

ТЕПЛООБМІН ЩІЛЬНОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО ШАРУ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ З ПУЧКАМИ ТРУБ

Одеський національний політехнічний університет

Анотація:

У даній роботі розглядаються питання теплообміну сипучого матеріалу з пучками труб. Були проведені теоретичні та експериментальні дослідження теплообміну шару з пучками труб з метою отримання відповідних критеріальних залежностей.

Ключові слова: щільний шар, теплообмін, інтенсивність, пучки труб.

Abstract:

This scientific work is considered to the problem of heat transfer of granular material with pipe bundles. Theoretical and experimental researches regarding layer of heat transfer of packed bed with pipe bundles were carried out in order to obtain corresponding criterial depended.

Keywords: packed bed, heat transfer, intensity, pipe bundles.

Вступ

На промислових підприємствах різного профілю дуже часто виникає необхідність в нагріві (охолоджені) дрібнодисперсних та поліфракційних гранульованих матеріалів (технологічні процеси, утилізація теплоти). Ці задачі можливо вирішити, використовуючи процеси міжкомпонентного теплообміну, який характеризується високою інтенсивністю [1,2]. Однак підвод тепла середой-теплоносієм до шару дрібнодисперсного матеріалу при їх безпосередньому контакті часто обмежен через великий гідравлічний опір та можливості виносу часток матеріалу. Крім того, у ряді випадків небажано, а іноді заборонена взаємодія дисперсного матеріалу з гріючею (нагріваемою) середою (забруднення, окислення, стікання).

У зв'язку з цим усе більшу роль починає грати підведення (відведення) теплоти до щільного гравітаційного шару через поверхню нагріву. При цьому поверхню нагріву раціонально виготовляти циліндричної форми і розташувати поперек руху шару сипучого матеріалу.

Результати дослідження

Проведений попередній аналіз дозволяє зробити ряд висновків та сформулювати мету досліді. Мета роботи – дослідження теплообміну щільного гравітаційного шару сипучого матеріалу з пучками труб для отримання залежностей для розрахунку вискоефективних теплообмінних апаратів.

Вивчались пучки з шаховим розташуванням трубок, як найбільш доцільні в апаратах з щільним шаром. По даним Донскова С.В. зміна тепловіддачі відбувається в перших трьох рядах трубного пучка (зменшується по глибині пучка) і далі залишається незмінною. Тому досліджуемий калориметр розташовувався у четвертому ряді, що дозволяло отримати данні близькі до середніх для багаторядних пучків. Це підтверджують і наші попередні досліді.

Для проведення досліджень була створена експериментальна установка, що представляє собою вертикальну шахту прямокутного перетину, у якій під дією сил тяжіння у режимі щільного шару ($F_t < F_{t_{кр}}$) рухався сипучий матеріал. Швидкість шару регулювалася зведеном шиббером, який має 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 розмір шахти забезпечували відсутність впливу випуску на характер руху в місці установки досліджуваного зразка. Більш детально експериментальна установка описана в [4].

Теплообмін досліджувався при сталому русі сипучого матеріалу методами стаціонарного і регулярного теплових режимів. Для розрахунку теплообмінних апаратів необхідно мати данні по

теплообміну з пучками труб. У зв'язку з цим в одній із змінюваних шахт експериментальної установки були змонтовані трубні дошки, що дозволяли змінювати відстань між горизонтальними та вертикальними рядами труб у досить широкому діапазоні. Для дослідження було використано локальне теплове моделювання. Суть методу локального моделювання полягає в тому, що замість тепловіддачі пучка в цілому досліджується тепловіддача однієї із труб пучка.

Було проведено 13 серій дослідів для пучків, що були зібрані з труб діаметрів (22 мм та 33 мм). У кожній серії змінювались продольний та поперечний кроки, а також швидкість шару. У якості сипучого матеріалу використовувалась суміш кварцового піску з середнім розміром часток $d = 0,45$ мм.

В таблиці приведені геометричні та режимні характеристики, а також умовні позначки.

