

УДК 621.548:620.92:624.131

Є.О. БАГАНОВ, О.В. АНДРОНОВА, В.В. КУРАК
Херсонський національний технічний університет**МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ
ПІДЗЕМНОГО ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА, ТЕПЛОВИХ СОНЯЧНИХ
КОЛЕКТОРІВ ТА ТЕПЛООВОГО НАСОСУ**

У даній роботі розроблено математичну модель роботи системи теплозабезпечення об'єкту на основі використання теплових сонячних колекторів, підземного теплового акумулятора та теплового насосу. Проведене моделювання надало змогу визначити достатні параметри системи для її надійної експлуатації в конкретних кліматичних умовах. Показано, що експлуатація такої установки з достатніми параметрами за середньостатистичних кліматичних умов Херсонської області характеризується високим ступенем покриття теплового навантаження і цілком прийнятною міжсезонною ефективністю підземного теплового акумулятора. Також визначено час виходу системи на середньорічний стаціонарний режим роботи.

Ключові слова: теплозабезпечення, підземний тепловий акумулятор, сонячний колектор, тепловий насос, моделювання.

Ye.A. BAGANOV, E.V. ANDRONOVA, V.V. KURAK
Kherson National Technical University**SIMULATION OF WORK OF HEAT SUPPLY SYSTEM BASED ON UNDERGROUND HEAT
ACCUMULATOR, SUN HEAT COLLECTORS, AND HEAT PUMP****Abstract**

In this work the mathematical model of work of heat supply system based on sun heat collectors, an underground heat accumulator, and a heat pump is worked out. Based on this model simulation gives the possibility to define the sufficient system parameters for its reliable work at the specific climate conditions. It was shown the operation of such system with sufficient parameters at average statistical Kherson region climate conditions is characterized by high level of heat demand covering and completely acceptable seasonal efficiency of underground heat accumulator. Also the operation period after that the system achieves stable average annual operation conditions is defined.

Keywords: heat supply, underground heat accumulator, sun heat collector, heat pump, simulation.

Постановка проблеми

З кожним роком усе більше загострюються питання, пов'язані з подальшими шляхами розвитку енергетики. Одним з найважливіших завдань, які стоять перед паливно-енергетичним комплексом України, є максимальне використання власних енергетичних ресурсів, зокрема – сонячної енергії, причому, насамперед для генерації тепла з використанням теплових сонячних колекторів (СК), що характеризуються значною ефективністю. На користь цього свідчить і те, що майже вся територія України знаходиться в умовах помірного клімату, для якого характерні значна сонячна активність протягом літа та потреби у великих опалювальних потужностях протягом зими.

Характерною рисою теплових систем, що використовують сонячну енергію, є розбіжність моментів надходження й споживання теплової енергії при опаленні будівель. Зсув максимумів у річному циклі досягає 6-7 місяців. Із цих причин такі теплові системи у своєму складі повинні мати сезонні теплові акумулятори [1]. Однією з технологій накопичення, зберігання та використання в опалювальний період теплоти, що надходить в теплий період року, є створення та експлуатація підземних теплових акумуляторів (ПТА) [2, 3]. Однак ефективність використання системи СК-ПТА залежить від багатьох чинників (кліматичних, геологічних, будівельних тощо) і може бути оцінена тільки шляхом комплексного моделювання тривалої роботи системи з урахуванням місцевих кліматичних умов, універсальних пакетів для якого не існує.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблемою практичного використання ПТА у системах сонячного теплопостачання займаються з кінця 70-х років ХХ сторіччя, коли була створена перша демонстраційна станція у Швеції [3]. Основні висновки результатів досліджень полягають у тому, що головною задачею ефективної експлуатації системи СК-ПТА є зниження робочих температур системи [3]. Тому все частіше система оснащується тепловими насосами (ТН) задля узгодження низькотемпературної лінії СК-ПТА з високотемпературною

системою опалення та додаткового зарядження ПТА при кондиціонуванні [4]. Однак така система, внаслідок великих втрат у ПТА, поки що залишається ефективною тільки для великих потужних об'єктів, таких як райони або спільноти [5]. Показано, що для ефективного використання системи сонячного опалення з сезонним акумулюванням теплоти обов'язково слід враховувати місцеву геологічну ситуацію, інтеграцію системи, величину ПТА, температурні рівні та потужність теплового навантаження [5].

