

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 536.241

Теплообмін щільного шару сипучого матеріалу з зануреними поверхнями

О. А. Климчук¹✉, Н. В. Климчук², Є. С. Бабаєв³, О. М. Вудвуд⁴, Є. О. Кравченко⁵¹⁻⁴Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна;⁵Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ¹aaklymchuk@gmail.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-5207-7259>; ²<https://orcid.org/0000-0002-9132-1541>; ³<https://orcid.org/0000-0001-7388-5979>; ⁴<https://orcid.org/0000-0002-4807-3634>; ⁵<https://orcid.org/0009-0009-3446-4958>

В роботі представлені результати експериментальних досліджень, проведених з метою визначення особливостей теплообміну щільного шару сипучого матеріалу з поверхнями та отримання емпіричних залежностей для середніх і локальних коефіцієнтів тепловіддачі при поперечному обтіканні щільним шаром зануреного циліндра. Емпіричні залежності дійсні в широкому діапазоні зміни геометричних і режимних параметрів за задовільною похибкою експериментів. Необхідність проведення досліджень в даній області пов'язана з тим, що більшість відомих літературних даних по теплообміну між дисперсним матеріалом з поверхнею описує теплообмін з потоками при низькій концентрації дисперсного матеріалу (запилені потоки, газозавись, киплячі шари). Теплообміну щільного шару з поверхнею присвячено досить обмежена кількість робіт, проведених в 1970-1980 роках, проте навіть в цих роботах є суперечності не тільки кількісного, але і якісного характеру. В представленій роботі дослідження проведені на експериментальній установці, яка виконана у вигляді прямокутної вертикальної шахти, у якій під дією сил тяжіння надходить щільний шар сипучого матеріалу. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі виконано за використання методів стаціонарного та регулярного теплових режимах. В результаті узагальнення експериментальних даних отримані критеріальні залежності, що дозволяють проводити тепловий розрахунок трубчастих теплообмінних апаратів для нагрівання (охолодження) сипучих матеріалів, що рухаються у вигляді щільного шару. Отримані залежності представляють важливість для хімічної промисловості, на підприємствах кольорової металургії, при термообробці матеріалів та в інших галузях промисловості, де існує необхідність в нагріванні (охолодженні) сипучих матеріалів у відповідних технологічних процесах або з метою утилізації тепла.

Ключові слова: Сипучий матеріал; Щільний шар; Теплообмін; Калориметр; Циліндричні поверхні; Коефіцієнт тепловіддачі

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2728>

© The Author(s) 2023. 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

У багатьох галузях промисловості існує необхідність у нагріві (охолодженні) сипких матеріалів у технологічних процесах або з метою утилізації тепла. Це – нагрівання або охолодження матеріалів

у хімічній промисловості, термообробка матеріалів, нагрів дрібнодисперсних рудних концентратів для витягання металу і охолодження огарка на підприємствах кольорової металургії, прожарювання формувальних сумішей після лиття з метою випалу смільних домішок, що дозволяє бага-

торазово використовувати формувальні матеріали, процеси сушки, утилізації тепла енерготехнології і так далі.

Існує принципова можливість здійснити в цих випадках процес міжкомпонентного теплообміну, що характеризується високою інтенсивністю. Проте процес підведення тепла середовищем – теплоносієм до шару дрібнодисперсного матеріалу при їх безпосередньому контакті часто обмежений із-за великого гідравлічного опору і можливості винесення часток матеріалу [1-4]. Крім того, у ряді випадків небажана, а іноді і неприпустима взаємодія дисперсного матеріалу з гріючим (охолоджуючим) середовищем (забруднення, окислення, спікання). У зв'язку з цим все більшу роль починає грати підведення (відведення) тепла до щільного гравітаційного шару через поверхню нагріву. При цьому є можливість розташовувати поверхні уздовж або поперек щільного шару, що рухається. Процес теплообміну щільного гравітаційного шару сипкого матеріалу з поверхнею в обох випадках відрізняється досить низькою інтенсивністю, а часто не може бути здійснений із-за нестабільності руху (зависання, обвали) сипкого матеріалу (сушка, термообробка матеріалу з великими коефіцієнтами зовнішнього і внутрішнього тертя і так далі). Проте, якщо в літературі є достатнє число робіт по теплообміну при поздовжньому обтіканню поверхонь, то відомості про теплообмін при поперечному омиванню обмежуються невеликою кількістю досліджень. Відомості, що дозволяють оцінювати інтенсивність теплообміну щільного гравітаційного шару сипучого шару з пучком труб, майже відсутні. За допомогою зміни режимних та геометричних характеристик можливо підвищити інтенсивність теплообміну між сипучим тілом та пучком труб. Тому завдання створення високоефективних теплообмінних апаратів є дуже актуальним.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Щільний шар сипкого матеріалу є неоднорідною двокомпонентною системою «газ-тверді частки». Механізм перенесення тепла у такій системі дуже складний. Він складається з елементарних процесів, що накладаються один на другий: теплопровідності в зернах і контактах між ними, теплопровідності і конвекції газів, що заповнюють простір пір, а також радіаційного теплообміну між зернами. Роль конвекції, випромінювання і конта-

