

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.8.036

Використання кільцевих каналів із пористим заповненням для утилізації низькопотенційного тепла

*І. О. Писаревський*¹, *І. І. Мукмінов*^{2✉}, *Е. І. Альтман*³

¹⁻³Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: ²fatalrew@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0009-0007-3920-9601>; ²<http://orcid.org/0000-0002-3674-9289>;

³<http://orcid.org/0000-0002-8934-2036>

У статті розглянуто перспективну технологію утилізації низькопотенційного тепла (температура газового потоку <math><180^\circ\text{C}</math>) шляхом використання кільцевих каналів, заповнених пористим матеріалом, зокрема, піском. Запропонований підхід направлений на акумулювання теплоти відхідних газів щільним шаром матеріалу з наступною передачею акумульованої теплоти іншому теплоносію. Теплообмінники з щільною насадкою здатні забезпечити високу ефективність передачі тепла завдяки розвиненій поверхні та великій теплоємності насадки. Наголошується, що на даний час теоретично й експериментально обґрунтовано механізми теплообміну в пористому середовищі, проаналізовано вплив геометрії каналу та характеристик заповнювача на ефективність теплообміну з урахуванням раціональних аеродинамічних умов. Визначено, що перспективним конструктивним рішенням для утилізації низькопотенційного тепла відхідних газів є насадочні теплообмінники, використання яких уявляється доцільним в системах вентиляції будівель (як альтернатива або доповнення до стандартних рекуператорів), у димоходах котельного обладнання (для підйому ККД установок), а також у низці промислових процесів, де повітря або газ, що відходить, має помірну температуру. Пропонується конструкція теплоутилізатора в вигляді стаціонарних модулів без рухомих частин, що дозволяє знизити обслуговування до мінімуму. Розглянуто можливості оптимізації конструкцій (радіальне протікання, багат шарова насадка) та інтеграції нових матеріалів, зокрема фазоперехідних. Обґрунтовані сучасні напрямки подальших досліджень з метою зниження аеродинамічного опору шару насадки, оптимізації гранулометричного складу, а також чисельне моделювання нестационарного теплообміну. Наведено приклади досягнення ККД до 90% у протиточних або циклічних режимах роботи. Підкреслено значення технології для енергозбереження й декарбонізації, з огляду на її простоту, економічність і універсальність застосування.

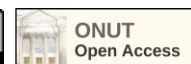
Ключові слова: Утилізація тепла; Кільцевий канал; Пористий заповнювач; Пісок; Теплообмінник; Низькопотенційне тепло; Регенератор; Теплоакумуляція; Енергоефективність; Вентиляція

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v6i12.3180>

© The Author(s) 2025. 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

Низькопотенційне тепло (зазвичай <math><180^\circ\text{C}</math>) широко присутнє у промисловості та комунальному господарстві, проте найчастіше безповоротно губиться у довкілля [1,2]. За оцінками, до

~70% енергії, що виробляється, перетворюється на низькотемпературне тепло, що не повертається в корисне русло [2]. Приклади включають тепле витяжне повітря систем вентиляції будівель, димові гази опалювальних котлів, тепло відпрацьованого повітря на виробництвах тощо. Таке розсіювання

енергії – втрачена можливість підвищити енергоефективність та знизити вуглецевий слід підприємств. [3]. Пряме перетворення низькотемпературного тепла в електроенергію утруднене через низький термодинамічний ККД (за законом Карно) при малій різниці температур [3]. Тому все більше уваги приділяється технологіям утилізації цього тепла для цілей опалення та нагріву, наприклад, за допомогою теплообмінників-рекуператорів та акумулювання теплової енергії.

Практичне значення утилізації низькопотенційного тепла підтверджується вимогами сучасних стандартів енергозбереження. У вентиляційних системах без рекуперації втрачається до 30-40% енергії на опалення приміщень. Використання теплоутилізаторів дозволяє повернути значну частку цієї енергії: так, рекупераційні вентиляційні установки забезпечують повернення 50-80% тепла, а в оптимальних умовах – до 90% [4]. Опалювальні газові котли старих типів без економайзерів втрачають через димові гази 10-20% тепла, проте встановлення конденсаційних економайзерів здатне скоротити ці втрати на 5-15%. [4]. Таким чином, завдання утилізації низькопотенційного тепла є актуальним як з економічної, так і екологічної точки зору, стимулюючи пошук нових ефективних рішень.

2. Аналіз літературних джерел

На сьогоднішній день розроблено низку технологій для повернення низькопотенційного тепла потоків, що відходять. Широко застосовуються рекуперативні теплообмінники – наприклад, пластинчасті перехресноточні або протиточні теплообмінники, в яких теплий і холодний потоки розділені тонкою стінкою. Вентиляційні установки з пластинчастими рекуператорами зазвичай досягають ефективності утилізації ~55-70%, кращі до ~80% [4]. Іншим підходом є роторні теплообмінники (теплові колеса) – масиви матеріалу, що обертаються, з великою поверхнею (металеві стільникові структури, полімерні волокна і т.д.), що по черзі омиваються витяжним і припливним повітрям. За рахунок періодичного обертання вони акумулюють тепло з витяжного потоку і передають його припливному (працюючи як регенератор, що обертається) [5]. Теплові колеса здатні повертати 65-80% тепла за безперервної роботи, а оптимізовані – до ~85% [4]. Нижче показана принципова схема такого роторного регенератора:

риятий диск, що обертається, послідовно контактує з гарячим (червона стрілка) і холодним (синя стрілка) потоками, запасаючи тепло у своїй масі і віддаючи його зустрічному потоку.

