

С. С. Титар  
О. С. Фурман

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ ЩІЛЬНОГО ШАРУ З ЦИЛІНДРОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІБРАЦІЇ

Одеський національний політехнічний університет

*У даній роботі розглядаються питання інтенсифікації теплообміну сипучого матеріалу з циліндром за допомогою вібрації. Були проведені теоретичні та експериментальні дослідження процесів теплообміну шару з поперечно омиваним циліндром в умовах вібрації і без неї з метою отримання відповідних критеріальних рівнянь.*

**Ключові слова:** щільний шар, теплообмін, інтенсивність, вібрація, термічний опір.

### Вступ

У багатьох галузях промисловості існує необхідність у нагріванні (охолодженні) дрібнодисперсних і поліфракційних сипучих матеріалів у технологічних процесах або з метою утилізації тепла (хімічна, металургійна промисловості, енергетична переробка палив, процеси сушіння і термообробки у виробництві різних матеріалів - абразивних порошоків, шамоту, каоліну і т.д.).

Існує принципова можливість вирішення зазначених завдань, використовуючи процес міжкомпонентного теплообміну. Однак при цьому безпосередній контакт матеріалу з теплоносієм часто обмежений, а часом неприпустимий (великий гідравлічний опір, можливість виносу частинок, забруднення, окислення і т.д.). У подібних випадках нагрівання (охолодження) може здійснюватися у поверхневих апаратах, причому, доцільно використовувати поперечно обтічні трубні пучки, організовуючи рух матеріалу у вигляді щільного шару.

Процес теплообміну шару з поверхнею відрізняється порівняно низькою інтенсивністю, а для матеріалів з високими коефіцієнтами внутрішнього і зовнішнього тертя часто не може бути здійснений через нестабільність руху. У таких випадках раціонально використання рекуперативних апаратів з різними схемами вібрації.

### Постановка задачі

Робота велась у наступних напрямках:

1. Теоретичний аналіз процесу теплообміну шару з поперечно омиваними поверхнями в умовах вібрації з метою отримання відповідних рівнянь у загальному вигляді.

2. Вивчення середнього теплообміну шару з одиночним циліндром при накладенні сил вібрації, а також при відсутності; відшукування оптимальних геометричних і режимних характеристик, отримання узагальнюючих залежностей.

Накладення сил вібрації по різних раціональних схемах на гравітаційний щільний шар, поперечно омиваючий циліндричні теплообмінні поверхні, має приводити до інтенсифікації теплообміну за рахунок зміни характеру обтікання і структури шару. При обтіканні циліндра на його лобовій частині утворюється призма з малорухомих частинок, кормову частину займає зона відриву шару («повітряний мішок») і лише в екваторіальній області спостерігається безвідривний, інтенсивний рух частинок. Поліпшення тепловіддачі під впливом вібрації повинно відбуватися в основному через зменшення і руйнування структур, що володіють підвищеним термічним опором (застійна зона, зона відриву): деякий вплив має надавати і можливе ущільнення шару, що приводить до зростання ефективної теплопровідності. Можна вважати, що при безпосередній вібрації циліндра спільний вплив сил вібрації і гравітації призводить до посилення переміщення матеріалу в застійній зоні, а коли ці сили перевищують сили тертя, вона повністю руйнується. Поліпшенню тепловіддачі має сприяти і більш інтенсивне перемішування матеріалу у безвідривно обтічній області.

Критеріальні рівняння для середньоїтепловіддачімаютьвигляд:

1. Вібрація одиночного калориметру:

$$\overline{Nu}_z = f_2 \left( Pe, Pe_s, Fr, Fr_s, \frac{D}{d}, \frac{B}{D}, \frac{B-D}{2d}, \frac{tg\varphi_s}{tg\varphi_c}, \frac{t_w}{t} \right), \quad (1)$$

Де  $Nu$  – Число Нуссельта,  $f$  – амплітуда,  $Pe$  – Число Пекле,  $Fr$  – Число Фруда,  $D, d$  – діаметри циліндра і частинок,  $B$  – ширина,  $tg\varphi$  – коефіцієнттертя,  $t$  – температура.