Таким чином, маємо комплексну, багатовекторну систему, розрахунок роботи якої, потребує моделювання з розглядом реальних кліматичних умов, динаміки температурного поля в ґрунті, взаємозв'язків між усіма технічними елементами системи.

Саме комплексність питання обумовлює відсутність на ринку універсальних програмних продуктів, спрямованих на оцінку параметрів роботи системи СК-ПТА-ТН. Навіть TRNSYS – одна з найуспішніших програм моделювання роботи теплових та електричних систем, до якої входить велика кількість моделей теплових акумуляторів різної конструкції, дає можливість тільки спрощеного моделювання теплових процесів в ґрунті (через середню температуру та її амплітуду для поверхні землі), однак без урахування впливу акумулятора на температурне поле ґрунту [6].

Формулювання мети дослідження

Аналіз стану досліджень систем з ПТА, СК та ТН показує необхідність комплексної передпроектної оцінки їх роботи. Відсутність на ринку ефективних програмних засобів аналізу та моделювання таких систем значно ускладнює визначення можливості використання ПТА у конкретних умовах експлуатації, зокрема, в умовах Херсонської області. Тому метою даного дослідження є аналіз роботи системи теплозабезпечення об'єкта з використанням ПТА, СК та ТН як базових складових та визначення доцільності її застосування на основі моделювання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для аналізу роботи системи була побудована математична модель, що складалася з семи структурних елементів: об'єкт, що опалюється (ОО); кліматичні умови (КУ); сонячні колектори; ґрунт (Г); тепловий насос; підземний тепловий акумулятор; система опалення (СО); дублер системи опалення (Д). Характеристики об'єктів, що враховувалися/варіювалися при моделюванні, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики об'єктів, що враховувалися/варіювалися при моделюванні

Структурний елемент	Характеристики
Об'єкт, що опалюється	Розрахункова температура у приміщенні для опалювального періоду та теплового періоду року та можлива її варіація в межах комфортності; клас енергоефективності
Кліматичні умови	Часові залежності температури повітря та надходження сонячної радіації
Сонячні колектори	Ефективність як функція температури теплоносія, зовнішньої температури, інтенсивності сонячного випромінювання, кут нахилу колекторів
Ґрунт	Теплопровідність; теплоємність; нестационарне температурне поле, геотермальна сходи́нка
Тепловий насос	Теплова та електрична потужності теплового насосу як функції температури теплоносія СО і температури теплоносія у ПТА
Підземний тепловий акумулятор	Геометричні розміри, температура теплоносія
Система опалення	Температура теплоносія у опалювальних приладах, коефіцієнт теплопередачі
Дублер системи опалення	Потужність

На рис.1 наведені зв'язки між структурними елементами системи, що являють собою вплив: температури навколишнього середовища та теплонадходжень від сонячної радіації на теплове навантаження або кондиціонування будівлі (1); температури навколишнього середовища та інтенсивності сонячного випромінювання на продуктивність сонячних колекторів (2); температури навколишнього середовища та інтенсивності сонячного випромінювання на умови теплообміну поверхні ґрунту (3); температурного поля у ґрунті на теплові потоки від ПТА (4); температури теплоносія в ПТА на температурне поле ґрунту (5); продуктивності СК на температуру теплоносія в ПТА (6); температури теплоносія в ПТА на ККД СК (7); потужності і графіку роботи ТН на потужність СО (8); температури і потужності СО на електроспоживання ТН (9); потужності теплового насосу на температуру теплоносія в

ПТА (10); температури у приміщенні ОО на часовий графік роботи ТН (11); потужності і графіку роботи СО на температуру у приміщенні ОО (12); температури ПТА на необхідність застосовувати Д (13); потужності і графіку роботи Д на потужність СО (14).

