

**ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.643.053

**Перспективи розвитку технологій накопичення низькопотенційного тепла газових (повітряних) потоків***І. Л. Бошкова*<sup>1✉</sup>, *Е. І. Альтман*<sup>2</sup>, *І. І. Мукмінов*<sup>3</sup>, *І. О. Писаревський*<sup>4</sup><sup>1-4</sup>Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: <sup>1</sup>boshkova.irina@gmail.comORCID: <sup>1</sup><http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; <sup>2</sup><http://orcid.org/0000-0002-3674-9289>;<sup>3</sup><http://orcid.org/0000-0002-8257-5769>; <sup>4</sup><http://orcid.org/0009-0007-3920-9601>

Наведений аналітичний огляд наукових праць, присвячених дослідженню технологій накопичення енергії від низькопотенційних теплових потоків. Актуальність вивчення методів та методології акумулювання та утилізації теплоти газового (повітряного) середовища пов'язана з тим, що накопичення теплової енергії дає найкращу можливість збалансувати попит та пропозицію за рахунок подолання переривчастості і нестабільності реальних джерел тепла, що призводить до створення більш універсальної, стійкої та надійної системи теплопостачання або термостабілізації. Наголошується, що технології накопичення енергії (ТНЕ) набувають ключового значення у енергобалансі країни. Наведений аналіз акумуляторів теплоти за властивостями теплоакуючих матеріалів. Матеріал акумулятора емкисного типу нагрівається (охолоджується) без зміни свого агрегатного стану, простота створення акумуляторів та теплоутилізаторів на їх основі дозволила на даний час розробити теплоакуютори зі скельних порід, гравійно-водні схеми, запропонувати пісочні батареї для накопичення теплової енергії. Стверджується, що доцільність використання теплоутилізаторів з низькими температурними напорами може бути підвищена шляхом використання теплоносієм гранульованої насадки. Наведені загальні відомості щодо акумуляторів, які засновані на фазових переходах. Визначені експериментальні залежності для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі в процесі перенесення тепла та маси при теплообміні в щільних шарах. Наведені математичні моделі процесів перенесення теплоти і маси в щільному шарі гранульованого матеріалу, які є найближчими до предмета дослідження. Аналізуються теплові процеси, що відбуваються під час проходження повітря крізь шар акумулятора. Аналізуються основні характеристики матеріалів та речовин для створення акумуляторів тепла.

**Ключові слова:** Акумулятори; Теплоутилізатори; Гранульовані матеріали; Щільні шари; Теплообмін; Типи матеріалів

**doi:** <https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2898>

© The Author(s) 2024. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>**1. Вступ**

Акумуляція енергії сьогодні важливіша, ніж будь-коли. Процес накопичення енергії відіграє ключову роль в зберіганні електричної та теплової енергії з відновлюваних джерел — вітру, сонця і хвиль, забезпечуючи декарбонізацію електроенергетичного сектору [1]. Згідно зі статистичним ог-

лядом World Energy & Climate Statistic [2], близько 80 % світового споживання енергії залежить в першу чергу від невідновлюваних джерел енергії (нафта 29 %, вугілля 27 % та природний газ 24 %), а інша частина – від відновлюваних джерел (10 % – використання біомаси, 10 % – сонячна енергетика). Технологія накопичення теплової енергії дає найкращу можливість збалансувати попит та

пропозицію за рахунок подолання преривчастості і нестабільності реальних джерел тепла, що призводить до створення більш універсальної, стійкої та надійної системи теплової енергії. Розвивається технологія ізотермічного зберігання тепла в матеріалі, відома як приховане зберігання. В цьому методі зберігання часто використовують лід, що плавиться, парафін, жирні кислоти та сіль. Використовуються технології, засновані на зберіганні тепла за рахунок теплоємності доступних матеріалів, зокрема твердих порід чи каміння. Використання низькопотенційного тепла має значний енергетичний потенціал, внаслідок чого перетворення (утилізація) теплової енергії в корисну є важливим практичним завданням.

## 2. Вивчення технологій накопичення теплової енергії

Нині стрімко зростає інтерес до розвитку технологій зберігання енергії.

Передбачається, що рівень ємності акумульованої енергії може бути збільшений на 15-25% найближчим часом в розвинених країнах, також цей показник може бути збільшений у країнах, що розвиваються [3]. Основні проблеми енергозбереження при задоволенні попиту на енергію пов'язані з розробкою енергоефективних технологій для забезпечення енергетичної безпеки та скорочення викидів у навколишнє середовище. У спектрі енергоефективних технологій системи зберігання теплової енергії пропонують реалізувати значний потенціал для подолання невідповідності між енергопостачанням та попитом на енергію. Загальні експлуатаційні характеристики систем зберігання тепла залежать від якості вмісту енергії та ефектів деградації енергії, що проявляються під час циклічних процесів зарядки і розрядки. В [4] наводяться результати аналізу основних технологій накопичення енергії, рисунок 1, у перспективних інтелектуальних (на основі Smart Grid) системах енергозабезпечення. Наголошується, що технології накопичення енергії (ТНЕ) набувають ключового значення при скільки-небудь помітних частках ВЕС, СЕС у енергобалансі країни. Наявні технології накопичення енергії розділено на три групи за ємністю та часом реакції: швидкодіючі з тривалістю живлення від часток секунди до кількох десятків хвилин, а також ті, що беруть участь у більш тривалих добових та сезонних циклах енергозабезпечення

[4]. Акумулятори тепла можна класифікувати за властивостями теплоакумулюючих матеріалів. Це акумулятори ємкісного типу, що використовують теплоємність акумулюючого матеріалу. Матеріал цього акумулятора нагрівається (охолоджується) без зміни свого агрегатного стану [6]. Існують також акумулятори з фазовим переходом речовини. В таких акумуляторах використовується тепло плавлення (затвердіння) речовини [7, 8]. В огляді [4] представлений критичний аналіз досягнень в царині систем накопичення енергії з 1850 по 2022 рік, включаючи їх еволюцію, класифікацію та принципи роботи. Дослідження зосереджені, в основному, на системах зберігання електроенергії, практично без аналізу систем зберігання теплової чи хімічної енергії.

## 3. Акумулятори для теплових технологій накопичення енергії

### 3.1. Акумулятори ємкісного типу – загальні відомості

Матеріал акумулятора ємкісного типу нагрівається (охолоджується) без зміни свого агрегатного стану [5]. В якості теплоакумулюючих матеріалів можуть бути використані бетон, камінь, вода, цегла, інші матеріали та їх комбінації [10]. Можуть використовуватись і окремі предмети (наприклад, ємності з водою, каміння та інші предмети, що здатні акумулювати тепло) [11].

Щільні гранульовані потоки потенційно можуть працювати в якості теплоносія. В [12] представлений короткий огляд щільних гранул та їх властивостей теплопередачі, включаючи основні поняття теплопередачі, теплову поведінку цих матеріалів та фактори, що впливають на цю поведінку. Стадії теплообміну в шарі гранульованого матеріалу аналізуються в [13]. Салліван та Саберські прийняли критерії теплопередачі рідини, такі як числа Пекле и Нуссельта, що мають відношення до цього процесу. Аналітичні залежності для розподілу температури отримані з принципів складання теплового балансу при теплопередачі [14]. Приклад акумулятора ємкісного типу представлений на рисунку 1.

