

УДК 697.329

Москвітіна А.С.,
anisiya_1@meta.ua, ORCID: 0000-0003-3352-0646,
Київський національний університет будівництва і архітектури

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СЕЗОННОГО АКУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТИ.

Описуються вимоги до систем з сезонними акумуляторами теплоти. Залежність непродуктивних тепловтрат сезонного акумулятора теплоти від місця його розміщення. Залежність товщини теплової ізоляції теплового акумулятора від місця його розміщення. Вплив вартості 1 ГДж закумульованої теплоти на товщину теплової ізоляції. Наведено розрахунок оптимальної товщини теплової ізоляції сезонного акумулятора теплоти.

Ключові слова: сезонне акумулювання теплоти, теплоємнісний акумулятор теплоти, теплоакумуючий матеріал, вартість акумулятора теплоти, товщина теплової ізоляції акумулятора теплоти.

Різке загострення взаємопов'язаних енергетичних і екологічних проблем - Монреальський протокол 1987 року з проблеми озонобезпеки і Кіотський протокол 1997 року (з проблем емісії парникових газів і глобального потепління), викликало значний інтерес до можливостей сонячних систем для тепlopостачання (гаряче водopостачання й опалення) та холодopостачання. Останнє десятиліття відзначено особливою активністю у цьому напрямі в Японії і США. Приділяється увага розробці та створенню „гібридних” систем опалення та гарячого водopостачання будинків. Стимулювання використання відновлюваної енергії є головною складовою Європейської енергетичної та екологічної політики впродовж багатьох років. Згідно з Політикою ЄС, викладеною в Директиві 2009/28/ЄС, на рівні ЄС були погоджені цілі досягнення впровадження ВДЕ, відзначається підвищений інтерес до використання сонячної енергії, в тому числі - її акумулювання.

Одним з ефективних та широко розповсюджених способів отримання теплоти є перетворення сонячного випромінювання, яке падає на поверхню Землі. Але, у зв'язку з тим, що період опалення у холодний період року зміщений на 180 діб відносно періоду найбільш інтенсивної сонячної інсоляції, виникає необхідність акумулювання сонячної теплоти. Застосування сезонного акумулятора теплоти (САТ), для зберігання теплоти на короткостроковий або довгостроковий період часу, дозволяє підвищити ефективність роботи та надійність геліосистем тепlopостачання навіть за несприятливих кліматичних умов. При застосуванні альтернативних, енергозберігаючих технологій

використання енергії навколишнього середовища (енергії Сонця, вітру, ґрунту, водоймищ тощо) виникає необхідність накопичувати цю енергію в теплових чи електричних акумуляторах [1, с. 225; 2, с. 176]. Тому, метою є створення екологічно чистих, енергозберігаючих систем теплопостачання з використанням сонячної енергії на базі сезонного акумулятора теплоти, який буде відповідати наступним основним вимогам:

- приймати та віддавати теплоту з максимальною інтенсивністю;
- мати як найменший об'єм;
- акумулювати теплоносій з температурою більше 100⁰С;
- витримувати велику кількість циклів без суттєвого зменшення потужностей акумулятора;
- мати недорогі капітальні та експлуатаційні затрати, бути простим в подальшій експлуатації.

Оптимальна енергоефективність акумуляції теплоти та всієї системи сонячного теплопостачання залежить від:

- вартості акумулятора, яка включає в себе вартість спорудження резервуару (повна конструкція резервуара з теплоізоляцією), вартість самого теплоакumuлюючого матеріалу;
- робочих температур ТАМа;
- вартості експлуатації теплоакumuлятора;
- вартості й експлуатаційних характеристик геліоколекторів (виникає питання доцільності використання дорогих та складних конструкцій імпортованих геліоколекторів) та інших альтернативних джерел теплової енергії.

Комплексний розгляд цих вимог дозволив запропонувати конструкцію акумулятора теплоти з комбінованим двокомпонентним рідинно-твердим теплоакumuлюючим матеріалом [3,4,5], в якому досягається більш рівномірний розподіл температур в об'ємі теплового акумулятора.