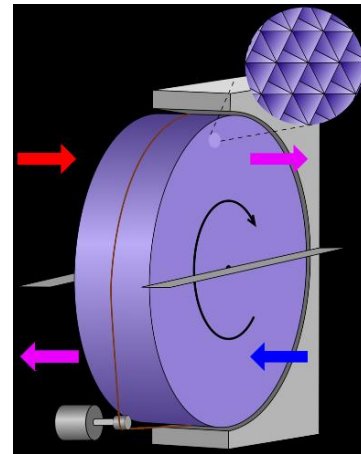


Рисунок 1 [5] – Принцип роботи роторного регенератора (теплого колеса): пористе колесо обертається між двома каналами, акумулюючи тепло витяжного повітря (червона стрілка) і віддаючи його припливному потоку (синя стрілка). Вставка (вгорі праворуч) ілюструє комірчасту структуру ротора, що забезпечує велику поверхню теплообміну.

Інші рішення включають теплові труби та системи з теплоносієм, наприклад, двоконтурні схеми з виносними теплообмінниками (run-around coil), а також теплові насоси, що перекачують низькопотенційне тепло на більш високий температурний рівень [4]. Однак останні вимагають електричної енергії та складного обладнання. На цьому фоні привертають увагу статичні регенератори на основі твердого теплоакумулюючого заповнювача, що не мають частин, що рухаються (на відміну від теплового колеса) і використовують дешеві матеріали. До таких відносяться канали або резервуари, заповнені пористим матеріалом (насадкою): наприклад, шаром піску, гравію, керамічних гранул тощо. У них тепло від гарячого відпрацьованого газу передається наповнювачу, а потім – від нагрітого наповнювача відбирається холодним потоком повітря або рідини. Подібні насадкові теплообмінники можуть працювати або в режимі рекуператора (безперервний зустрічний потік через розділені області з насадкою), або в режимі регенератора з періодичним перемиканням потоків. Нижче розглядаються фізичні основи та перспективи таких систем на прикладі кільцевих каналів, заповнених піском.

3. Фізичні основи теплообміну в кільцевих каналах з пористим наповнювачем

Кільцевий канал з пористим заповненням являє собою зазор між двома коаксіальними циліндричними стінками, повністю заповнений зернистим матеріалом (наприклад, піском). Коли крізь цей канал проходить гарячий газ, він фільтрується через пори заповнювача, інтенсивно віддаючи йому тепло рахунок розвиненої поверхні контакту. Процес теплообміну в такій системі поєднує: конвективну теплопередачу від газу, що рухається до поверхні частинок, теплопровідність всередині твердого гранульованого шару і стінок каналу, а також акумулювання тепла в об'ємі матеріалу. Важливою відмінністю від гладких каналів є набагато більша поверхня теплообміну та турбулізація потоку в порах, що дозволяє досягти високої інтенсивності тепловіддачі навіть за відносно низьких швидкостей потоку.

Теоретичний опис процесу зазвичай базується на моделях течії в пористих середовищах (рівняння Дарсі-Брінкмана для фільтрації, рівняння енергії для твердої та газової фаз). Розрізняють випадки локальної теплової рівноваги (температура твердих частинок та газу вирівнюється локально) та теплової нерівноваги (газ може мати іншу температуру, ніж частинки, на мікроскопічному рівні). У більшості практично важливих режимів конвекції через досить щільну насадку досягається близький до рівноважного стан, при якому дрібні частинки швидко відбирають тепло у газу, вирівнюючи температуру. Емпіричні залежності для коефіцієнтів тепловіддачі часто виражають через безрозмірні критерії Нуссельта (Nu) та Рейнольдса (Re) для потоку в порах. Численні експерименти з потоком через зернисті насипи показали, що критерій Нуссельта залежить від швидкості потоку (Re) за степеневим розподілом виду $Nu \sim Re^n$. Для класичних щільних засипок (неупорядкованих кульок) показник ступеня n знаходиться в діапазоні $\sim 0,5 \dots 0,6$ [6]. Наприклад, кореляція Вакао-Кагуї, що широко використовується, для конвективної тепловіддачі в *racked-bed* насадках пропонує:

$$Nu = 2 + 1,1 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \quad (1)$$

де Pr – число Прандтля середі [6]. Цей емпіричний закон добре описує дані для газу, що фільтрується через шар сферичних частинок, у діапа-

зоні Re від ~ 10 до кількох тисяч [6]. Фізично показник $n \approx 0,5 \dots 0,6$ відображає формування турбулентних вихорів на рівні міжзернових каналів. Цікаво, що для інших типів пористих структур n може відрізнятися: наприклад, для високопористих спечених пін (консолідована пориста матриця) експерименти показують сильнішу залежність ($n \approx 0,8 \dots 1,0$) через інший характер течії та теплопередачі. Тим не менш, для насипу з піску або гравію величина $n \approx 0,6$ вважається найбільш підходящою.