2. Ступінь інтенсифікації теплообміну при вібрації одиночного калориметра:

$$\frac{\overline{Nu}_z}{Nu_{z0}} = f_4 \left( \frac{Pe_s}{Pe}, \frac{D}{d}, \frac{B}{D}, \frac{B-D}{2d}, \frac{tg\varphi_s}{tg\varphi_c}, \frac{t_w}{t} \right) \quad (2)$$

Для проведення досліджень була створена експериментальна установка, що представляє собою вертикальну шахту прямокутного перетину, у якій під дією сил тяжіння у режимі щільного шару ( $Fr < Fr_{кр}$ ) рухався сипучий матеріал. Швидкість шару регулювалася здвоєним шибером, який мав багато отворів, встановленим у випускному отворі шахти. Конструкція установки забезпечувала циркуляцію матеріалу по замкнутому контуру і можливість зміни шахт у залежності від розв'язуваної задачі. У кожному разі розміри шахт забезпечували необмеженість і відсутність впливу випуску на характер руху в місці установки досліджуваного зразка. Теплообмінна поверхня здійснювала спрямовані коливання.

Параметри вібрації контролювались вібрографом ВР-1 (амплітуда) і за допомогою осциллографа по фігурам Ліссажу (частота). Замір витрати сипучого матеріалу проводився за допомогою мірної ємкості, яка працює за принципом дозатора, і контролювався ваговим способом. Об'ємну вагу визначали методом відміток.

Теплообмін досліджувався при сталому русі сипучого матеріалу методами стаціонарного і регулярного теплових режимів. У першому випадку середній ( $\alpha$ ) коефіцієнттеплообміну визначався за питомому тепловому потоку, віднесений до відповідного температурного напору (середньозваженому по поверхні). Для визначення середнього коефіцієнту тепловіддачі методом стаціонарного теплового режиму використовувався електрокалориметр у вигляді порожньогосталевого циліндру, в порожнину якого на теплоізолюючих втулках містився ніхромовий електронагрівач. Температура в різних точках поверхні замірялась мідьконстантановими термопарами ( $\varnothing = 0,2 \text{ мм}$ ), розташованими по окружності циліндра у трьохперетинах по довжині. Термопари через перемикач із загальним холодним спаєм приєднувалися до потенціометра. При використанні методу регулярного режиму середній коефіцієнт тепловіддачі обчислювався за темпом охолодження. Калориметр - мідна циліндрична болванка, на поверхню якої припаяли гарячий спай диференціальної термопари. Холодний спай поміщався у потік, де набігав сипучий матеріал. Калориметр, встановлений у шахті, попередньо нагрівався за допомогою переносної електронпечі. Потенціометром фіксувалася зміна надлишкової температури у часі. Температура матеріалу вимірювалася у декількох точках по перерізу на вході і виході.

Аналіз первинних експериментальних даних показав, що у всьому діапазоні зміни геометричних і режимних характеристик при збільшенні швидкості шару, зменшення діаметра циліндра і розміру часток спостерігається інтенсифікація теплообміну. При зростанні швидкості це обумовлено в першу чергу збільшенням знімання теплотиз безвідривно обтічних ділянок (бічні поверхні циліндра) через поліпшення перемішування частинок, а також зменшення часу контакту з калориметром, що призводить 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 граничного значення швидкості ( $V_{кр}$ ) темп зростання коефіцієнта тепловіддачі зменшується. Це перш за все пов'язано з тим, що при перевищенні граничної швидкості відбувається локальне розпушення шару у циліндра, що приводить до зростання 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:

$$Fr_{np} = \left(10,9 + 0,363 \frac{D}{a}\right) \cdot 10^{-5} \quad (3)$$

$$Pe_{np} = 17,8 \left(\frac{D}{a}\right)^{1,06} \quad (4)$$

Геометричні і режимні характеристики експериментів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