Для зменшення питомої вартості 1 ГДж закумуляованої теплоти ефективна конструкція теплового акумулятора повинна **мати мінімальні тепловтрати в навколишнє середовище**. При виборі форми теплоакumuлятора в плані потрібно намагатися максимально спростити його форму. Оскільки найбільші тепловтрати відбуваються через стіни, бажано, щоб площа їх поверхонь була найменшою. Оскільки на форму теплового акумулятора впливає його розташування [6], ми розглядаємо варіант розміщення теплового акумулятора під будинком рис. 1. Система акумуляування теплоти, як правило, містить теплоізолюваний резервуар з теплоакumuлюючим матеріалом (ТАМ), який здійснює накопичення й зберігання теплової енергії, теплообмінне обладнання для підведення й відводу теплоти від ТАМу при зарядці й розрядці теплоакumuлятора.

Враховуючи вартість закумуляованої енергії в сезонному акумуляторі теплоти [6], при визначенні оптимальної товщини теплової ізоляції, потрібно виконувати техніко-економічний розрахунок з визначенням мінімальних приведених затрат.

$$P = (P_i + E_n) \cdot K_i + C_{mn} = \min, \quad (1)$$

де P_i – річні відрахування від вартості ізоляції складають 0,08;

E_n – нормативний коефіцієнт капіталовкладень в ізоляцію, дорівнює 0,12;

K_i – капіталовкладення в теплову ізоляцію, грн;

C_{mn} – річна вартість тепловтрат, грн;

P – приведені затрати, грн.

Для визначення річної вартості тепловтрат необхідно розрахувати:

- Тепловтрати при різних товщинах теплової ізоляції;
- Вартість 1кДж закумуляованої теплоти.

Приймаємо наступну конструкцію сезонного акумулятора теплоти для розрахунків [6]:

- Гідроізоляція, $\lambda=0,17$ Вт/(м·К), $\delta=0,005$ м.

- Теплоізоляція донної частини з вспіненого скла $\lambda=0,065$ Вт/(м·К), $\delta=x$ м та теплоізоляція бокових частин з мінеральної вати $\lambda=0,045$ Вт/(м·К), $\delta=x$ м.

- Залізобетон бетон, $\lambda=2,04$ Вт/(м·К), $\delta=0,220$ м.

- Гідроізоляція, $\lambda=0,17$ Вт/(м·К), $\delta=0,005$ м.

Сезонний акумулятор теплоти розміщено під індивідуальним житловим будинком, тому втрати тепла відбуваються в приміщення будинку зверху над тепловим акумулятором і в ґрунт, який оточує ТА з інших боків, рис 1. Розміри теплового акумулятора приймаємо 8x8x3,36(h)м [6]. Річна витрата теплоти на опалення +ГВП, 25700 кВт*год/рік; річне надходження сонячної радіації 830 кВт*год/рік, враховуючи те, що період зарядки теплового акумулятора триває з кінця квітня до початку жовтня; загальна площа сонячних колекторів: 52 м². Об'єм тепла, що необхідно закумуляувати 46,33ГДж.

Тепловтрати розраховуємо за формулою:

$$Q_{mn} = F \cdot k \cdot (t_{та}^c - t_{нав}), \text{ Вт} \quad (2)$$

Де, Q_{mn} – тепловтрати, Вт

F – площа поверхні стінки сезонного акумулятора теплоти, м²;

k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);

$t_{та}^c$ – середня температура акумулятора теплоти, при розрахункових температурах акумулятора теплоти 140-55 °С, дорівнює 97,5 °С;

$t_{\text{нав}}$ – температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$.