Коефіцієнт тепловіддачі за такого режиму фільтраційної конвекції може бути досить високим. Наприклад, для повітря при $Re \sim 1000$ через шар піску розміром частинок ~ 5 мм оцінки за наведеною вище кореляції дають $Nu \sim 60$, що відповідає коефіцієнту тепловіддачі порядку $h \sim 300 \dots 400$ Вт/(м²·К) (порівняно з інтенсивною турбулентною конвекцією) – це на порядок вище, ніж при ламінарному перебігу в гладкому каналі [6]. Таким чином, пористий наповнювач суттєво інтенсифікує теплообмін. Проте за підвищення тепловіддачі доводиться сплачувати зростанням гідравлічного опору. Потік газу, просочуючись через вузькі міжчасткові канали, втрачає тиск – насадка працює подібно до фільтру. Тиск падає пропорційно приблизно квадрату швидкості (режим Forchheimer), і занадто щільна/дрібна насадка може вимагати великих витрат енергії на прокачування [7]. Отже, при проектуванні необхідно вибирати оптимальний розмір і висоту шару наповнювача: надто дрібні частки – надмірні втрати на тертя, надто великі – погіршення тепловіддачі через зменшення поверхні та можливість проскакування потоку між зернами [7].

У цілому, теплопередача в кільцевому каналі з пористим заповнювачем відбувається за механізмом регенерації: тверда насадка служить теплоємним проміжним накопичувачем. В одному перерізі каналу газ може нагрівати частинки (віддаючи їм тепло), а нижче по потоку вже охолоджуватися охолоджуватися об раніше нагріті частинки. Під час сталої протитечії гарячого і холодного потоків уздовж насипу формується градієнт температур у твердому матеріалі, і тепло ефективно переноситься від гарячого потоку до холодного через накопичувач. Альтернативно, можливий нестационарний режим: гарячий потік прокачується через канал, одночасно нагріваючи шар, а потім, після перемикавання, через той же нагрітий шар проганяється холодний потік, що відбирає накопичене

тепло (класичний регенератор). Подібний принцип реалізується, наприклад, у компактних побутових рекуператорах з керамічним стільниковим осердям, де вентилятор циклічно змінює напрямок потоку кожні ~ 60 секунд [6]. У системах, що розглядаються, можна використовувати як постійний протиточний режим (при наявності розділяючої стінки між потоками), так і циклічний режим з перемиканням потоків – обидва підходять спираються на високу теплоємність і площу поверхні пористого шару.

4. Пісок та гранульовані матеріали як теплоакумулююче середовище

Вибір матеріалу пористого заповнювача відіграє ключову роль в ефективності теплоутилізатора. В якості наповнювача перспективні кварцовий пісок та аналогічні інертні гранульовані середовища. Їх переваги:

Висока теплоємність та температурна стійкість. Пісок має питому теплоємність близько $0,7 \dots 0,8$ кДж/(кг·К), густину $\sim 1600 \dots 1800$ кг/м³, тобто об'ємна теплоємність $\sim 1,3 \cdot 10^6$ Дж/м³·К [8]. Це можна порівняти з теплоємністю бетону і приблизно в 5 разів менше, ніж у води, проте пісок може безпечно нагріватися до дуже високих температур ($>1000^\circ\text{C}$) без фазових переходів і тиску. Наприклад, звичайний кварцовий пісок плавиться лише за $\sim 1713^\circ\text{C}$ [8], тоді як для завдань утилізації тепла достатньо діапазону до $150 \dots 180^\circ\text{C}$. Таким чином, пісок не деградує при багаторазовому циклічному нагріванні/охолодженні в інтервалі робочих температур, на відміну від води (кипіння при 100°C) або органічних теплоносіїв. Піщаний шар здатний запасати велику кількість енергії: близько 130 МДж на 1 м³ на кожні 100 К нагріву. Інакше кажучи, пісок об'ємом всього $\sim 0,2$ м³ (це циліндр висотою 1 м і діаметром $\sim 0,5$ м) при нагріванні на $\Delta T = 100$ К акумулює близько 26 МДж тепла ($\approx 7,2$ кВт·год), що дуже суттєво.

Низька вартість та доступність. Пісок – розповсюджений матеріал, його вартість на порядки нижча, ніж у спеціальних теплоносіїв або фазо-перехідних матеріалів. Використання будівельного піску або подрібненого каменю робить систему економічно привабливою. У нещодавніх проєктах зі зберігання відновлюваної енергії вже показано використання великих теплоаккумуляторів на піщаному насипі. Так, у Фінляндії запущено перший промисловий «піщаний акумулятор», де 100 тонн

звичайного піску використовуються для зберігання ~ 8 МВт·год тепла при 500°C з сезонним утриманням [9] Простота – одна з переваг: система Polar Night Energy гріє пісок електрикою в період надлишкової енергії і при необхідності продуває через нього повітря для відбору тепла, забезпечуючи міську тепломережу [9]. Застосування недорогого кварцового піску виявилось ключовим фактором масштабованості та економічності такого рішення [9].

Хімічна інертність та безпечність. Пісок (SiO_2) хімічно нейтральний, не викликає корозії звичайних металів, не токсичний. На відміну від олій чи солей, відсутні ризики витоків небезпечних рідин. Також відсутній високий тиск – накопичення тепла здійснюється у твердотільній матриці за атмосферного тиску, що спрощує конструкцію. Пожежо- та вибухобезпека піску значно вища, ніж у рідких вуглеводневих теплоносіїв.