Зв'язки 2 і 7 визначають графік роботи сонячних колекторів (при від'ємній ефективності колектори «від'єднуються» від системи), що симулює роботу автоматики системи. Також до симуляції автоматики відносяться зв'язки 11 і 13. Інші зв'язки описуються особливостями моделей структурних елементів, граничними умовами та тепловим балансом.

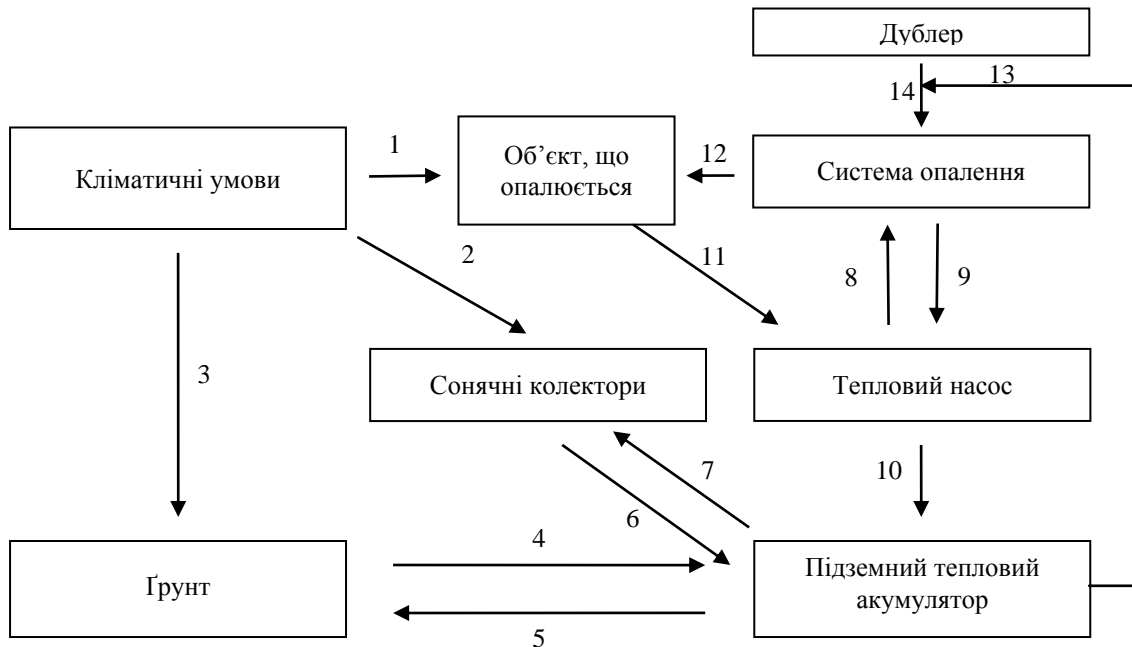


Рис. 1. Структурні елементи схеми та зв'язки між ними

КУ описувалися двома залежностями, що визначали річний хід температури та інтенсивність сонячного випромінювання. Зміна температури повітря являє собою безперервну функцію з коливаннями упродовж року та кожної доби. Для виконання апроксимації статистичних даних приймалися наступні припущення:

- 1) Температура повітря (T_A) змінюється упродовж доби та року за синусоїдальним законом.
- 2) Добові максимум та мінімум температур зсунуті на 12 годин та рівновіддалені від лінії середньомісячної температури.
- 3) Температура повітря біля поверхні землі дорівнює середній температурі у даній місцевості (значення вказані в [7]).