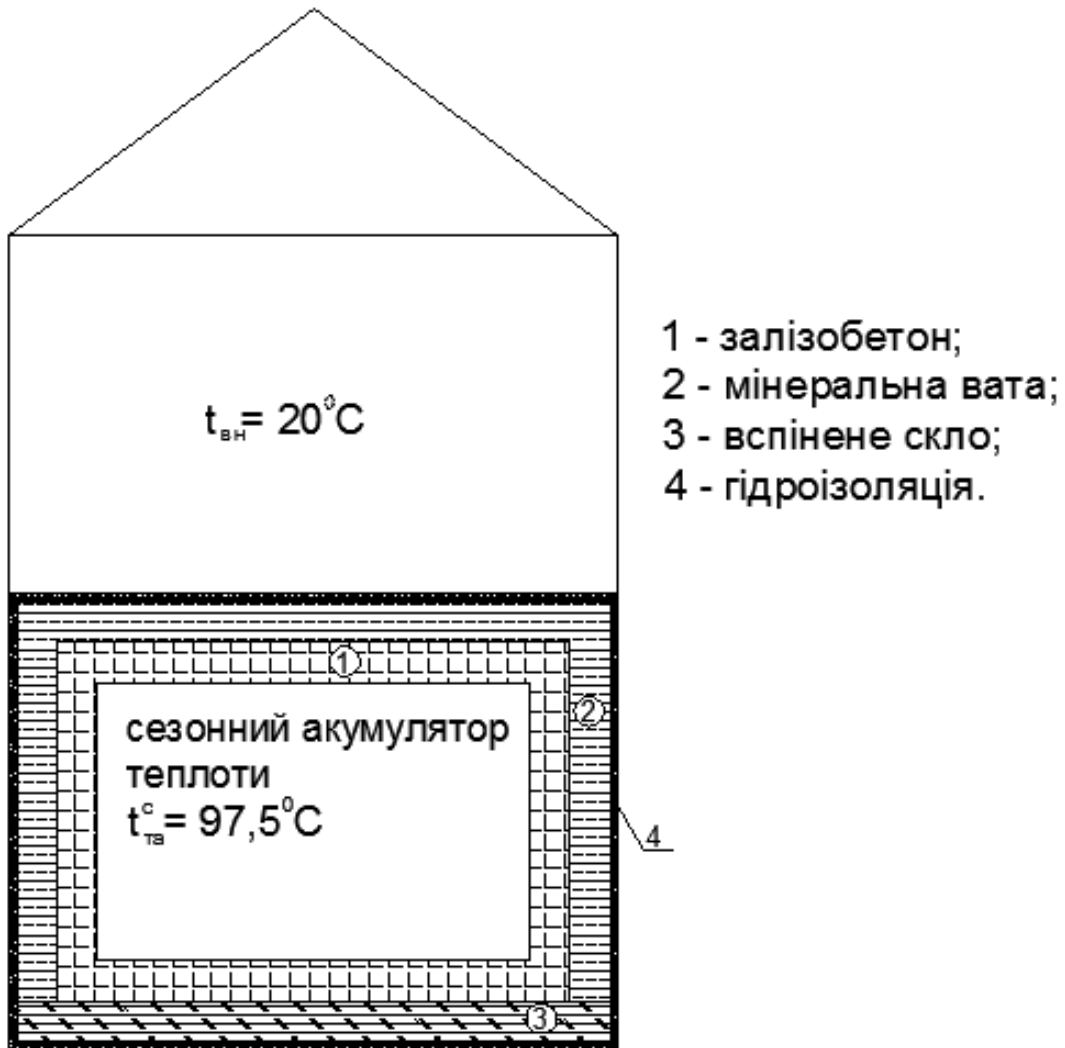


Рис.1. Розміщення теплового акумулятора та його контерукція.

Коефіцієнт теплопередачі визначається:

$$k=1/R, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}) \quad (3)$$

де R – опір теплопередачі, $(\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}$.

Опір теплопередачі підземної частини стіни теплового акумулятора R , $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$, визначають з урахуванням утеплювача по зонах-смугах завширшки 2 м, паралельних зовнішнім стінам, за формулами:

$$\text{для I-ої зони } R^I = 2,1 + \delta_{mi} / \lambda_{mi};$$

$$\text{для II-ої зони } R^{II} = 4,3 + \delta_{mi} / \lambda_{mi}. \quad (4)$$

$$\text{для III-ої зони } R^{III} = 8,6 + \delta_{mi} / \lambda_{mi};$$

$$\text{для IV-ої зони } R^{IV} = 14,2 + \delta_{mi} / \lambda_{mi}.$$

де, δ_{mi} – товщина теплової ізоляції, м;

λ_{mi} – коефіцієнт теплопровідності теплової ізоляції, Вт/(м · К).

Опір теплопередачі верхньої частини теплового акумулятора розраховується як :

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{i=1}^n R_i = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{ip}}, \quad (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт} \quad (5)$$

де α_B , - коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, Вт/(м² · К), який дорівнює 8,7, Вт/(м² · К);

R_i - термічний опір i -го шару конструкції, (м² · К)/Вт;

λ_{ip} - теплопровідність матеріалу i -го шару конструкції в розрахункових умовах експлуатації, Вт/(м · К).