Тут резервуар для зберігання складається з сипучих кам'яних матеріалів, які розташовані у вигляді шару. Під час циклу зарядки гаряче повітря з сонячного колектору надходить у верхню частину бака-акумулятора і передає

теплову енергію щільному шару кам'яних часток. Під час циклу розрядки акумульована теплова енергія витрачається на обігрів приміщення, а

залишкове холодне повітря направляється назад в сонячний повітряний колектор, котрий потім використовується для наступного циклу зарядки.

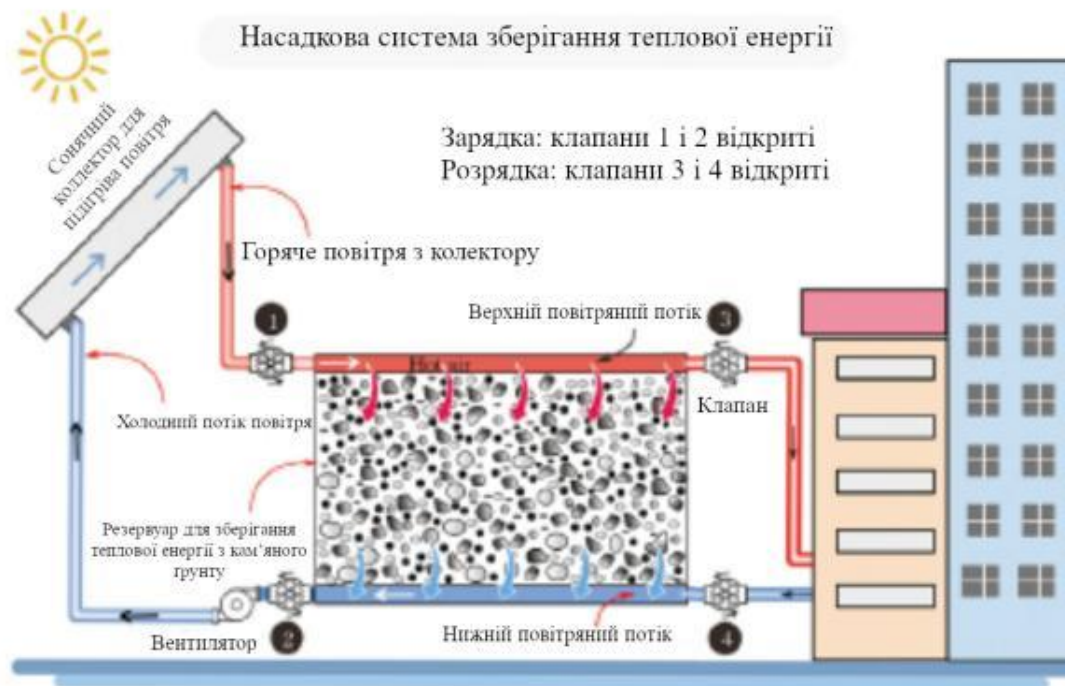


Рисунок 1 – Принципова схема акумуляційної теплової енергії з насадкою

### 3.2. Акумуляція теплової енергії в скельних породах

Перевага Thermal Energy Storage (TES) в скельних кавернах полягає у виключно високому рівні інжекції та швидкості вилучення, тоді як недоліком є їх надзвичайно висока вартість будівництва [15, 16]. Однак реконструкція існуючих печер та шахт може зробити їх економічно життєздатними. В світі дуже мало прикладів систем TES в скельних печерах. Однак декілька дослідників провели численні експериментальні дослідження печерних TES. На початку 1980-х у Швеції були побудовані перші дві печерні TES. Система TES в печері Avesta з ємністю  $1,5 \cdot 10^4$  м<sup>3</sup> була побудована в 1981 році для зберігання тепла від сміттєспалювального заводу впродовж обмеженого часу [9]. Система Lyskebo TES з об'ємом зберігання  $1,15 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup> та максимальною температурою 90 °С експлуатується з 1983 р. [9, 17]. Є декілька інших випадків систем кавернозних TES, побудованих та експлуатованих в якості теплових сховищ для централізованого теплопостачання [18, 19].

Згідно зі схемою, яка представлена на рис. 2, суміш гравію і води поміщається в підземний резервуар для зберігання, теплообмін відбувається

трубопроводами, прокладеними в різних шарах всередині бака. Надмірне тепло від сонячного випромінювання використовується для нагрівання води під час циклу зарядки, після чого гаряча вода прокачується трубопроводами. Труби передають теплову енергію від гарячої води до суміші гравію та води усередині резервуару для зберігання. Тепло від суміші гравій-вода видаляється під час циклу розрядки, пропускаючи холодну воду через трубопроводи.

Гравійно-водяна TES є підземною системою зберігання тепла. Тут замість спорудження величезного та дорогого резервуару для гарячої води використовується викопаний котлован, заглиблений у землю ближче до поверхні землі в межах 5-15 м [19]. Яма-сховище зазвичай водонепроникна і утеплена з боків та зверху. Ізоляція також передбачена на дні сховища, залежно від його форми та розміру. Середовище зберігання зазвичай є сумішшю гравію і води, хоча це також може бути пісок і вода, або ґрунти і вода. Залежно від ізоляційного матеріалу максимальна температура може досягати 90 °С. Зарядка і відведення тепла в сховище і з нього здійснюється шляхом прямого водообміну, або через пластикові труби, встановлені на різних рівнях всередині сховища.

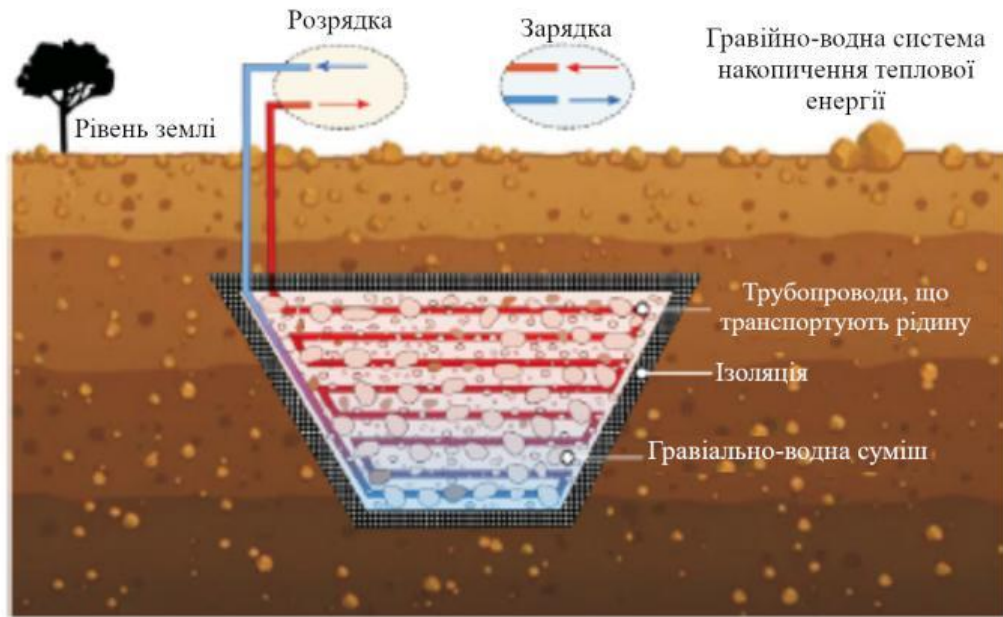


Рисунок 2 – Принципова схема гравійно-водної системи для зберігання теплової енергії [9]

В огляді [16] повідомляється про сучасний стан цих ТЕС та пропонуються перспективи на майбутнє, на основі 31 місця розташування в Європі із загальним доступним об'ємом зберігання майже  $800000 \text{ м}^3$ , що відповідає потужності  $56600 \text{ МВтч}$  у разі оптимізованого використання сховища.

