DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.67
УДК 697.343:621.311.243

Моделювання конструктивних та техніко-економічних показників засобами програмного продукту T*SOL

Марисюк Богдан Олександрович[1)]
Д-р філософії, завідувач каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1099-0290; marysiuk.b.o@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57222086897
Коренна Світлана Русланівна[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0339-7030; 9480827@stud.op.edu.ua
Гончаров Михайло Сергійович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4972-8622; honcharov.8865225@stud.op.edu.ua
Кушмаунзе Владислав Олегович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9275-8910; 4779174@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044,Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто проблему забезпечення гарячого водопостачання приватних будинків у контексті зростання цін на традиційні енергоносії, енергетичної невизначеності та міжнародних зобов'язань зі скорочення викидів CO_2. Як альтернативне рішення запропоновано використання сонячних теплових систем, здатних частково або повністю покривати потреби у гарячій воді в умовах високої інсоляції Півдня України. Метою дослідження є розробка оптимальної конфігурації сонячної теплової системи для приватного будинку в Одеському регіоні та кількісна оцінка її ефективності на основі динамічного моделювання в середовищі T*SOL. У роботі детально описано методику визначення потреби в тепловій енергії для нагрівання добового об'єму води залежно від кількості мешканців, температурних параметрів та нормативів водоспоживання. Розраховано необхідну площу сонячних колекторів із урахуванням середньодобової інсоляції, кута нахилу, коефіцієнта корисної дії обладнання та сезонних коливань. Наведено підхід до визначення кількості колекторів та оцінки фактичного теплового виходу системи у літній період, коли інсоляція досягає максимальних значень. Результати моделювання засвідчили, що річне надходження сонячного випромінювання на колектори становить 12899,82 кВт·год, із яких 4935,53 кВт·год трансформується в корисну теплову енергію. Система забезпечує понад 90 % потреб у гарячій воді в літні місяці, що дозволяє суттєво знизити споживання газу та електроенергії. Водночас виявлено ключові обмеження: теплові втрати в баці-акумуляторі та трубопроводах (13 % річного виходу), обмежена ємність акумулювання, залежність від погодних умов та зниження ефективності у зимовий період. Серед можливих шляхів підвищення ефективності визначено покращення теплоізоляції, оптимізацію стратегії керування насосним обладнанням, збільшення площі колекторного поля, перехід на вакуумні установки та вдосконалення стратифікації в баку-акумуляторі. Розглянуто переваги та недоліки використання пропіленгліколю як теплоносія. Окремо підкреслено значення економічної оцінки та доцільність застосування систем моніторингу для підвищення надійності та ефективності експлуатації. Таким чином, проведене дослідження підтверджує високу доцільність застосування сонячних теплових систем у побутовому секторі Півдня України, окреслює їхні сильні сторони та виявляє напрями технічної оптимізації для досягнення більшої енергетичної автономності.

Ключові слова: ВДЕ; сонячна теплова система; гаряче водопостачання; плоскі колектори; акумуляція тепла; енергоефективність

Актуальність. Зростання цін на традиційні енергоносії (природний газ, електроенергія), енергетична невизначеність та міжнародні зобов'язання щодо скорочення викидів CO_2 підсилюють інтерес до локальних відновлюваних рішень у побуті [1, 2]. Гаряче водопостачання (ГВП) у приватних будинках є суттєвим компонентом побутового енергоспоживання – для сім'ї з 3-4 осіб річні потреби на підігрів води становлять кілька тисяч кВт·год [3]. Сонячні теплові системи – технічно відпрацьоване рішення для часткового або повного покриття потреб ГВП у регіонах з помірною і високою інсоляцією, таких як Південь України [4]. Проте фактична ефективність системи залежить від комплексу параметрів: площа колекторів, тип колекторів, орієнтація й кут нахилу, обсяг бака-акумулятора, теплові втрати трубопроводів і бака, розумна автоматика й режим експлуатації [5].

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Метою роботи є розробка конфігурації сонячної теплової системи для приватного будинку у Одеському регіоні та кількісна оцінка її здатності покривати потреби ГВП (на основі динамічного моделювання в T*SOL [6]) і виявлення основних джерел втрат.