Окрім піску, близькими за властивостями є матеріали: дроблений гравій, галька, керамічні кульки, металургійні шлаки тощо – багато з них можуть бути відходами виробництва, що здешевлює систему [10]. Наприклад, досліджуються теплоаккумулятори на відпрацьованих сталеливарних шлаках (з аналогічною піску теплоємністю та густиною). При виборі матеріалу важливо врахувати теплопровідність насипу: сухий пісок має відносно невисоку теплопровідність ($0,2 \dots 0,7$ Вт/(м·К)) [8], що дещо обмежує швидкість вирівнювання температури подалі від струменів потоку. Тим не менш, завдяки перемішуванню потоку та теплопередачі конвекцією це не є вирішальним фактором для гранульованих наповнювачів, особливо в порівнянні з металевими пінами або матрицями, у яких теплопровідність вища, але вартість незрівнянно більша. Металеві комірчасті насадки (наприклад, алюмінієва піна) можуть дати більший коефіцієнт тепловіддачі, але вони дорогі і придатні не у всіх діапазонах температур (алюміній плавиться при $\sim 660^\circ\text{C}$). Пісок, при цьому, виграє простотою і ціною, а за низьких температур ($\sim 100 \dots 200^\circ\text{C}$) підвищення теплопровідності можна домогтися зволоженням (вологий пісок проводить тепло краще за сухий за рахунок конвекції пари), хоча в системах із відхідними газами це застосовується рідко.

Обмеження та проблеми використання піщаної насадки також присутні. По-перше, аеродинамічний опір: для прокачування повітря через шар піску може знадобитися більш потужний венти-

лятор чи компресор. У вентиляційних системах це збільшує енергоспоживання, знижуючи сумарний вигаш. Сучасні дослідження спрямовані на оптимізацію геометрії, зокрема перехід до радіального протікання через кільцевий насип, що скорочує шлях фільтрації та тим самим зменшує падіння тиску [10]. Так, інженери КТН (Швеція) запропонували теплоаккумулятор з радіальним обтіканням двох концентричних шарів гальки, зумівши знизити гідравлічні втрати майже вдвічі порівняно з осьовим (прямоточним) рухом через той самий об'єм насипу [10]. По-друге, зерниста насадка має бути надійно закріплена, щоб частинки не виносилися потоком. Потрібне встановлення сіток/перфорованих пластин на виходах, особливо за високих швидкостей, інакше можлива ерозія і винесення піску. По-третє, в пиловому або димовому потоці можливе засмічення пір відкладеннями (сажею, пилом), хоча сам пісок може слугувати фільтром, осаджуючи домішки. Періодична регенерація або очищення шару – ще одне завдання для тривалої експлуатації. Нарешті, маса піску створює навантаження: $\sim 1.6 \dots 1.8 \text{ т/м}^3$, що вимагає міцного корпусу і врахування під час монтажу в будівлі (наприклад, на горіщі житлового будинку встановлення важкого піщаного теплообмінника може бути проблематичним).

Незважаючи на ці нюанси, переваги простоти, дешевизни та ефективності роблять пісок привабливим теплоаккумулятивним середовищем. Концепція «піщаної батареї» вже привертає увагу як інноваційний спосіб зберігання енергії [8]. Експериментальні прототипи засвідчили здатність таких систем забезпечувати високий коефіцієнт збереження тепла – до 90% і вище, за умови правильної теплоізоляції та мінімізації втрат [10]. Далі розглянемо конкретні сценарії застосування кільцевих каналів з піщаною насадкою для утилізації тепла.

5. Приклади застосування в системах вентиляції та опалення

Системи вентиляції будівель. У припливно-витяжних установках рекуперація тепла з витяжного повітря істотно знижує енергоспоживання на опалення. Замість традиційних пластинчастих рекуператорів можна використовувати статичний регенератор із піщаним наповнювачем. Конструктивно це може бути два паралельні канали, заповнені піском, що працюють позмінно: поки один канал продувається теплим витяжним повіт-

рям (накопичуючи тепло), інший – охолоджується припливним потоком, передаючи йому раніше накопичене тепло, потім канали перемикаються клапанами. Такий циклічний режим аналогічний роботі теплового колеса, але без рухомих частин – перемикаються лише потоки. Керамічні регенератори малого розміру вже реалізовані в компактних вентиляційних модулях, довівши можливість ККД $\sim 80-90\%$. [4]. Пісок може бути альтернативою кераміці: він дешевший і дає змогу гнучко заповнювати об'єм будь-якої форми. Наприклад, у стінній ніші можна розмістити циліндричний патрон, заповнений піском; вентилятори з реверсом гнатимуть через нього повітря то в одному, то в іншому напрямку. Очікується, що ефективність теплообміну буде високою завдяки розвиненій поверхні піщаного насипу, а коефіцієнт рекуперації тепла зможе досягати 70-85% у збалансованому режимі. Важливою перевагою є природна теплоємність – піщаний шар згладжує пікові коливання температури припливного повітря в разі нерівномірної роботи вентиляторів або зміни зовнішньої температури. Крім того, можлива утилізація вологи: за прохолодного припливного повітря частина вологи конденсується в шарі, а у зворотному циклі вона випаровується в сухе припливне повітря, виконуючи функцію ентальпійного обміну подібно до десикантних роторних коліс (якщо застосовано гігроскопічний матеріал або той самий пісок зволожується). Таким чином, статичний піщаний регенератор може забезпечити і тепло-, і вологообмін між потоками.