### 3.3. Акумулятори теплоти, що використовують теплоємність ґрунту

Чимало досліджень присвячено акумулюванню теплової енергії у ґрунті, серед яких слід виділити роботи [20, 21]. Серед цих публікацій слід відзначити дослідження, виконані [22]. Зроблено висновок, що напів-ізольоване ґрунтове середовище може накопичувати значне кількість тепла протягом повторюваних циклів нагрівання. У роботі [23] показано, що тепличний ґрунт є важливим джерелом тепла в нічний час і може забезпечити приблизно  $44,03 \text{ Вт/м}^2$ . У порівнянні з системою штучного опалення, яка потребує приблизно  $78 \text{ Вт/м}^2$ , таке джерело тепла буде достатнім для підтримки температури повітря в теплиці між  $15$  і  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Порівняльне дослідження дозволяє зробити наступні висновки: тверді матеріали, що акумулюють відчутне тепло, такі як камінь, мрамур, галька, гравій, ґрунт і глина, хімічно інертні, дешеві і доступні, деякі з них мають великий потенціал акумулювання тепла, але їх недоліки полягають у тому, що продування шару повітрям викликає великий перепад тиску і сам акумулятор займає більший об'єм для зберігання.

Акумулятори теплоти, що використовують теплоємність ґрунту (глина, гальково-піщана суміш), представляють собою системи горизонтальних або вертикальних каналів в ґрунті, виконаних з металічних або пластмасових труб, по яким в період зарядки циркулює теплоносія, передаючи теплоту навколишньому середовищу. В період розрядки акумулятора теплота ґрунту передається теплоносію, що циркулює по цим же каналам в протилежному напрямку. Прикладами таких сезонних сховищ теплоти є системи, що діють в Нідерландах (Гроненген), Швеції (Санклей, Куллавік), Швейцарії (Вальруз), Австрії (Крансбіттен). Характеристики цих систем приведені [9].

Накопичування теплової енергії має великий потенціал: кам'яний акумулятор енергії – майбутнє відновлювальної енергії [20]. Автори проєкту стверджують, що запропонований кам'яний акумулятор дозволить зберігати енергію протягом трьох місяців для зимового періоду. Підкреслюється, що система зберігання енергії не вимагає ніяких токсичних матеріалів або хімічних сумішей. Вона працює, використовуючи безпечні компоненти і процеси, а каміння для накопичувача можна отримати в багатьох місцевих кар'єрах. Схема представлена на рисунку 3.

Представляє інтерес проєкт фінських інженерів, які з метою цілорічного стабільного електропостачання з відновлюваних джерел енергії під час зміни сезонів і мінливих погодних умов запропонували батарею з піску, яка представлена на рисунку 4 [23].

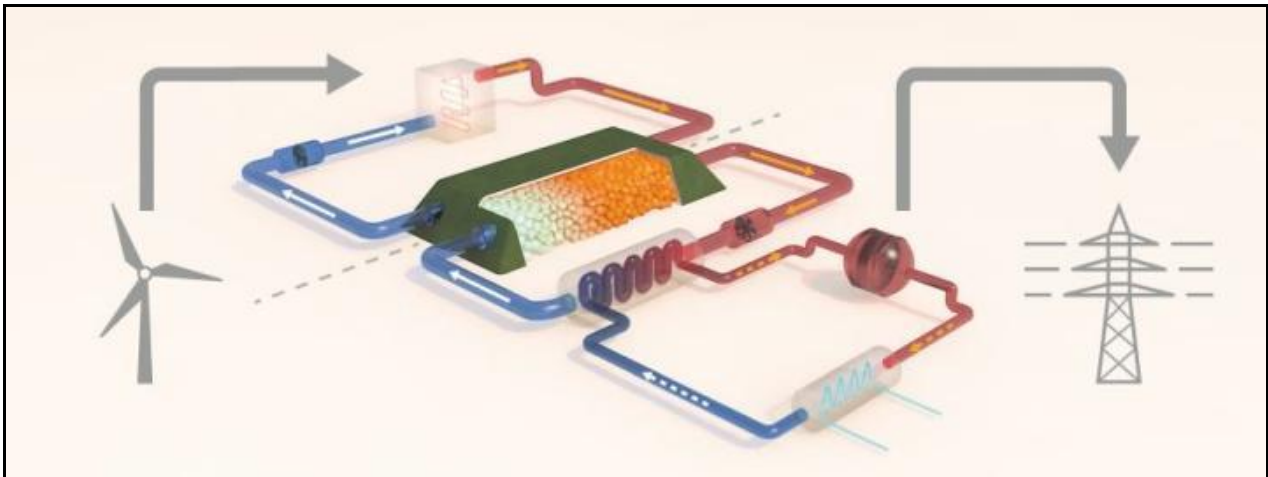


Рисунок 3 – Акумулятор теплоти з щільним шаром кам'яного матеріалу



Рисунок 4 – Пісочна батарея для накопичення теплової енергії [24]

Заповнена батарея зберігає 8 МВт·год теплової енергії. Коли потреба в енергії зростає, батарея вивільняє близько 200 кВт енергії через теплообмінні труби. Цього достатньо, щоб забезпечити опаленням і гарячою водою приблизно 100 будинків і громадський басейн, доповнюючи електрику з мережі. Акумулятор заряджається вночі, коли ціни на електроенергію нижчі.

#### 3.4. Акумулятори, засновані на фазовому переході – загальні відомості

В акумуляторах з фазовим переходом речовини використовується теплота плавлення (затвердіння) [6, 7]. Акумулятори, засновані на фазовому переході, більш ефективні, ніж акумулятори емкісного типу через те, що мають величину

ентальпії фазового переходу значно більшу, ніж теплоємність. Однак ці акумулятори мають високу вартість. Додаткові дослідження економічної доцільності їх використання в теплиці доводиться проводити в кожному конкретному випадку [10]. Класифікація систем, що використовують приховане тепло пароутворення, приведена в [9].

Фазові переходи тверде тіло-газ та рідина-газ мають високу приховану теплоту, однак фазові переходи призводять до значних змін об'єму, що призводить до проблем з локалізацією. У порівнянні з переходами рідина-газ, переходи тверде тіло-рідина мають більш низьку приховану теплоту. Однак ці перетворення призводять лише до незначних змін об'єму (близько 10% або менше). В результаті в системах TES традиційно використовують переходи тверде тіло-рідина.