Щоб оцінити потребу в тепловій енергії для системи гарячого водопостачання, насамперед визначають кількість теплоти, необхідної для нагріву певного об'єму води від початкової температури до робочої [7]. Такий підхід дозволяє обчислити, скільки енергії повинна виробити сонячна система для забезпечення споживачів. Важливо також враховувати тепловтрати, оскільки вони суттєво впливають на загальну ефективність установки [8].

Розрахунок теплової енергії виконується за формулою::

$$\boldsymbol{Q}_{\text{необ}} = \boldsymbol{c_p} \cdot \boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{V} \cdot (\boldsymbol{t}_{\text{гв}} - \boldsymbol{t}_{\text{хв}}), \quad (1)$$

де c_p – питома теплоємність води, кВт·год/кг;

ρ – густина води, кг/м^3;

V – об'єм води, що споживається на добу всіма мешканцями, м^3/добу;

$t_{гв}$ – температура гарячої води, °С;

$t_{хв}$ – температура холодної води, °С.

Добовий об'єм споживання води визначають через добову норму витрати на одну людину та кількість мешканців:

$$\boldsymbol{V} = \boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{n}, \quad (2)$$

де n – кількість мешканців будинку;

m – добова норма витрати води на одну людину, м^3.

Після того як обчислено обсяг теплоти, необхідний для нагрівання визначеної кількості води до робочої температури, наступним кроком стає визначення розмірів поглинальної поверхні сонячних колекторів (3). Цей етап дозволяє встановити, яка площа колекторного поля здатна забезпечити потрібний рівень енергії виключно за рахунок надходження сонячної радіації. Інакше кажучи, знаючи теплову потребу, можна спрогнозувати, яку площу колекторів потрібно встановити для її покриття.

Для виконання такого розрахунку необхідно врахувати середньодобову інсоляцію – кількість сонячної енергії, що потрапляє на одиницю площі земної поверхні протягом доби. Цей параметр залежить від географічного розташування, пори року та кута нахилу колекторів. Зазвичай для орієнтовних розрахунків обирають місяць із найбільшою сонячною активністю, адже саме він відображає максимально можливі енергетичні показники системи. У розглянутому випадку було взято дані для літнього періоду (липень–серпень), коли сонячна інсоляція досягає пікових значень. Це дозволяє змоделювати найсприятливіші умови роботи установки та оцінити її потенціал у період максимальної продуктивності.

Таким чином, у подальших розрахунках застосовується значення денної інсоляції, характерне для серпня. Використання саме цього місяця як розрахункової бази забезпечує точніше визначення ефективної площі колекторів, яка здатна задовольнити розраховану потребу в тепловій енергії. Додатково варто зазначити, що врахування сезонних змін інсоляції дозволяє не лише оцінити максимальний потенціал системи, а й передбачити її ефективність упродовж року. Це особливо важливо для визначення рівня енергетичної автономності об'єкта та доцільності комбінування сонячних установок із традиційними джерелами енергії.

$$\boldsymbol{S}_{\text{необ}} = \frac{\boldsymbol{Q}_{\text{необ}}}{\boldsymbol{H_{46}} \cdot \boldsymbol{\eta}}, \quad (3)$$

де H_{46} – середньодобова інсоляція для кута нахилу 46°;

η – коефіцієнт корисної дії сонячного колектора.

Щоб сонячна установка могла покрити розраховану добову потребу в тепловій енергії, необхідно визначити кількість сонячних колекторів, які потрібно змонтувати у складі системи. Цей розрахунок здійснюється на основі вже визначеної сумарної площі поглинальної поверхні.

Для цього застосовується співвідношення (4), яке дозволяє визначити кількість панелей, виходячи з площі, що потрібна для покриття енергетичного балансу, та ефективної площі одного стандартного колектора:

$$\boldsymbol{n}_{\text{СК}} = \frac{\boldsymbol{S}_{\text{необ}}}{\boldsymbol{S}_{\text{СК}\mathbf{1}}}, \tag{4}$$

де $S_{СК1}$ – площа поглинальної поверхні одного колектора, м^2.

Отримане значення дає змогу оцінити реальні масштаби і конфігурацію майбутньої геліосистеми. Однак важливо врахувати, що це лише теоретичний розрахунок, який у подальшому може коригуватися залежно від фактичних умов встановлення: наявної площі даху, його орієнтації відносно сторін світу, кута нахилу, рівня затінення та інших експлуатаційних факторів.

