

І. Л. Бошкова, І. І. Мукмінов, А. В. Арику

**ТЕПЛООБМІН В ЩІЛЬНОМУ ШАРІ
ГРАНУЛЬОВАНОГО МАТЕРІАЛУ
З НАСКРІЗНИМ ГАЗОВИМ ПОТОКОМ**

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА



Одеса-2024

І. Л. Бошкова, І. І. Мукмінов, А. В. Арику

**ТЕПЛООБМІН В ЩІЛЬНОМУ ШАРІ ГРАНУЛЬОВАНОГО
МАТЕРІАЛУ З НАСКРІЗНИМ ГАЗОВИМ ПОТОКОМ.
ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА**

Одеса 2024

536
536.2

УДК 536.2-4; 620.2

Т 34

Рецензенти:

д.т.н. проф. Петраш Віталій Дем'янович, Одеська державна академія будівництва та архітектури, кафедра теплогазопостачання і вентиляції;

д.т.н. проф. Клімчук Олександр Андрійович, каф. теплових електростанцій та енергозберігаючих технологій національного університету «Одеська політехніка»;

д.т.н. проф. Семенюк Юрій Володимирович, завідувач каф. екоенергетики, термодинаміки та прикладної екології Одеського національного технологічного університету.

Рекомендовано вченою радою

Одеського національного технологічного університету

від 08.11.2024 протокол № 5

Т 34 **Теплообмін** в щільному шарі гранульованого матеріалу з наскрізнимгазовим потоком. Теорія і практика [Монографія]. Бошкова І. Л., Мукмінов І. І., Арику А. В., – Одеса: Бондаренко М. О., 2024. – 160 с.
ISBN 978-617-8511-19-7

Монографія присвячена процесам перенесення теплоти в рухомих та нерухомих щільних шарах гранульованих (дисперсних) матеріалів. Основний інтерес роботи відноситься до технології накопичення явній енергії щільним шаром часток різного походження. Наведені дані щодо ефективності застосування теплоутилізаторів низькотемпературної теплоти із гранульованою насадкою, принципові схеми акумуляції теплової енергії з щільною насадкою, результати сучасних експериментальних та теоретичних досліджень Обговорюються конструктивні рішення теплоутилізаторів промислового призначення. Описано оригінальні методи та стенди для визначення коефіцієнтів міжкомпонентного теплообміну поверхні часток з наскрізним газовим потоком, а також емпіричні дані по структурі та аеродинамічному опору щільного шару. Наведені результати математичного моделювання теплообміну між наскрізним газовим потоком та щільним шаром часток. Представлені залежності для розрахунків локальних температур рухомого газового і рухомого твердого компонентів для як для протитечії, так і для прямотечії, а також аналітична залежність для розрахунку локальної надлишкової температури при нестационарному нагріванні шару часток в теплообмінному каналі наскрізним потоком газу. Наведені результати експериментального дослідження ґрунтового регенератора та алгоритм розрахунку регенератора – теплоутилізатора. Дослідження спрямовані на створення теоретико-практичних умов ефективного використання щільного шару гранульованого матеріалу в якості насадки в складі регенеративних теплообмінних апаратів для акумулювання в явній формі низькотемпературної теплоти.

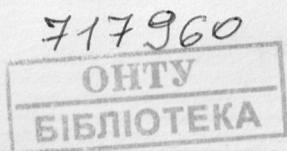
УДК 536.2-4; 620.2

ISBN 978-617-8511-19-7

© Бошкова І. Л., Мукмінов І. І.,

Арику А. В.

© Одеський національний технологічний університет.



ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	6
Передмова	8
1. ГРАНУЛЬОВАНІ МАТЕРІАЛИ В ТЕОРІЇ І ПРАКТИЦІ УТИЛІЗАЦІЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕПЛОТИ	11
1.1. Доцільність застосування теплоутилізаторів низькотемпературної теплоти із гранульованою насадкою	11
1.2. Вивчення основних технологій накопичення енергії	14
1.3 Акумулятори термічних технологій накопичення енергії	16
1.3.1. Акумулятори ємкісного типу – загальні відомості	16
1.3.2. Акумулятори, засновані на фазовому переході – загальні відомості	19
1.3.3. Акумуляція теплової енергії в скельних породах та ґрунтах	20
1.4. Класифікація вторинних енергетичних ресурсів	22
1.5. Основні джерела скидної теплової енергії на підприємствах	24
1.6. Конструктивні рішення для теплоутилізаторів промислового призначення	26
1.6.1. Основні типи теплообмінних апаратів для утилізації ВЕР	26
1.6.2. Використання теплоти продуктів згорання в сушарках	29
1.7. Використання теплоти продуктів згорання в харчовій промисловості	30
1.8. Методи аналізу ефективності використання теплоти теплонавантажених промислових підприємств	31
1.9. Використання регенеративних теплообмінників з рухомих щільним шаром, що продувається газовим потоком	32
1.10. Особливості руху щільного шару гранульованих матеріалів	33
1.10.1. Відомості про механізм вільного руху в каналі	33
1.10.2. Вплив розміру і форми частинок на характер витікання	36
1.11. Теоретико-експериментальне дослідження процесів теплопереносу в щільному шарі гранульованого матеріалу	38

1.1.1.1. Взаємопов'язаний тепломасоперенос між наскрізним газовим потоком і щільним шаром	38
1.1.1.2. Дослідження теплообміну між газом і твердими частками	41
2. АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОБМІНУ МІЖ НАСКРІЗНИМ ГАЗОВИМ ПОТОКОМ ТА ЩІЛЬНИМ ШАРОМ ЧАСТОК	44
2.1. Теоретичні підходи до моделювання процесу теплообміну між потоками газу та твердими частками	44
2.2. Математичний опис процесу теплообміну між рухомими потоками газу та гранульованим матеріалом	45
2.3. Зіставлення розрахункових та експериментальних даних	55
2.4. Математична модель теплопровідності при нестационарному нагріванні (охолодженні) наскрізним газовим потоком	60
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОБМІНУ НАСКРІЗНОГО ПОТОКУ ГАЗУ З ЩІЛЬНИМИ ШАРОМ ГРАНУЛЬОВАНОЇ НАСАДКИ	76
3.1. Мета і завдання експериментальних досліджень	76
3.2. Вивчення характеристик матеріалів для гранульованих насадок	77
3.3. Оцінка основних геометричних характеристик шару і частинок	79
3.4. Схема експериментальної установки	82
3.5. Методика експериментальних досліджень	83
3.6. Вивчення теплообміну щільного шару гранульованого матеріалу і повітряного середовища	84
3.6.1. Дослідження теплообміну нерухомого щільного шару гранульованого матеріалу при його нагріванні потоком повітря	84
3.6.2. Дослідження теплообміну рухомого щільного шару гранульованого матеріалу з наскрізним потоком повітря	93
3.7. Порівняльна характеристика інтенсивності теплообміну в рухомому і нерухомому шарі	105

3.8. Оцінка впливу розміру часток гранульованого матеріалу на інтенсивність теплообміну	107
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІЛОТНОЇ УСТАНОВКИ ҐРУНТОВОГО РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛОБМІННИКА	111
4.1. Мета дослідження	111
4.1.2. Конструкція пілотної установки та методика проведення досліджень	121
4.3. Моделювання процесу нагрівання щільного шару часток в теплообмінному каналі в системі Ansys Discovery 2021 R2	122
4.4. Дослідження аеродинамічного опору нерухомого щільного шару щєбня	124
4.5. Аналітичні основи визначення аеродинамічного опору шару часток с наскрізним газовим потоком	125
4.6. Результати експериментальних досліджень теплообміну між наскрізним потоком повітря та гранульованою насадкою	126
5. КОНСТРУЮВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ҐРУНТОВОГО РЕГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ТЕПЛИЦЬ	132
5.1. Ґрунтовий регенератор для теплиць	132
5.2. Теплова схема роботи ґрунтового регенератора у складі теплиці та методика теплового конструкторського розрахунку	136
5.2.1. Аналіз роботи ґрунтового регенератора в складі теплиці	136
5.2.2 Алгоритм розрахунку ґрунтового регенератора	142
Перелік літературних посилань	148