ктної теплопровідності у більшості випадків дуже незначна (не перевищує декількох відсотків) із-за малих розмірів газових прошарків і площ контактів. Аналогічним механізмом обумовлена і передача тепла від нерухомого шару до поверхні. При накладенні фактора руху процес ще більше ускладнюється за рахунок конвективного перенесення тепла твердою і газовою фазами і впливу додаткових чинників, викликаних рухом: перемішування, обертання і гальмування часток в пристінному шарі, його розпушування і таке інше. Усе це разом із стрибкоподібною зміною фізико-механічних і теплофізичних характеристик на межі розділу компонентів робить практично неможливим на сучасному рівні знань аналітичне рішення задачі. Тому природно прагнення дослідників шляхом деяких допущень спростити її [5]. Найбільш поширеним у літературі є допущення про те, що щільний шар можна розглядати як квазігомогенне середовище, для опису процесів в якому можна використати "ефективні" фізичні характеристики (теплопровідність, температуропровідність, об'ємна вага і так далі). Уперше такий підхід був запропонований Бринном у 1948 році, а потім використаний іншими авторами [6, 7, 8, 9, 10, 11].

В усіх цих роботах приймалося допущення про стрижнеподібний (безградієнтний) рух шару і на цій підставі до процесу теплообміну з шаром застосовувалися відомі для однофазних середовищ теоретичні рішення: використовується аналітичне рішення Гретца-Нуссельта для тепловіддачі при безградієнтній ламінарній течії рідини, використовується рішення математично ідентичного завдання нестационарної теплопровідності суцільного необмеженого циліндра за граничних умов 1 роду, до процесу теплообміну шару з пластиною застосовується рішення про нестационарну теплопровідність напівобмеженого масиву. Експериментальні дані, отримані авторами для дрібнозернистих матеріалів в широких каналах, задовільно описуються теоретичними залежностями; спеціальні спостереження підтвердили, що рух шару близький до стрижнеподібного. Експериментальні дослідження також показали, що розподіл температур в шарі, що рухається, узгоджується з температурним полем необмеженого суцільного циліндра. Таким чином, в певних умовах можуть бути використані уявлення про шар як про суцільне середовище з ефективними характеристиками і стрижнеподібним характером руху.

Уявлення про шар як про суцільне середовище

використовувалося при узагальненні дослідних даних в експериментальних дослідженнях теплообміну і при поперечному [6, 8, 9, 10] омиванні поверхонь. При достатній тривалості процесу ефективні характеристики задовільно враховують умови перенесення тепла. Проте при короткочасних контактах з поверхнею (її малій протяжності і високих швидкостях гравітаційного руху шару) виникає необхідність урахування дискретної будови середовища. Дослідження короткочасних процесів спрямовані на розширення уявлень про фізичну природу перенесення тепла в шарі, отримання розрахункових залежностей, встановленні меж застосування до щільного шару рівнянь, отриманих для суцільного середовища. Останніми роками такі процеси інтенсивно вивчаються стосовно шару [6, 8, 11, 12]. Так, в [12] пропонується термічний опір прогриваємого масиву уявити у вигляді суми: опір самого масиву і контактного опору, що враховує вплив укладення і характеру руху часток у поверхні. Приведене автором зіставлення з експериментальними даними дозволило досягти задовільного узгодження. Отримані залежності базуються на моделі, що замінює дисперсне середовище рядів шарів, розташованих паралельно стінці. У роботах, що узагальнені у роботі [12], дисперсне середовище представляється у вигляді прошарків твердого і газового компонентів, орієнтованих перпендикулярно стінці (уздовж напрямку теплового потоку). При створенні і рішенні диференціальних рівнянь, що описують температурне поле компонентів, використовується уявлення про релаксацію температурних обурень між ними. В результаті рішень цієї системи отримані залежності для розподілу температур у вигляді нескінченних рядів. Чисельний аналіз на ЕОМ дозволив отримати залежність, яка, за твердженням автора, добре узгоджується з дослідними роботами. Слід зазначити, що в [12] прийнятий цілий ряд суперечливих допущень. На нашу думку, модель з орієнтацією прошарків паралельно стінці ближче до реальної структури шару, оскільки враховує газовий прошарок у поверхні. З результатів, приведених в [6, 8, 9, 10], витікає, що при досить великих часах контакту шару з поверхнею можна при обробці експериментальних даних успішно користуватися ефективними теплофізичними характеристиками сипких матеріалів.