**Геометричні і режимні характеристики**

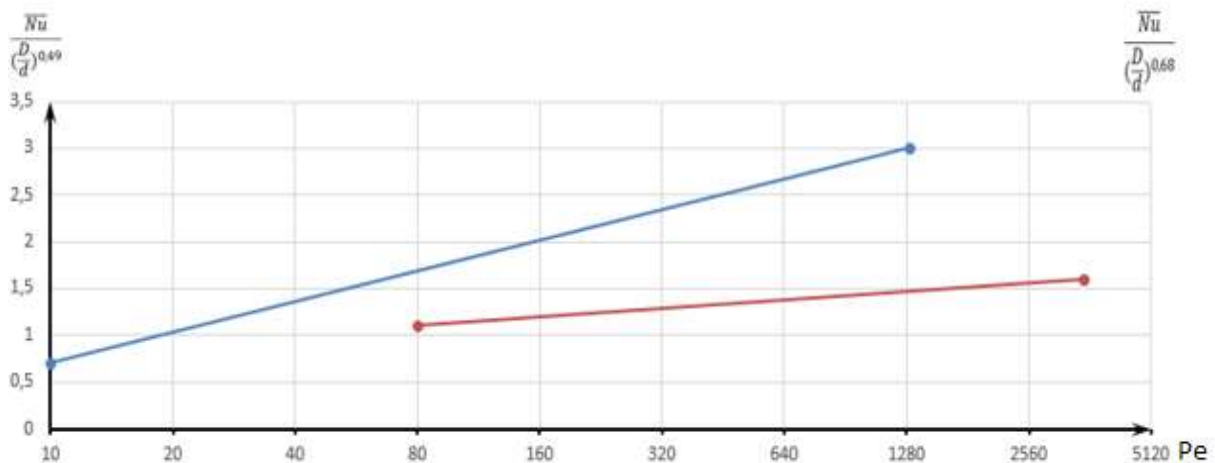
Відсутність вібрації					Вертикальна вібрація поверхні нагріву						
Середній теплообмін					Середній теплообмін						
D, мм	Матеріал	d, мм	$\frac{V, \text{мм}}{c \text{ек}}$	Кіл. Оп.	D, мм	Матеріал	d, мм	$\frac{V, \text{мм}}{c \text{ек}}$	f, гц	2A, мм	Кіл. Оп.
8	Моно-Фракції піску	0,35	0,31-38	120	8	Моно-фракції піску	0,35	0,38-38	20-36	1,5	189
12		0,48			12		0,48				
16		0,6			16		0,6				
20		1,8			20		1,8				
		3,0									

Справедливі із імовірною похибкою  $\pm 6 - 8\%$  при  $13 \leq \frac{D}{a} \leq 57$ .

Зниження інтенсивності теплообміну зі збільшенням діаметра циліндра пов'язано зі зростанням часу контакту і з деякою зміною характеру омивання. При значеннях симплекса  $\frac{D}{a} = 5 - 10$  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 певна різниця у порозності рухомого шару (для дрібних фракцій порозність нижче) і, отже, його ефективності теплопровідності. При малому часі контакту (високих швидкостях і малих діаметрах циліндра) певну роль грає термічний опір пристінного газового прошарку, товщина якої пропорційна діаметру частинок.

На фіг. 1 у логарифмічних координатах представлена узагальнена залежність по теплообміну фракціонованих шарів ідеально сипучих і близьких до них матеріалів з поперечно омиваючими циліндричними поверхнями.



Фіг. 1. Узагальнена залежність по теплообміну шільного шару з горизонтальним циліндром

Причини, що викликали наявність двох областей у представленій залежності, вказані вище при аналізі впливу швидкості на теплообмін.

Рекомендуються наступні критеріальні залежності, що описують теплообмін у кожній з областей і справедливі з вірогідною помилкою

$\pm 6\%$  при різних напрямках теплового потоку і температури шару до  $500 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$ :

При  $10 \leq Pe \leq Pe_{np}$ ;  $13 \leq \frac{D}{a} \leq 57$

$$\overline{Nu}_o = 0,39 Pe^{0,28} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,49}, \quad (5)$$

При  $Pe_{кр} \leq Pe \leq 3200$ ;  $2,3 \leq \frac{D}{d} \leq 57$

$$\overline{Nu}_o = 0,84 Pe^{0,07} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,68}, \quad (6)$$

Аналіз експериментальних даних при вертикальній вібрації одиночних калориметрів показав наступне:

