

УДК 697.278

## Теплоакумулюючі матеріали в теплоакумулюючих електропечах: аналіз та практика використання

Е.С. Малкін<sup>1</sup>, О.В. Лисак<sup>2</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, saodhar@gmail.com

<sup>2</sup>аспірант, Київський національний університет будівництва і архітектури, oleg.v.lysak@gmail.com

*Проаналізовано практику використання матеріалів для акумуляції теплоти в теплоакумулюючих електропечах (ТАЕП). Розглянуто основні види теплоакумулюючих матеріалів та виконано порівняння їх теплофізичних характеристик. Надані рекомендації по оптимальному вибору теплоакумулюючих матеріалів на основі їх теплофізичних характеристик.*

*Ключові слова: акумуляційна система опалення; електрична акумуляційна система опалення; теплоакумулююча електропіч; теплонакопичувач.*

**Вступ.** Актуальною задачею сьогодення є раціональне використання енергетичних ресурсів. Однією з технологій, яка відіграє важливу роль у вирішенні даної задачі, є акумулювання енергії. Така технологія дозволяє більш повно використовувати потужність джерел енергії, що в свою чергу дозволяє заощаджувати кошти. Принцип роботи систем акумулювання наступний: надлишково вироблена енергія акумулюється (накопичується) з тим, аби бути використаною в години нестачі потужностей від основного джерела енергії. Застосування акумуляції сприяє вирівнюванню в часі завантаження джерела енергії, зменшує необхідну пікову генеруючу потужність за рахунок використання енергії, накопиченої в години непікового споживання, та поліпшує показники окупності джерел енергії з нерівномірною потужністю у часі – таких, наприклад, як сонячні та вітрові електростанції. Недоліком систем акумулювання є певні втрати енергії (наприклад, втрати теплової енергії в акумуляторі), проте економічний зиск від їх використання, як правило, перевищує наведений недолік.

Одним з різновидів акумуляційних систем є теплоакумулюючі електропечі (ТАЕП). Принцип роботи таких приладів наступний: електрична енергія перетворюється в теплову, яка накопичується в теплоакумулюючому матеріалі на протязі певного періоду доби (цей процес називається зарядкою), а тепловіддача відбувається на протязі всієї доби чи, інколи, частки доби (цей процес називається розрядкою) [1, с. 69].

В залежності від потужності та умов застосування ТАЕП поділяють на два типи [1, с. 70–72]: а) місцеві (кімнатні), які слугують для опалення приміщення, та б) центральні, які мають значно більшу потужність і забезпечують потреби у теплопостачанні як великих по площі окремих приміщень, так і цілих будівель.

Існує три основні типи місцевих ТАЕП: 1) нерегульовані [15, с. 19]; 2) статичні; 3) динамічні. Нерегульовані місцеві ТАЕП є найбільш простими: вони складаються з теплоакумулюючого матеріалу, в який вмонтовані електричні нагрівачі, а сама поверхня теплоакумулюючого матеріалу покрита

ізоляцією та має зовнішню оболонку [19, с. 189]. В статичних місцевих ТАЕП до принципової конструкції нерегульованих місцевих ТАЕП додають конвективні канали, що проходять через прилад, та регулюючі заслінки на виході з каналу для регулювання тепловіддачі від приладу. В динамічних місцевих ТАЕП для ще кращого регулювання додають до принципової конструкції статичних ТАЕП вентилятор та утворюють більшу складну систему конвективних каналів.

Центральні ТАЕП поділяються на два типи: повітряні та рідинні. Центральні повітряні ТАЕП мають принципову конструкцію, аналогічну динамічним місцевим ТАЕП, але є більшими за розміром. В центральних рідинних ТАЕП до аналогічної принципової конструкції повітряних центральних ТАЕП додається теплообмінник типу «рідина-повітря», в якому нагрівається рідинний теплоносії.

**Мета і задачі роботи.** Важливою складовою при створенні якісних ТАЕП є раціональний вибір теплоакумулюючого матеріалу. Метою даної роботи є огляд основних теплоакумулюючих матеріалів та визначення на основі теплофізичних характеристик найкращих матеріалів для акумуляції теплової енергії.

**Огляд матеріалів та умов їх застосування.** В якості теплоакумулюючого матеріалу ТАЕП прийнято застосовувати твердотільні матеріали. Застосування в ТАЕП матеріалів з фазовим переходом не набуло широкого вжитку, оскільки на даний момент вони характеризуються коротким терміном експлуатації [8, с. 66].

В табл. 1 наведені матеріали, які застосовують для акумуляції теплової енергії в ТАЕП. Їх умовно можна поділити на два типи: спеціально виготовлені та відходи виробництва. Останні представлені в табл. 1 магnezіохромітом з відходів футерування. Загалом, кожен теплоакумулюючий матеріал може бути як спеціально виготовленим, так і побічним продуктом виробництва. На практиці найбільшого розповсюдження набули спеціально виготовлені матеріали.