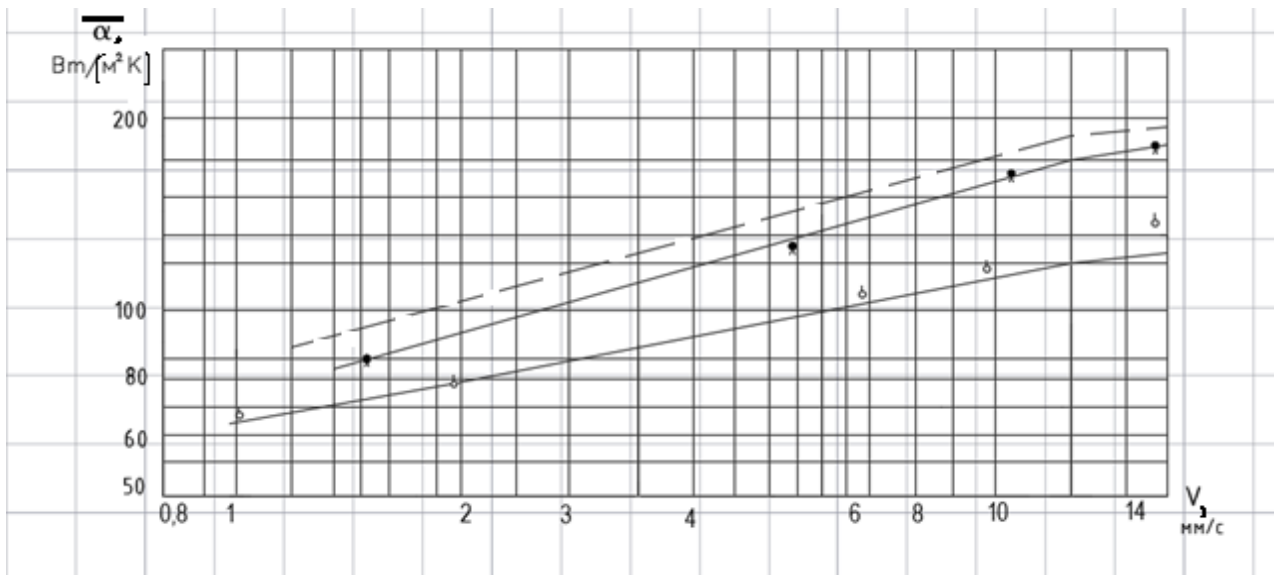
Таблиця 1

№ серії	D, мм	d, мм	Швидкість шару $V_{сл}, мм$	S_1/D	S_2/D	Кількість дослідів	Умовні позначки на графіках
1	2	3	4	5	6	7	8
1	22	0,45	0,6+12,4	2,7	6,13	5	x
2			0,15+16	2,7	3,63	7	■
3			0,06+9,1	2,7	1,82	5	♀
4			0,63+17,7	1,36	1,82	7	+
5			1,36+21	1,36	3,63	9	o
6			1,21+20,6	1,36	6,13	5	*
7			0,16+15,9	1,82	6,13	6	△
8			1,40+15,5	1,82	3,63	5	▲
9			4,9+13,3	1,82	1,82	3	▼
10	33	0,45	0,54+14,6	1,36	2,44	5	○
11			1,1+17,1	1,36	4,24	5	◆
12			0,1+17,0	1,36	5	5	●
13			0,9+17	1,36	3,03	5	▲

Всього було проведено 72 досліди.