Тоді залежність T_A від часу t , що визначається від початку календарного року, може бути апроксимована наступною системою рівнянь ($^{\circ}\text{C}$):

$$\begin{cases} T_A(t) = T_{СЕР.М.}(t) + \Delta T_{СЕР.М.}(t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{24 \cdot 3600} t + C_A\right); \\ T_{СЕР.М.}(t) = A_M + B_M \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365 \cdot 24 \cdot 3600} t + C_M\right); \\ \Delta T_{СЕР.М.}(t) = A_D + B_D \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365 \cdot 24 \cdot 3600} t + C_D\right), \end{cases} \quad (1)$$

де $T_{СЕР.М.}(t)$ – функція зміни середньої температури повітря упродовж року (коефіцієнти апроксимації A_M і B_M знаходяться зі значень середньомісячних температур); $\Delta T_{СЕР.М.}(t)$ – функція зміни амплітуди добового коливання температури упродовж року (коефіцієнти апроксимації A_D , B_D знаходяться зі значень середньої добової амплітуди коливань температури за місяцями); коефіцієнти C_M , C_D , C_A враховують часовий зсув появи мінімальних і максимальних значень температури та її коливань відносно початку року.

Для виконання апроксимації статистичних даних за сонячною радіацією приймалося наступне:

- 1) Максимальна інтенсивність сонячного випромінювання змінюється упродовж року за синусоїдальним законом.

2) Зміна інтенсивності сонячного випромінювання протягом доби відповідає позитивному напівперіоду синусоїди з максимумом опівдні за місцевим часом.

Тоді часовий розподіл інтенсивності сонячної радіації описується залежністю

$$\begin{cases} I(t) = \frac{(I_d(t) + |I_d(t)|)}{2}; \\ I_d(t) = I_Y(t) \cdot \left(\sin\left(\frac{2\pi}{24 \cdot 3600}(t - 6 \cdot 3600)\right) - \text{tg}(\varphi - \beta) \cdot \text{tg} \delta \right); \\ I_Y(t) = I_A + \Delta I_A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365 \cdot 24 \cdot 3600}t + K_M\right), \end{cases} \quad (2)$$

де $I_d(t)$ – функція зміни інтенсивності сонячного випромінювання протягом дня з урахуванням негативного напівперіоду синусоїди; $I_Y(t)$ – функція максимальних добових інтенсивностей, I_A – середньорічна добова максимальна інтенсивність, ΔI_A – амплітуда зміни добової максимальної інтенсивності протягом року, C_M – враховує часовий зсув появи мінімальних і максимальних значень інтенсивності сонячної радіації відносно початку року, φ – широта місцевості, β – кут нахилу СК, δ – схилення, що визначається за формулою:

$$\delta = 0,13\pi \sin\left(2\pi \frac{284 + \frac{n}{24 \cdot 3600}}{365}\right). \quad (3)$$

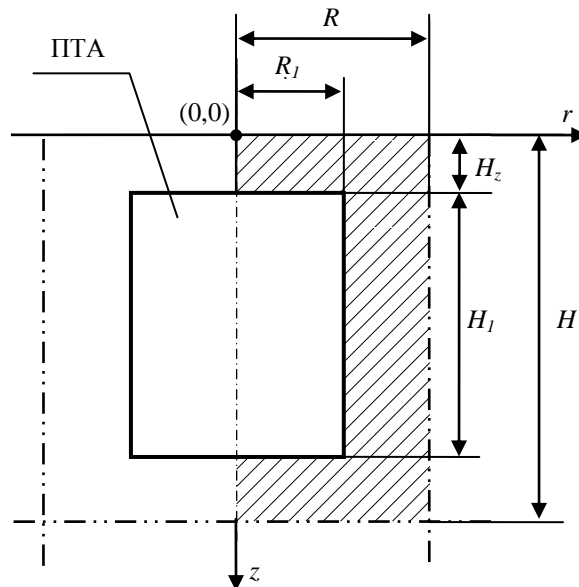


Рис. 2. Геометрія системи для моделювання взаємодії ґрунт-ПТА

ПТА розглядався як циліндричний резервуар, який розташований на певній глибині H_z від поверхні землі (рис. 2) і заповнений теплоносієм з однорідним розподілом температури (стратифікація за температурою відсутня). Температурне поле у ґрунті $T(z, r, t)$ описувалося двовимірним нестационарним диференціальним рівнянням теплопровідності у циліндричній системі координат, вісь якої співпадала з віссю ПТА (поверхня землі прийнята за нульовий рівень, вісь z спрямована донизу):

$$\frac{\partial T(z, r, t)}{\partial t} = a_s \left(\frac{\partial^2 T(z, r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(z, r, t)}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