Використання деяких з наведених матеріалів посприяло вдале географічне розташування. Наприклад, вказане в табл. 1 талькове каміння [14, с. 170] не дуже розповсюджене у світі. Але в тих місцях, де присутні значні його поклади, як, наприклад, в Карелії, даний матеріал використовується в ТАЕП місцевих виробників. В той же час у інших виробників значне розповсюдження отримали прилади з використанням магnezиту та феоліту.

Потрібно зазначити, що в літературі трапляються випадки, коли при згадці теплоакумулюючого матеріалу не зазначають його характеристик. Саме тому у подальшому аналізі відсутні деякі з матеріалів, згадані в табл. 1.

Також автори часто наводять узагальнені назви матеріалів при вказівці їх характеристик. Наприклад в [3, табл. 14.1, с. 593], коли мова йде про різні теплоакумулюючі матеріали, згадано про бетон і наведено його характеристики, проте не вказано до якої саме марки бетону відносяться ці характеристики.

В табл. 2 надані значення наступних характеристик матеріалів: питомої масової теплоємності  $c$ , кДж/(кг·К), коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$ , Вт/(м·К), та густини  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>. На основі цих параметрів визначено значення температуропровідності матеріалу  $a$ , м<sup>2</sup>/с:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}. \quad (1)$$

Таблиця 1.

Матеріали, що застосовують для акумуляції теплоти в ТАЕП

Матеріал	Джерело
Бетон	[2, табл. 9, с. 96]; [3, табл. 14.1, с. 593]; [4, табл. 2, с. 15]; [8, табл. 1, с. 66]
Вогнетриви	[5, с. 50]; [6, с. 170-171]
Керамзит	[7, с. 53]
Магнезит	[2, табл. 9, с. 96]; [3, табл. 14.1, с. 593]; [4, табл. 2, с. 15]; [7, с. 54]; [8, табл. 1, с. 66]; [9, с. 66]; [10, с. 29]; [11, с. 74]; [12, с. 175-176]
Магнієохроміт з відходів футерування обертових печей випалювання цементного заводу	[13, с. 12]
Талькове каміння	[14, табл.2, с. 171]
Феоліт	[6, с. 170-171,173]
Чавун	[2, табл. 9, с. 96]; [3, табл. 14.1, с. 593]; [4, табл. 2, с. 15]; [6, рис. 8.8, с. 173]
Шамот	[2, табл. 9, с. 96]; [3, табл. 14.1, с. 593]; [4, табл. 2, с. 15]; [5, с. 50]

*Примітки:* в таблиці вказані лише ті матеріали, які застосовувались чи наводились в якості перспективних для застосування в ТАЕП. В літературі вказано чимало інших матеріалів для акумулювання теплової енергії в ТАЕП, які, однак, не набули широкого застосування.

Таблиця 2.

Порівняння теплоакуюлюючих матеріалів

Матеріал	Густина $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Питома масова теплоємність $c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	Теплопровідність $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	Питома об'ємна теплоємність $c\rho, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3\cdot\text{К}}$	Відносний об'єм $V'$	Відносна маса $m'$	Коефіцієнт акумуляції теплової енергії, $b, \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}^{0,5}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$	Температуропровідність $a \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Відносна кількість акумульованої теплової енергії $\chi_{\text{кл}}$
Чавун	7150	0,52	45	3718	1	1	12935	12,10	1
Талькове каміння (Юука)	2980	0,98	6,4	2920	1,27	0,53	4323	2,19	0,334
Талькове каміння (Турган-Койван-Аллуста)	2865	0,85	4,1	2435	1,53	0,61	3160	1,68	0,244
Магнезит	3000	0,95	2,25	2850	1,30	0,55	2532	0,79	0,196
Феоліт	3900	0,92	2,1	3588	1,04	0,57	2745	0,59	0,212
Шамот	2015	1,2	0,95	2418	1,54	0,43	1516	0,39	0,117
Бетон	1950	0,84	1,25	1638	2,27	0,62	1431	0,76	0,111

*Примітки:* 1. Значення  $\rho$ ,  $c$  та  $\lambda$  для талькового каміння наводяться в залежності від родовища (показано в дужках) згідно [14, табл. 2, с. 171], а для всіх інших наведених матеріалів – з [5, табл. 2.2, с. 52]. 2. Якщо у вказаних джерелах були наведені діапазони характеристик матеріалів, то в даній таблиці використовувались їх середні значення. 3. Відносний об'єм  $i$ -ого матеріалу визначено з рівняння (7)  $V'_i = (c\rho)_{\text{чавун}} / (c\rho)_i$ , тобто за одиницю відносного об'єму прийнято об'єм чавуну. 4. Відносна маса  $i$ -ого матеріалу визначена з рівняння (6)  $m'_i = V'_i (\rho / \rho_{\text{чавун}}) = c_{\text{чавун}} / c_i$ , тобто за одиницю відносної прийнята маса чавуну. 5. Коефіцієнт акумуляції теплової енергії  $b$  визначено по формулі (8). 6. Температуропровідність матеріалу  $a$  визначена по формулі (1). 7. Відносна кількість акумульованої теплової енергії  $i$ -ого матеріалу визначена з формули (14)  $\chi_{\text{кл}} = (b / b_{\text{чавун}})$ , тобто за одиницю відносної кількості акумульованої теплової енергії прийнято значення коефіцієнта акумуляції теплової енергії чавуну.