#### 4. Експериментальні дослідження процесів переносу тепла та маси при теплообміні і щільних шарах

Останні досягнення в області визначення особливостей передачі теплоти в двофазних системах газ-тверде тіло, включаючи гідродинаміку течії крізь щільні шари, розглядаються в [9], Огляд [25] зосереджений на дослідженнях, проведених за останні кілька років в Інституті науки про частинки та інженерії Університету Лідса, та порівняння з результатами інших груп. У [26] представлені кореляції числа Нуссельта та коефіцієнта тертя для системи зберігання сонячної енергії із щільним шаром, що складається з часток великого розміру (1 – 3 см) різної форми. Більшість експериментальних досліджень було спрямовано на зіставлення повних швидкостей теплообміну (як правило, у безрозмірній формі) з числом Рейнольдса.

Сумарний теплообмін складався, в більшості випадків, як з кондуктивного, так і з конвективного режиму. Оскільки режим провідності залежить від фізичних та транспортних властивостей матеріалів шару, ці кореляції, хоч і часто надійні, застосовні до конкретних матеріалів шару, для яких вони були розроблені. Експерименти по вивченню теплопереносу [27] проводилися при 100 °С як при постійному тепловому потоці стінки, так і в умовах постійної температури стінки, які давали розподіл температури як в радіальному, так і в осьовому напрямках [27]. Дані про коефіцієнт теплопередачі були оброблені для отримання числа Нуссельта  $Nu_m$ , що визначається як

$$Nu_m = \frac{h_m \cdot d_p}{k_f}, \quad (1)$$

де  $k_f$  – теплопровідність рідини. Потім були спроби пов'язати число Нуссельта з числами Рейнольдса і Архімеда, і навіть із масою завантаження твердих частинок [27]. Авторами [25] запропонована залежність, яка узгоджується з експериментами в межах 7 і 11% відповідно для частинок розміром 112,5 і 55 мкм при постійному тепловому потоці на стінці каналу:

$$Nu_m = 0,014 \cdot Ar_m^{0,25} \cdot Re_p^{0,5} \left(1 + \frac{G_m}{G_g}\right)^{0,68} \quad (2)$$

$$Re_p = 149 \dots 373; G_m / G_g = 0,2 \dots 2,1$$

У [28] представлені кореляції, що враховують теплообмін між газом, частинками, що рухаються, і сусідніми частинками з модифікацією за об'ємною часткою газу (порозності  $\epsilon$ ).

$$Re_m \leq 200:$$

$$Nu_m = 2 + 0,6 \epsilon_g^n Re_m^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (3)$$

$$200 \leq Re_m \leq 1500:$$

$$Nu_s = 2 + 0,5 \epsilon_g^n Re_m^{1/2} Pr^{1/3} + 0,02 \epsilon_g^n Re_m^{0,8} Pr^{1/3}, \quad (4)$$

$$Re_m \geq 1500:$$

$$Nu_s = 2 + 0,000045 \epsilon_g^n Re_s^{1,8}, \quad (5)$$

Показник ступеня  $n = 3,5$  пропонується для поліетиленових гранул діаметром 3 мм при моделюванні розведених потоків. Однак у потоках з вищою концентрацією твердих частинок виявлено невідповідність температури на вході твердих частинок.

Експериментальні значення числа Нуссельта при низьких числах Рейнольдса [29] узагальнюються наступним виразом для :

$$Nu = 0,054 \cdot Re^{1,48}, \quad (6)$$

Зазначається, що визначення коефіцієнта теплопередачі газу, що протікає через шар насадки, є найбільш чутливою точкою розрахунку.

Коефіцієнт теплопередачі залежить переважно від типу акумулюючого матеріалу. Відповідні рівняння конвективного теплообміну опубліковані, наприклад, [30], а ті, що відносяться до радіаційного теплообміну, обговорювалися, наприклад, в [31].

Рівняння для невпорядкованого шару частинок (рівняння (59)), перевірене на експериментальних даних, було рекомендовано в [32]:

$$Nu = \frac{h_c d_p}{\lambda_g} = 2 + 1,8 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}, \quad (7)$$

Експериментальне дослідження коефіцієнта конвективної теплопередачі в ущільненому шарі при малих числах Рейнольдса показало, що теплові властивості стінок (адіабатичні або нагріті) істотно впливають на режим провідності, тому можна очікувати, що дослідження з використанням аналогічних експериментальних методів, але за наявності різних матеріалів шару, також

дадуть різну кореляцію, яка зв'язує коефіцієнт теплопередачі з числами Рейнольдса.

Дослідження теплопереносу в щільних шарах дозволили зробити висновок, що при проектуванні шару для накопичення теплової енергії число Біо повинне бути якнайнижче. У цьому випадку тепловий опір усередині твердого тіла не є визначальним. При виборі матеріалу для насадки доцільно враховувати цю умову. Важливо також створення умов для інтенсифікації теплообміну. Виявлено, що вплив форми контакту на перепади тиску є значним, а на числа Нуссельта вплив відносно невеликий. Однак дані стосуються шару сферичних часток, що не дозволяє їх поширити на шар часток з довільною формою поверхні. Для розрахунку числа Біо запропоновано таке рівняння:

$$Bi = h_v \cdot d_p / 2k_p - St \cdot Re_p \cdot Pr \cdot (k_f / 2k_p), \quad (8)$$

де  $k_f$ ,  $k_p$  – коефіцієнти теплопровідності рідини і твердого матеріалу.

Застосування акумуляторів з щільними шарами пропонує помірні швидкості теплопередачі та перепади тиску, і через це рекомендується використовувати пасивні сонячні системи для зберігання теплової енергії.

## 5. Математичні моделі процесів перенесення теплоти і маси в щільному шарі гранульованого матеріалу

Найближчу до предмета дослідження математичну модель представлено в [33], яка описує теплообмін між рухомих щільним шаром дисперсного матеріалу, що рухається, і потоком газу. Отримано аналітичні залежності для розрахунку локальних температур газового і твердого компонентів такого вигляду для протитечії:

$$tg(x) = C_1 + C_2 \cdot e^{\frac{K_2(-K_4+K_3) \cdot x}{K_4 \cdot K_3}}, \quad (9)$$

$$t_m(x) = \frac{K_4 \cdot C_1 + C_2 \cdot e^{\frac{K_2(-K_4+K_3) \cdot x}{K_4 \cdot K_3}}}{K_4}, \quad (10)$$

де:  $C_1$ ,  $C_2$  – коефіцієнти, що відповідають заданим умовами однозначності, і визначаються залежностями (1.17), (1.18):

$$C_1 = tg_0 + \frac{K_4 \cdot (tg_0 - t_{m0})}{-K_4 + e^{K_5 \cdot L} \cdot K_3}, \quad (11)$$

$$C_2 = -\frac{K_4 \cdot (tg_0 - t_{m0})}{-K_4 + e^{K_5 \cdot L} \cdot K_3}, \quad (12)$$

Коефіцієнти  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  являють собою комбінації із заданих величин, що характеризують процес:

$$K_2 = \alpha_M \cdot a_{y0}, \quad (13)$$

де:  $\alpha_M$  – коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $a_{y0}$  – питома поверхня частинок в одиниці об'єму, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

$$K_3 = c_2 \cdot \rho_2 \cdot w, \quad (14)$$

Отримані аналітичні залежності для розрахунку температур газового і твердого компонентів дають змогу проводити розрахунковим шляхом оцінку впливу різних чинників, як-от фізичні властивості газу і твердих частинок, швидкості потоків, порізність шару, та ефективність теплообміну між потоками, що може бути застосовано під час пошуку оптимальних параметрів роботи теплоутилізаторів контактного типу.