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

α_m – коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну, Вт/(м²·к);

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

c – питома теплоємність, Дж/(кг·к)

f – площа поверхні, м²;

m – маса матеріалу, кг;

t – температура, °С;

T – температура, К;

v – об'єм, м³;

w – швидкість, м/с;

β – об'ємна концентрація часток;

δ – товщина шару, м;

ε – порозність;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·к);

τ – час, с;

η – коефіцієнт корисної дії;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с;

ρ – щільність, кг/м³;

x – координата, м;

d – діаметр, м;

Q – тепловий потік, Вт;

S – площа перетину, м²;

G – витрати кг/с;

q – питома потужність, Вт/м³;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;

ϕ – коефіцієнт відхилення форми часток;

r – радіус, м;

l – висота, м;

w – водяні еквіваленти, Вт/к

скорочення

Bi – число био;

Fo – число Фур'є;

Nu – число Нуссельта;

Pe – число Пекле;

Ra – число Релея

Fr – критерій Фруда;

Fr – число Архімеда;

індекси

п – повітря,

конв – конвективний;

н – насадка;

пов – поверхня;

ш – шар,

т – твердий,

м – матеріал;

пит – питома;

0 – початкове значення;

с – еквівалентний;

г – газ;

гідр.ст. – гідродинамічна стабілізація;

вит – витрати;

прир.к. – природна конвекція;

тр – труба;

н.с. – навколишнє середовище.

ПЕРЕДМОВА

Кроком до стійкого розвитку країни є рішення питань енергозбереження. З цією проблемою суспільство стикається постійно та важливість даного питання зростає через зростання потреб в енергетичних системах, що пов'язано з розвитком технологій, технічних та електричних приладів, та удосконалення вимог щодо охорони навколишнього середовища. У ряді випадків знизити енерговитрати можливо з використанням технологій накопичення теплової енергії, що також дає можливість створення більш універсальної, стійкої та надійної теплоенергетичної системи. Відомо, що значну частину теплових втрат в енергетичних та теплотехнічних установках складає теплота відхідних газів, утилізація якої здатна підвищити ефективність підприємств. На сьогодні акумуляція енергії важливіша, ніж будь-коли. Серед сучасних технологій накопичення теплової енергії (ТНТЕ) слід приділити увагу розвитку явній теплової технології, за якою використовується теплоємність акумулюючого матеріалу, тобто акумулятори ємкісного типу. Подібні теплові акумулятори приваблюють простотою своєї конструкції, зазвичай, низькою вартістю матеріалу та ефективністю акумулювання. На даний час відомі акумулятори у вигляді пісочної батареї (Фінляндія, Гельсінкі), що зберігає 8 МВт-год теплової енергії, акумулятор зі щільного шару кам'яних матеріалів заявленою потужністю 36 МВт-год (Hamburg-Altenwerde, Німеччина), а також є приклади систем кавернозних ТНТЕ, що побудовані та використовуються в якості теплових сховищ для централізованого тепlopостачання (Фінляндія, Швеція, Голандія та ін.). Можна стверджувати: за тепловими акумуляторами різного призначення та різних потужностей – велике майбутнє. Слід виокремити область використання гранульованих матеріалів в промислових регенераторах, які поділяються на регенератори з рухомим та нерухомим шаром матеріалу, та зазначити, що актуальним є використання регенераторів з гранульованими насадками для утилізації

теплоти газових потоків з відносно низьким (від 40 °С до 150 °С) рівнем температур. Складність їх правильного проектування та оптимізації є однією з причин, через яку ці пристрої не набули широкого поширення. Питанням теплообміну та гідравліки в у дисперсних наскрізних потоках приділялась значна увага в дослідженнях, що проводились дослідницькими групами за керівництвом З. Р. Горбіс, В. О. Календер'ян, що виконувались в Одеському технологічному інституті холодильної промисловості (нині ОНТУ), на даний час в інституті технічної теплофізики НАН України продовжуються роботи з оптимізації теплоутилізаційних систем енергетичних установок під керівництвом проф. Фіалко Н.М. сумісно з Степановою А. І., Навродською Р.А. Дослідження процесів перенесення теплоти та маси в щільних шарах гранульованих матеріалів необхідне для отримання залежностей та розрахункових рекомендацій, що можуть бути використані як основи для розробки ряду теплообмінних пристроїв технологічних апаратів та систем ефективного використання теплоти.