Найбільш фізично обґрунтованим є уявлення про щільний шар як про дискретне середовище, розвинене у роботах З.Р. Горбіса [5], де приведена

у загальному вигляді система диференціальних рівнянь, що описують теплообмін дисперсних наскрізних потоків, до яких належить і щільний шар. Виведення цих рівнянь ґрунтується на виділенні в потоці осередку кінцевих розмірів – частки і газового прошарку, що оточує її. Аналітичне рішення цієї системи відсутнє; проте з неї було отримано у загальному вигляді критеріальне рівняння теплообміну шару, що рухався, до якого увійшли критерії подібності, що відносяться до твердої та газової фази. Такий підхід, де розглядаються в сукупності процеси руху і теплообміну, якнайповніше відбиває фізичну суть процесу. Правда, як відмічає сам автор, при виведенні диференціальних рівнянь в [5] використано розкладання в ряд Тейлора функцій, що терплять розрив безперервності усередині розглядаємого осередку, що неправомірно. Крім того, при аналізі теплообміну із стінкою розглядаються рівняння енергії і руху, записані для усього потоку в цілому, а облік теплової і динамічної взаємодії компонентів робиться за допомогою додаткових граничних умов.

З експериментальних робіт для нас найбільший інтерес представляють дослідження, виконані при поперечному омиванні поверхні. Цим питанням присвячені роботи [9] та [10]. Автори основну увагу приділяли вивченню питання, пов'язаного з теплообміном щільного гравітаційного шару з поодиноким круглим циліндром (вплив швидкості і розміру часток матеріалу). Окрім цього досліджувався вплив: а) стислості потоку [9,10]; б) геометричних характеристик пучків труб [10]; в) діаметра циліндра [9,10]. Автори вивчали характер руху методом візуальних спостережень. Дослідження тепловіддачі проводилися в стаціонарному режимі при направленні теплового потоку від стінки до матеріалу і від матеріалу до стінки. Дані циліндри були електрокалориметрами, що дозволяє визначити середню тепловіддачу по периметру. Роботи Ю.П. Курочкина, присвячені дослідженням характеру руху і теплообміну при поперечному обтіканні щільним шаром (кварцевий пісок $d = 0...3$ мм, вологе вугілля ($W = 60\%$) круглих ($D = 25, 50, 75$ мм), еліпсоподібних і сочевицеподібних циліндрів при змінній швидкості шару, показали наступне:

1. Тепловіддача покращується при збільшенні швидкості шару і зменшенні розміру часток, що узгоджується з [10].

2. Коефіцієнт тепловіддачі зростає зі збільшенням діаметру циліндра.

3. Форма поперечного перерізу циліндра знач-

ною мірою впливає на теплообмін (коефіцієнт тепловіддачі більше у циліндрів з сочевицеподібним профілем).

4. Властивості сипких матеріалів, а отже і тепловіддача, практично не міняються при збільшенні вологості до гігроскопічної. Подальше збільшення вологості призводить до погіршення сипких властивостей матеріалів.

Аналіз сучасного стану теплообміну щільного шару з поверхнями визначила постановку основного завдання даного дослідження – вивчення процесу тепловіддачі щільного гравітаційного шару сипучого матеріалу, що омиває поперечно циліндричні поверхні, з метою отримання критеріальних залежностей, які узагальнюють дані по коефіцієнтах тепловіддачі в трубчастих теплообмінних апаратах з щільними шарами сипучого матеріалу.

3. Мета та задачі дослідження

Основною метою даного дослідження є отримання критеріальних залежностей за теплообміном між зануреними теплообмінними каналами і щільним рухомих шаром дисперсного матеріалу, призначені для теплових розрахунків трубчастих теплообмінних апаратів з зануреними в щільний шар сипучого матеріалу поверхнями.

Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- скласти методичку проведення експерименту та обробки даних на підставі визначальних критеріїв теплообміну;
- провести експериментальні дослідження з одиночними калориферами та отримати дані по теплообміну між зануреним циліндром і щільним рухомих шаром дисперсного матеріалу;
- визначити середні та локальні коефіцієнти тепловіддачі та отримати узагальнюючі критеріальні залежності.

4. Методика проведення досліджень та обробки експериментальних даних

В задачу досліджень входило визначення середніх та локальних коефіцієнтів тепловіддачі для одиночного циліндра та пучка труб. Дослідження проведені на експериментальній установці, представленої на рис.1. Сипкий матеріал з нахиленого жолобу 2 під дією сил тяжіння у вигляді щільного шару потрапляє у шахту 9, де в зоні рівномірного розподілу швидкості матеріалу горизонтально роз-

ташовано експериментальний циліндр 8. Рух у вигляді щільного шару, рівномірний розподіл швидкості по перерізу, а також її регулювання забезпечувалось за допомогою спеціального дірчастого шиберу 4, встановленого в випускному перетині шахти. Після проходження шахти та мірної ємності 11 матеріал потрапляє на горизонтальний транспортер 13, потім у ковшевий елеватор 1 і знову в нахилений жолоб 2, тобто рухався по замкненому контуру. Періодичне вимірювання витрати проводилося за допомогою мірної ємності 11.

