	17	49	84	94	105	126	126	126	
Червень $\delta = 23,1^0$	44°	H _B	9	77	237	381	524	656	733	810
		H _D	13	49	77	91	105	119	119	119
	46°	H _B	12	84	237	374	510	642	712	782
		H _D	14	49	84	98	112	126	126	126
	48°	H _B	16	91	244	374	503	635	698	761
		H _D	19	49	84	98	112	133	133	133
	50°	H _B	21	91	251	374	496	629	688	747
		H _D	23	56	84	98	112	133	133	133
52°	H _B	27	105	258	377	496	622	684	747	
	H _D	29	63	84	98	112	126	126	126	
Липень $\delta = 21,2^0$	44°	H _B	9	77	182	349	510	622	718	761
		H _D	7	49	84	102	112	126	132	133
	46°	H _B	15	91	196	349	492	608	702	747
		H _D	8	49	84	99	112	126	128	133
	48°	H _B	16	91	210	356	496	594	686	733
		H _D	13	56	84	99	112	126	129	133

Продовження таблиці Д1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	50°	H _B	17	105	216	363	496	587	669	726	
		H _D	17	56	84	98	112	126	129	133	
	52°	H _B	33	119	223	363	496	587	667	719	
		H _D	21	56	84	100	112	119	126	136	
Серпень $\delta = 13,5^0$	44°	H _B		21	126	279	433	559	639	719	
		H _D		28	70	91	112	119	122	126	
	46°	H _B		28	133	279	426	538	608	677	
		H _D		28	70	87	105	119	126	133	
	48°	H _B		35	133	276	414	524	590	656	
		H _D		35	70	87	105	119	126	133	
	50°	H _B		35	147	276	405	519	581	642	
		H _D		35	63	84	105	119	122	126	
	52°	H _B		42	147	276	398	510	573	635	
		H _D		35	63	84	108	112	115	119	
	Вересень $\delta = 2,2^0$	44°	H _B			70	203	342	510	569	629
			H _D		28	42	63	91	105	112	119
46°		H _B			77	199	335	489	552	615	
		H _D		28	42	63	84	107	112	119	
48°		H _B			63	182	321	468	534	601	
		H _D		28	49	66	84	105	108	112	
50°		H _B			63	182	300	447	513	580	
		H _D		28	49	66	84	98	101	105	
52°		H _B			56	168	300	433	492	552	
		H _D		28	49	66	84	91	98	105	
Жовтень $\delta = -9,6^0$		44°	H _B			21	108	196	405	457	510
			H _D			9	43	63	84	91	98
	46°	H _B			21	98	175	370	419	468	
		H _D			7	42	63	84	91	98	
	48°	H _B			14	84	154	342	395	447	
		H _D			3	40	63	84	87	91	
	50°	H _B			7	70	133	328	374	419	
		H _D			2	40	63	77	80	84	
	52°	H _B			7	63	119	300	346	391	
		H _D			2	29	56	77	77	77	

Продовження таблиці Д1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Листопад $\delta = - 18,9^{\circ}$	44°	H _B				22	84	293	342	391	
		H _D				16	49	70	77	84	
	46°	H _B				19	70	251	304	356	
		H _D				14	42	70	77	84	
	48°	H _B				15	56	237	276	326	
		H _D				13	35	63	73	84	
	50°	H _B				12	42	216	251	286	
		H _D				12	35	56	66	77	
52°	H _B				8	35	168	210	251		
	H _D				8	28	56	63	70		
Грудень $\delta = - 23^{\circ}$	44°	H _B					49	196	255	314	
		H _D					28	63	70	77	
	46°	H _B						21	161	216	272
		H _D						28	63	70	77
	48°	H _B						14	133	192	251
		H _D						28	63	70	77
	50°	H _B						7	112	161	210
		H _D						28	56	63	70
52°	H _B						7	77	122	168	
	H _D						14	49	59	70	
			Години доби після полудня								
			19-20	18-19	17-18	16-17	15-16	14-15	13-14	12-13	

Таблиця Д 2. Середня температура атмосферного повітря t_0 , ° С, та коефіцієнт η_0 для міст України

