

УДК 514.18

DOI: 10.32347/0131-579x.2024.106.109-118

Зданевич В. А.,

vasyl.zdanevych@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9875-8463

к. т. н., Кундрат Т. М.,

kundratt@i.ua, ORCID: 0000-0001-9345-3161

к. т. н., доцент Літніцький С. І.,

gavran88@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4962-7800

д. т. н., професор Пугачов Є. В.,

e.v.pugachov@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4771-0942,

Національний університет водного господарства та природокористування

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ КУТІВ НАХИЛУ ПЛОСКОГО СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА ЗА УМОВИ ЩОМІСЯЧНОЇ ЗМІНИ КУТІВ НАХИЛУ

Розроблено спосіб визначення оптимальних кутів нахилу плоского сонячного колектора південної орієнтації до площини горизонту за умови щомісячної (12-ть місяців) зміни кута нахилу, зважаючи на вірогідність сонячного сяяння в районі будівництва.

Для кожного місяця року наведено криві залежності енергії, що потрапляє на 1 м² площини колектора південної орієнтації для міста Сарни, від кута нахилу колектора до площини горизонту в градусах, зважаючи на вірогідність сонячного сяяння. Також всі криві зведено на одному рисунку, що дозволяє їх зручно зіставляти.

Статистична крива тривалості сонячного сяяння в годинах бралася за даними спостережень актинометричної станції в місті Сарни, представленими у вигляді поліному четвертої степені залежно від номера дня року, а максимальна (астрономічна) тривалість сонячного сяяння розраховувалась в розробленій авторами програмі як сонячний час від сходу до заходу сонця в даний день року.

Відношення статистичної тривалості сонячного сяяння до максимальної (астрономічної) трактувалось як вірогідність сонячного сяяння в даний день року. Звісно, таке трактування є досить наближеним, оскільки насправді треба було б брати відношення статистичної тривалості сонячного сяяння над площиною колектора до максимальної (астрономічної) тривалості сонячного сяяння теж над площиною колектора. Та необхідних даних стосовно такої статистичної тривалості наразі немає.

Всі криві залежності енергії, що потрапляє на 1 м² площини колектора південної орієнтації, мають один добре виражений максимум, що дало змогу визначити його для кожного місяця, попередньо

інтерполюючи значення параболічними сплайнами, і, таким чином, визначити оптимальний кут нахилу колектора для даного місяця.

Спосіб можна використати (за наявності статистичних даних для району будівництва стосовно тривалості сонячного сяяння) і для інших періодів року, наприклад, весна-літо-осінь, зважаючи на те, що в певних районах будівництва може тривалий час лежати сніг на площинах колекторів. Інші періоди року можуть бути використані також з міркувань, які не мають відношення до кліматичних умов, а пов'язаних, наприклад, з графіком споживання електроенергії.

Ключові слова: плоский сонячний колектор; астрономічна і статистична тривалість сонячного сяяння; вірогідність сонячного сяяння; оптимальний кут нахилу колектора; інтегральний коефіцієнт прозорості атмосфери; розрахунковий період; орієнтація плоского сонячного колектора; маса атмосфери; час сходу і заходу сонця над площиною колектора.

Постановка проблеми. Кількість сонячної енергії, що потрапляє на один метр квадратний плоского сонячного колектора залежить, зокрема, від таких геометричних величин як його орієнтація та кут нахилу до площини горизонту. Окрім того, вона залежить від розрахункового періоду (рік, певна частина року, сезон, місяць), вірогідності сонячного сяяння у розрахунковий період, широти місцевості та значення деяких фізичних величин на даний момент часу: відстані від Землі до Сонця, маси атмосфери, інтегрального коефіцієнту прозорості атмосфери.

Зазвичай, якщо це можливо для конкретного випадку, колектори орієнтують на південь, що дозволяє отримати більше енергії у порівнянні з інакше орієнтованими колекторами з таким же кутом нахилу до площини горизонту. У відповідній літературі колектори, зорієнтовані на південь, часто рекомендують влаштовувати під кутом до площини горизонту, що дорівнює широті місцевості. Проте оптимальний кут нахилу суттєво залежить від обраного розрахункового періоду та вірогідності сонячного сяяння в цей період. Тому можливість зміни, наприклад, щомісячної (12-ть разів на рік) кута нахилу дозволяє отримати більше енергії порівняно з колектором оптимального кута нахилу, незмінного протягом року.