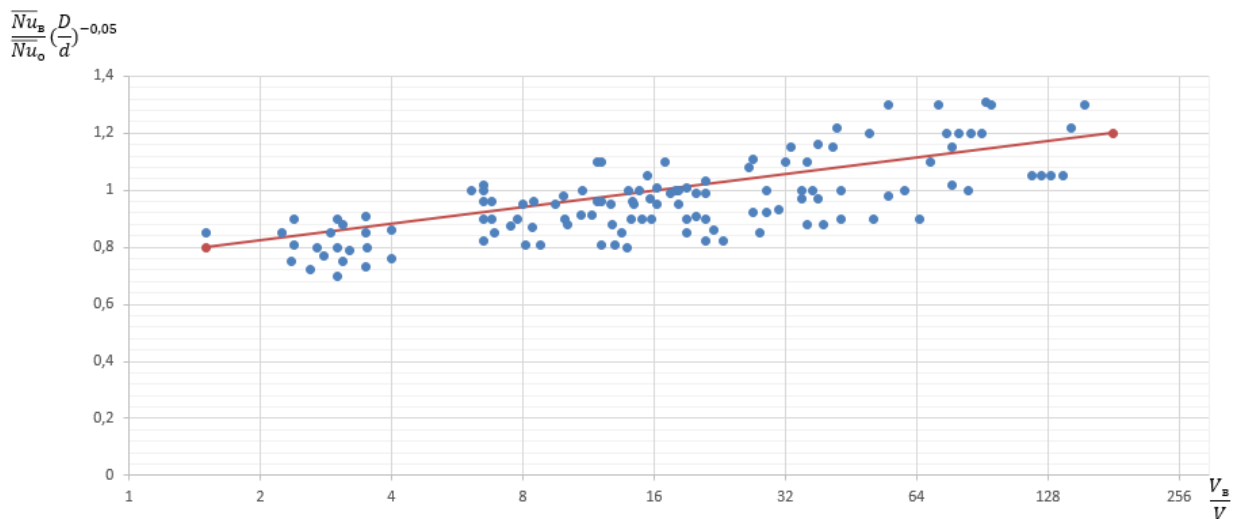
Використання вібрації з метою інтенсифікації теплообміну ефективно при низьких швидкостях шару. Так, при швидкості шару  $0,5 + 1 \text{ мм/сек}$  і параметрах вібрації  $f = 40 \text{ гц}, 2A = 3 \text{ мм}$  коефіцієнт тепловіддачі збільшився у  $1,5 + 1,8$  раза у порівнянні з нерухомим циліндром. За інших умов інтенсифікація теплообміну тим вища, чим вищі параметри вібрації (частота, амплітуда).

1. У всьому діапазоні зміни геометричних і режимних характеристик спостерігається збільшення середнього коефіцієнта тепловіддачі з ростом швидкості шару.

2. Так само як і у випадку теплообміну з нерухомим циліндром, спостерігається наявність двох областей, у яких темп залежності коефіцієнта тепловіддачі від швидкості шару різний (в області знижених швидкостей вище). Значення граничної швидкості практично не залежить від параметрів вібрації і може бути визначено по залежностям, наведеним вище при описі теплообміну з нерухомими циліндрами.

3. Темп залежності середнього коефіцієнта теплообміну від швидкості шару вібрації нижче, ніж без неї і падає з ростом амплітуди і частоти.

Отримані результати у значній мірі пояснюються уявленнями про механізм впливу вібрації на інтенсивність теплообміну, наведеним вище. Зниження темпу залежності середнього коефіцієнта тепловіддачі від швидкості шару при вібрації у порівнянні з її відсутністю викликано тим, що основною причиною інтенсифікації теплообміну в даному випадку є вібрація (перемішування частинок у бічних поверхнях, руйнування зони з малорухомих частинок на лобовій поверхні). Збільшення швидкості лише частково доповнює цей процес. З наведених експериментів випливає, що теплообмін шару з поперечно омиваним віброуючим циліндром визначається інтенсивністю гравітаційного руху і вібрації. Вплив кожного фактора найбільш помітно позначається в області, де інтенсивність іншого низька. Ступінь інтенсивності теплообміну визначається відносною швидкістю вібрації і описується залежністю (фіг. 2):



Фіг. 2. Узагальнена залежність ступеня інтенсифікації теплообміну під впливом вібрації одиночних циліндрів у логарифмічних координатах

$$\frac{\overline{Nu}_v}{\overline{Nu}_o} = 0,71 \left(\frac{V_v}{V}\right)^{0,1} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,05} \quad (7)$$