Для розрахунку тепловтрат від акумулятора теплоти в приміщення над ним, окрім конструкції самого теплового акумулятора, необхідно врахувати ще підлогу першого поверху, яка складається з:

- Залізобетонної плити $\lambda=2,04$ Вт/(м·К), $\delta=0,220$ м;
- Цементно-піщаної стяжки $\lambda=0,81$ Вт/(м·К), $\delta=0,050$ м.
- Керамічна плитка $\lambda=1,1$ Вт/(м·К), $\delta=0,005$ м.

Всі розрахунки проводимо для товщини теплової ізоляції в діапазоні $\delta_{mi} = 400...2500$.

Тепловтрати за рік в ґрунт розраховуємо за формулами 1 та 2 з поправками: замість $t_{вн}$ ставимо $t_{та}^c = 97,5$ °С, t_{oc} приймаємо середню температуру зовнішнього повітря за рік 8 °С, та кількість днів приймаємо 365. Тепловтрати в приміщення будинку в опалювальний період приймаємо як теплонадходження в опалювальне приміщення, тому тепловтрати в ґрунт потрібно розраховувати тільки за неопалювальний період. Тому приймаємо середню температуру повітря за неопалювальний період 20 °С – температура повітря в приміщенні будинку, а кількість днів неопалювального періоду: 365-176=189. Для розрахунку тепловтрат в ґрунт за неопалювальний період приймаємо мінімальну температуру зовнішнього повітря – 8 °С.

Вартість 1кДж закумуляованої теплоти розраховуємо за методикою, викладеною в [3].

Для кращого аналізу даних будуємо графіки приведених затрат в залежності від товщини теплової ізоляції (рис. 2).

Згідно графіку приведених затрат на теплову ізоляцію оптимальна товщина теплової ізоляції становить 2300мм. Тепловтрати в неопалювальний період будуть покриватися за рахунок додаткових площ сонячних колекторів, а тепловтрати в опалювальний період – за рахунок збільшення об'єму сезонного акумулятора теплоти.