Ціль статті. У роботі поставлено мету – розробити спосіб визначення для кожного місяця року оптимальних кутів нахилу площини сонячного колектора південної орієнтації за можливості його (кута) щомісячної зміни на прикладі міста Сарни, зважаючи на вірогідність сонячного сяяння. Для міста Сарни є статистичні дані щодо тривалості сонячного сяяння, оскільки там працює актинометрична станція.

Аналіз основних досліджень і публікацій. У роботі [1] визначався оптимальний кут нахилу колектора до площини горизонту, але дуже спрощено: поза увагою залишилися змінна відстань від Землі до Сонця,

маса атмосфери, змінний інтегральний коефіцієнт прозорості атмосфери та вірогідність сонячного сяяння. В роботі [2] визначалася астрономічна тривалість інсоляції похилої площини довільної орієнтації та кута нахилу, що було підґрунтям для визначення в роботі [3] можливого опромінення похилої площини на протязі року без урахування вірогідності сонячного сяяння. У роботі [4] інсоляція, опромінення похилої площини та оптимальний кут її нахилу залежно від її орієнтації вже визначалися, зважаючи на вірогідність сонячного сяяння для Києва за річний розрахунковий період. У роботі [5] ті ж параметри за річний розрахунковий період визначалися вже для міста Сарни, причому вірогідність сонячного сяяння визначалась іншим способом ніж в роботі [4]. У роботі [6] визначалися оптимальні кути нахилу колектора для міста Сарни за посезонної зміни кутів. Проте визначення оптимальних кутів нахилу за щомісячної їх зміни в зазначених роботах не розглядалося.

Основна частина. Вірогідність сонячного сяяння визначалась на даний день року як відношення статистичної тривалості сонячного сяяння в годинах до максимальної (астрономічної) тривалості сонячного сяяння на цей день року. Остання обчислювалась за часом сходу і заходу Сонця в даний день року способом, описаним в [3] і реалізованим в середовищі MathCad. На рис. 1 показані криві статистичної тривалості сонячного сяяння (нижня) і максимальної тривалості (верхня) за рік в годинах. Статистичні дані апроксимовані поліномом четвертої степені (саме тому нижня крива продовжується за 365-й день року). А на рис. 2 показана крива відношення названих величин (тобто вірогідність сонячного сяяння) залежно від дня року [5]. Площина колектора була зорієнтована на південь.