В табл. 2 показані узагальнені значення наведених характеристик. Це зроблено як з міркувань спрощення математичного аналізу, про що мова піде далі по тексту, так і через розбіжності в літературі між значеннями даних характеристик для одних і тих самих матеріалів.

При виборі теплоакумулюючого матеріалу одним з параметрів, на які орієнтуються виробники ТАЕП, є здатність витримувати високі температури розігріву. При цьому температура розігріву матеріалу не повинна перевищувати значення температури плавлення матеріалу чи температури, за якої можливе погіршення характеристик матеріалу.

Чим вищою є температура розігріву теплоакумулюючого матеріалу (тобто, чим більшим є діапазон нагрівання теплоакумулюючого матеріалу), тим більшою буде кількість акумульованої енергії на одиницю матеріалу, що дозволяє зменшити об'єм теплоакумулюючого приладу. Разом з тим високе значення температури теплоакумулюючого матеріалу вимагатиме як більш якісних електричних нагрівачів, так і теплової ізоляції, здатної витримувати високі температури.

В літературі є такі посилання на максимальні значення температури розігріву теплоакумулюючих матеріалів: згідно [7, с. 53] потрібно орієнтуватись на верхнє робоче значення температури в межах 600...800 °С, в [9, с. 66; 10, с. 29] – 650 °С, [11, с. 74] – 600...650 °С, [12, с. 175] – 600 °С. При цьому існують різноманітні дані по визначенню допустимого температурного діапазону застосування того чи іншого матеріалу: в [2, табл. 9, с. 96; 3, табл. 14.1, с. 593] наведено дані по робочому діапазону температур, за якого варто застосовувати матеріал; в [5, табл. 2.2, с. 52] наведена тільки максимальна допустима температура розігріву матеріалу; в [12, табл. 2.2, с. 58] представлена лише температура плавлення матеріалу.

Як правило, теплофізичні характеристики теплоакумулюючих матеріалів порівнюють переважно в двох аспектах: або по значенню питомої об'ємної теплоємності матеріалу  $c\rho$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К), як в [2, табл. 9, с. 96; 3, табл. 14.1, с. 593] або по значенню коефіцієнта акумуляції теплової енергії  $b$ , (Вт·с<sup>0.5</sup>)/(м<sup>2</sup>·К), як в [8, с. 66; 14, с. 172].

За першого підходу використовується рівняння для визначення кількості теплоти, яка була надана тілу чи відведена від нього,  $Q$ , кДж:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де  $m$  – маса матеріалу, кг;  $\Delta t$  – це перепад середніх значень температури матеріалу при його розігріві чи охолодженні, К. Оскільки маса визначається як:

$$m = \rho \cdot V, \quad (3)$$

де  $V$  – об'єм матеріалу, м<sup>3</sup>, то рівняння (2) з урахуванням (3) можна переписати у вигляді:

$$Q = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta t. \quad (4)$$

За однакового значення перепаду температури  $\Delta t$  та однакового об'єму матеріалу  $V$  кількість накопиченої теплоти у різних матеріалів буде відрізнятись лише в залежності від значення питомої об'ємної теплоємності  $c\rho$ . В табл. 2 наведені значення  $c\rho$  для матеріалів.

Також в табл. 2 виконано співставлення необхідних відносних мас  $m'$  та об'ємів  $V'$  за сталого перепаду температур  $\Delta t$  та однакової кількості накопиченої

теплоти  $Q$ . Ці розрахунки виконувались наступним чином. Кількість акумульованої різними матеріалами теплоти є однаковою і з урахуванням (2):

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow c_1 m_1 \Delta t_1 = c_2 m_2 \Delta t_2, \quad (5)$$

За однакового перепаду температури  $\Delta t_1 = \Delta t_2$  можливо визначити з формули (5) співвідношення мас як:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{c_2}{c_1} \quad (6)$$

Для порівняння об'ємів підставимо формулу (3) в формулу (6) і отримаємо співвідношення необхідних об'ємів матеріалів за однакової кількості накопиченої теплоти та однакового перепаду температур:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{c_2 \cdot \rho_2}{c_1 \cdot \rho_1} \quad (7)$$

В табл. 2 наведені значення відносних мас  $m'$  та об'ємів  $V'$  матеріалів для накопичення однакової кількості теплової енергії за однакового перепаду температур, які порівнювались з аналогічними значеннями для чавуну.