з наступними крайовими умовами:

– взаємодія поверхні землі з навколишнім середовищем

$$-\lambda \left. \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha_1 (T_A(t) - T(0, r, t)); \quad (5)$$

– геотермальний потік (геотермічна сходінка)

$$\left. \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial z} \right|_{z=H} = \frac{1}{\sigma_T}; \quad (6)$$

– умови незбуреності теплового потоку землі

$$\left. \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R} = 0; \quad (7)$$

– умови симетрії

$$\left. \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, z \in [0; H_z] \cup [H_z + H_1; H]; \quad (8)$$

– взаємодія теплоносія зі стінками бака-акумулятора (бічна/верхня/нижня)

$$-\lambda \left. \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_1} = \alpha_2 (T_0(t) - T(z, R_1, t)), z \in [H_z; H_z + H_1], \quad (9)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial r} \right|_{z=H_z} = \alpha_4 (T_0(t) - T(H_z, r, t)), r \in [0; R_1], \quad (10)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial r} \right|_{z=(H_z + H_1)} = \alpha_3 (T_0(t) - T((H_z + H_1), r, t)), r \in [0; R_1], \quad (11)$$

та початковою умовою, що відповідає незбуреному ПТА температурному полі землі

$$T(z, r, 0) = T_A(t) + \frac{\lambda}{\sigma_T \cdot \alpha_1} + \frac{z}{\sigma_T}. \quad (12)$$

У формулах (4) – (12) a_s – температуропровідність ґрунту, σ_T – геотермальна сходінка, λ – теплопровідність ґрунту; $T_0(t)$ – температура теплоносія у ПТА, α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від землі до повітря, $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – еквівалентні коефіцієнти тепловіддачі від води до стінок (бічної/нижньої/верхньої) ПТА Вт/(м²·°С), які враховували як конвекційну складову, так і термічні опори стінок та теплоізоляції. Конвекційні складові коефіцієнтів тепловіддачі вважалися функціями температури і визначалися з відповідних критеріальних рівнянь, наведених у [8, 9]. Величини R і H визначають зону моделювання, яка містить ділянку ґрунту з температурним полем, збуреним наявністю ПТА.

ККД СК визначався стандартною формулою, що наводиться у паспортах виробників:

$$\eta = \eta_{opt} - k_1 \frac{((T_0 + T_{к.вих})/2 - T_0)}{I(t)} - k_2 \frac{((T_0 + T_{к.вих})/2 - T_0)^2}{I(t)}, \quad (13)$$

де η_{opt} – оптичний ККД СК; k_1, k_2 – коефіцієнти теплових втрат; $T_{к.вих}$ – температура теплоносія на виході СК, °С.

Для характеристик теплового насоса була обрана лінійна апроксимація, що добре узгоджується з переважною більшістю паспортних даних:

$$P_{ТН.N}(T_1, T_2) = (K_{1N} \cdot T_2 + B_{1N}) \cdot T_1 + (K_{2N} \cdot T_2 + B_{2N}), \quad (14)$$

де $P_{ТН.N}$ – потужність теплового насоса (теплова, холодильна, споживана); T_1 – температура подачі первинного контуру; T_2 – температура подачі вторинного контуру; $K_{1N}, B_{1N}, K_{2N}, B_{2N}$ – коефіцієнти, що визначаються робочими характеристиками ТН. Індекс N відповідає виду характеристики ТН: T – тепловій, X – холодильній, CE – споживаній електриці.