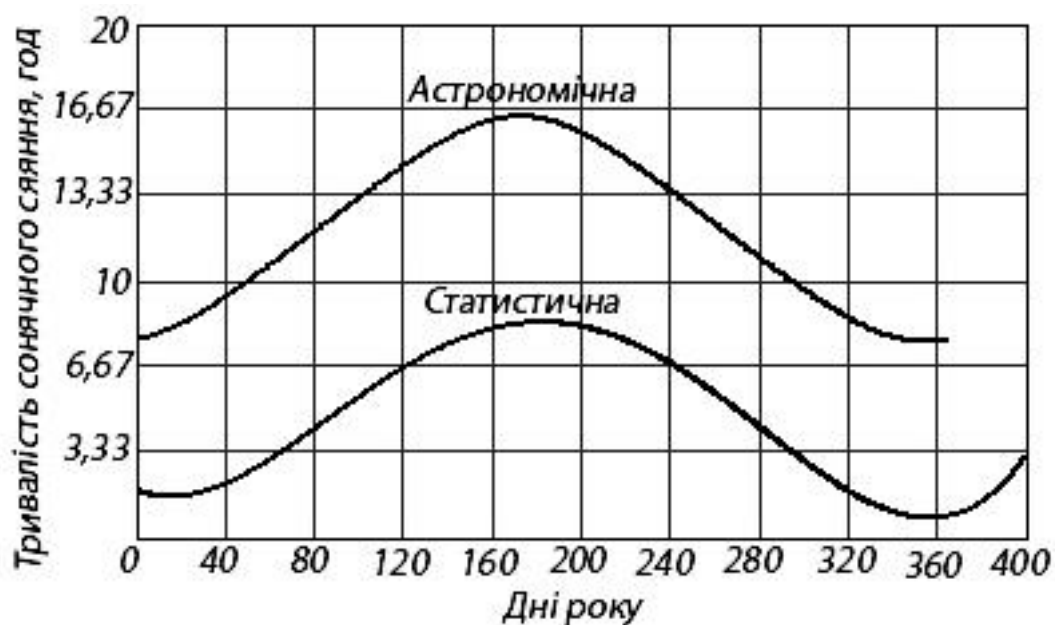


Рис.1. Астрономічна (максимальна) та статистична тривалість сонячного сяяння для міста Сарни (51.4° пн. ш.) залежно від дня року

Для площини колектора кут її нахилу до площини горизонту змінювався від 0 до 90 градусів з кроком 10 градусів. Тривалість кожного місяця року приймалась: січень – з 1-го по 59-й день, лютий – з 32-го по 59-й день, березень – з 60-го по 90-й день, квітень – з 91-го по 120-й день, травень – з 121-го по 151-й день, червень – з 152-го по 181-й день, липень – з 182-го по 212-й день, серпень – з 213-го по 243-й день, вересень – з 244-го по 273-й день, жовтень – з 274 по 304 день, листопад – з 305-го по 334-й день, грудень – з 325-го по 365 день.

За способом, викладеним в [4], у розробленій в середовищі MathCad програмі обчислювалась кількість енергії, що потрапляє за кожен день місяця на 1 м^2 площини колектора заданого кута нахилу для міста Сарни, спочатку не зважаючи на вірогідність сонячного сяяння в цей день.

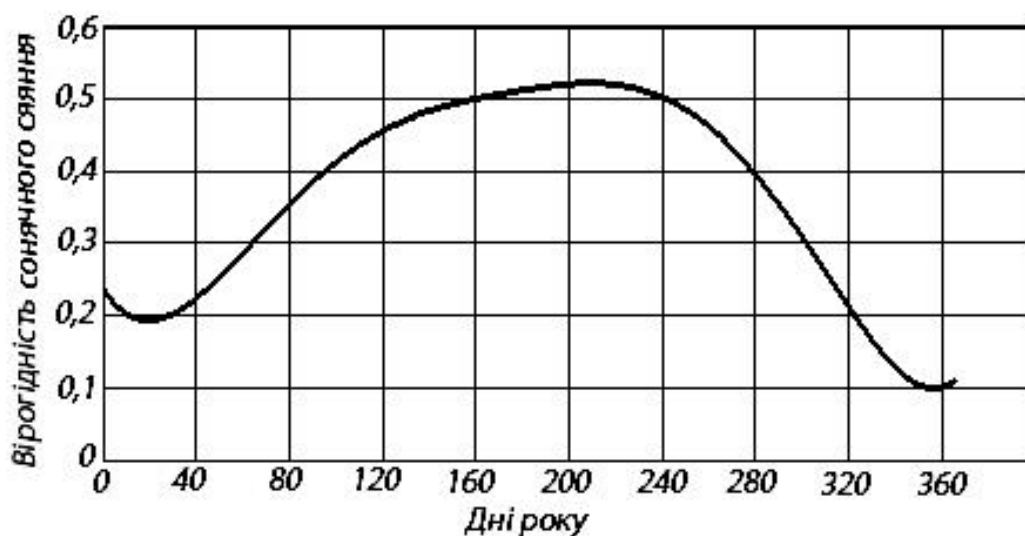


Рис. 2. Вірогідність сонячного сяяння для міста Сарни (51.4° пн. ш.) залежно від дня року

Затим енергія, що потрапляє на 1 м^2 колектора в даний день місяця, множилась на вірогідність сонячного сяяння в цей день – таким чином визначалась енергія, що потрапляє на 1 м^2 колектора в даний день місяця року, зважаючи на вірогідність сонячного сяяння. Після цього визначалась сума енергії, що потрапляє на 1 м^2 колектора за весь місяць.

Таким чином для кожного кута нахилу площини колектора була визначена сумарна кількість енергії, що потрапляє на 1 м^2 за даний місяць року, зважаючи на вірогідність сонячного сяяння, що дозволило побудувати відповідні графіки. Дані графіків були інтерпольовані в середовищі MathCad параболічними, а не кубічними сплайнами з огляду на опуклу форму кривих. Інтерпольовані графіки показані разом на рис. 3 для зручності їх зіставлення.