## 6. Взаємопов'язаний тепломасоперенос між наскрізним газовим потоком і щільним шаром

Опис процесу взаємопов'язаного тепломасопереносу охоплює дві проблеми [34], а саме теплообмін (між повітрям, що протікає, та частками шару) і масоперенос (внаслідок процесів випаровування/конденсації). Розв'язання цих проблем можна розглянути на прикладі роботи [34]. Під час проходження повітря через пористу структуру скельної породи можуть мати місце два режими (які розраховують як порівняння параметрів повітря на вході та виході з накопичувача): осушення і зволоження. Ці режими мають місце як під час циклів заряджання, так і розряджання акумулятора. Теоретично, під час заряджання повітря, що виходить, характеризується меншою ентальпією і концентрацією водяної пари порівняно з повітрям, що входить, адже частина тепла, яке спочатку міститься в повітрі, перетворюється на підвищення температури твердого тіла, а менша концентрація

водяної пари є наслідком конденсації пари на поверхні частинок шару. У разі скидання відбувається зворотнє: повітря, що виходить, характеризується більш високою температурою і більш високою концентрацією водяної пари (ефект випаровування).

Процеси, що відбуваються під час протікання

повітря через пористий шар акумулятора, представлені на рис. 5. Рухійною силою процесів тепломасопереносу, що відбуваються під час протікання повітря через пористий шар, є різниця температур повітря і твердого тіла та різниця концентрації водяної пари між середовищем і поверхню частинок шару.

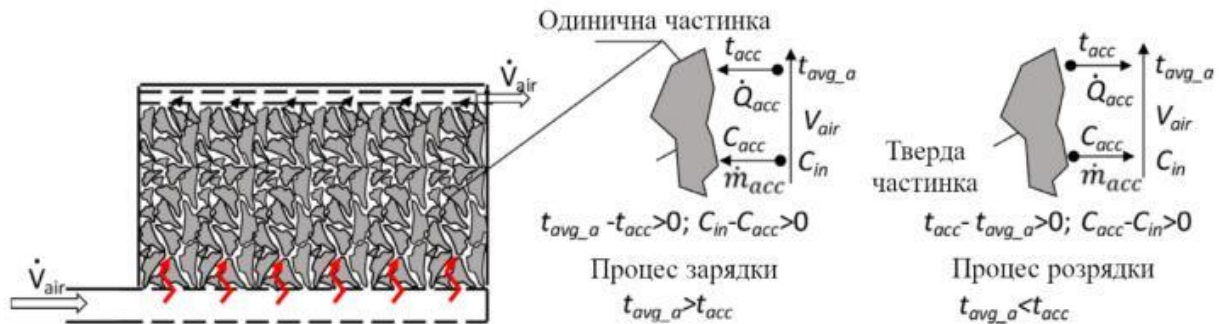


Рисунок 5 – Схема процесів, що відбуваються під час протікання повітря через шар акумулятора [34]

Фізичний аналіз обговорюваних явищ показує, що під час контакту вологого тіла з нагрітим повітрям, що обтікає його, рідина випаровується з поверхні контакту. Однак процес випаровування вимагає енергії (теплоти випаровування на одиницю маси). Таким чином, у результуючому процесі випаровування рідини створюється рух маси перпендикулярно до напрямку потоку повітря, що викликає зміну значення коефіцієнта теплопередачі. Рідина, що випаровується, проникає в навколишнє газове середовище в результаті дифузії. Описаний механізм має місце під час випаровування, під час конденсації знаки описуваних сил протилежні.

Важливим розділом дослідження взаємопов'язаних процесів перенесення теплоти і маси є проведення порівняння чисел Нуссельта і Шервуда. Спочатку для цього було обрано рівняння Ранца-Маршеля [35, 36]; однак модель Ранца-Маршала описує одночасне перенесення тепла і маси у випадку, коли простір, що оточує сферичні частинки, необмежений і частинки оббризкуються водою. Тому для обмеженого простору (ущільнений пористий шар з протіканням повітря крізь пори) для порівняння знайдених функціональних залежностей, що описують теплообмін, використовувалася кореляція Вітакера [37]:

$$Nu = 0,40 \cdot Re^{0,5} + 0,21 \cdot Re^{0,67} \cdot Pr^{0,4}, \quad (15)$$

Наведену вище залежність отримано на основі випробувань обтікання сферичних частинок повітрям і азотом для діапазонів:  $\varepsilon = 0,34 \dots 0,74$  і  $Re = 4 \dots 8000$ . Однак недоліком цього рівняння є те, що воно не враховує зміни в'язкості рідини з температурою. Далі для порівняння залежність, отриману з емпіричних формул Вакао та Фуназкрі [38].

$$Sh = 2 + 1,1 \cdot Re^{0,6} \cdot Sc^{0,33}, \quad (16)$$

Діапазон літературних значень  $Nu$  і  $Sh$  становить від 2,3 до 6,4 і від 6,3 до 15,7 відповідно, тоді як значення  $Nu$  і  $Sh$ , розраховані в даному дослідженні, не перевищують 3,4 і 1,2 відповідно. Однак слід пам'ятати, що всі кореляції правильні тільки для того діапазону умов, у яких вони були визначені. Крім того, відмінності, що спостерігалися є наслідком відмінностей в умовах, у яких проводили окремі дослідження, а також у теплофізичних параметрах матеріалу підкладки, випробуваного в цьому дослідженні та в інших дослідженнях.

## 7. Типи матеріалів для акумулювання теплоти

Вибір матеріалу залежить від заданих умов та вимог, особливо від температури. Для високих температур слід використовувати керамічний накопичувальний матеріал. Існує безліч типів матеріалів зберігання. Для великих регенераторів можна використовувати цеглу. Для меншого регенера-

тора можна використовувати стільники, сферичні частинки, моноліт, тканий екран або кільця Рашига, керамічний накопичувальний матеріал. Для низьких або помірних температур теплоакumuлюючий матеріал може бути виготовлений з металу, наприклад сталі або алюмінію.

В акумуляторах з пористою матрицею як теплоакumuлюючий матеріал (ТАМ використовуються гравій, феоліт (залізна руда), залишки будів-

ельних матеріалів. Такі теплові матеріали знайшли широке поширення в системах теплопостачання (пасивних або активних) з повітряним теплоносієм.

Матеріали з більш високою щільністю мають, як правило, найвищі теплоакumuлюючі властивості. Властивості деяких матеріалів та речовин для створення акумуляторів тепла представлені у таблиці 1 [39].