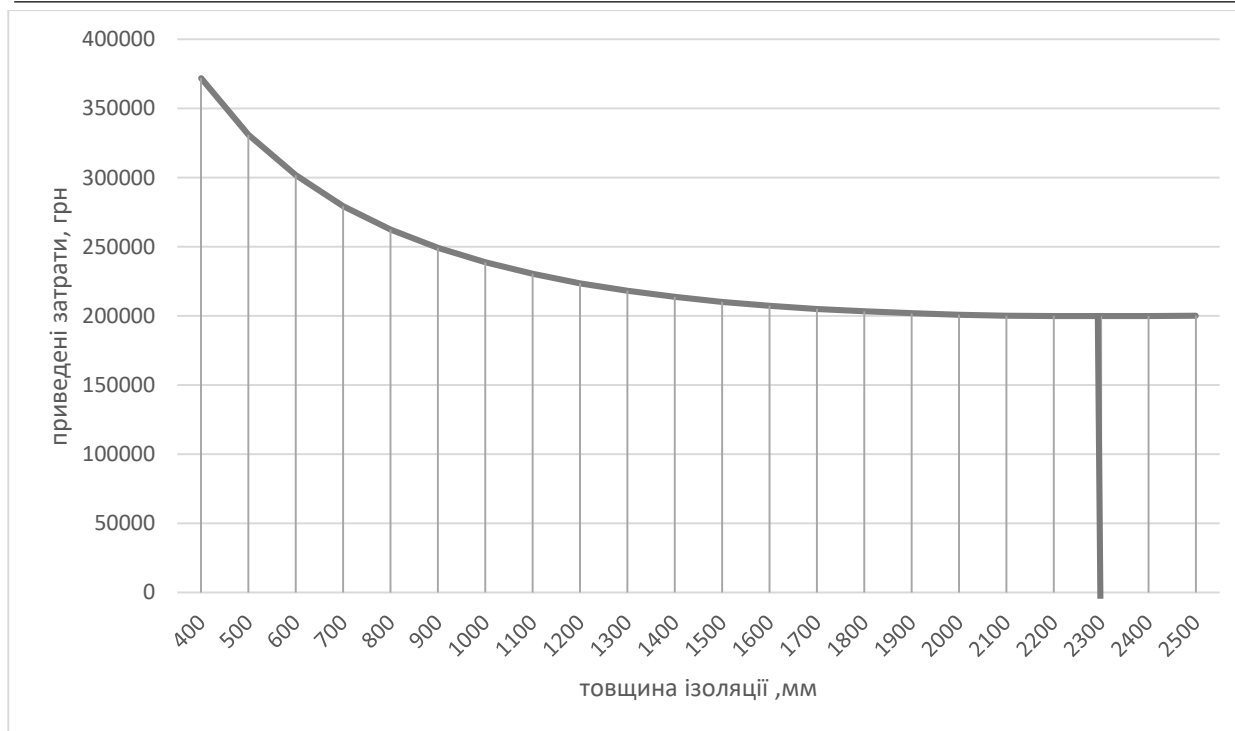


Рис. 2. Приведені затрати на теплову ізоляцію з урахуванням тепловтрат в ґрунт і в приміщення будинку зверху.

Необхідна площа сонячних колекторів визначається:

$$A = \frac{W_{річн} + W_{літ.}^{т.п.}}{W_{літ.}^{с.р.} \cdot \eta} = 62 \text{ м}^2 \quad (6)$$

Де, A – площа сонячних колекторів, м^2 ;

$W_{річн}$ – річна витрата теплоти на опалення +ГВП, кВт*год/рік (для даного розрахунку з [6]);

$W_{літ.}^{с.р.}$ – річне надходження сонячної радіації, кВт*год/рік (для даного розрахунку з [6]);

η – ККД сонячного колектору, для плоских колекторів дорівнює 0,6;

$W_{літ.}^{т.п.}$ – тепловтрати за літній період для даного розрахунку з [6], тепловтрати в неопалювальний період – $8,61 \text{ ГДж} = 2391,67 \text{ кВт*год}$.

З розрахунків в площа сонячних колекторів, необхідна на покриття потреб тепловтрат в літній період становить 10 м^2 . Тому сумарна площа сонячних колекторів буде дорівнювати 62 м^2 .

Об'єм сезонного баку-акумулятора визначається:

$$G = \frac{W_{ак}}{c \cdot (t_{зап} - t_{роз})}, \text{ кг}; \quad (7)$$

$$V = \frac{G}{\rho}, \text{ м}^3; \quad (8)$$

де, G - кількість теплоакумуючого матеріалу, кг;

$t_{\text{зар}}$ - температура теплоносія при зарядці баку, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{роз}}$ - температура теплоносія при розрядці баку, $^{\circ}\text{C}$;

c - питома теплоємність теплоакумуючого матеріалу, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$;

ρ - питома густина теплоакумуючого матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

За формулами 7 та 8 розраховуємо необхідний об'єм сезонного акумулятора теплоти, приймаючи кількість теплоти, яку необхідно закумуляовати, як суму $W_{a.k.}$ (46,33 ГДж) та тепловтрати сезонного акумулятора теплоти в ґрунт в опалювальний період (5,12 ГДж), в неопалювальний – 8,61 ГДж – 224,43 м³. Розміри сезонного акумулятора теплоти становлять 8,1х8,1х3,5 м.

Але є питання доцільності використання такого товстого шару теплової ізоляції в верхній частині сезонного акумулятора теплоти. Тому пропонуємо розглянути показники приведених затрат на теплову ізоляцію окремо з урахуванням тепловтрат в ґрунт в опалювальний період (рис. 3), оскільки тепловтрати в неопалювальний період компенсуються за рахунок додаткових площ сонячних колекторів.