Як видно з рисунку 3, всі графіки мають один максимум. Тому для кожного графіку в середовищі MathCad за допомогою функції оптимізації були визначені оптимальні кути. Початкові значення кутів, необхідні для

роботи функції оптимізації, визначались трасуванням графіків. В результаті отримані такі значення оптимальних кутів: січень – 75.086° , лютий – 66.972° , березень – 53.935° , квітень – 37.524° , травень – 22.742° , червень – 14.967° , липень – 18.751° , серпень – 31.898° , вересень – 48.263° , жовтень – 62.96° , листопад – 72.893° , грудень – 77.309° . Зрозуміло, що чим ближче до зими, тим нижче піднімається сонце над горизонтом. Тому для зимніх місяців кут нахилу колектора стає більшим, адже для надходження більшої кількості енергії треба, щоб площина колектора була перпендикулярна до променів сонця.

За наведеним вище даними побудовано графік залежності оптимального для даного місяця кута нахилу площини колектора до площини горизонту від номера місяця, представлений на рис. 4. Зрозуміло, що графік являє собою ламану.

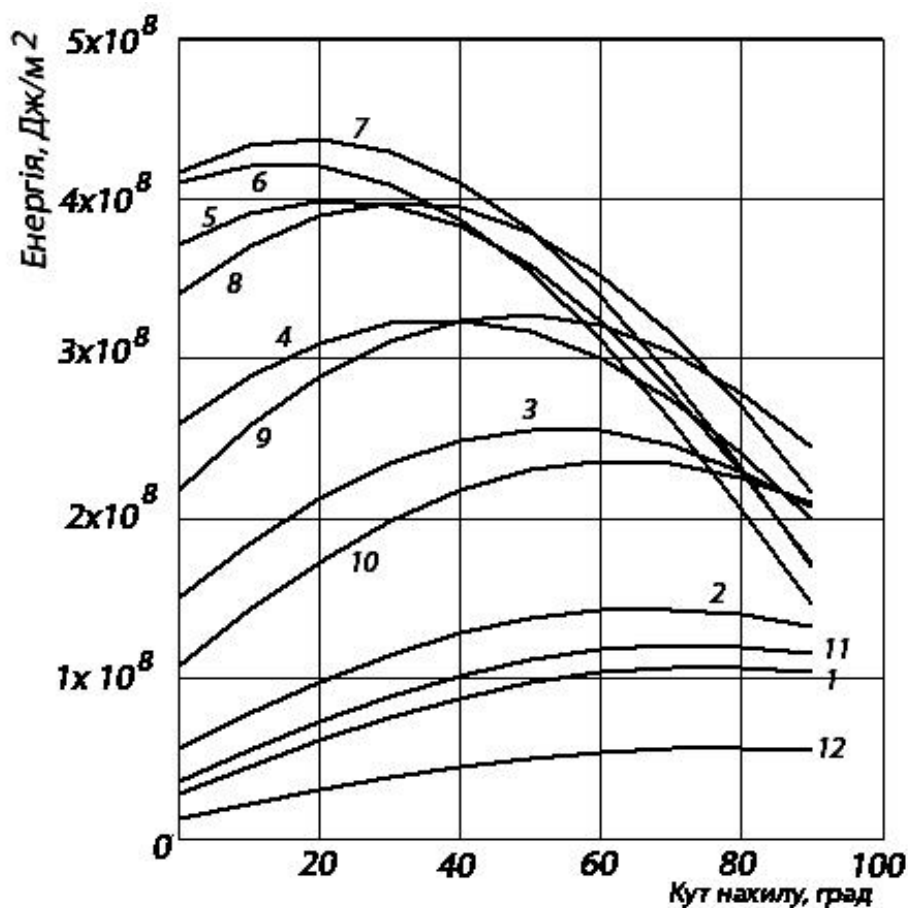


Рис. 3. Інтерпольовані параболічними сплайнами графіки залежності кількості енергії, що надходить на 1 м^2 колектора, від номера дня року для 12-ти місяців.