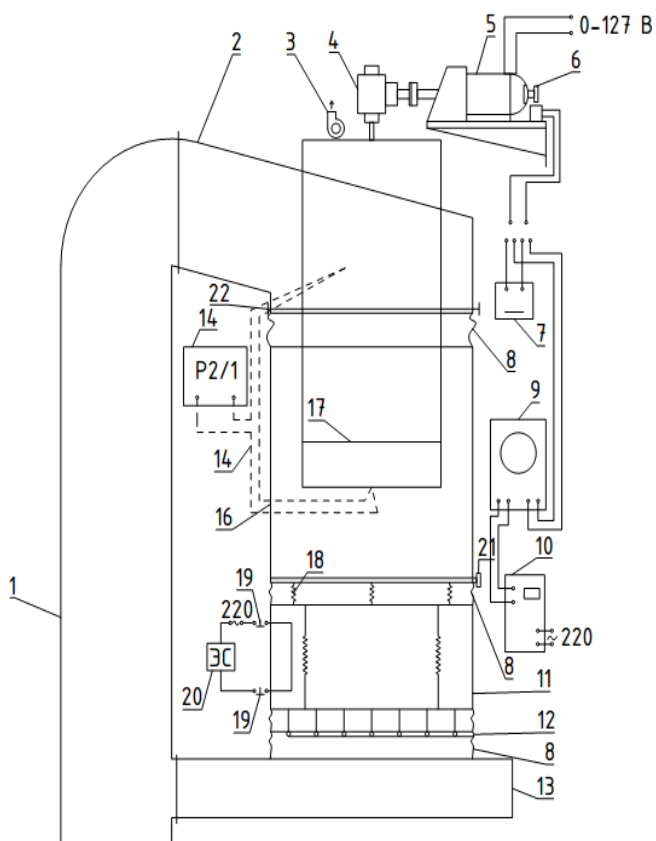


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки:

- 1 – ковшевий елеватор; 2 – нахилений жолоб;
- 3 – верхній шибер; 4 – нижній шибер;
- 5 – секундомір; 6 – вимикач; 7 – пружини;
- 8 – експериментальний циліндр; 9 – шахта;
- 10 – сифон; 11 – мірна ємність; 12 – привід жалюзі; 13 – транспортер; 14 – потенціометр;
- 15 – термонара.

При дослідженнях по теплообміну найбільш широко використовувалися стаціонарні методи, а також метод регулярного режиму. Виходячи з цього, були використані наступні методики проведення експериментів:

1. Дослідження теплообміну проведені при стабільному на протязі експерименту руху сипучого матеріалу в режимі щільного шару та спрямуванні

теплового потоку від поверхні до шару.

2. Визначення середнього коефіцієнту тепловіддачі по залежності виконувалось відповідно залежностям:

при стаціонарному режимі

$$\bar{\alpha} = \frac{Q}{F(\bar{t} - t_{\text{ш}})}; \quad (1)$$

при регулярному режимі

$$\bar{\alpha} = \psi m \frac{C}{F}, \quad (2)$$

де Q – тепловий потік, Вт; m – темп охолодження; C – повна теплоємність циліндра; F – повна поверхня теплообміну; ψ – коефіцієнт нерівномірності розподілу температури в тілі; \bar{t} – середня температура циліндра; $t_{\text{ш}}$ – температура сипучого матеріалу; $\bar{\alpha}$ – середній коефіцієнт тепловіддачі.

3. Визначення локального коефіцієнту тепловіддачі по залежності:

$$\alpha_x = \frac{Q}{F(t_x - t_{\text{ш}})}, \quad (3)$$

де α_x – локальний коефіцієнт тепловіддачі; t_x – локальна температура циліндра.

4. Проведення дослідів в широкому інтервалі зміни режимних та геометричних характеристик, що забезпечувалося конструкцією експериментальної установки.