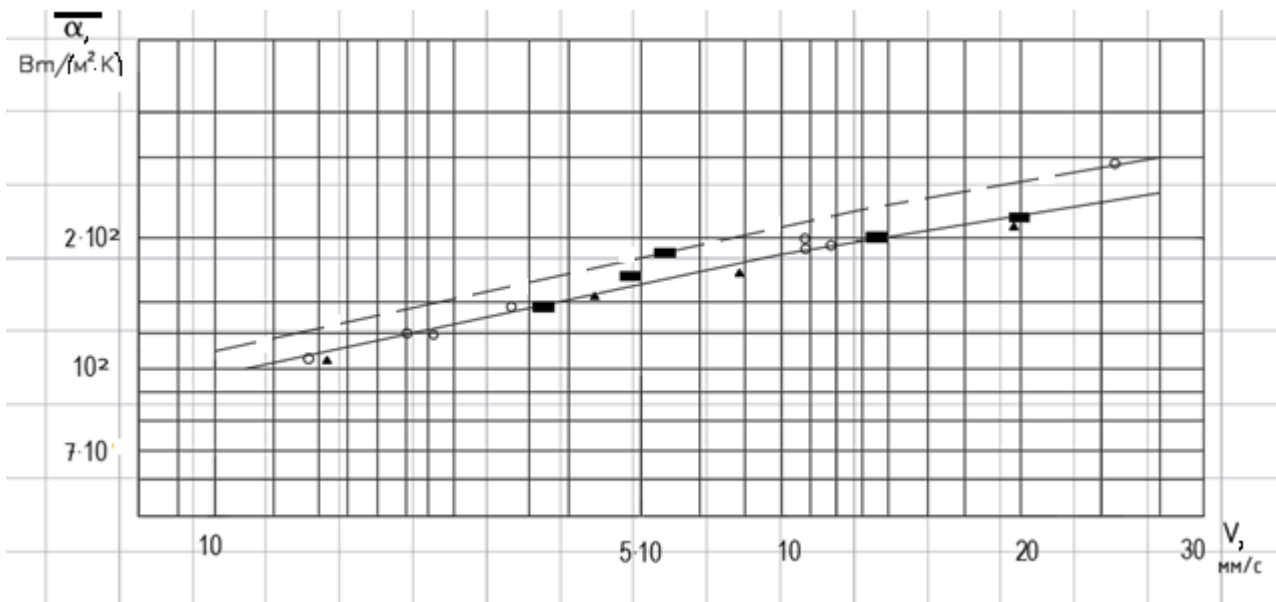
Для кожного з пучків були побудовані залежності середніх коефіцієнтів тепловіддачі від швидкості шару. На фіг.1 представлена така залежність. Для порівняння на цьому ж графіку наведені данні, що отримані для одиночного калориметру. Аналізуючи отримані графіки, можна відмітити, що в усьому діапазоні зміни режимних і геометричних характеристик середній коефіцієнт тепловіддачі збільшується з зростанням швидкості шару. Інтенсифікація теплообміну при зростанні швидкості пов'язана в першу чергу з покращенням тепловідводу з бокових поверхонь циліндру, тому що покращується перемішування часток у поверхні та зменшується їх час контакту з калориметром, що приводить до збільшення температурного градієнту на межі з поверхнею нагріву.

На фіг.2 представлена залежність середнього коефіцієнту тепловіддачі пучка труб діаметрами 22 мм від швидкості шару при змінному поперечному кроці ($S_1/D=1,36-2,7$) та незмінному продольному ($S_2/D=3,36$). Як свідчить графік, експериментальні данні, отримані для пучків з різними поперечними кроками, узагальнюються однією залежністю.



Фіг.1 Залежність середнього коефіцієнту тепловіддачі від швидкості шару (--- одиночний калориметр $D = 33$ мм)

Аналогічна картина спостерігається для всіх досліджених компоновок пучків при тих же умовах ($S_2/D = \text{idem}$; $S_1/D = \text{var.}$). Таким чином, можна зробити висновок, що у дослідженому діапазоні змін геометричних та режимних характеристик впливу на теплообмін поперечного кроку не виявлено. Це можна пояснити тим, що характер омивання труб у пучку в дослідженому діапазоні зміни відносних поперечних кроків ($S_1/D = 1,36; 1,82; 2,7$) є таким, як для одиночного калориметру, тобто сусідні трубки не мають взаємного впливу.



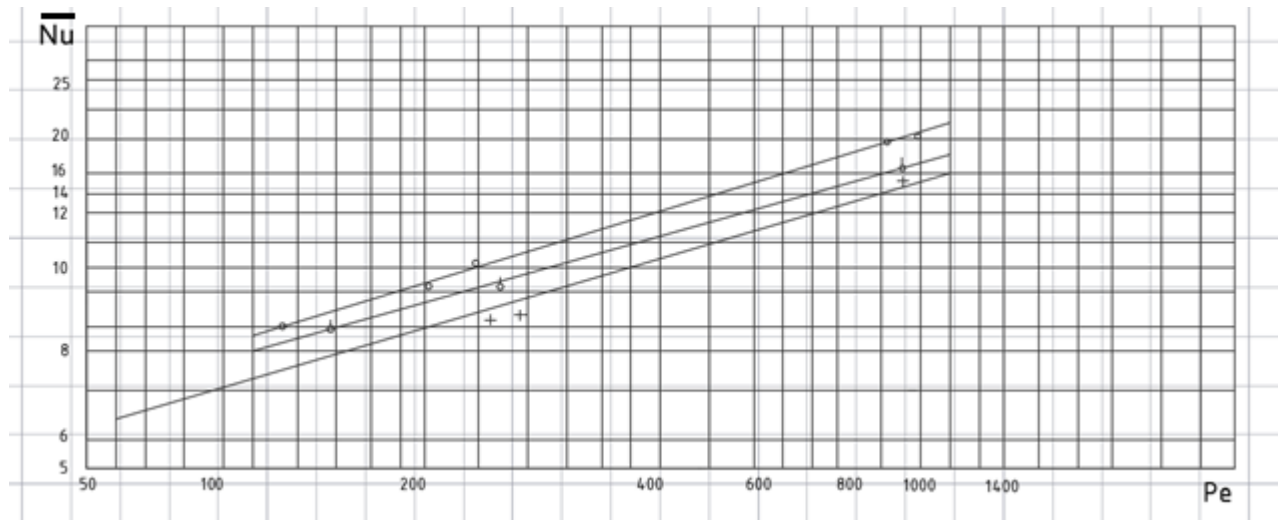
Фіг.2 Залежність середнього коефіцієнту тепловіддачі від швидкості шару ($D = 22$ мм; $S_1/D = 1,36 - 2,7$; $S_2/D = 3,63$; --- одиночний калориметр)