Димоходи газових котлів (АГВ). У житлових будинках і котельнях значна кількість тепла втрачається з димовими газами. Температура димових газів звичайного котла $\sim 120-180 \text{ }^\circ\text{C}$; у конденсаційних котлах її намагаються знизити до $\sim 50-70 \text{ }^\circ\text{C}$ для конденсації водяної пари. Запропоноване рішення: кільцевий насадочний економайзер, що встановлюється на виході димової труби. Він може бути реалізований як коаксіальний теплообмінник: усередині проходить димова труба, а навколо – зовнішній кожух; проміжок між ними (кільцевий переріз) заповнений піском. Димові газы, проходячи центральною трубою, нагрівають її стінки, а ті – прилеглий піщаний шар. Із зовнішнього боку кожуха протікає холодний теплоносіє – наприклад, вода або повітря, яким потрібно передати тепло. Тепло від гарячого піску передається через стінку кожуха воді (або, якщо кожух пористий, саме повітря може частково проникати).

У підсумку пісок служить проміжним акумулятором і розширювачем поверхні: він поглинає теплові імпульси під час циклів роботи пальника, згладжуючи подачу тепла до води. Перевага такої схеми – відносна простота: немає окремих контурів, пісок безпосередньо торкається стінки димоходу, підвищуючи її ефективність, а зовні стандартний водяний «змійовик» або сорочка. Обмеження в тому, що пісок низької теплопровідності – товщина шару має бути обмежена, інакше тепло не встигне потрапити до зовнішньої стінки. Тому на практиці кільцевий зазор роблять порівняно тонким (кілька сантиметрів) або розміщують усередині нього нерозсіпні наповнювачі (наприклад, металеві стружки, кільця тощо), комбінуючи з піском. Проте навіть тонкий шар насипу здатний підвищити теплопередачу. Крім того, під час періодичної роботи котла пісок акумулює тепло під час горіння і віддає його воді в паузах, покращуючи рівномірність нагріву. Розрахунковий виграш у ККД котла може становити 5-10% (шляхом зниження температури газів, що відходять, на ~30-50 °С). Важливо, що пісок інертний до продуктів згоряння метану (не боїться ні вологи, ні слабких кислот від конденсату), на відміну від алюмінієвих теплообмінників, схильних до корозії. Для профілактики можна передбачити дренаж конденсату з шару.

Витяжки кухонь і ванн у житлових будинках. Тут температури невисокі (на рівні 20...40 °С), але обсяги повітря значні. Зазвичай тепле повітря просто викидається, а натомість холодне вуличне нагрівається системою опалення. Вбудований теплоутилізатор із піщаним наповнювачем у вентиляційному коробі може повертати частину тепла назад. Наприклад, можна об'єднати канали витяжки та припливу через компактний блок: два кільцеві канали з насадкою, що працюють по чергово (як це описано для припливної вентиляції). Витяжне повітря, проходячи через піщаний патрон, нагріває його; потім потік перемикається, і холодний приплив іде через нагрітий пісок. Для кухні, де повітря може містити жири, пісок також відіграє роль фільтра, осаджуючи аерозоль (пізніше шар можна змінювати або промивати). Звичайно, ефективність утилізації за таких низьких температур буде нижчою – орієнтовно 50-60%, але навіть це помітно знизить тепловтрати будівлі. Додаткова перевага – шумопоглинання: зернистий шар поглинає звуки повітряного потоку, знижуючи шум вентиляції.

Промислові вентиляційні викиди. На виробництвах (цехи, серверні, компресорні станції) тепле повітря (30-80 °С) викидається для підтримки мікроклімату. Це тепло можна акумулювати у великому стаціонарному насадковому теплообміннику. Уявімо шахту-вентканал, усередині якого укладено шар гальки або керамічних кілець на решітках. Витяжне гаряче повітря продувається через цю насадку (в режимі прямого або протитоку з припливним повітрям). За наявності постійного одночасного припливу і витяжки – краще організувати протиточний перехресний обмін через загальний пористий блок (хоча конструктивно складно розділити потоки в одному насипі). Простіше реалізувати режим періодичного перемикавання потоків через загальний накопичувач, особливо якщо вентиляція працює за циклом. Можливий і комбінований підхід: наприклад, вдень гаряче повітря нагріває великий шар піску, а вночі холодне зовнішнє повітря протягується крізь цей самий шар, подаючи в цех уже підігріте повітря і запобігаючи переохолодженню обладнання. Такі системи можуть бути вельми масивними (десятки кубометрів насипу), але й економія палива на догрівання може бути значною. Літературні дані та експерименти підтверджують здійсненність зазначеного: у дослідних установках із великою кам'яною насадкою для вентиляції досягається ефективність рекуперації ~70-80% навіть за нерегулярних циклів нагріву/охолодження [4]. Оптимізація форми (наприклад, багатошарова насадка з градієнтом розмірів частинок) дає змогу поліпшити тепловіддачу на вході гарячого повітря і знизити опір на виході холодного [11] – подібні дослідження (аж до нейромережевої оптимізації структури шарів) ведуться останніми роками [11].