Найвищу питому об'ємну теплоємність  $c \cdot \rho$  серед матеріалів в табл. 2 має чавун. Однак, об'ємна теплоємність  $c \cdot \rho$  є не єдиним фактором, на який необхідно звертати увагу при підборі матеріалу. В [4, с. 14–15] серед причин використання магнезиту замість чавуну вказувалось, що за однакової кількості акумульованої теплової енергії необхідний об'єм магнезиту хоча й буде дещо більшим за необхідний об'єм чавуну, проте акумуляційний блок з магнезиту буде важити значно менше. Зменшення ваги теплоакумулюючого матеріалу знизить витрати на транспортування та полегшить монтаж приладу.

За другого підходу для порівняння матеріалів використовують коефіцієнт акумуляції теплової енергії  $b$ , який характеризує здатність матеріалу акумулювати теплоту та віддавати її при охолодженні. Цей параметр визначають згідно формули як в [14, с. 172; 17, с. 80; 18, с. 21]:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \quad (8)$$

чи [8, табл.1, с. 66]:

$$b = 0,27 \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \quad (8a)$$

Для розрахунків в даній роботі використана формула (8). Обчислені значення параметру  $b$  наведені в табл. 2.

**Математичне моделювання прогрівання теплоакумулюючого матеріалу у часі.** В даному огляді виконаний спрощений аналіз розподілення температури в теплоакумулюючому матеріалі. За умовами аналізу вважається, що теплофізичні характеристики матеріалу (густина  $\rho$ , питома масова теплоємність  $c$ , теплопровідність  $\lambda$ ) є постійними. Значення густини для згаданих вище твердих тіл під час нагрівання практично не змінюється. В той же час значення коефіцієнта теплопровідності та питомої масової теплоємності обраних матеріалів значно коливаються в діапазоні нагрівання теплоакумулюючого матеріалу в ТАЕП, верхнє значення якого складає 600...800 °С. Таким чином, подальші розрахунки є наближеними. Математичне моделювання буде виконано згідно готових рішень, представлених в [16].

Першим буде проаналізовано розподілення температури в напівобмеженому тілі за граничних умов першого роду. Це обумовлено тим, що коефіцієнт акумуляції теплової енергії  $b$  визначено за даних умов. За такого підходу тепловий потік, що підводиться до матеріалу, змінюється у часі. Температура поверхні напівобмеженого тіла прийнята  $t_n = 600$  °С, що відповідає наведеному в літературі значенню розігріву матеріалу. Початкову температуру напівобмеженого тіла приймаємо  $t_0 = 20$  °С. Час нагрівання приймаємо  $\tau = 7$  год, що відповідає тривалості періоду дії дешевого тарифу на електричну енергію за тризонного тарифу для всіх категорій споживачів, окрім населення<sup>1</sup>. Аналіз розподілення температури виконаємо на глибину (на відстань від поверхні нагрівання) 2 м. Розв'язок базується на рішенні задачі № 1 з [16, с. 166].

Значення температури на відстані  $x$  визначаємо з рівняння:

$$t_x = t_n + \theta (t_0 - t_n) \quad (9)$$

де  $\theta$  – параметр температури:

$$\theta = 1 - \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2\sqrt{\operatorname{Fo}_x}} \right) \quad (10)$$

де  $\operatorname{Fo}_x$  – критерій Фур'є:

$$\operatorname{Fo}_x = \frac{a \cdot \tau}{x^2} \quad (11)$$

Результати проведених розрахунків показані на рис. 1.

Кількість теплоти, яка була акумульована напівобмеженим тілом на одиницю площі,  $q_\infty$ , Вт/м<sup>2</sup>, можна визначити згідно з [16, с. 167]

$$q_\infty = 2\sqrt{\frac{\lambda \cdot c \cdot \rho}{\pi}} (t_n - t_0) (\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_1}) \quad (12)$$

де  $\tau_1, \tau_2$  – час, відповідно, на початку, та закінченні нагрівання, с.

З підстановкою означення коефіцієнта акумуляції теплової енергії  $b$  з формули (8) рівняння (12) приймає вигляд:

$$q_\infty = \frac{2b}{\sqrt{\pi}} (t_n - t_0) (\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_1}) \quad (13)$$

Оскільки за розглянутих умов значення температур та проміжки часу для всіх матеріалів є однаковими, то значення акумульованої матеріалом теплоти будуть відрізнятися лише в залежності від значення параметру  $b$ . В табл. 2 для порівняння кількості теплової енергії, яка може бути акумульована різними матеріалами, використано відношення значень параметру  $b$  матеріалу по відношенню до найвищого показника  $b$  серед наведених матеріалів, в даному випадку – чавуну:

$$\chi_{\infty i} = \frac{b_i}{b_{\text{чавун}}} \quad (14)$$

<sup>1</sup>Згідно постанови НКРЕ №1262 від 04.11.2009.