На рис. 5. показано графік надходження енергії на 1 м^2 площини колектора, що відповідає оптимальним кутам для кожного місяця. А на рис. 6 і 7 – згадані залежності, але згладжені кубічними сплайнами в середовищі MathCad.

Висновки та перспективи. Отримані в статті на прикладі міста Сарни результати підтверджують, що оптимальний кут нахилу колектора суттєво залежить від розрахункового періоду. Наведений метод визначення оптимальних кутів нахилу площини сонячного колектора за щомісячної їх зміни надалі можна використати для інших періодів року, наприклад, для періоду весна-літо-осінь, або для інших міст України, для яких є статистичні дані щодо тривалості сонячного сяяння.

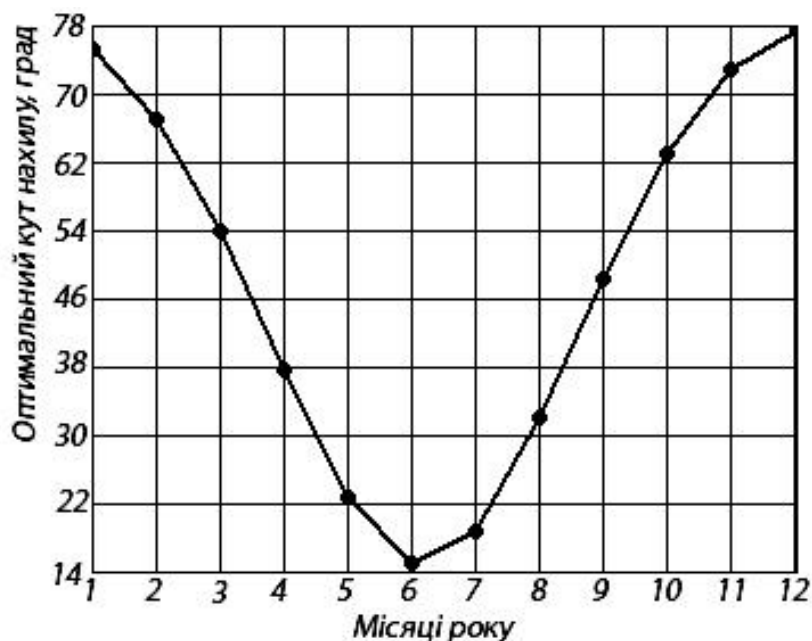


Рис. 4. Залежність оптимального кута нахилу колектора до площини горизонту для міста Сарни (51.4° пн. ш.) за щомісячної його зміни від номера місяця

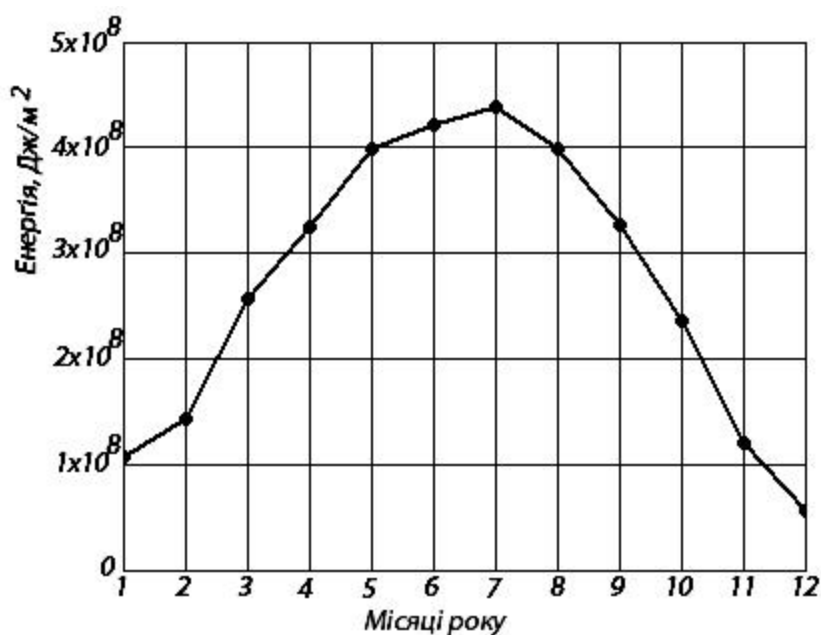


Рис. 5. Залежність енергії, що надходить на 1 м^2 колектору протягом місяця за оптимальних кутів нахилу площини колектора