$V, V_{\varepsilon}$  – Швидкість шару, швидкість вібрації, справедливої для ідеально сипучих і близьких до них матеріалів із вірогідною помилкою  $\pm 4,5\%$  у межах:

$$1,8 \leq \frac{V_{\varepsilon}}{V} \leq 300; 2,3 \leq \frac{D}{d} \leq 111; 13 \leq \frac{B-D}{2d} \leq 130; 5 \leq \frac{B}{D} \leq 12,5;$$

Вплив геометричних характеристик на теплообмін з віброуючими і нерухомими циліндрами якісно однаково: із збільшенням діаметра циліндра і частинок, зменшенням симплекса  $D/d$  теплообмін погіршується. Обумовлений вібрацією ефект при  $\frac{V_{\varepsilon}}{V} = idem$  тим значніше, чим вище симплекс  $D/d$ . У ділянці  $\frac{V_{\varepsilon}}{V} = 1$  поліпшення тепловіддачі не спостерігається, а для великих частинок і циліндрів малих діаметрів вібрація призводить навіть до її погіршення. Це пояснюється зростанням порозності шару поблизу циліндра.

### Висновки

- Досліджено середній теплообмін одиночних калориметрів з фракціонованими шарами сипучого матеріалу у результаті чого отримані критеріальні рівняння, що дозволяють розрахувати тепловіддачу шару для цього випадку у широкому діапазоні зміни геометричних і режимних характеристик; отримані досить надійні дані, що показують, що у вивченому діапазоні зміни геометричних і режимних характеристик зростання швидкості шару, зменшення діаметра калориметр і розміри частинок матеріалу призводить до інтенсифікації теплообміну.
- Вивчено вплив у теплообмін вібрації поверхні нагріву, показано вплив вібрації на інтенсифікацію теплообміну і отримані відповідні залежності для розрахунку, справедливі при досліджених змінах геометричних і режимних факторів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Титарь С. С. Системи тепlopостачання промислових виробництв // Навчальний посібник: Одеса, 2002.
2. Горбіс З. Р. Теплообмін і гідродинаміка дисперсних наскрізних потоків. "Енергія", 1970.
3. Крючков Е. Н., Розенгарт Ю. І. Дослідження тепловіддачі від полідисперсного зернистого матеріалу до поперечно обтічної трубчастій поверхні. Т.У. 1972.

*Титар Сергій Семенович* - канд. техн. наук, професор кафедри теплових електричних станцій і енергозберігаючих технологій, Одеський національний політехнічний університет.

*Фурман Олександр Сергійович* – студент, Одеський національний політехнічний університет.

**S. Titar**

**A. Furman**

## INTENSIFICATION HEAT TRANSFER OF THE GRANULAR MATERIAL OF PACKET BED WITH THE CYLINDER BY VIBRATION

Odessa national polytechnic university

*This work has the issues of enhancement of heat transfer granular material with the cylinder by means of vibration. Theoretical and experimental investigations of heat transfer layer were carried out with a transverse watered cylinder with vibration and without vibration the purpose of obtaining an appropriate criterion equations.*

**Keywords:** packed bed, heat transfer, intensity, vibration, thermal resistance.

*Titar Sergii* – Cand. Sc. (Eng.), Professor of the chair of thermal power plants and energy saving technologies, Odessa national polytechnic university.

*Furman Olexandr* – student of the Odessa national polytechnic university.

**С. С. Титарь**

**А. С. Фурман**

## **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ПЛОТНОГО СЛОЯ С ЦИЛИНДРОМ ПРИ ПОМОЩИ ВИБРАЦИИ**

Одесский национальный политехнический университет

*В данной работе рассматриваются вопросы интенсификации теплообмена сыпучего материала с цилиндром с помощью вибрации. Были проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов теплообмена слоя с поперечно омываемым цилиндром в условиях вибрации и без нее с целью получения соответствующих критериальных уравнений.*

**Ключевые слова:** *плотный слой, теплообмен, интенсивность, вибрация, термическое сопротивление.*

**Титарь Сергей Семенович** – канд. техн. наук, профессор кафедры тепловых электрических станций и энергосберегающих технологий, Одесский национальный политехнический университет.

**Фурман Александр Сергеевич** – студент, Одесский национальный политехнический университет.