5. Результати досліджень теплообміну між цільним шаром дисперсного матеріалу з одиночним циліндром

5.1. Експериментальне визначення середніх коефіцієнтів тепловіддачі для одиночного циліндру

Геометричні і режимні умови проведення експериментів по визначенню середнього коефіцієнту тепловіддачі теплообміну з одиночним циліндром представлені у таблиці

Таблиця – Геометричні та режимні умови проведення експериментів

Діаметр калориметра D , мм	Матеріал	Діаметр часток d , мм	Швидкість руху шару матеріалу $V_{\text{ш}}$, мм /с	Кількість дослідів
8	Монофракції піску	0,35	0,31 - 38	120
12		0,48		
16		0,6		
20		1,8		
		3,0		

Аналіз експериментальних даних показав, що у всьому діапазоні зміни геометричних та режимних параметрів при збільшенні швидкості шару, зменшення діаметра циліндра та розміру часток спостерігається інтенсифікація теплообміну. При зростанні швидкості це обумовлено в першу чергу збільшенням знімання теплоти в безвідривно обтічних ділянках (бічні поверхні циліндра) через поліпшення перемішування частинок, а також зменшення часу контакту з калориметром, що приводить до зростання температурного градієнта на кордоні шару з поверхнею. У значно меншій мірі на збільшення середнього коефіцієнта тепловіддачі впливає зменшення застійної зони. При перевищенні деякого межового значення швидкості ($V_{\text{гп}}$) темп зростання коефіцієнта тепловіддачі зменшується. Це перш за все пов'язано з тим, що при перевищенні граничної швидкості відбувається локальне розпушення шару, що приводить до зро-

стання термічного опору. Певною мірою починає позначатися і збільшення повітряного мішка у кормовій частині. Значення граничної швидкості залежить від співвідношення діаметрів поперечно обтічних циліндрів і розмірів частинок. Обробка експериментальних даних дозволила отримати залежності числа Фруда від співвідношення діаметрів:

$$Fr_{\text{гп}} = \left(10,9 + 0,363 \frac{D}{d} \right) \cdot 10^{-5}; \quad (4)$$

$$Pe_{\text{гп}} = 17,8 \left(\frac{D}{d} \right)^{1,06}. \quad (5)$$

В рівнянні (4) число Фруда $Fr_{\text{гп}} = \frac{V_{\text{ш}}^2}{g \cdot d}$.

Рівняння справедливі із похибкою 6-8% при $13 \leq D/d \leq 57$.

На рис. 2 представлена узагальнююча залежність по теплообміну фракціонованих шарів ідеально сипучих та близьких до них матеріалів з поперечно омиваними циліндричними поверхнями. При обробці експериментальних даних використовуються безрозмірне число Нусельта $Nu = (\bar{\alpha} \cdot d) / \lambda$,

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, та симплексу (D/d) , де D – діаметр зануреного циліндру. Комплекс $Nu/(D/d)$ визначається в залежності від числа Пекле $Pe = (V_{ш} \cdot d) / a$, де $V_{ш}$ – швидкість руху шару, a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу.

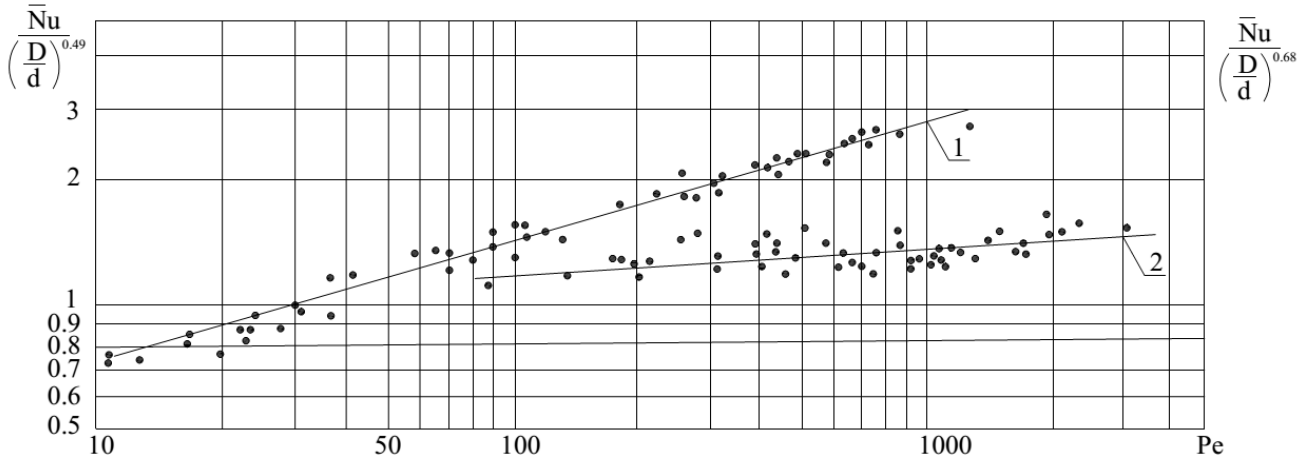


Рисунок 2 – Узагальнююча залежність по теплообміну щільного шару з горизонтальним циліндром:
1 – дані експериментальних досліджень за умовами $Fr < Fr_{гр}$,
2 – дані експериментальних досліджень за умовами $Fr > Fr_{гр}$,