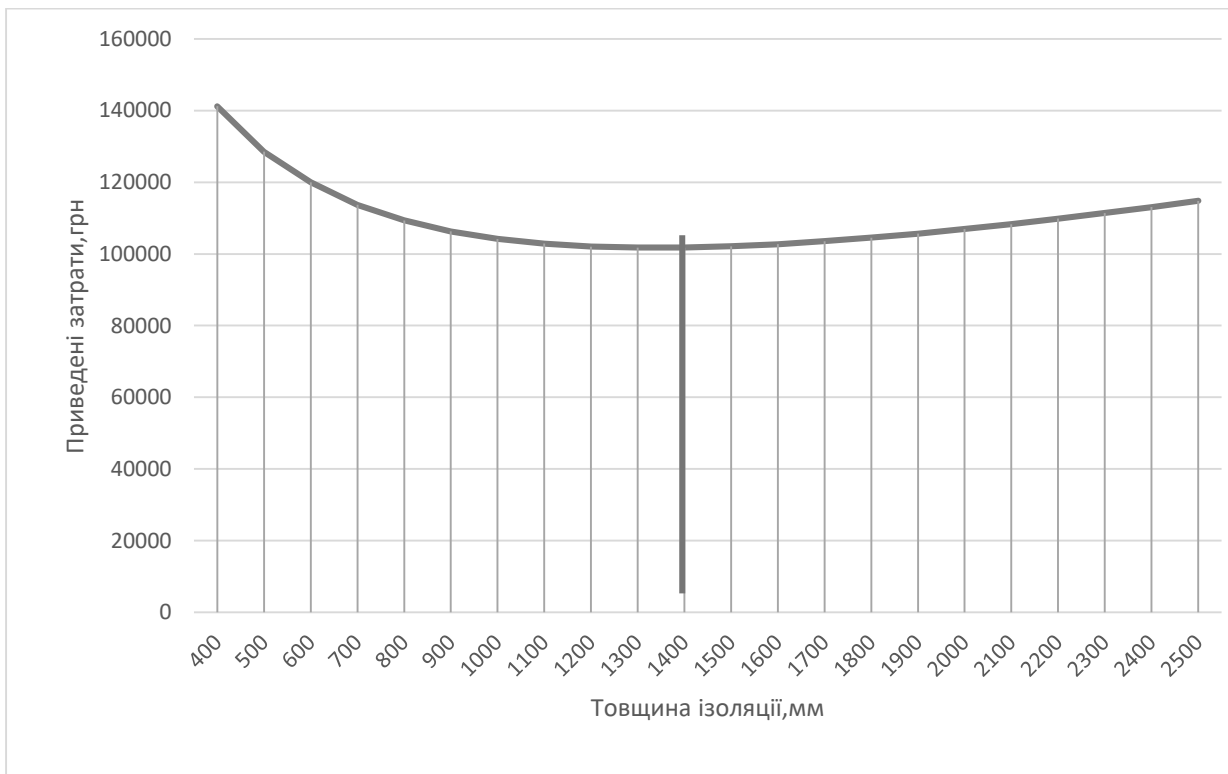


Рис. 3. Приведені затрати на теплову ізоляцію з урахуванням тепловтрат в ґрунт в опалювальний період.

При такому варіанті оптимальна товщина теплової ізоляції становить 1400мм, тепловтрати в неопалювальний період – 13,53 ГДж або 3758,33 кВт*год, а тепловтрати в ґрунт в опалювальний період – 7,96 ГДж. За

формулою 6 необхідна площа сонячних колекторів становить 57 м^2 , а сумарна площа сонячних колекторів, з урахуванням тепловтрат в літній період, – 73 м^2 . За формулами 7 та 8 б'єм сезонного акумулятора теплоти дорівнює $237,67 \text{ м}^3$, отже приймаємо розміри сезонного акумулятора теплоти $8,1 \times 8,1 \times 3,65 \text{ м}$.

При зменшенні товщини теплової ізоляції сезонного акумулятора теплоти з 2300 мм до 1400 мм необхідна сумарна площа сонячних колекторів збільшується на 16 м^2 , а розміри сезонного акумулятора теплоти – на 15 см в висоту.

Оскільки сезонний акумулятор теплоти розміщено під житловим будинком, необхідно розрахувати температуру на поверхні підлоги першого поверху і порівняти її з нормативно допустимим значенням. Температура на поверхні підлоги визначається за формулою 9.

$$t_{\text{п}} = t_{\text{та}}^{\text{с}} - q_{\text{в}} \cdot \sum_{i=1}^n R_i = t_{\text{та}}^{\text{с}} - q_{\text{в}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{\text{іп}}}, \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

де, $t_{\text{п}}$ – температура на поверхні підлоги, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{вн}}$ – температура внутрішнього повітря, $20 \text{ } ^{\circ}\text{C}$;

$q_{\text{в}}$ – тепловий потік, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Тепловий потік розраховується :

$$q_{\text{в}} = \frac{t_{\text{та}}^{\text{с}} - t_{\text{вн}}}{R_{\Sigma}}, \text{ } \text{Вт}/\text{м}^2 \quad (10)$$

Згідно формули 9 температура на поверхні підлоги першого поверху становить $20,28 \text{ } ^{\circ}\text{C}$, що не перевищує гранично допустимих значень.