**Таблиця 1** – Властивості деяких матеріалів та речовин для створення акумуляторів тепла [24]

| Матеріал          | Густина,<br>$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Питома теплоємність,<br>$C$ , кДж/кг·К | Теплопровідність,<br>$\lambda$ , Вт/(мК) |
|-------------------|--|--|--|
| Вода              | 1000                                   | 4.2                                    | 0.55                                     |
| Ґрунт             | 1600                                   | 0.8                                    | 1.02                                     |
| Природний камінь: |  |  |  |
| Граніт            | 2800                                   | 0.88                                   | 3.49                                     |
| Бут               | 2400                                   | 0.84                                   | 1.86                                     |
| Бетон             | 1800                                   | 0.88                                   | 0.81                                     |
| Цегла             | 800                                    | 0.84                                   | 0.23                                     |
| Гравій            | 1600                                   | 0.84                                   | 0.58                                     |
| Пісок             | 500                                    | 2.3                                    | 0.18                                     |

Жоден з матеріалів, що пропонуються до використання, не відповідає всім вимогам ідеально, завжди повинен бути компроміс. З економічної точки зору природні камені, такі як кварц і базальт, найдорожчі: приблизно 6 €/кг за даними [33]; кварцовий пісок та спечений боксит пропонують найбільші переваги для теплопередачі та акумулювання. Кварцовий пісок пропонує найнижчі фінансові вкладення (0,1 €/кг), але має деякі недоліки щодо термоциклювання. Всі негативні ефекти, пов'язані з цими недоліками, можуть бути зведені до мінімуму шляхом застосування відповідної конструкції та експлуатації пристроїв.

## 8. Висновки

Технологія накопичення теплової енергії дає найкращі шанси збалансувати попит і пропозицію за рахунок подолання переривчастості та нестабільності реальних джерел тепла, що призводить до створення більш універсальної, стійкої та надійної системи теплової енергії.

Застосування шару гранульованих матеріалів для акумуляції теплоти має низку переваг: висока теплопровідність, висока теплоємність, енергоефективність, можливість регулювання температури. Внаслідок цього гранульовані матеріали можуть бути корисним компонентом у системах

опалення, охолодження та енергозбереження.

Отримання адекватної математичної моделі дозволить суттєво розширити область досліджень та скоротити час визначення основних теплових характеристик процесу. Наразі немає точних аналітичних рішень математичних моделей, що описують нестационарний процес теплообміну в щільному шарі гранульованого матеріалу. Кінцевою ціллю такого рішення є отримання аналітичної залежності для розрахунку температури гранульованого матеріалу в довільній точці по довжині каналу в заданий час процесу нагрівання або охолодження.

Більшість експериментальних досліджень спрямована на зіставлення швидкостей теплообміну (як правило, у безрозмірній формі) з числом Рейнольдса. У літературі представлені кореляції числа Нуссельта для щільних шарів, рухомих і нерухомих, для частинок великого розміру (1...3 см, 4...13 см) і малого розміру (до 0,5 мм) різної форми. Дослідження проводили на різних матеріалах, у літературних джерелах представлено кореляції для коефіцієнта теплопередачі та тертя залежно від форми та розміру часток матеріалу. Загальної залежності для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі між шаром часток і газовим потоком не існує. Кожний окремий випадок теплообміну має потребу у відповідній кореляційній залежності

Розроблення регенераторів для утилізації низько потенційної теплоти є перспективним щодо розвитку енергозберігаючих систем нагріву та охолодження. Показано раціональність розроблення ґрунтового регенератора для теплиць, водночас необхідні додаткові відомості щодо особливостей їхнього конструювання з урахуванням знань теплообміну між потоком газу і твердими частинками.

### Особистий внесок авторів CRediТ

**Бошкова І. Л.:** концептуалізація, формальний аналіз. **Альтман Е. І.:** аналіз експериментальних досліджень та узагальнення даних. **Мукмінов І. І.:** аналіз математичних моделей. **Писаревський І. О.:** інформаційний пошук, аналіз даних.

### Література

1. **Sciacovelli A., Vecchi A., Ding Y.** Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage – From component to system level performance through dynamic modelling // *Applied energy*. – 2017. – Vol. 190. – P. 84-98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.118>.
2. World energy consumption statistics | enerdata. World Energy Statistics | Enerdata. Режим доступу URL: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html> (дата звернення 12.05.24)
3. **Kalaiselvam S., Parameshwaran R.** Energy storage // *Thermal energy storage technologies for sustainability*. – 2014. – P. 21-56. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-417291-3.00002-5>.
4. **Фіалко Н. М., Тимченко М. П.** Технології накопичення енергії у складі інтелектуальних систем енергозабезпечення // *Промислова теплотехніка*. – 2017. – Т. 39, № 4. – С. 44-54.
5. **A. Bazgaou et al.** Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse // *Solar energy*. – 2020. – Vol. 198. – P. 8-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.041>.
6. **Lukyanov A. V., Ostapenko V. V., Aleksandrov V. D.** Thermal energy accumulators based on phase transition // *Вісник донбаської національної академії будівництва і архітектури: збірник наукових праць, Макіївка*. – 2010. – С. 64-69.
7. **S. Bellan et al.** Numerical and experimental studies on heat transfer characteristics of thermal energy storage system packed with molten salt PCM capsules // *Applied thermal engineering*. – 2015. – Vol. 90. – P. 970-979. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.056>.
8. **Rady M.** Thermal performance of packed bed thermal energy storage units using multiple granular phase change composites // *Applied energy*. – 2009. – Vol. 86, no. 12. – P. 2704-2720. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.027>.
9. **Mitali J., Dhinakaran S., Mohamad A. A.** Energy storage systems: a review // *Energy storage and saving*. – 2022. – Vol. 1, Is. 3. – P. 166-216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>.
10. **Savytskyi M., Danishevskyy V., Bordun M.** Accumulation of solar energy to heat greenhouses. IOP conference series: materials science and engineering. – 2020. – Vol. 985. – P. 012013. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012013>.
11. **Ivanko A., Kalinichenko A., Shmat N.** The solar vegetarianium. – Kyiv, 1996. – 112 p.
12. **Zhang X., Yang L.** Dense granular flow as heat transfer media: a new type of high power target design // *Principles and applications in nuclear engineering - radiation effects, thermal hydraulics, radionuclide migration in the environment*. – 2018. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.77276>.
13. **Spelt J. K., Brennen C. E., Sabersky R. H.** Heat transfer to flowing granular material. *International journal of heat and mass transfer*. – 1982. – Vol. 25, no. 6. – P. 791-796. doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(82\)90091-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(82)90091-6).
14. **Díaz-Heras M., Belmonte J. F., Almendros-Ibáñez J. A.** Effective thermal conductivities in packed beds: review of correlations and its influence on system performance // *Applied thermal engineering*. – 2020. – Vol. 171. – P. 115048. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115048>.
15. **Paksoy H. Ö., Beyhan B.** Thermal energy storage systems for greenhouse technology // *Advances in thermal energy storage systems*. – 2021. – P. 699–715. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819885-8.00025-5>.
16. **Bott C., Dressel I., Bayer P.** State-of-technology review of water-based closed seasonal thermal energy storage systems // *Renewable and sustainable energy reviews*. – 2019. – Vol. 113. – P. 109241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.048>.
17. **Nordell B.** Underground thermal energy storage (UTES) // *International conference on energy storage: Lleida, 16-18 May 2012*.
18. **Totschnig G., Suna D., Pardo Garcia N.** Assessment of a seasonal cavern thermal storage for district heating in the city of graz // *EuroHeat&Power*.