Зниження інтенсивності теплообміну зі збільшенням діаметра циліндра пов'язано зі зростанням часу контакту і з деякою зміною характеру омивання при значеннях симплекса $D/d = 5-10$ (діаметри циліндрів і частинок сумірні). Коли різко змінюється картина обтікання калориметра (зникає застійна зона у лобовій частині) і час контакту перестає грати першорядну роль, можливе збільшення коефіцієнта тепловіддачі з ростом діаметра циліндра. Основною причиною є зміна в характері обтікання циліндра. Певною мірою позначається різниця у порізності рухомого шару (для дрібних фракцій порізність нижче) і, отже, ефективності теплопровідності. При малому часі контакту (високих швидкостях і малих діаметрах циліндра) певну роль грає термічний опір пристінного газового прошарку, товщина якого пропорційна діаметру частинок.

За результатами обробки експериментальних даних отримані критеріальні залежності, що описують теплообмін у кожній з областей і справедливі з вірогідною помилкою $\pm 6\%$ при різних напрямках теплового потоку і температурі шару до 500-600 °С:

При $10 \leq Pe \leq Pe_{гр}$; $13 \leq D/d \leq 57$:

$$\bar{Nu} = 0,39 Pe^{0,28} \left(\frac{D}{d} \right)^{0,49} \quad (6)$$

При $Pe_{гр} \leq Pe \leq 3200$; $2,3 \leq D/d \leq 57$:

$$\bar{Nu} = 0,84 Pe^{0,07} \left(\frac{D}{d} \right)^{0,68} \quad (7)$$

Рівняння (7) з похибкою $\pm 6\%$ справедлива при різних напрямках теплового потоку (нагрів, охолодження) та температурі шару до 500-600 °С.

5.2. Експериментальне визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі для одиночного калориметру

Процес теплообміну щільного шару сипкого середовища з циліндричною поверхнею викликає інтерес у дослідників, що бажають створити теплообмінні апарати для багатьох галузей промисловості (хімічна, металургійна, енергетична переробка палива та ін.). Деякі результати таких дослідів наведено в [1, 12].

При обтіканні циліндра на його лобовій частині утворюється призма з малорухомих частинок, кромку частину займає зона відриву шару сипкого матеріалу («повітряний мішок») і лише в екваторіальній області спостерігається безвідривний рух частинок. Така картина спостерігається при візуалізації процесу. Оскільки теплообмін поперечно омиваного щільним шаром циліндра відрізняється

низькою інтенсивністю, потрібно знати локальний теплообмін і як ефективно покращити його.

Мета цієї частини роботи – визначення коефіцієнтів тепловіддачі в кожній точці периметру циліндричної поверхні, що омивається щільним шаром сипкого середовища.

Для проведення дослідів виконаний калориметр, який являє собою порожній циліндр, виготовлений з деревини. Деревина має невеликий коефіцієнт теплопровідності ($\lambda = 0,215 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), досить велику механічну міцність і добре обробляється. Однак її низька теплостійкість не дозволяє підіймати температуру нагрівача вище $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Нагрівач виготовлено з каліброваної ніхромової стрічки, яка щільно приклеєна на поверхню каркасу. Товщина стрічки – $0,2 \text{ мм}$, ширина – 5 мм . Стрічковий нагрівач приклеювався на каркас клеєм БФ-2 з зазорами $0,5 \text{ мм}$, які потім заливались епоксидною смолою. Це дозволяло отримати поверхню з приблизно однаковою шорсткістю, а нагрівач не чинив додаткового впливу на характер обтікання циліндра. Контрольно-вимірювальні прилади мали клас точності 1 та 2 та забезпечували вимір всіх величин, необхідних для визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі. Таким же вимогам відповідали прилади, що реєстрували режимні умови досліду (витрати сипкого матеріалу, його об'ємна вага, параметри вібрації та ін.). Температура поверхні вимірювалась мідь-константовими термопарами (діаметр термоелектронів $0,2 \text{ мм}$) в емалевій та шовковій ізоляції. Термопари укладались під стрічковим нагрівачем та виводились крізь порожнину каркасу циліндра. Температура шару матеріалу на вході та виході з шахти вимірювалась ртутними термометрами з точністю $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Враховуючи, що середня температура зазору нижче температури стрічки, отриманий коефіцієнт тепловіддачі буде більшим за реальний. Як показали досліди, поправка до коефіцієнту тепловіддачі у нашому випадку не перевищує 1% , тому не враховувалась. В якості сипкого матеріалу використовувався повітряно-сухий кварцовий пісок. Експериментальний циліндр мав зовнішній діаметр $d = 33 \text{ мм}$.