На наступному етапі виконується оцінка кількості теплової енергії, яку система здатна реально виробити в умовах найбільшої сонячної активності. Для цього обирається період року з максимальною інсоляцією (у нашому випадку – серпень), коли система може демонструвати свій найвищий потенціал. Розрахунок проводиться за формулою (5):.

$$\boldsymbol{Q}_{\text{от}} = \boldsymbol{H}_{\mathbf{46}} \cdot \boldsymbol{S}_{\text{СК}} \cdot \boldsymbol{\eta}_{\text{СК}} \cdot \boldsymbol{n}_{\text{СК}}, \tag{5}$$

де H_{46} – середньодобова інсоляція для кута нахилу 46°;

$S_{СК1}$ – площа поглинальної поверхні одного колектора, м^2;

$\boldsymbol{\eta}_{\text{СК}}$ – коефіцієнт корисної дії колектора;

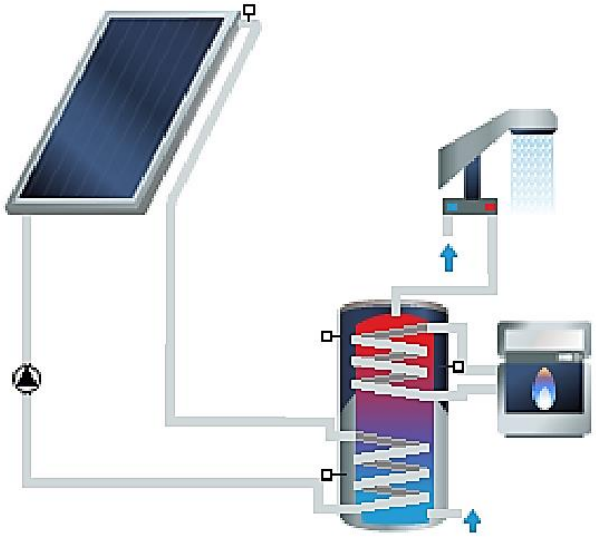
$\boldsymbol{n}_{\text{СК}}$ – кількість встановлених колекторів.

Отримане значення характеризує добовий тепловий вихід системи за сприятливих умов. Це дозволяє не лише оцінити максимальну продуктивність геліосистеми, але й надати уявлення про можливі сезонні коливання її ефективності.

Далі розраховані результати для кожного місяця року порівнюють із фактичними даними щодо споживання енергії на нагрівання води. Такий аналіз є ключовим у визначенні реального внеску сонячної системи в загальний енергетичний баланс приватного будинку. Він дає змогу встановити, яку частку потреб у гарячій воді може покрити установка, а яку необхідно компенсувати традиційними джерелами енергії.

Результати моделювання запропонованої схеми представлені на рис.1. Згідно з проведеними розрахунками моделі, сумарне річне сонячне випромінювання, яке надходить на поверхню колекторів, становить 12 899,82 кВт·год, що еквівалентно 1 402,15 кВт·год/м² [9]. Це значення відображає кількість сонячної енергії, яку протягом року отримує колекторна площина з урахуванням кліматичних умов регіону, географічної широти, кута нахилу та орієнтації установки відносно сторін світу.

Із цього загального енергетичного потенціалу геліосистема здатна трансформувати в корисну теплову енергію 4 935,53 кВт·год, або 583,81 кВт·год/м². Отриманий показник відображає реальну кількість енергії, яка надходить у систему гарячого водопостачання після урахування всіх неминучих втрат. До таких втрат належать втрати під час теплообміну в колекторах, циркуляції теплоносія в контурі, а також під час акумулювання та зберігання тепла в баку-накопичувачі. Таким чином, наведені дані демонструють ефективність роботи колекторного контуру та дозволяють оцінити частку енергії, яку вдається реально використати для покриття потреб у гарячій воді [10].



Results of annual simulation

Installed collector power:		5,070 kW
Installed solar surface area (gross):		10,1 m²
Irradiation on collector surface (active):	12 899,82 kWh	1 402,15 kWh/m²
Energy delivered by collectors:	5 371,06 kWh	583,81 kWh/m²
Energy delivered by collector loop:	4 935,53 kWh	536,47 kWh/m²
DHW heating energy supply:		7 351,30 kWh
Solar energy contribution to DHW:		4 740,73 kWh
Energy from auxiliary heating:		3 013,7 kWh
Natural gas (H) savings:		**487,0 m?**
CO2 emissions avoided:		**1 029,91 kg**
DHW solar fraction:		**61,1 %**
Relative savings of supplementary energy (DIN EN 12977):		**62,7 %**
System efficiency:		**36,8 %**

Рис. 1. **Результати чисельного моделювання ефективності системи**

Аналіз результатів числового моделювання схемно-конструктивних та техніко-економічних параметрів системи гарячого водопостачанням приватного будинку для кліматичних умов Півдня України, з використання програмного продукту T*SOL, дозволив виокремити як її переваги, так і обмеження, що впливають на ефективність експлуатації.