Функція теплового навантаження будівлі з урахуванням КУ приймалася за залежністю

$$E_{\text{буд.}}(T_i, T_A(t), A(t)) = QQ \cdot (T_i - T_A(t)) + \frac{353 \cdot WW \cdot (T_i - T_A(t))}{273 + 0.5(T_i - T_A(t))} - BB - CC \cdot A(t), \quad (15)$$

де T_i – розрахункова температура приміщення, QQ, WW, BB, CC – коефіцієнти, що визначалися на основі методики, описаної в [10].

Опалювальні прилади та прилади для кондиціонування повітря приймалися за спрощеною моделлю та визначали вихідну температуру контуру ТН для опалення (T_h) та кондиціонування (T_c).

Прийнята однорідність температурного поля у ПТА призводить до наступного теплового балансу:

$$\begin{aligned}
 -c\pi R_1^2 H_1 \rho dT_0(t) = & 2\pi\alpha_3 \int_0^{R_1} (T_0(t) - T(H_z + H_1, r, t)) + \alpha_4 (T_0(t) - T(H_z, r, t)) r dr + \\
 & + 2\pi R_1 \alpha_2 \int_{H_z}^{H_z + H_1} (T_0(t) - T(z, R_1, t)) dz - \eta I(t) S_k dt - \\
 & - (P_{TH.X}(T_i, T_0) + P_{TH.CE}(T_c, T_0)) dt + (P_{TH.T}(T_0, T_h) - P_{TH.T}(T_0, T_h)) dt,
 \end{aligned} \tag{16}$$

де c, ρ – теплоємність і густина теплоносія у ПТА. Останні два доданки визначають роботу ТН у режимі кондиціонування та опалення відповідно, які не реалізуються одночасно.

Тепловий баланс приміщення ОО:

$$-c_a \rho_a V dT_i(t) = E_{\text{ввод}}(T_i(t), T_A(t), I(t)) + P_{TH.X}(T_c, T_0) dt - P_{TH.T}(T_0, T_h) dt - P_D dt, \tag{17}$$

де P_D – потужність дублера, c_a, ρ_a – теплоємність і густина повітря при температурі T_i , V – опалюваний об’єм ОО. Аналогічно (16) режими кондиціонування та опалення ТН, а також робота дублера одночасно не реалізуються.

Для розв’язання математичної моделі системи (1) – (17) використовувався метод скінченних різниць. Для всіх процесів системи проводилася дискретизація часу, а дискретизація простору – для рівнянь (4) – (12).

Моделювання проводилося для умов Херсонської області для житлового будинку класу енергоефективності С (питомі витрати теплової енергії були прийняті 65 кВт·год/м² за опалюваний сезон) [11]. Параметри рівнянь (1), (2) були визначені на основі статистичних даних, наведених у [12]. Нормативна температура приміщення, згідно з [13], для опалювального періоду складає $22 \pm 3^\circ\text{C}$, а періоду охолодження – $24,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$. Температури теплового насоса були прийняті $T_h = 50^\circ\text{C}$ і $T_c = 10^\circ\text{C}$ для роботи фанкойлів Ferroli TOP FAN 15. Теплопровідність та теплоємність ґрунту в значній мірі залежить від таких непостійних за часом та місцевістю особливостей, як вологість та розмір твердих частинок. У середньому для ґрунту, що є характерним для Херсонської області, теплопровідність приймають 1,75 Вт/(м·°C), а теплоємність – 1,7 кДж/(кг·°C) [14].