Графіки, показані на рис. 1, демонструють, що чавун має найкращі характеристики прогріву, проміжне положення займає талькове каміння, а всі інші матеріали нагріваються більш повільно. Також, згідно значень відносної кількості акумульованої теплової енергії  $\chi_\infty$  в табл. 2, найбільшу кількість теплоти буде накопичувати чавун, а всі інші матеріали за наведених умов мають значно гірші показники по кількості акумульованої теплової енергії.

Аналіз результатів математичних розрахунків приводить до наступних висновків. При побудові ТАЕП значних розмірів є сенс використовувати чавун. Це дозволить заощадити на об'ємі теплоакумулюючого матеріалу і на об'ємі, який займатимуть в ТАЕП конвективні канали, канали для прокладання електричних нагрівачів; знадобиться менша кількість теплової ізоляції (буде меншою площа поверхні акумулятора).

Розглянемо нагрівання необмеженої пластини товщиною  $h = 100$  мм. Дана величина відповідає типовому значенню відстані від електричних нагрівачів до найбільш віддалених частин теплоакумулюючого прошарку в місцевих (кімнатних) ТАЕП. Розігрів даної пластини розглянемо за двох умов.

За першої умови температура на поверхні нагріву  $t_n$ , температура матеріалу  $t_0$  та час нагрівання  $\tau$  приймаємо такими, як для попереднього аналізу розподілення температури в напівобмеженому тілі. Розв'язок базується на рішенні задачі № 16 з [16, с. 197]. Значення температури на відстані  $x$  визначаємо з рівняння, аналогічного (9), але в якому параметр  $\theta$  визначається з формули:

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos[\mu_n(1-\eta)] \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (15)$$

де

$$\mu_n = (2n-1) \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

$$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n} \quad (17)$$

$$\eta = \frac{x}{h} \quad (18)$$

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{h^2} \quad (19)$$

В результаті математичних розрахунків, результати яких показані на рис. 2, встановлено що розподілення температур за умови накопичення теплоти на протязі 7 годин не мають такого значного коливання як для випадку напівобмеженого тіла. При цьому найшвидше розігрівается чавун. Вже за першу годину за прийнятих в задачі умов температура даного матеріалу практично дорівнює температурі стінки. Також досить швидко розігрівается талькове каміння.

В другому випадку проаналізуємо розподілення температури в необмеженій пластині за умови, що початкова температура тіла є однаковою  $t_0 = 20$  °С, а середня температура пластини за час нагрівання  $\tau = 7$  год повинна досягти значення  $t_{\text{ср}} = 600$  °С за постійного теплового потоку з однієї поверхні і відсутнього теплового потоку на іншій поверхні. Дані умови відображають

найбільш характерний тип зарядки ТАЕП – за постійного підведення теплоти. Розв’язок базується на рішенні задачі № 22 з [16, с. 209].

Визначимо питому кількість теплоти на одиницю площі  $q_s$ , кВт/м<sup>2</sup>, яка повинна бути підведена до необмеженої пластини для того, аби на протязі заданого часу її середня температура досягла необхідного значення:

$$q_s = (t_{сер} - t_0) \cdot c \cdot \rho \cdot h \cdot \frac{1}{\tau} \quad (20)$$