Однією з ключових переваг є висока сезонна ефективність у літній період. У місяці з піковою інсоляцією система здатна забезпечувати понад 90 % потреб у гарячій воді, що значно скорочує споживання газу чи електроенергії та, відповідно, знижує експлуатаційні витрати.

Важливим аспектом є також використання перевіреної технічної схеми – поєднання плоских сонячних колекторів із баком-акумулятором. Така конфігурація є простою в монтажі, має високий рівень надійності й добре відпрацьована на практиці, що підтверджується широкою доступністю обладнання та сервісної підтримки.

Окремо слід підкреслити позитивний вплив буферної ємності об’ємом 449 літрів. Такий рівень акумулювання забезпечує згладжування добових коливань у споживанні та дозволяє скоротити частоту ввімкнення резервного котла, підвищуючи комфортність користування системою.

Водночас виявлені й обмеження, що можуть знизити ефективність роботи системи. Найбільш відчутною проблемою є втрати теплоти в баку-акумуляторі та трубопроводах, які

сягають близько 632 кВт·год на рік, тобто майже 13 % від загального корисного виходу системи. Основними причинами є недостатня якість теплоізоляції, наявність теплових містків та значна протяжність контурів.

Ще одним викликом є чутливість системи до погодних умов, особливо у зимовий та міжсезонний періоди. У разі тривалих похмурих днів площа встановлених колекторів виявляється недостатньою для забезпечення повного покриття потреби, що вимагає використання резервного котла або розширення площі колекторного поля.

Застосування 40 % розчину пропіленгліколю у теплоносії також має як переваги, так і недоліки. Позитивною стороною є надійний захист від замерзання, однак гліколь знижує теплопровідність, потребує регулярного технічного контролю й періодичної заміни, а також створює додаткові гідравлічні навантаження через підвищену в'язкість, що впливає на вибір насосного обладнання.

Ще одне обмеження пов'язане з ємністю бака. Його запас енергії, еквівалентний приблизно 22,8 кВт·год (близько 1,1 доби автономної роботи), виявляється недостатнім для багатоденних похмурих періодів, тому система без резервного джерела тепла не може забезпечувати енергетичну незалежність протягом усього року.

Для покращення ефективності доцільно насамперед оптимізувати теплоізоляцію бака та трубопроводів. Застосування сучасних матеріалів з теплопровідністю не вище 0,04 Вт/(м·К) та збільшення товщини шару ізоляції до 30-40 мм дозволять скоротити теплові втрати на 20–30 %. Додатковий ефект дасть усунення теплових містків у місцях з'єднань.

Важливим напрямом є вдосконалення стратегії керування. Використання диференційного контролера з гнучкими гістерезисами та регульованою швидкістю циркуляційного насоса дозволить зменшити непотрібні втрати енергії на перекачування та забезпечить оптимальну роботу системи при змінних умовах.

З технічної точки зору варто розглянути варіанти збільшення площі колекторів або перехід на вакуумні трубчасті установки, які демонструють вищу ефективність у зимовий час та за похмурої погоди. Моделювання показує, що додавання двох плоских панелей (≈2,4 м²) може підняти рівень покриття потреб до 80 %.

Суттєве підвищення ефективності також можливе завдяки поліпшенню стратифікації в баку-акумуляторі. Використання багатосекційних теплообмінників або внутрішніх роздільників теплових шарів дозволяє мінімізувати ефект «змішування» та зберегти верхній шар води при високій температурі.

Щодо теплоносія, альтернативою застосуванню гліколю може стати система drain-back, яка автоматично зливає теплоносій у бак у разі простою. Така схема усуває потребу в антифризі, хоча потребує ретельного конструкторського опрацювання. Якщо ж використання гліколю залишається обов'язковим, необхідно впровадити планове технічне обслуговування з контролем концентрації та заміною розчину.