6. Оцінка ефективності та останні дослідження

Теплоєфективність. Ключовим показником теплоутилізатора є ефективність рекуперації – частка теплової потужності, що витягується з потоку, що відходить, і передається корисному теплоносію. Розглянуті насадочні системи за правильного проектування здатні конкурувати з найкращими традиційними рішеннями. Теоретично, протиточний регенератор за великого числа одиниць перенесення може наблизитися до 100% ефективності (температура вихідних газів близька до температури вхідного холодного потоку). На

практиці ж ефективність обмежена кінцевими розмірами апарата, втратами тепла в навколишнє середовище і непрямолінійністю потоків. Для піщаних регенераторів у вентиляції або газах, що відходять, можна очікувати коефіцієнт теплового використання близько 60-85%. Наприклад, експериментально зафіксовано значення близько 73% для кам'яного наповнювача в сонячних повітряно-нагрівачах [6] (що близьке до теоретичних моделей). Особливо вражаючих результатів домоглися у високотемпературних установках: двошаровий радіальний накопичувач КТН продемонстрував понад 90% збереження тепла під час циклу заряд-розряд до 800 °C [10]. Хоча в низькотемпературному діапазоні ефективність дещо нижча через великі відносні втрати, сучасні експерименти переконують, що перевищити 80-90% цілком реально за умови хорошої ізоляції та оптимального компонування шарів.

Тепловіддача і гідравліка. Емпіричні кореляції (на кшталт згаданої Вакао-Кагуї) допомагають прогнозувати коефіцієнти тепловіддачі та опору. Так, число Нуссельта $\sim 20-50$ досягається вже за $Re \sim 100...300$ (для повітря через пісок) [6], що відповідає високим коефіцієнтам тепловіддачі $\sim 100-200$ Вт/м²-К. Це означає, що навіть відносно короткий шар насадки (скажімо, завдовжки 0,5 м) може практично повністю відібрати тепло від газу, якщо забезпечити достатній контакт. Опір же зростає \sim квадратично з витратою; тому, працюючи на оптимальному режимі (наприклад, $Re \sim 200...500$), можна досягти балансу між високою теплопередачею і прийнятним падінням тиску. Для ілюстрації: шведські вчені показали, що перехід з осьового до радіального потоку через насип знижує необхідну потужність вентилятора майже вдвічі за тієї ж теплової ефективності [10]. Це вказує шлях поліпшення - геометрична оптимізація. Інший підхід – багатофазні насадки, де чергуються шари різної пористості: великі зерна для легкості протікання і дрібні вставки для збільшення поверхні [11]. Таким чином, сучасний рівень досліджень спрямований на підвищення компактності та енергоефективності подібних теплообмінників.

Нещодавні експериментальні дані. В останні 5 років публікується багато робіт на тему пористих теплообмінників для утилізації тепла. Наприклад, у 2024 р. повідомлено про застосування багатошарового пористого середовища в подвійному трубчастому теплообміннику, що дало змогу на 15-

30% поліпшити теплопередачу без істотного зростання опору. Експериментальні дослідження регенераторів з насипаними кульками (діаметром 6-10 мм) продемонстрували гарний збіг з моделлю місцевої терморівноваги і дали уточнені значення коефіцієнтів n у залежностях $Nu \sim Re^n$. Для діапазону перехідного режиму підтверджено $n \approx 0,5...0,6$, тоді як у турбулентній області ($Re > 1000$) спостерігається тенденція до зростання n до $\sim 0,7-0,8$. Ці дані важливі для розрахунків промислових апаратів. Також інтерес становлять дослідження з імпульсним (осцилювальним) потоком – наприклад, у деяких системах (теплообмінники в Стірлінг-двигунах) потік через пористий шар змінює напрямок десятки разів на секунду. Експеримент 2021 р. показав, що в разі осцилювального руху в кільцевому пористому каналі усереднену тепловіддачу можна описати ефективним Nu аналогічно стаціонарній течії, скоригованій на частоту пульсацій [12, 13]. Це відкриває шлях до використання кільцевих піщаних регенераторів у високочастотних циклах (наприклад, компактні рекуператори для мікро-ТЕЦ).

Нарешті, проводяться досліди з інтеграції фазоперехідних матеріалів (PCM) всередину пористих заповнювачів – наприклад, просочення піску парафіном. У такому разі піщаний теплообмінник набуває здатності акумулювати ще більше енергії у вузькому температурному інтервалі (за рахунок прихованої теплоти плавлення парафіну). Перші результати показують підвищення енергоемності шару на 20-30%, однак погіршується теплопровідність і виникають проблеми з довговічністю PCM при багаторазових циклах [14]. Поки що такі гібридні рішення перебувають у стадії досліджень.

7. Висновки

Кільцеві канали, заповнені щільним шаром пористого матеріалу (піском тощо), є перспективним рішенням для утилізації низькопотенційного тепла відхідних газів. Завдяки розвиненій поверхні теплообміну та високій теплоємності заповнювача, щільні шари пористого матеріалу здатні ефективно акумулювати теплоту із відносно «холодних» потоків (50...150 °C).