На підставі аналітичних і експериментальних досліджень визначені особливості процесу теплообміну між гранульованою насадкою та наскрізним потоком газового (повітряного) середовища. Областю можливого застосування результатів досліджень є промислові підприємства з низькопотенційними тепловими викидами. Як результат розв'язку двокомпонентної математичної моделі, отримані аналітичні залежності для розрахунків температур газового та твердого компонентів за прямої схеми руху та протічії. Залежності дозволяють оцінити розрахунковим шляхом вплив різних факторів, таких як фізичні властивості газу та твердих часток, швидкість потоків, порозність шару, на ефективність теплообміну між потоками. Розрахункові дані пропонується використовувати при пошуку оптимальних режимних параметрів. У якості гранульованого матеріалу застосовується керамзит і гравій. Проведені експериментальні дослідження теплообміну між щільним шаром гранульованого матеріалу і потоком нагрітого повітря. Установлені умови підвищення ефективності роботи

теплоутилизатора. Хід температурних кривих для газового потоку та твердого компоненту на вході і виході з установки свідчить про наявність двох явно виражених областей з різним темпом нагрівання. Стверджується, що доцільно тривалість нагрівання в теплоаккумуляторі з нерухомою насадкою встановлювати в межах першого періоду, який характеризується високим темпом нагрівання. Отримано, що інтенсивність теплообміну підвищується при використанні суміші часток різного розміру. Показано, що теплоутилизатор з щільним рухомих шаром керамзиту характеризується ККД на рівні 79%, теплоутилизатор з нерухомих шаром має ККД 60%. Однак переваги апаратів з нерухомих шаром полягають у простоті конструкції та у відсутності необхідності організації руху насадки. Дослідження, представлені в монографії, націлені на вирішенні як теоретичних, так і практичних питань вдосконалення енергоефективності утилізації низкопотенційної теплоти за використання гранульованої щільної насадки в технології накопичення явного типу.



Бошкова Ірина Леонідівна

Бошкова Ірина Леонідівна. Закінчила Одеський технологічний інститут холодильної промисловості за спеціальністю «Теплофізика» у 1981 р. У 1995 р. захистила кандидатську дисертацію на тему «Термоакустичні явища при кипінні недогрітої рідини в парогенеруючих каналах радіоелектронної апаратури», спеціальність 05.14.06 Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. У 2015 р. захистила докторську дисертацію на тему «Інтенсифікація процесів тепломасоперенесення в рослинних матеріалах при дії мікрохвильового електромагнітного поля», спеціальність 05.14.06 Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. Професор кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики, Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнології та екологічної енергії ім. В.С. Мартиновського, Одеського національного технологічного університету.



Арику Антоніна Василівна

Закінчила Одеську національну академію харчових технологій у 2013 році за спеціальністю «Теплоенергетика». У 2018 році закінчила Івано-Франківський технологічний інститут нафти та газу за спеціальністю «Нафтогазова інженерія та технології». У 2018 році отримала ступінь кандидата технічних наук на тему «Інтенсифікація міжкомпонентного теплообміну в теплоутилізаторах з гранульованими насадками», спеціальність 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Викладач кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики, Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнології та екологічної енергії ім. В.С. Мартиновського, Одеського національного технологічного університету



Мукмінов Ігор Ігорович

Закінчив Одеський національний політехнічний університету 2018 році за спеціальністю «Хімічна технологія та інженерія». У 2023 році отримав ступінь доктора філософії зі спеціальності «Теплоенергетика» робота на тему "Інтенсифікація процесів переносу теплоти та маси в щільних шарах гранульованого матеріалу"

Старший викладач кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики, Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнології та екологічної енергії ім. В.С. Мартиновського, Одеського національного технологічного університету.