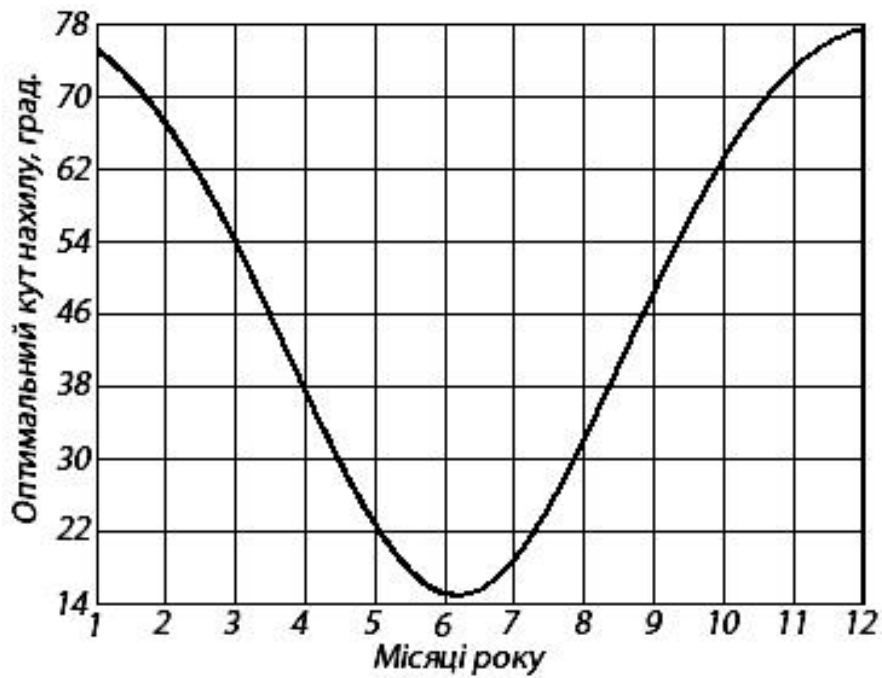


Рис. 6. Залежність оптимального кута нахилу колектора до площини горизонту для міста Сарни (51.4° пн. ш.) за щомісячної його зміни від номера місяця, згладжена кубічними сплайнами

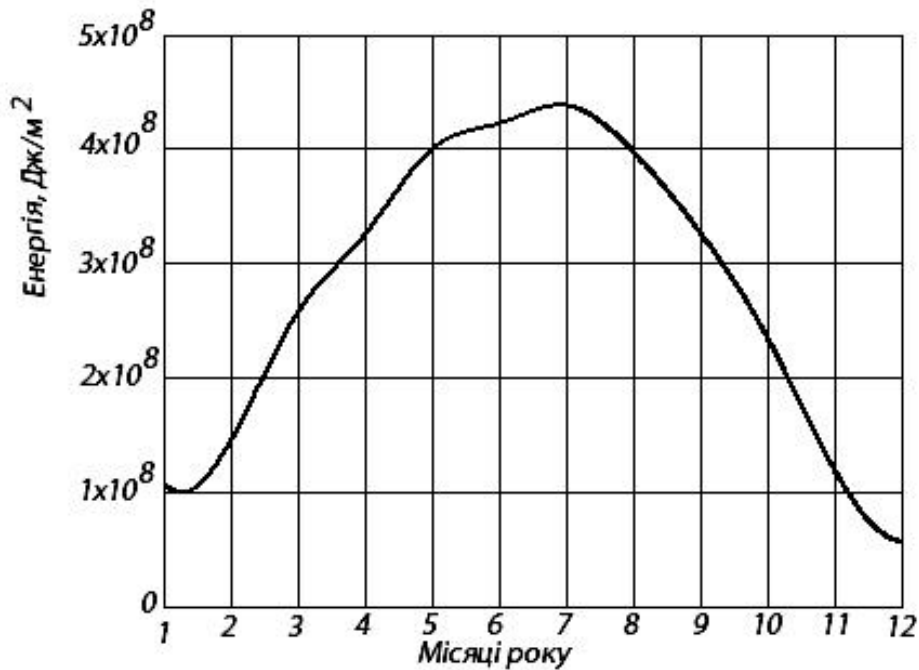


Рис. 5. Залежність енергії, що надходить на 1 м^2 колектора протягом місяця за оптимальних кутів нахилу площини колектору, згладжена кубічними сплайнами