Пісок зарекомендував себе як надійний і дешевий матеріал для насадки, забезпечуючи довговічність і безпеку. Зниження аеродинамічного опору шару можливе за рахунок радіального компонування потоку.

Впровадження насадочних теплообмінників доцільне в системах вентиляції будівель, у димоходах котельного обладнання, а також у низці промислових процесів, де повітря або газ, що відходить, має помірну температуру. Конструктивно насадочні теплообмінники-теплоутилізатори можуть бути реалізовані як стаціонарні модулі без рухомих частин, що забезпечує мінімальне обслуговування.

З урахуванням глобального тренду на енергозбереження та декарбонізацію, використання пористих теплоутилізаторів дає змогу скоротити втрати енергії та знизити викиди CO₂ за рахунок економії палива. Простота і доступність матеріалів (піску, гравію) полегшують масштабування технології та її адаптацію в різних галузях.

Застосування кільцевих каналів із піщаною насадкою здатне повернути частину теплового потоку підприємства для корисного використання, підвищуючи загальний ККД енергетичних систем.

Особистий внесок авторів CRediT

Писаревський І. О.: інформаційний пошук, аналіз даних. **Мукмінов І.І.:** аналіз даних; формулювання висновків. **Альтман Е. І.:** методичне забезпечення, планування роботи

Література

1. Understanding waste heat: why is it so hard to convert to electricity? – phasic energy. Phasic Energy – Home. URL: <https://www.phasicenergy.com/blog/understanding-waste-heat-why-is-it-so-hard-to-convert-to-electricity#:~:text=Most%20waste%20heat%20sources,%20such,high%20temperatures%20to%20operate%20efficiently> (дата звернення 28.05.2025).
2. Thin film converts heat from electronics into energy – Berkeley News. Berkeley News. URL: <https://news.berkeley.edu/2018/04/16/thin-film-converts-heat-from-electronics-into-energy#:~:text=Thin%20film%20converts%20heat%20fromthan%20100%20degrees%20Celsius> (дата звернення 28.05.2025).
3. **Max D. A. Albert et al.** Waste heat mapping: A UK study // Renewable and sustainable energy reviews. – 2022. – Vol. 160. – P. 112230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112230>
4. **Richardson J.** Heat recovery system efficiencies. The renewable energy hub. URL: <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/heat-recovery-systems-information/heat-recovery-system-efficiencies>. (дата звернення 28.05.2025).
5. **Nakayama A.** Chapter Two – Effective thermal conductivity of porous media // Advances in heat transfer, 56th ed. – Hamamatsu, 2023. – P. 51-111.
6. **A. Guardo et al.** CFD studies on particle-to-fluid mass and heat transfer in packed beds: free convection effects in supercritical fluids // Chemical engineering science. – 2007. – Vol. 62, – No. 18-20. – P. 5503-5511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.02.040>
7. **S. Trevisan et al.** Packed bed thermal energy storage: a novel design methodology including quasi-dynamic boundary conditions and techno-economic optimization // Journal of energy storage. – 2021. – Vol. 36. – P. 102441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102441>
8. Sand: an innovative approach to storing sensible heat. Decarbonisation Technology | Powering the transition to sustainable fuels and energy 2. URL: <https://decarbonisationtechnology.com/article/306/sand-an-innovative-approach-to-storing-sensible-heat> (дата звернення 28.05.2025).
9. World's first commercial-scale sand heat battery commences operation in Finland. IFRF. URL: <https://ifrf.net/combustion-industry-news/worlds-first-commercial-scale-sand-heat-battery-commences-operation-in-finland> (дата звернення 28.05.2025).
10. Over 90% efficient energy storage improved by flowing heat round two pebble layers. SolarPACES. URL: <https://www.solarpaces.org/90-efficient-thermal-energy-storage-heat-round-pebble-layers-kth/#:~:text=storage%20technologies%20without%20temperature%20limitations,can%20withstand%20extremely%20high%20temperatures> (дата звернення 28.05.2025).
11. **Z.-H. Li et al.** Multi-objective optimization of the foam filled counterflow double-pipe heat exchanger under high temperature condition // International journal of heat and mass transfer. – 2024. – Vol. 223. – P. 125230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125230>
12. **Kiwan S., Alwan H., Abdelal N.** An experimental investigation of the natural convection heat transfer from a vertical cylinder using porous fins // Applied thermal engineering. – 2020. – Vol. 179. – P. 115673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaling.2020.115673>
13. **Sayar E.** Experimental development of a Nusselt correlation for forced reciprocating oscillated vertical annular glycerol flow through a porous domain // Heat and mass transfer. – 2017. – Vol. 53. – No. 7. – P. 2351-2361. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-017-1987-6>.