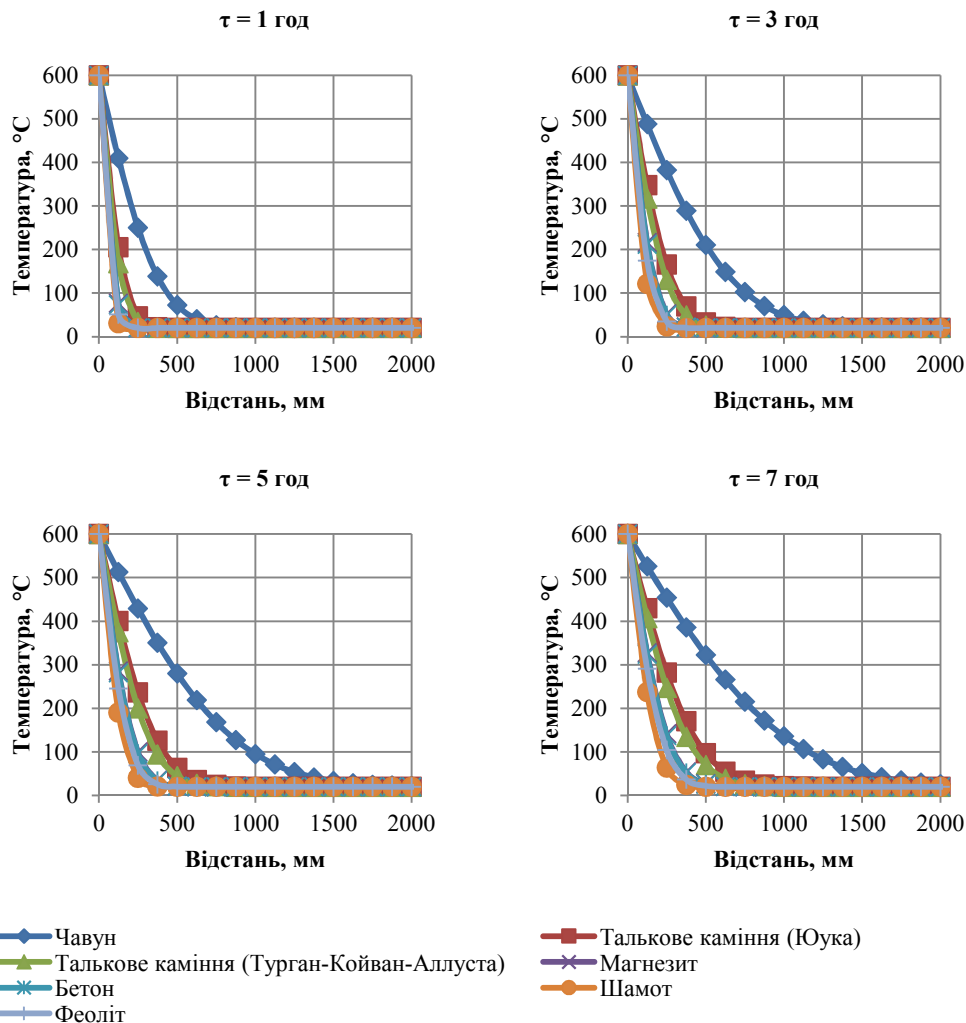


Рис.1. Розподілення температури в напівобмежених тілах з різних теплоакуюлюючих матеріалів за певного часу акумуляції теплової енергії та постійної температури на поверхні нагрівання

Значимо, що для кожного матеріалу визначається власне значення  $q_s$ , оскільки значення питомої об’ємної теплоємності  $c \cdot \rho$  у кожного матеріалу своє.



Задачею даного моделювання є оцінка рівномірності розігрівання матеріалу до заданого значення середньої температури за постійного теплового потоку.

Значення температури на відстані  $x$  визначаємо з рівняння:

$$t_x = t_0 + \theta \frac{q_s \cdot h}{\lambda}, \quad (21)$$

де параметр  $\theta$  визначається з формули:

$$\theta = Fo - \eta + \frac{\eta^2}{2} + \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos[\mu_n(1-\eta)] \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (22)$$