- 2021. – P. 29-31.
19. **Velraj R.** Sensible heat storage for solar heating and cooling systems // *Advances in solar heating and cooling*. – 2016. – P. 399–428. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100301-5.00015-1>.
20. **Gabrielsson A., Bergdahl U., Moritz L.** Thermal energy storage in soils at temperatures reaching 90°C // *Journal of solar energy engineering*. – 2000. – Vol. 122, no. 1. – P. 3-8. doi: <https://doi.org/10.1115/1.556272>.
21. **T. Zdankus et al.** Investigation of thermal energy accumulation using soil layer for buildings' energy efficiency // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14, no. 9. – P. 5247. doi: <https://doi.org/10.3390/su14095247>.
22. **A. Kapjor et al.** The accumulation and heat transfer in soils // *Structure & environment*. – 2014. – Vol. 6, no. 4. – P. 43-46.
23. **K. Mesmoudi et al.** Experimental study of the energy balance of unheated greenhouse under hot and arid climates: study for the night period of winter season / *Journal of the association of arab universities for basic and applied sciences*. – 2010. – Vol. 9, no. 1. – P. 27-37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2010.12.007>.
24. What is a sand battery? – polar night energy. *Polar Night Energy*. Режим доступу URL: <https://polar-nightenergy.fi/sand-battery> (дата звернення 12.05.24)
25. **Y. Ding et al.** Hydrodynamics and heat transfer of gas-solid two-phase mixtures flowing through packed beds – a review // *Progress in natural science*. – 2008. – Vol. 18, no. 10. – P. 1185-1196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.03.023>.
26. **Singh R., Saini R. P., Saini J. S.** Nusselt number and friction factor correlations for packed bed solar energy storage system having large sized elements of different shapes // *Solar energy*. – 2006. – Vol. 80, no. 7. – P. 760-771. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.07.001>.
27. **T. N. Cong et al.** Heat transfer of gas–solid two-phase mixtures flowing through a packed bed under constant wall heat flux conditions // *Chemical engineering journal*. – 2007. – Vol. 130, no. 1. – P. 1-10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.11.006>.
28. **Li J., Mason D. J.** Application of the discrete element modelling in air drying of particulate solids // *Drying technology*. – 2002. – Vol. 20, no. 2. – P. 255-282. doi: <https://doi.org/10.1081/drt-120002542>.
29. **Huber M. L.** Investigation of heat transfer in packed beds at high temperatures and low Reynold's numbers: Dissertation. – Golden, 1985. – 212 p.
30. **Sadrameli S. M., Heggs P.** Heat transfer calculations in asymmetric x and unbalanced regenerators // *Iranian journal of science & technology*. – 2019. – Vol. 22, no. 1. – P. 77-94.
31. **Narayanan C. M., Pramanick T.** Computer aided design and analysis of regenerators for heat recovery systems // *Industrial & engineering chemistry research*. – 2014. – Vol. 53, no. 51. – P. 19814-19844. doi: <https://doi.org/10.1021/ie501213s>.
32. **Amelio M., Morrone P.** Numerical evaluation of the energetic performances of structured and random packed beds in regenerative thermal oxidizers // *Applied thermal engineering*. – 2007. – Vol. 27, no. 4. – P. 762-770. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.10.016>.
33. **Солодка А. В., Бошкова І. Л.** Математичний опис процесу теплообміну між потоками газу та дисперсного матеріалу // *Холодильна техніка та технологія*. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 39-43. doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v53i2.593>.
34. **S. Kurpaska et al.** Experimental and modeling approach to heat and mass transfer in a porous bed of a rock-bed heat accumulator // *International journal of heat and mass transfer*. – 2021. – Vol. 179. – P. 121654. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmass-transfer.2021.121654>.
35. **Beji T., Merci B.** A detailed investigation on the effect of the sherwood and nusselt number modelling for the heating and evaporation of a single suspended water droplet // *Journal of physics: conference series*. – 2018. – Vol. 1107. – 062002. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1107/6/062002>.
36. **A. Seck et al.** Evaporation modeling of water droplets in a transonic compressor cascade under fogging conditions // *International journal of turbomachinery, propulsion and power*. – 2020. – Vol. 5, no. 1. – P. 5. doi: <https://doi.org/10.3390/ijtp5010005>.
37. **Wisniewski T. S.** Some aspects of conjugated radiative-conductive heat transfer in thermal insulations // *Advances in heat transfer engineering*. – 2017. – P. 177-184.
38. **Wakao N., Funazkri T.** Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid mass transfer coefficients in packed beds // *Chemical engineering science*. – 1978. – Vol. 33, no. 10. – P. 1375-1384. doi: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(78\)85120-3](https://doi.org/10.1016/0009-2509(78)85120-3).
39. ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Чинний від 2014-01-01. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 51 с.

# Prospects for the development of low-potential heat accumulation technologies of gas (air) flows

Iryna Boshkova<sup>1</sup>✉, Ella Altman<sup>2</sup>, Ihor Mukminov<sup>3</sup>, Ihor Pysarevskiy<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: <sup>1</sup>boshkova.irina@gmail.com

ORCID: <sup>1</sup><http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; <sup>2</sup><http://orcid.org/0000-0002-3674-9289>;

<sup>3</sup><http://orcid.org/0000-0002-8257-5769>; <sup>4</sup><http://orcid.org/0009-0007-3920-9601>

*An analytical review of scientific works dedicated to the research of energy storage technologies, in particular from low-potential heat flows, is given. The relevance of studying the methods and methodology of heat accumulation and utilization gas (air) medium is connected with the fact that thermal energy storage provides the best opportunity to balance supply and demand by reducing the intermittency and instability of real heat sources, which leads to the creation of a more universal, stable and reliable thermal energy system. It is emphasized that energy storage technologies (SES) are gaining key importance in the country's energy balance. The analysis of heat accumulators based on the properties of heat-accumulating materials is given. The battery material of the capacitive type is heated (cooled) without changing its state of aggregation, the simplicity of creating batteries and heat-utilizes based on them has made it possible to develop systems in rock, gravel-water schemes, and offer sand batteries for thermal energy storage. It is claimed that the expediency of using heat exchangers with low temperature pressures can be increased by using a granular nozzle as a heat carrier. General information on batteries based on phase transitions is provided. Defined experimental dependences for calculating the heat transfer coefficient in the process of heat and mass transfer during heat exchange in dense layers. Mathematical models of heat and mass transfer processes in a dense layer of granular material are presented closest to the subject of research. The thermal processes that occur during the flow of air through the battery layer are analyzed. The main characteristics of materials and substances for creating heat accumulators are analyzed.*

**Keywords:** Batteries; Heat exchangers; Granular materials; Dense layers; Heat exchange; Types of materials

## Acknowledgment

*This project has received funding through the EURIZON project, which is funded by the European Union under grant agreement No.871072.*