Висновок: Розрахунок оптимальної товщини теплової ізоляції сезонного теплоакумулятора потрібно починати з визначення місця його розташування, щоб непродуктивні тепловтрати від теплоакумулятора можливо було використати. Оптимальна товщина теплової ізоляції теплоакумулятора залежить від вартості 1 ГДж закумуляованої в ньому теплоти. Зменшення непродуктивних тепловтрат веде до зменшення капітальних затрат на спорудження сезонного теплоакумулятора. В подальших дослідженнях планується визначити частку непродуктивних тепловтрат від теплоакумулятора, які впливають на тепловий баланс будівлі, що опалюється.

Бібліографічний список:

1. Б. Андерсон. Солнечная энергия (основы строительного проектирования)/ Пер. с англ. А.Р. Анисимова; Под ред. Ю.Н. Милевского – М.: Стройиздат, 1982. – 375 с.
2. Бекман Н.Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии./ Пер. с англ. В.Я. Сидорова, Е.В. Сидорова; Под ред. В.М. Бродянского. – М.: Мир, 1987. – 272 с.
3. Любарець О.П., Москвітіна А.С. Техніко-економічне обґрунтування використання теплоакumuлюючих матеріалів для систем міжсезонного сонячного теплопостачання/ Любарець О.П., Москвітіна А.С.//Вентиляція, освітлення та теплопостачання: Наук.-техн. збірник. Відпов. ред.Е.С.Малкін. – К., КНУБА, 2014. – Вип. 17. – С.115-119.
4. Любарець О.П., Москвітіна А.С. Аналіз конструкцій сезонних теплоакumuляторів для забезпечення систем гарячого водопостачання та опалення в котеджному будівництві/ Любарець О.П., Москвітіна А.С.//Вентиляція, освітлення та теплопостачання: Наук.-техн. збірник. Відпов. ред.Е.С.Малкін. – К., КНУБА, 2015. – Вип. 18. – С. 61-69.
5. Любарець О.П., Москвітіна А.С. Порівняння конструкцій теплових акumuляторів з твердим теплоакumuлюючим матеріалом та комбінованим теплоакumuлюючим матеріалом/ Любарець О.П., Москвітіна А.С.//Вентиляція, освітлення та теплопостачання: Наук.-техн. збірник. Відпов. ред.Е.С.Малкін. – К., КНУБА, 2016. – Вип. 19. – С. 101-111.
6. Любарець О.П., Москвітіна А.С. Вибір форми і розрахунок об'єму сезонного акumuлятора теплоти/ Любарець О.П., Москвітіна А.С.//Вентиляція, освітлення та теплопостачання: Наук.-техн. збірник. Відпов. ред.Е.С.Малкін. – К., КНУБА, 2016. – Вип. 20. – С. 24-38.

Москвитина А.С.,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

**РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ
СЕЗОННОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ.**

В статье описываются требования к системам с сезонными аккумуляторами теплоты. Зависимость непродуктивных теплопотерь сезонного аккумулятора теплоты от места его размещения. Зависимость толщины тепловой изоляции теплового аккумулятора от места его размещения. Влияние стоимости 1 ГДж теплоты, которая аккумулирована, на толщину тепловой

ізоляції. Приведен расчет оптимальной толщины тепловой изоляции сезонного теплового аккумулятора.

Ключевые слова: сезонное аккумулирование тепла, теплоемкостный аккумулятор теплоты, теплоаккумулирующий материал, стоимость аккумулятора теплоты, толщина тепловой изоляции аккумулятора теплоты.

Moskvitina Anna,
Department of hitting, ventilation, air condition and gas supply (HVAC),
Assistant Kyiv National University of Construction and Architecture

CALCULATION OF THE OPTIMUM THERMAL INSULATION THICKNESS OF A SEASONAL HEAT ACCUMULATOR.

The article describes the requirements for systems with seasonal heat accumulators. Dependence of unproductive heat loss of a seasonal heat accumulator from its location. Dependence of the thermal insulation thickness of the accumulator of heat from its location. The effect of the cost of 1 GJ of heat, which is accumulated, on the thickness of thermal insulation. The calculation of the optimum thermal insulation thickness of the seasonal heat accumulator is given.

Key words: seasonal heat accumulation, heat capacity accumulator of heat, heat-accumulating material, the cost of an accumulator of heat, thickness of thermal insulation of the heat accumulator.