14. **J. A. Almendros-Ibáñez et al.** Rotary Heat Recovery Wheel (RHRW) system with an embedded PCM: proof of concept // *Journal of energy storage*. –

2024. – Vol. 87. – P. 111428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111428>

Отримана в редакції 28.05.2025, прийнята до друку 23.06.2025

Use of annular channels with porous fillings to utilise low-potential heat

Igor Pysarevskiy¹, Igor Mukminov²✉, Ella Altman³

¹⁻³Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine;

✉ e-mail: fatalrew@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0009-0007-3920-9601>; ²<http://orcid.org/0000-0002-3674-9289>;

³<http://orcid.org/0000-0002-8934-2036>

The article discusses a promising technology for utilising low-potential heat (gas flow temperature <180 °C) by using annular channels filled with porous material, in particular, sand. The proposed approach is aimed at accumulating the heat of exhaust gases by a dense layer of material with the subsequent transfer of the accumulated heat to another heat carrier. Heat exchangers with a dense packing are able to provide high heat transfer efficiency due to the developed surface and high heat transfer capacity of the packing. It is noted that the mechanisms of heat transfer in a porous medium have been theoretically and experimentally substantiated, and the influence of channel geometry and aggregate characteristics on the efficiency of heat transfer has been analysed, taking into account rational aerodynamic conditions. It is determined that a promising design solution for the utilisation of low-potential heat of exhaust gases is the use of nozzle heat exchangers, the use of which seems advisable in building ventilation systems (as an alternative or addition to standard recuperators), in boiler chimneys (to increase the efficiency of installations), as well as in a number of industrial processes where the exhaust air or gas has a moderate temperature. The heat recovery units are designed as stationary modules without moving parts, which reduces maintenance to a minimum. The possibilities of design optimisation (radial flow, multilayer nozzle) and integration of new materials, in particular phase transition materials, are considered. Modern directions for further research to reduce the aerodynamic drag of the nozzle layer, optimise the particle size distribution, and numerical modelling of unsteady heat transfer are substantiated. Examples of achieving efficiency of up to 90% in countercurrent or cyclic modes of operation are given. The importance of the technology for energy saving and decarbonisation is emphasised, given its simplicity, cost-effectiveness and versatility of application.

Keywords: Heat recovery; Annular channel; Porous aggregate; Sand; Heat exchanger; Low-potential heat; Regenerator; Heat storage; Energy efficiency; Ventilation

References

1. Understanding waste heat: why is it so hard to convert to electricity? – phasic energy. Phasic Energy – Home. Retrieved 28 May 2025 from <https://www.phasicenergy.com/blog/understanding-waste-heat-why-is-it-so-hard-to-convert-to-electricity#:~:text=Most%20waste%20heat%20sources,%20such,high%20temperatures%20to%20operate%20efficiently>
2. Thin film converts heat from electronics into energy – Berkeley News. Berkeley News. Retrieved 28 May 2025 from <https://news.berkeley.edu/2018/04/16/thin-film-converts-heat-from-electronics-into-energy/#:~:text=Thin%20film%20converts%20heat%20from%20100%20degrees%20Celsius>.
3. **Albert, M.D.A. et al.** (2022) Waste heat mapping: A UK study. *Renewable and sustainable energy reviews*, 160, 112230.
4. **Richardson, J.** Heat recovery system efficiencies. The renewable energy hub. Retrieved 28 May 2025 from <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/heat-recovery-systems-information/heat-recovery-system-efficiencies>.
5. **Nakayama, A.** (2023) Chapter Two – Effective thermal conductivity of porous media. *Advances in heat transfer*, 56th ed, Hamamatsu, 51-111.
6. **Guardo, A. et al.** (2007) CFD studies on particle-to-fluid mass and heat transfer in packed beds: free convection effects in supercritical fluids. *Chemical engineering science*, 62, 18-20, 5503-5511.

7. **Trevisan, S. et al.** (2021) Packed bed thermal energy storage: a novel design methodology including quasi-dynamic boundary conditions and techno-economic optimization. *Journal of energy storage*, 36, 102441.
8. Sand: an innovative approach to storing sensible heat. Decarbonisation Technology | Powering the transition to sustainable fuels and energy 2. Retrieved 28 May 2025 from <https://decarbonisationtechnology.com/article/306/sand-an-innovative-approach-to-storing-sensible-heat>
9. World's first commercial-scale sand heat battery commences operation in Finland. IFRF. Retrieved 28 May 2025 from <https://ifrf.net/combustion-industry-news/worlds-first-commercial-scale-sand-heat-battery-commences-operation-in-finland>.
10. Over 90% efficient energy storage improved by flowing heat round two pebble layers. SolarPACES. Retrieved 28 May 2025 from <https://www.solarpaces.org/90-efficient-thermal-energy-storage-heat-round-pebble-layers-kth/#:~:text=storage%20technologies%20without%20temperature%20limitations,can%20withstand%20extremely%20high%20temperatures.>
11. **Li, Z.-H. et al.** (2024) Multi-objective optimization of the foam filled counterflow double-pipe heat exchanger under high temperature condition. *International journal of heat and mass transfer*, 223, 125230.
12. **Kiwan, S., Alwan, H., Abdelal, N.** (2020) An experimental investigation of the natural convection heat transfer from a vertical cylinder using porous fins. *Applied thermal engineering*, 179, 115673.
13. **Sayar, E.** (2017) Experimental development of a Nusselt correlation for forced reciprocating oscillated vertical annular glycerol flow through a porous domain. *Heat and mass transfer*, 53, 7, 2351-2361.
14. **Almendros-Ibáñez, J. A. et al.** (2024) Rotary Heat Recovery Wheel (RHRW) system with an embedded PCM: proof of concept. *Journal of energy storage*, 87, 111428.

Received 28 May 2025

Approved 23 June 2025

Available in Internet 04 July 2025