Аналіз дослідів показав, що має місце значна зміна коефіцієнтів тепловіддачі по периметру циліндра, в той час як по довжині вони практично не змінні. Нерівномірність розподілу тепловіддачі по периметру характеризується відношенням $k = \alpha_{\phi}/\alpha$.

Отримано, що локальні коефіцієнти тепловіддачі змінюються по периметру і ці зміни тим суттєвіші, чим вище швидкість шару. Так, при

$V_{\text{ш}} = 0,31 \text{ мм/с}$: $\alpha_{\phi}^{\text{min}} = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, $\alpha_{\phi}^{\text{max}} = 70 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; при $V_{\text{ш}} = 10,6 \text{ мм/с}$: $\alpha_{\phi}^{\text{min}} = 40 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, $\alpha_{\phi}^{\text{max}} = 235 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

6. Висновки

При зростанні швидкості шару сипучого матеріалу коефіцієнт тепловіддачі збільшується, але темп його зростання різний і залежить від значення граничного числа Фруда $Fr_{\text{гр}}$, який є функцією співвідношення діаметрів калориметра та розміру часток сипучого матеріалу (D/d). При $Fr < Fr_{\text{гр}}$ темп зростання вище, ніж при $Fr > Fr_{\text{гр}}$. Це пояснюється тим, що на межі $Fr = Fr_{\text{гр}}$ щільний шар сипучого матеріалу перетворюється в падаючий шар, який має більшу порізність та менший ефективний коефіцієнт теплопровідності.

Вивчення локального теплообміну дозволило підтвердити візуальні спостереження за обтіканням циліндру (утворення зони застою на лобовій частині циліндру та утворення повітряного мішку – у кормовій частині). В цих зонах коефіцієнт тепловіддачі значно нижче, ніж в інших.

На основі обробки експериментальних даних отримані критеріальні залежності для теплових розрахунків трубчастих теплообмінних апаратів з щільними шарами дисперсних матеріалів, які з похибкою $\pm 6\%$ справедливі при різних напрямках теплового потоку (нагрів, охолодження) та температурі шару до $500\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$.

Особистий внесок авторів CRediT

Климчук О.А.: концептуалізація, методологія, формальний аналіз. **Климчук Н.В.:** експериментальні дослідження, методичне забезпечення. **Бабаєв Є.С.:** аналіз та узагальнення даних. **Вудвуд О.М.:** експериментальні дослідження, обробка даних. **Є.О. Кравченко:** інформаційний пошук, участь в експериментальних дослідженнях, аналіз даних.

Література

1. **Титар С.С., Шраменко О.М.** Локальний теплообмін щільного шару сипкого матеріалу з циліндром за відсутності та наявності // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – №1 (135). – С.18-24.
2. **Бошкова І.Л., Солodka А.В.** Математичний опис процесу теплообміну між потоками газу та

дисперсного матеріалу // Холодильна техніка та технологія. – 2017. – №2, Т.53. – С.39-42.

3. **Yu J., Zhang M., Fan W., Zhou Y., Zhou G.** Study on performance of the bll packed-bed regenerator: experiments and simulation // Applied Thermal Engineering. – 2014. – Vol.69. – P.113-122.

4. **Solodka A., Volgusheva N., Boshkova I., Titlov A., Rozhentsev A.** Investigation of heat exchange in a blown dense layer of granular materials // East-European Journal of Enterprise Technology. – 2017. – №8 (89). – Vol 5. – P. 58-64.

5. **Balaji N.C., Mani M., Reddy B.V.** Discerning Heat Transfer in Building Materials // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 54. – P. 654-668. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.307>.

6. **Календерьян В.А., Бошкова І.І.** Тепломасоперенесення в апаратах із щільним дисперсним шаром. – К.: Слово, 2011. – 184 с.

7. **Горбіс З.Р., Календерьян В.А.,** Теплообмінники із проточними дисперсними теплоносіями. – М.: Енергія, 1975. – 296 с.

8. **V. A. Borodulya et al.** Heat transfer in fluidized beds // Journal of Engineering Physics. – 1985. –

Vol. 49. – No. 4. – P. 1197–1202. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00871918>.

9. **D. Zhang et al.** Experimental study on heat transfer and flow resistance characteristics of integral rolled spiral finned tube bundles heat exchangers // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023. – P. 103689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103689>.

10. **Al-Arkawazi S.** Modeling the heat transfer between fluid-granular medium // Applied Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 128. – P. 696-705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.064>.

11. **N. S. Saleh et al.** Experimental Investigation of a Moving Packed-Bed Heat Exchanger Suitable for Concentrating Solar Power Applications // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – No. 8. – P. 4055. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12084055>.

12. **Титар С.С., Фурман А.С.** Інтенсифікація теплообміну сипучого матеріалу щільного шару з циліндром за допомогою вібрації // Науково – технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». – Вінниця, 2016. – №1. – С. 65-70.