## References

1. Sciacovelli, A., Vecchi, A., & Ding, Y. (2017). Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage – From component to system level performance through dynamic modelling. *Applied Energy*, 190, 84-98.
2. World energy consumption statistics | enerdata. World Energy Statistics | Enerdata. Retrived 12 May, 2024 from <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>.
3. Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications. *Elsevier Science & Technology Books*, 21-56.
4. Fialko, N. M., Tymchenko, M. P. (2017). Energy storage technologies as part of intelligent energy supply systems. *Industrial Heat Engineering*, 39 (4), 44-54.
5. Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Elame, F., Ezzaeri, K., Gourdo, L., Bouirden, L. (2020). Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse. *Solar Energy*, 198, 8-24.
6. Lukyanov A. V., Ostapenko V. V., Aleksandrov V. D. (2010). Thermal energy accumulators based on phase transition. Bulletin of the Donbas National Academy of Construction and Architecture: collection of scientific works, Makiivka, October 25, 2010, 64-69.
7. Bellan, S., Alam, T. E., González-Aguilar, J., Romero, M., Rahman, M. M., Goswami, D. Y., & Stefanakos, E. K. (2015). Numerical and experimen-

- tal studies on heat transfer characteristics of thermal energy storage system packed with molten salt PCM capsules. *Applied Thermal Engineering*, 90, 970-979.
8. **Rady, M.** (2009). Thermal performance of packed bed thermal energy storage units using multiple granular phase change composites. *Applied Energy*, 86(12), 2704-2720.
9. **Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A.** (2022). Energy storage systems: A review. *Energy Storage and Saving*, 1, 3, 166-216.
10. **Savytskyi, M., Danishevskyy, V., & Bordun, M.** (2020). Accumulation of solar energy to heat greenhouses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985, 012013.
11. **Ivanko A., Kalinichenko A., Shmat N.** (1996). The solar vegetarianium. *Kyiv*, 112.
12. **Zhang X., Yang L.** (2018). Dense granular flow as heat transfer media: a new type of high power target design. *Principles and applications in nuclear engineering - radiation effects, thermal hydraulics, radionuclide migration in the environment*.
13. **Spelt, J. K., Brennen, C. E., & Sabersky, R. H.** (1982). Heat transfer to flowing granular material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25(6), 791-796.
14. **Díaz-Heras, M., Belmonte, J. F., & Almendros-Ibáñez, J. A.** (2020). Effective thermal conductivities in packed beds: Review of correlations and its influence on system performance. *Applied Thermal Engineering*, 171, 115048.
15. **Paksoy, H. Ö., Beyhan, B.** (2021). Thermal energy storage systems for greenhouse technology. *Advances in thermal energy storage systems*, 699-715.
16. **Bott, C., Dressel, I., & Bayer, P.** (2019). State-of-technology review of water-based closed seasonal thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109241.
17. Underground thermal energy storage (UTES). (2012). *International conference on energy storage 16-18 May 2012, Spain: Lleida University of Technology*.
18. **Totschnig, G., Suna, D., Pardo Garcia, N.** (2021). Assessment of a seasonal cavern thermal storage for district heating in the city of graz. *Euro-Heat&Power*, 29-31.
19. **Velraj, R.** (2016). Sensible heat storage for solar heating and cooling systems. *Advances in solar heating and cooling*, 399-428.
20. **Gabrielsson, A., Bergdahl, U., & Moritz, L.** (2000). Thermal Energy Storage in Soils at Temperatures Reaching 90°C. *Journal of Solar Energy Engineering*, 122(1), 3-8.
21. **Zdankus, T., Jonynas, R., Vaiciunas, J., Bandarwadkar, S., & Lenkas, T.** (2022). Investigation of Thermal Energy Accumulation Using Soil Layer for Buildings' Energy Efficiency. *Sustainability*, 14(9), 5247.
22. **Kapjor, A. et al.** (2014). The accumulation and heat transfer in soils. *Structure & environment*, 6, 4, 43-46.
23. **Mesmoudi, K., Soudani, A., Zitouni, B., Bournet, P. E., & Serir, L.** (2010). Experimental study of the energy balance of unheated greenhouse under hot and arid climates: Study for the night period of winter season. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 9(1), 27-37.
24. What is a sand battery? – polar night energy. Polar Night Energy. Retrived 12 May, 2024 from <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>.
25. **Ding, Y., He, Y., Cong, N. T., Yang, W., & Chen, H.** (2008). Hydrodynamics and heat transfer of gas–solid two-phase mixtures flowing through packed beds – a review. *Progress in Natural Science*, 18(10), 1185-1196.
26. **Singh, R., Saini, R. P., & Saini, J. S.** (2006b). Nusselt number and friction factor correlations for packed bed solar energy storage system having large sized elements of different shapes. *Solar Energy*, 80(7), 760-771.
27. **Cong, T. N., He, Y., Chen, H., Ding, Y., & Wen, D.** (2007). Heat transfer of gas–solid two-phase mixtures flowing through a packed bed under constant wall heat flux conditions. *Chemical Engineering Journal*, 130(1), 1-10.
28. **Li, J., & Mason, D. J.** (2002). Application of the discrete element modelling in air drying of particulate solids. *Drying Technology*, 20(2), 255-282.
29. **Marcia Lynn, H.** (1985). Investigation of heat transfer in packed beds at high temperatures and low Reynold's numbers (Dissertation). *Colorado School of Mines*, 212.
30. **Dusinberre, G. M.** (2009). Heat transfer calculations by numerical methods. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 67(4), 991-1002.
31. **Narayanan, C. M., & Pramanick, T.** (2014). Computer Aided Design and Analysis of Regenerators for Heat Recovery Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(51), 19814-19844.
32. **Amelio, M., & Morrone, P.** (2007). Numerical evaluation of the energetic performances of structured

- and random packed beds in regenerative thermal oxidizers. *Applied Thermal Engineering*, 27(4), 762-770.
33. **Solodka, A. V., Boshkova, I. L.** (2017). Mathematical description of the heat exchange process between gas and dispersed material flows. *Refrigeration Engineering and Technology*, 53(2), 39-43.
34. **Kurpaska, S., Latała, H., Kielbasa, P., Sporysz, M., Gliniak, M., Famielec, S., & Bogusława, Ł.-K.** (2021). Experimental and modeling approach to heat and mass transfer in a porous bed of a rock-bed heat accumulator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 179, 121654.
35. **Beji, T., & Merci, B.** (2018). A Detailed Investigation on the Effect of the Sherwood and Nusselt Number Modelling for the Heating and Evaporation of a Single Suspended Water Droplet. *Journal of Physics: Conference Series*, 1107, 062002.
36. **Seck, A., Geist, S., Harbeck, J., Weigand, B., & Joos, F.** (2020). Evaporation Modeling of Water Droplets in a Transonic Compressor Cascade under Fogging Conditions. *International Journal of Turbo-machinery, Propulsion and Power*, 5(1), 5.
37. **Wisniewski T. S.** (2017). Some aspects of conjugated radiative-conductive heat transfer in thermal insulations. *Advances in heat transfer engineering*, 177-184.
38. **Wakao, N., & Funazkri, T.** (1978). Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid mass transfer coefficients in packed beds. *Chemical Engineering Science*, 33(10), 1375-1384.
39. DSTU B V.2.6-189:2013. (2014). Methods of choosing heat-insulating material for building insulation Valid from 2014-01-01. *Kyiv: Ministry of the Region of Ukraine*, 51.

---

Received 12 May 2024

Approved 03 June 2024

Available in Internet 30 June 2024