Місто	φ	Місяці року																							
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		IX		X		XI		XII	
		η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0
1	2	4	3	6	5	8	7	10	9	12	11	14	13	16	15	18	17	20	19	22	21	24	23	26	25
Ялта	44,5	0,54	18	0,57	9	0,56	10	0,64	17	0,69	22	0,71	26	0,78	29	0,78	29	0,71	23	0,64	18	0,54	13	0,51	9
Севастополь	44,6	0,52	9	0,56	8	0,59	12	0,72	17	0,8	21	0,86	25	0,91	29	0,91	29	0,8	24	0,69	19	0,54	13	0,48	9
Феодосія	45	0,59	7	0,58	6	0,57	12	0,66	18	0,73	23	0,73	27	0,81	31	0,8	29	0,72	24	0,64	19	0,52	11	0,52	7
Сімферополь	45	0,52	13	0,56	5	0,58	8	0,7	16	0,79	21	0,81	24	0,86	27	0,85	27	0,75	21	0,66	15	0,49	10	0,46	6
Ізмаїл	45,4	0,65	6	0,63	5	0,6	10	0,65	16	0,71	22	0,72	27	0,75	27	0,77	28	0,69	22	0,63	17	0,55	9	0,59	4
Керч	45,4	0,51	6	0,53	5	0,55	10	0,67	16	0,78	21	0,8	25	0,86	28	0,84	27	0,75	22	0,64	17	0,5	10	0,47	6
Бердянськ	46,4	0,57	7	0,56	6	0,58	10	0,68	17	0,78	22	0,8	28	0,85	29	0,86	31	0,75	25	0,67	19	0,52	10	0,53	6
Одеса	46,4	0,46	5	0,48	4	0,51	8	0,63	15	0,72	20	0,75	26	0,78	26	0,8	28	0,71	22	0,62	17	0,42	10	0,42	6
Херсон	46,6	0,65	5	0,64	3	0,6	8	0,67	16	0,73	21	0,7	27	0,76	27	0,79	28	0,72	22	0,69	16	0,55	7	0,6	4
Мелітополь	46,8	0,64	6	0,62	5	0,58	10	0,67	17	0,74	23	0,71	28	0,77	30	0,79	31	0,73	25	0,69	18	0,55	9	0,58	5
Маріуполь	47	0,63	4	0,61	2	0,57	7	0,63	15	0,72	21	0,7	27	0,74	27	0,78	28	0,69	22	0,63	16	0,51	7	0,57	3
Запоріжжя	47,8	0,64	4	0,62	2	0,57	7	0,65	17	0,73	23	0,7	27	0,75	29	0,78	29	0,71	24	0,68	17	0,53	8	0,57	3
Донецьк	48,1	0,64	2	0,62	2	0,58	8	0,62	16	0,71	23	0,68	26	0,72	28	0,77	28	0,67	22	0,62	15	0,52	7	0,58	3
Кропивницький	48,5	0,64	3	0,6	1	0,58	7	0,63	16	0,71	22	0,67	25	0,71	27	0,74	27	0,66	22	0,62	16	0,49	7	0,58	2
Ужгород	48,6	0,61	5	0,59	5	0,59	10	0,62	17	0,65	23	0,65	26	0,67	27	0,73	27	0,61	23	0,56	18	0,51	10	0,53	4
Луганськ	48,6	0,65	2	0,64	2	0,6	8	0,62	17	0,7	23	0,68	27	0,72	29	0,76	28	0,67	22	0,62	15	0,53	7	0,56	3
Івано-Франківськ	49	0,66	3	0,62	3	0,57	9	0,57	14	0,59	20	0,58	23	0,6	25	0,67	25	0,57	19	0,57	14	0,54	7	0,61	2
Вінниця	49,2	0,6	2	0,61	3	0,59	6	0,61	14	0,67	21	0,65	22	0,66	25	0,71	23	0,6	19	0,57	13	0,49	6	0,59	2
Хмельницький	49,4	0,61	2	0,6	2	0,57	8	0,6	14	0,66	20	0,64	23	0,64	24	0,7	24	0,59	19	0,57	14	0,49	6	0,57	1
Черкаси	49,4	0,65	1	0,62	2	0,59	6	0,62	15	0,7	22	0,67	26	0,7	27	0,74	27	0,64	22	0,61	15	0,49	6	0,59	1
Тернопіль	49,5	0,64	2	0,63	3	0,58	7	0,6	14	0,63	20	0,61	22	0,63	24	0,69	23	0,59	18	0,57	13	0,52	6	0,6	2
Полтава	49,6	0,69	1	0,66	1	0,62	5	0,63	14	0,7	21	0,67	25	0,7	26	0,75	25	0,65	20	0,63	13	0,55	5	0,64	1

Продовження таблиці Д 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Львів	49,8	0,63	3	0,62	3	0,57	9	0,59	14	0,61	19	0,59	23	0,61	24	0,68	24	0,57	19	0,55	14	0,5	7	0,59	2
Харків	50	0,7	1	0,68	1	0,62	6	0,61	15	0,7	22	0,67	25	0,71	28	0,75	26	0,67	22	0,63	15	0,57	5	0,64	1
Житомир	50,2	0,59	2	0,61	3	0,58	6	0,61	14	0,67	20	0,64	22	0,64	25	0,71	23	0,58	19	0,56	13	0,49	6	0,59	3
Київ	50,3	0,49	2	0,52	3	0,52	6	0,58	15	0,68	21	0,7	23	0,69	26	0,72	24	0,62	19	0,55	13	0,38	6	0,4	2
Луцьк	50,8	0,64	3	0,63	3	0,59	8	0,62	15	0,66	20	0,62	24	0,63	25	0,7	26	0,59	20	0,57	15	0,54	7	0,62	2
Рівне	50,6	0,59	3	0,61	3	0,57	8	0,6	14	0,66	20	0,64	23	0,63	24	0,7	24	0,58	19	0,56	14	0,49	7	0,57	2
Суми	50,9	0,72	0	0,68	1	0,63	5	0,63	14	0,69	21	0,65	24	0,68	26	0,72	25	0,62	21	0,61	14	0,56	5	0,68	1
Конотоп	51,2	0,66	4	0,65	1	0,62	5	0,61	14	0,68	21	0,64	24	0,67	25	0,69	24	0,59	19	0,58	13	0,5	5	0,61	2
Ковель	51,2	0,6	3	0,6	3	0,58	7	0,62	14	0,66	20	0,62	23	0,62	25	0,69	25	0,57	19	0,56	14	0,5	7	0,58	2
Бахмач	51,2	0,66	14	0,65	1	0,62	5	0,61	13	0,68	21	0,64	24	0,67	26	0,69	26	0,59	20	0,58	14	0,5	4	0,61	0
Чернігів	51,5	0,67	4	0,67	2	0,62	5	0,63	13	0,68	20	0,64	23	0,65	25	0,71	24	0,59	19	0,6	13	0,55	5	0,66	2