Отримана в редакції 18.11.2023, прийнята до друку 19.12.2023

Heat exchange of a dense layer of floor material with submersed surfaces

Olexandr Klymchuk¹, Nataliya Klymchuk², Yevhen Babaiev³, Oleksandr Vudvud⁴, Yevhen Kravchenko⁵

¹⁻⁴National University "Odesa Polytechnic", 1 Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine;

⁵Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹aaklymchuk@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-5207-7259>; ²<https://orcid.org/0000-0002-9132-1541>; ³<https://orcid.org/0000-0001-7388-5979>; ⁴<https://orcid.org/0000-0002-4807-3634>; ⁵<https://orcid.org/0009-0009-3446-4958>

The paper presents the results of experimental studies conducted with the aim of determining the characteristics of the heat exchange of a dense layer of bulk material with surfaces and obtaining empirical dependences for average and local heat transfer coefficients during transverse flow through a dense layer of a submerged cylinder. Empirical dependences are valid in a wide range of changes in geometric and regime parameters within a satisfactory experimental error. The need for research in this area is due to the fact that most of the known literature data on heat exchange between dispersed material and the surface describes heat exchange with flows at a low concentration of dispersed material (dusty flows, gas suspension, fluidized beds). The heat exchange of a dense layer with a surface is devoted to a rather limited number of works carried out in the seventies and eighties, but even in these works there are contradictions not only of a quantitative, but also of a qualitative nature. In the presented work, the research was carried out on an experimental installation, made in the form of a rectangular vertical mine, in which, under the action of gravity, bulk material enters in the form of a dense layer. Determination of heat transfer coefficients was performed using the methods of stationary and regular thermal regimes. As a result of the generalization of experimental data, criterial dependences were obtained, which allow thermal calculation of tubular heat exchangers for heating (cooling) bulk materials moving in the form of a dense layer. The resulting dependencies are important for the chemical industry, at non-ferrous metallurgy enterprises, during heat treatment of materials and in other industries

where there is a need to heat (cool) bulk materials in the relevant technological processes or for the purpose of heat utilization.

Keywords: Bulk material; Dense layer; Heat exchange; Calorimeter; Cylindrical surfaces; Heat transfer coefficient

References

1. **Titar, S.S., Shramenko, O.M.** (2018) Local heat exchange of a solid ball of adhesive material with a cylinder due to the presence and presence of vibration. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 1(135), 18-24.
2. **Solodkaya, A.V., Boshkova, I.L.** (2017) Mathematical description of the process of heat exchange between gas flows and disperse material. *Refrigeration Engineering and Technology*, 53(2), 39-42
3. **Yu, J., Zhang, M., Fan, W., Zhou, Y., Zhao, G.** (2002) Study on performance of the ball packed-bed regenerator: experiments and simulation. *Applied Thermal Engineering*, 22(6), 641-651.
4. **Solodka, A., Volgusheva, N., Boshkova, I., Titlov, A., Rozhentsev, A.** (2017) Investigation of heat exchange in a blown dense layer of granular materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 8,(89), 58-64.
5. **Balaji, N.C., Mani, M., Reddy, B.V.** (2014) Discerning Heat Transfer in Building Materials. *Energy Procedia*, 54, 654-668.
6. **Kalenderyan, V.A., Boshkova, I.L.** (2011) Heat and mass transfer in devices with a dense dispersed layer. *Kyiv: Slovo*, 184.
7. **Gorbis, Z.R., Kalenderyan, V.A.** (1975) Heat exchangers with flow-through dispersed coolants. *M.: Energy*, 296.
8. **Borodulya, V.A., Ganzha, V.L., Teplitskii, Yu.S., Epanov, Yu.G.** (1985) Heat transfer in fluidized beds. *Journal of Engineering Physics* 49(4), 1197-1202.
9. **Zhang, D., Zhao, L., Dong, H., Wu, R.** (2023) Experimental study on heat transfer and flow resistance characteristics of integral rolled spiral finned tube bundles heat exchangers. *Case Studies in Thermal Engineering*, 103689.
10. **Al-Arkawazi, S.** (2018) Modeling the heat transfer between fluid-granular medium. *Applied Thermal Engineering*, 128, 696-705.
11. **Saleh, N.S., Alaqel, S., Moon, D.** (2022) Experimental Investigation of a Moving Packed-Bed Heat Exchanger Suitable for Concentrating Solar Power Applications. *Applied Sciences*, 12(8), 4055.
12. **Titar, S.S., Furman, A.S.** (2016) Intensification of heat exchange between granular material and a cylinder with additional vibration. *Scientific and technical collection "Current technologies, materials and structures in everyday life"*, Vinnytsia, 1, 65-70.

Received 18 November 2023
 Approved 19 December 2023
 Available in Internet 02 January 2024