Література

1. Подгорный А.Л., Мартынов В.Л. Определение оптимального угла наклона плоскости солнечного коллектора при заданном азимуте / Міжвідомчий наук. – тхн. збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка». Київ: Будівельник, 1992. Вип. 53. С. 8-12.
2. Пугачов Є. В. Моделювання річного ходу тривалості інсоляції похилої площини / Вісник національного університету водного господарства та природокористування. Збірник. Рівне: НУВГП, 2005. Вип. 3(31). С. 248 - 255.
3. Пугачов Є. В. Моделювання можливого сонячного опромінення похилої площини / Зб. наукових праць Київського національного університету технологій та дизайну (спецвипуск): геометрич. та комп'ют. моделювання: енергозбереження, екологія, дизайн: доповіді 2-гої Кримської наук.-практ. конференції, Сімферополь-Новий Світ, 19-23 вер. 2005р. Київ : КНУТД, 2005. С. 154 -159.
4. Пугачов Є. В. Інсоляція та опромінення похилої площини з урахуванням імовірності сонячного сяяння / Збір. наукових праць Київського національного університету технологій та дизайну (спецвипуск): геометрич. та комп'ют. моделювання: енергозбереження, екологія, дизайн: доповіді 3-гої Кримської наук.-практ. конференції, Сімферополь-Алушта, 25-29 вер. 2006 р. Київ : КНУТД, 2006. Вип. 4 (30). С. 133 -137.
5. Зданевич В. А., Кундрат Т. М., Літницькій С. І., Пугачов Є.В. Визначення оптимального кута нахилу плоского сонячного колектора залежно від його орієнтації та вірогідності сонячного сяяння / Зб. наук. праць МДПУ ім. Б. Хмельницького; гол. ред. кол. А.В. Найдиш «Сучасні проблеми моделювання». Мелітополь : Видавництво МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2019. Вип. 16. С. 113 – 120.
6. Зданевич В. А., Літницькій С.І., Кундрат Т.М., Пугачов Є.В. Визначення оптимальних кутів нахилу плоского сонячного колектора за умови посезонної зміни кутів нахилу / збірник наукових праць МДПУ ім. Б. Хмельницького; гол. ред. кол. А.В. Найдиш «Сучасні проблеми моделювання» Мелітополь : Видавництво МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2020. Вип. 20. С. 107 – 114.

References

1. Podgornyy A.L., Martynov V.L. Opredeleniye optimal'nogo ugla naklona ploskosti solnechnogo kollektora pri zadannom azimute / Sbornik Prikladnaya geometriya i inzhenernaya grafika. Kiyev: Budivel'nik, 1992. Vyp. 53. S. 8-12. {in Russian}
2. Puhachov Ye. V. Modelyuvannya richnoho khodu tryvalosti insolyatsyi pokhyloyi ploshchyny / Visnyk natsional'noho universytetu vodnoho