$$\mu_n = \pi \cdot n \quad (23)$$

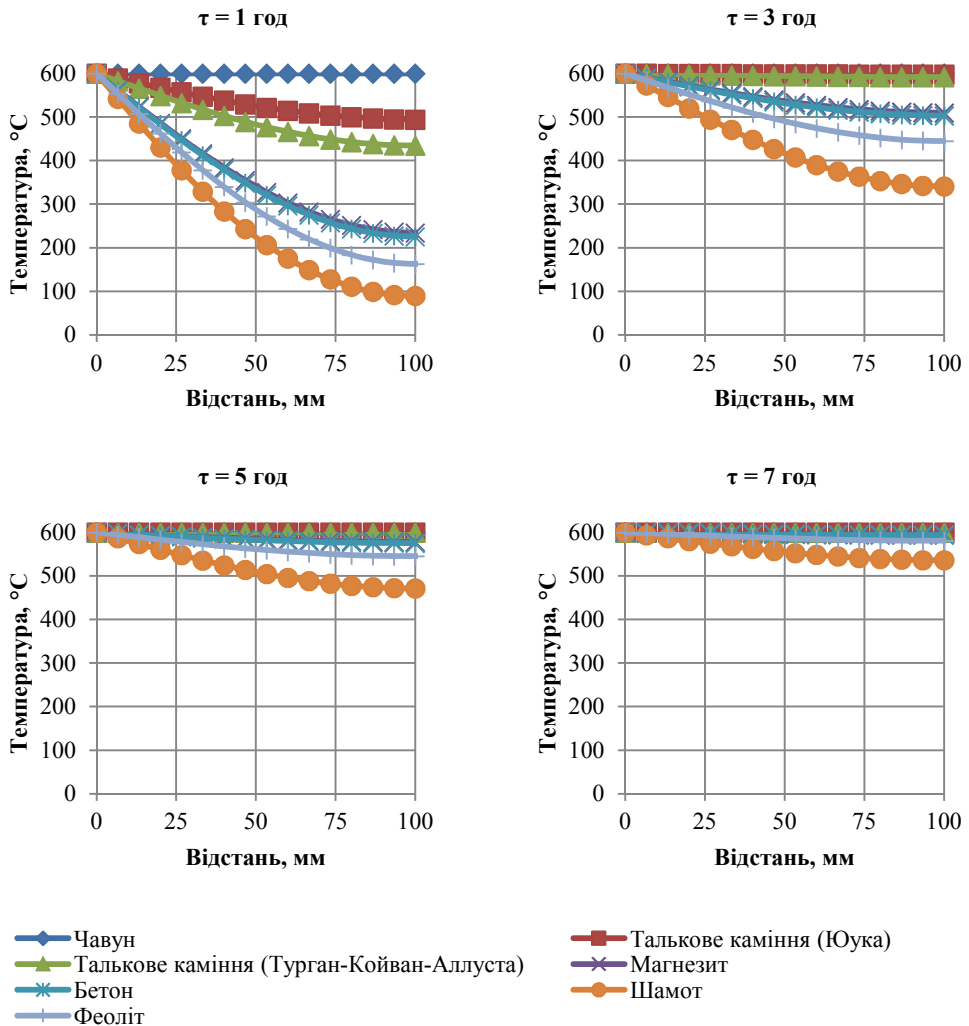


Рис.2. Розподілення температури в необмежених пластинах з різних теплоакумулюючих матеріалів за певного часу акумуляції теплової енергії та постійної температури на поверхні нагрівання

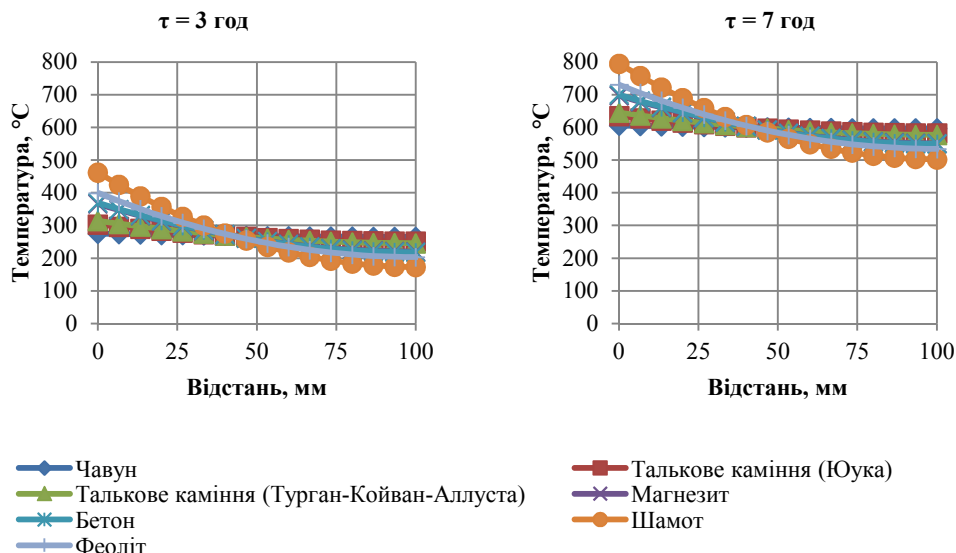


Рис.3. Розподілення температури в необмежених пластинах з різних теплоакумулюючих матеріалів за певного часу акумуляції теплової енергії та постійного теплового потоку на поверхні нагрівання

$$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2} \quad (24)$$

а параметри  $\eta$  та  $F_0$  визначаються відповідно по формулам (18) та (19).

Результати розрахунків показані на рис. 3. Найбільш рівномірно розігрівається чавун, найменш рівномірно – шамот. Тобто матеріали зі значним показником температуропровідності забезпечують набагато більш рівномірний у часі розігрів матеріалу. За умови застосування таких матеріалів зменшується необхідна температура розігріву електричних нагрівачів для забезпечення заданого теплового потоку. За рахунок цього можливо використати дешевші електричні нагрівачі.

Окрім теплофізичних характеристик на вибір теплоакумулюючого матеріалу впливають й інші фактори, як, наприклад, відповідність матеріалу санітарно-гігієнічним вимогам та низька вартість. Так, чавун має значну вартість і через це застосовують матеріали, які хоч і мають гірші теплофізичні характеристики, але є значно дешевшими.

**Висновок.** Отримані дані мали на меті продемонструвати особливості вибору оптимального теплоакумулюючого матеріалу ТАЕП в залежності від теплофізичних характеристик (питомої теплоємності, густини, теплопровідності, здатності витримувати високі температури) та конструктивного виконання ТАЕП (місцеві чи центральні). При розгляді місцевих ТАЕП можливо порівнювати теплоаккумулюючі матеріали лише за значенням питомої об'ємної теплоємності, оскільки за рахунок невеликих розмірів більшість з наведених теплоакумулюючих матеріалів можливо розігріти рівномірно. В той же час при застосуванні матеріалів з низьким значенням температуропровідності та значною

відстанню від поверхні нагріву до найбільш віддалених частин теплоакмулюючого матеріалу відбувається нерівномірний розігрів. Тому бажано при виборі теплоакмулюючого матеріалу для ТАЕП великих розмірів враховувати значення температуропровідності матеріалу. Також при виборі матеріалу слід керуватись не тільки його здатністю акумулювати значну кількість теплової енергії на одиницю об'єму, але і його масою. Легший матеріал дозволить знизити вартість транспортування та монтажу.