Важливим є також економічний аналіз, що враховує початкові витрати на обладнання та монтаж і поточні витрати на експлуатацію. Розрахунок терміну окупності для різних сценаріїв – базової конфігурації, додаткових колекторів або переходу на вакуумні трубки – дозволить обрати оптимальне рішення з точки зору економіки.

На завершення слід наголосити на доцільності впровадження системи моніторингу. Використання датчиків температури, лічильників теплової енергії та систем віддаленого контролю дає змогу не лише відслідковувати роботу обладнання в реальному часі, але й проводити своєчасну діагностику та оптимізацію експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lund H., Østergaard P. A. "The role of renewable energy in the future energy systems". *Energy*. 2020; 200: 117–124.

2. "IEA. Renewable Energy Market Update". *International Energy Agency*. 2022.

3. Duffie J. A., Beckman, W. A. “Solar Engineering of Thermal Processes”. *John Wiley & Sons.* 2013.

4. Kalogirou S. “Solar Energy Engineering: Processes and Systems”. *Academic Press*. 2014.

5. Pantic L., et al. “Performance evaluation of flat-plate solar collectors in different climates”. *Renewable Energy*. 2018; 129: 580–590.

6. “T*SOL Pro 6.0 Manual”.*Valentin Software GmbH*. 2019.

7. Мазур І. І., Кравець Р. І. «Енергоефективні системи теплопостачання з відновлюваних джерел енергії». Львів: Україна. *Видавництво Львівської політехніки*. 2021.

8. “EnergyPlus Weather Data”. *US. Department of Energy*. 2021.

9. Коренна С. Р. «Система гарячого водопостачання приватного будинку з використанням сонячних колекторів для Півдня України»: кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Одеса: Україна. Нац. ун-т «Одес. політехніка». 2025.

10. Hachem-Vermette C., et al. “Solar thermal systems for domestic hot water: A comparative study”. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 178: 115–123.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.67
UDC 697.343:621.311.243

Modeling of structural and technical and economic indicators using the T*SOL software product

Bohdan O. Marysiuk[1)]
Ph D, Head of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1099-0290; marysiuk.b.o@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57222086897
Svitlana R. Korenna[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0339-7030; 9480827@stud.op.edu.ua
Mykhailo S. Goncharov[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4972-8622; honcharov.8865225@stud.op.edu.ua
Vladyslav O. Kushmaunze[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9275-8910; 4779174@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

This paper addresses the issue of domestic hot water supply in private households in the context of rising prices for conventional energy carriers, energy insecurity, and international commitments to reducing CO_2 emissions. As an alternative solution, the study explores the use of solar thermal systems capable of partially or fully covering hot water demand under the high solar insolation conditions of Southern Ukraine. The objective of the research is to develop an optimal configuration of a solar thermal system for a private house in the Odesa region and to provide a quantitative assessment of its efficiency based on dynamic modeling in the T*SOL environment. The study presents a detailed methodology for estimating the thermal energy demand required to heat the daily water volume, taking into account the number of residents, temperature parameters, and water consumption standards. The required collector area is calculated with consideration of average daily insolation, tilt angle, equipment efficiency, and seasonal fluctuations. The approach to determining the number of collectors and evaluating the actual thermal output of the system during the summer period, when insolation reaches its peak values, is also described. Modeling results show that the annual solar radiation received by the collectors amounts to 12,899.82 kWh, of which 4,935.53 kWh is converted into useful thermal energy. The system is capable of covering more than 90% of hot water demand in summer months, significantly reducing gas and electricity consumption. However, several limitations have been identified: heat losses in the storage tank and pipelines (≈13% of annual output), limited storage capacity, dependency on weather conditions, and reduced efficiency during winter. Potential ways to improve system performance include enhanced thermal insulation, optimization of pump control strategies, expansion of collector area, transition to vacuum tube systems, and improvement of stratification within the storage tank. The advantages and drawbacks of using propylene glycol as a heat transfer fluid are considered. Additionally, the importance of economic assessment and the feasibility of implementing monitoring systems are emphasized to ensure reliability and operational efficiency. In conclusion, the study confirms the high potential of solar thermal systems for household applications in Southern Ukraine, highlights their strengths, and identifies technical optimization strategies to achieve greater energy autonomy.

Keywords: RES; solar thermal system; domestic hot water; flat-plate collectors; thermal storage; energy efficiency