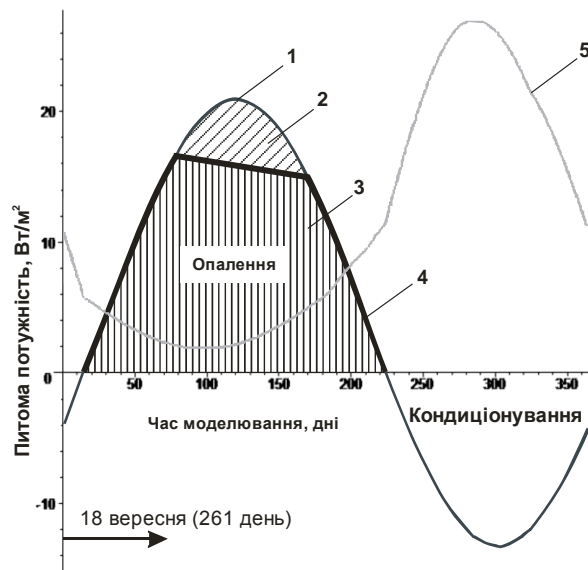


Рис. 3. Типові графіки питомого навантаження:

- 1 – питоме теплове навантаження ОО (від’ємна частина – кондиціонування);
- 2 – частка навантаження, що покривається дублером; 3 – частка навантаження, що покривається енергією системи з ПТА; 4 – питомі потужності, що віддається системою з ПТА;
- 5 – питомі теплонадходження у ПТА

Типовий результат моделювання роботи системи наведений на рис. 3. у вигляді потужностей, віднесених до одиниці опалюваної площі. Крива 1 характеризує питоме теплове навантаження об’єкта (від’ємна частина – навантаження на кондиціонування), причому частка навантаження на опалення покривається системою на основі ПТА (рис. 3, поз. 3), а частина – дублером (рис. 3, поз. 2). Крива 4 відповідає питомій потужності системи, а 5 – теплонадходженням у ПТА, що включають у себе скидне тепло ТН, енергію з СК та тепло, отримане із ґрунту.

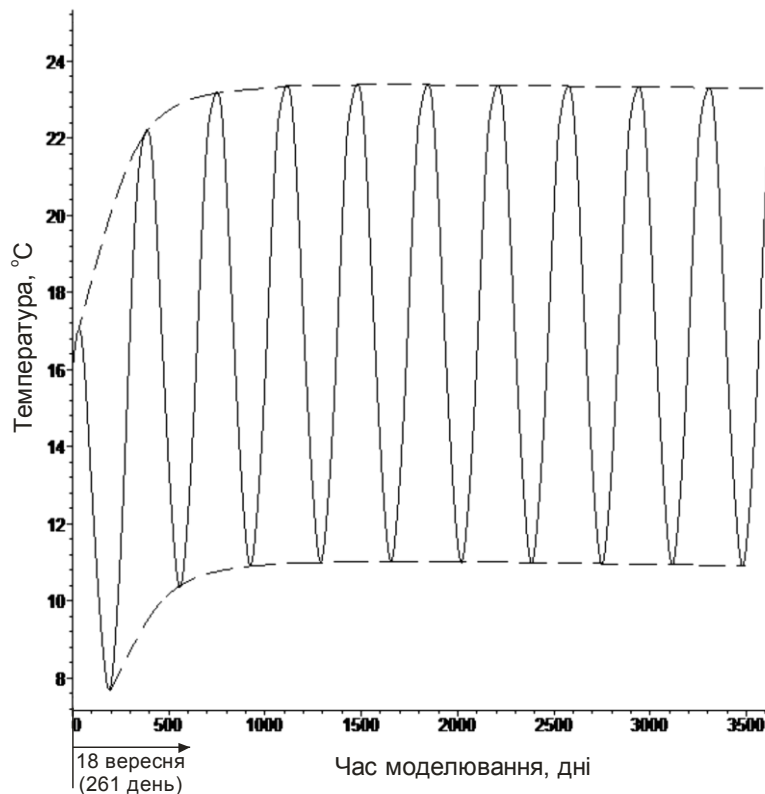


Рис. 4. Графік залежності температури теплоносія в ПТА за 10 років експлуатації (пунктир показує криву зміни максимальної та мінімальної температур в ПТА)

У результаті проведення серії розрахунків було визначено, що для будинку класу енергоефективності С частка покриття теплового навантаження ОО в опалювальний період при середньостатистичних погодних умовах практично перестає підвищуватися, починаючи з параметрів:

- питомий об'єм ПТА $5,3 \text{ м}^3/\text{м}^2$ опалюваної площі;
- питома площа СК $0,055 \text{ м}^2/\text{м}^2$ на опалювану площу;
- тепловий опір стінок ПТА $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

При цьому міжсезонний ККД ПТА склав 73 %, а частка навантаження, що покривається енергією системи з ПТА, – понад 86 %.