- hospodarstva ta pryrodokorystuvannya. Zbirnyk. Rivne: NUVHP, 2005. Vyp. 3(31). S. 248 -255. {in Ukrainian}*
3. *Puhachov YE. V. Modelyuvannya mozhyvoho sonyachnoho oprominennya pokhyloyi ploshchyny / Zb. naukovykh prats' Kyyivs'koho natsional'noho universytetu tekhnolohiy ta dyzaynu (spetsvypusk): heometrych. ta komp'yut. modelyuvannya: enerhozberezhennya, ekolohiya, dyzayn: dopovidi 2-hoyi Kryms'koyi nauk.-prakt. konferentsiyi, Siferopol'-Novyy Svit, 19-23 ver. 2005. Kyiv : KNUTD, 2005. S. 154 -159. {in Ukrainian}*
4. *Puhachov YE. V. Insolyatsiya ta oprominennya pokhyloyi ploshchyny z urakhuvannya imovirnosti sonyachnoho syayannya / Zbir. naukovykh prats' Kyyivs'koho natsional'noho universytetu tekhnolohiy ta dyzaynu (spetsvypusk): heometrych. ta komp'yut. modelyuvannya: enerhozberezhennya, ekolohiya, dyzayn: dopovidi 3-hoyi Kryms'koyi nauk.-prakt. konferentsiyi, Siferopol'-Alushta, 25-29 ver. 2006. Kyiv : KNUTD, 2006. Vyp. 4 (30). S. 133 -137. {in Ukrainian}*
5. *Zdanevych V. A., Kundrat T. M., Litnits'kiy S. I., Puhachov YE.V. Vyznachennya optimal'noho kuta nakhyly ploskoho sonyachnoho kolektora zalezno vid yoho oriyentatsiyi ta virohidnosti sonyachnoho syayannya / Suchasni problemy modelyuvannya: zb. nauk. prats' MDPU im. B. Khmel'nyts'koho; hol. red. kol. A.V. Naydysh. Melitopol' : Vydavnytstvo MDPU im. B. Khmel'nyts'koho, 2019. Vyp. 16. S. 113 – 120. {in Ukrainian}*
6. *Zdanevych V. A. Kundrat T. M., Litnits'kiy S. I., Puhachov YE.V. Vyznachennya optimal'nykh kutiv nakhyly ploskoho sonyachnoho kolektora za umovy posezonnoyi zminy kutiv nakhyly / Suchasni problemy modelyuvannya: zb. nauk. prats' // MDPU im. B. Khmel'nyts'koho; hol. red. kol. A.V. Naydysh. Melitopol' : Vydavnytstvo MDPU im. B. Khmel'nyts'koho, 2020. Vyp. 20. S. 107 – 114. {in Ukrainian}*

Vasyl Zdanevych,

vasyl.zdanevych@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9875-8463

Ph. D., Taras Kundrat,

kundratt@i.ua, ORCID: 0000-0001-9345-3161

Ph. D., assoc. prof Serhii Litnitskyi,

gavran88@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4962-7800

Ph. D., prof Eugene Pugachov,

e.v.pugachov@nuwm.edu.ua , ORCID: 0000-0003-4771-0942,

National University of Water and Environmental Engineering (NUWEE)

DEFINITION OF THE INCLINATION OPTIMUM ANGLES OF FLAT SOLAR COLLECTOR ON CONDITION OF MONTHLY CHANGE OF SLOPE ANGLES

The way of definition of optimum angles of the inclination of flat solar collector of the southern orientation to the horizon plane on condition of

monthly (12 months) changes of slope angle is developed, considering sunshine probability around construction.

For every month of year curve dependences of the energy falling on 1 sq.m of the plane of the collector of the southern orientation for Sarny town on slope angle of the collector to the horizon plane in degrees are shown, considering probability solar shine. All curves are also shown together in one drawing that allows to compare conveniently them.

The statistical duration of sunshine in hours undertook according to the observations of the actinometric station in Sarny town presented in the form of the polynom of the fourth degree depending on number of day of year, and the maximum (astronomical) duration of sunshine was calculated in the program developed by authors as solar time from rising to the decline in this day of year.

The relation of statistical duration of sunshine to maximum (astronomical) was treated as sunshine probability in this day of year. Of course, such treatment is rather approximate as actually it is advisable to accept the relation of statistical duration of sunshine over the collector's plane to the maximum (astronomical) duration of sunshine over the collector's plane too. But there are no necessary data on such statistical duration yet.

All curve dependences of the energy getting on 1 sq.m of the plane of the collector of the southern orientation have one well expressed maximum that allowed to define it for every month, previously interpolating values parabolic splines, and, thus, to define the optimum angle of the inclination of the collector for this month.

The way can be used (in the presence of statistical data for the area of construction on sunshine duration) and for other periods of year, for example spring-summer-fall, considering that snow on the planes of collectors can long lie in certain areas of construction. Other periods of year can be used also for the reasons which do not have relations to climatic conditions, and connected, for example, with the schedule of electric power consumption.

Keywords: flat solar collector; astronomical and statistical duration of sunshine; sunshine probability; optimum angle of the inclination of the collector; integrated transmission factor of the atmosphere; rated period; orientation of flat solar collector; mass of the atmosphere; time of rising and decline.