### Література

1. Малкін Е. С. Теплоакмулюючі електропечі. Термінологія і класифікація / Е. С. Малкін, Лисак О. В. // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2014. – № 3. – С. 69–74.
2. Кривошеин И. А. Бытовые электронагревательные приборы и установки : монография / И. А. Кривошеин. – М. : Изд-во МКХ РСФСР, 1963. – 184 с.
3. Богословский В. Н. Отопление : учебник для вузов / В. Н. Богословский, А. Н. Сканава. – М. : Стройиздат, 1991. – 735 с.
4. Третьякова Л. Д. Ефективні засоби електротеплоакмуляційного обігріву / Л. Д. Третьякова, А. Є. Селіверстов, М. Баран // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2006. – № 4 – С. 14–16.
5. Левенберг В. Д. Аккумуляирование тепла : производственно-практическое издание / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – Киев : Тэхника, 1991. – 112 с.
6. Oughton D. R. Faber & Kell's Heating and Air-Conditioning of Buildings // D. R. Oughton, S. L. Hodkinson. – Amsterdam ; London : Butterworth-Heinemann, 2008. – XIX, 786 p. – ISBN 978-0-75-068365-4.
7. Лазебник О. М. Досвід впровадження електротеплопостачання на базі електроакмуляційних технологій на Житомирщині // Нова Тема. – 2009. – № 2. – С. 53–54.
8. Розинський Д. Й. Теплоакмулюючі електропечі для об'єктів цивільного призначення / Д. Й. Розинський, М. П. Тимченко // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2011 – № 3. – С. 65–70.
9. Речицкий В. И. Кручёная подача–2 // Наука и жизнь. – 2008. – №. 4. – С. 64–68.
10. Симонов А. А. Бытовое электрическое отопление с аккумулярованием тепла – важнейший фактор эффективного использования электроэнергии // Энергетика и электрификация. – 1992 – № 1. – С. 26–30.
11. Ливчак И. Ф. Квартирное отопление : монография / И. Ф. Ливчак. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М. : Стройиздат, 1982. – 240 с.
12. Бекман Г. Тепловое аккумулярование энергии / Г. Бекман, П. Гилли; [пер. с англ.: В. Я. Сидорова. Е. В. Сидорова] ; [под. ред. В. М. Бродянского] – М. : Мир, 1987. – 272 с.
13. Гиллос А. Ю. Перспективы использования электротеплоаккумуляционного отопления в Литовской ССР // Водоснабжение и санитарная техника. – 1985. – № 7. – С. 12.
14. Шеков В. А. Тальковый камень: его свойства и пути использования / В. А. Шеков, О. В. Мясникова, А. А. Иванов // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы : [сборник научных статей по материалам IV Российского семинара по технологической минералогии] – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2010. – С. 170–174.
15. Богословский В. Н. Электротеплоаккумуляционная система отопления сельского дома / В. Н. Богословский, Е. Г. Малявина, А. Ю. Гиллос // Водоснабжение и санитарная техника. – 1985. – № 3. – С. 19–20.
16. Пехович А. И. Расчеты теплового режима твёрдых тел / А. И. Пехович,

В. М. Жидких. – 2-е изд, перераб. и доп. – Л. : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1976 – 351 с.

17. Лыков А. В. Теория теплопроводности : учебное пособие / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967 – 600 с.

18. Кашеев И. Д. Свойства и применение огнеупоров : справочное издание / И. Д. Кашеев. – М. : Теплотехник, 2004 – 352 с.

19. Малкин Е. С. Шляхи удосконалення роботи місцевих теплоакumuлюючих електропечей / Е. С. Малкин, О. В. Лысак // Энергоэффективность в будівництві та архітектурі : наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – К. : КНУБА, 2014. – Вип. 6. – С. 188–191.

## **Теплоаккумулирующие материалы в теплоаккумулирующих электропечах: анализ и практика использования**

Малкин Э.С., Лысак О.В.

*Проанализирована практика использования материалов для аккумуляции теплоты в теплоаккумулирующих электропечах (ТАЭП). Рассмотрены основные виды теплоаккумулирующих материалов и выполнено сравнение их теплофизических характеристик. Представлены рекомендации по оптимальному выбору теплоаккумулирующих материалов на основе их теплофизических характеристик.*

*Ключевые слова: аккумуляционная система отопления; электрическая аккумуляционная система отопления; теплоаккумулирующая электропечь; теплонакопитель.*

## **Storage materials in storage heaters: analysis and practice of use**

E. Malkin, O. Lysak

*The practice of the use of the storage materials in storage heaters is analyzed. The main materials are considered and the comparison of their thermophysical characteristics is made. The recommendations for optimum storage material selection based on thermophysical characteristics of materials are shown.*

*Keywords: storage heating system; electric storage heating system; storage heater.*

Надійшла до редакції 24.06.2014 р.