Також результати моделювання показали, що орієнтовний час виходу системи на середньорічний стаціонарний режим роботи для умов Херсонської області при наведених вище достатніх технічних параметрах становить біля 3-4 років за середньостатистичних погодних умов (рис. 4).

Висновки

Моделювання системи «підземний тепловий акумулятор – тепловий насос – сонячні колектори» в кліматичних умовах Херсонської області показало доцільність її використання. Для житлової будівлі класу енергоефективності С визначені достатні технічні параметри системи:

- питомий об'єм ПТА $5,3 \text{ м}^3/\text{м}^2$ опалюваної площі;
- питома площа СК $0,055 \text{ м}^2/\text{м}^2$ опалюваної площі;
- тепловий опір стінок ПТА $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,

що забезпечують при середньостатистичних погодних умовах 85 % покриття навантаження на опалення. Міжсезонний ККД ПТА при цьому сягає 73 %. Подальше підвищення цих параметрів призводить до незначного покращення енергетичних характеристик системи.

Також показано, що вихід системи на середньорічний стаціонарний режим роботи відбувається через 3-4 роки після початку її експлуатації.

Список використаної літератури

1. Теплонасосные гелиосистемы отопления и горячего водоснабжения зданий / Плешка М.С. [и др.]. – Кишинев: Штиинца, 1990. – 124 с.
2. Nordell B. High Temperature Solar Heated Seasonal Storage System for Low Temperature Heating of Buildings/ Nordell B., Hellström G. // Solar Energy. – 2000. – 6. – p. 511 – 523

3. Pavlov G. Seasonal solar thermal energy storage through ground heat exchangers –Review of systems and applications/Pavlov G., Olesen B. // Proceedings of 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 25-29 of September 2011, Dubrovnik, Croatia. – p. 42-53.
4. Potential of decentralized heat pumps to improve the financial viability of a solar district heating system with seasonal thermal storage / Krebs M. [at al.] // Proceedings of 2014 ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference – September 10 - 12, 2014, Atlanta, GA, USA. – p. 370-377
5. Socaciu L. Seasonal Thermal Energy Storage Concepts. // Acta Technica Napocensis. Series: Applied Mathematics and Mechanics. – 2012. – 55. – p. 775-784.
6. TRNSYS 17. A TRaNsient SYstem Simulation program, User manual/Klein, S. A. [et al.] // Madison, WI: University of Wisconsin-Madison, USA. 2012
7. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія». Київ. Мінрегіонбуд України – 2011р. 127 с.
8. Михеев М.А. Основы теплопередачи/Михеев М.А., Михеева И.М. – М.:«Энергия», 1977. – 344 с.
9. Крейт Ф. Основы теплопередачи / Крейт Ф., Блэк У. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
10. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції: – ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. – [Чинний від 01–07–2008] // Мінрегіонбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2008. – 42 с.
11. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6–31:2006. – [Чинні від 01–04–2007] // Мінбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2006. – 65 с
12. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. – [Чинний від 01–11–2011] // Мінрегіонбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2011р. – 123 с.
13. Опалення, вентиляція та кондиціонування: ДБН В.2.5-67:2013 – [Чинний від 01–01–2014] // Мінрегіон України. – К.: Укрархбудінформ, 2013 р. – 141 с.
14. Назаренко І.І., Грунтознавство: підручник / Назаренко І.І., Польчина С.М., Нікорич В.А. – Чернівці, Книги ХХІ, 2004. – 400 с.