Експериментальні данні були оброблені на основі отриманого у роботі загального критеріального рівняння, що описує теплообмін щільного гравітаційного шару з пучком труб. При цьому відповідно з умовами проведення експерименту було пропущені ряд критеріїв, вплив яких не виявлено.

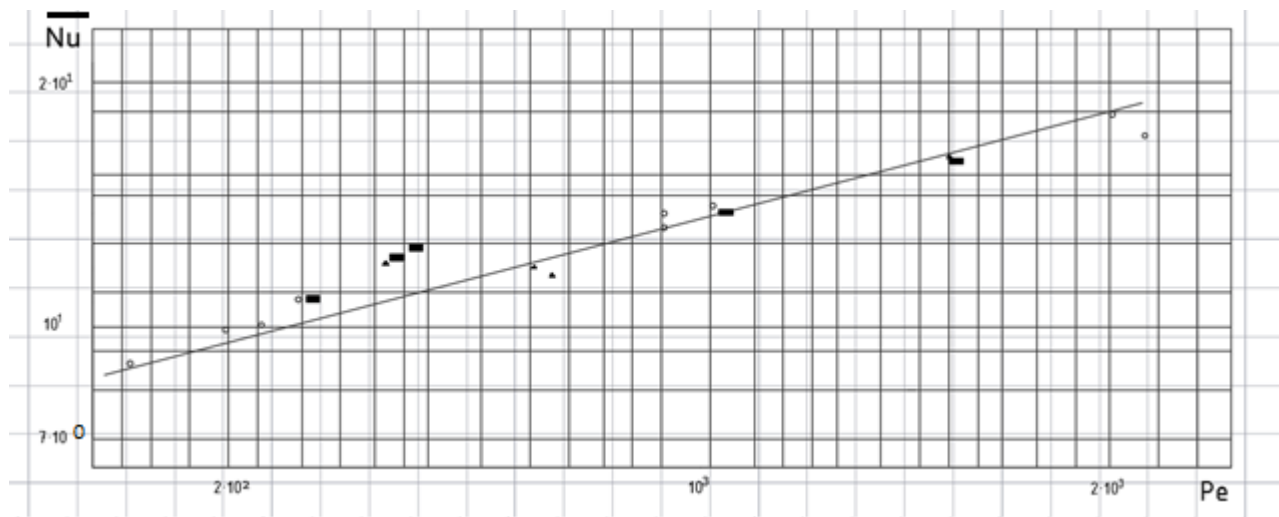
Після виключення із загального критеріального рівняння, з причини, що зазначене в них, таких факторів як відносний поперечний крок S_1/D , критерій Фруда Fr , номера горизонтального ряду у пучку h , геометричні фактори стислості $(S_1-D)/d$ воно буде мати такий вигляд:

$$Nu = f\left(Pe, \frac{S_2}{D}, \frac{D}{d}\right) \quad (1)$$

На фіг.3,4 представлені залежності числа Нусельта від критерія Pe при $S_1/D=idem$ (фіг.3) та $S_2/D=idem$. (фіг.4). У першому випадку спостерігається залежність від відносного продольного кроку (S_2/D) , у другому випадку всі данні вкладаються на одну залежність. Це ще раз підкреслює той факт, що на інтенсивність теплообміну в дослідженому нами діапазоні зміни геометричних і режимних характеристик впливає продольний крок. Впливу поперечного кроку не виявлено. В обох випадках залежність інтенсивності теплообміну від критерія Пекле зберігається такою ж, як для одиночного калориметру ($Nu \sim Pe^{0.28}$).

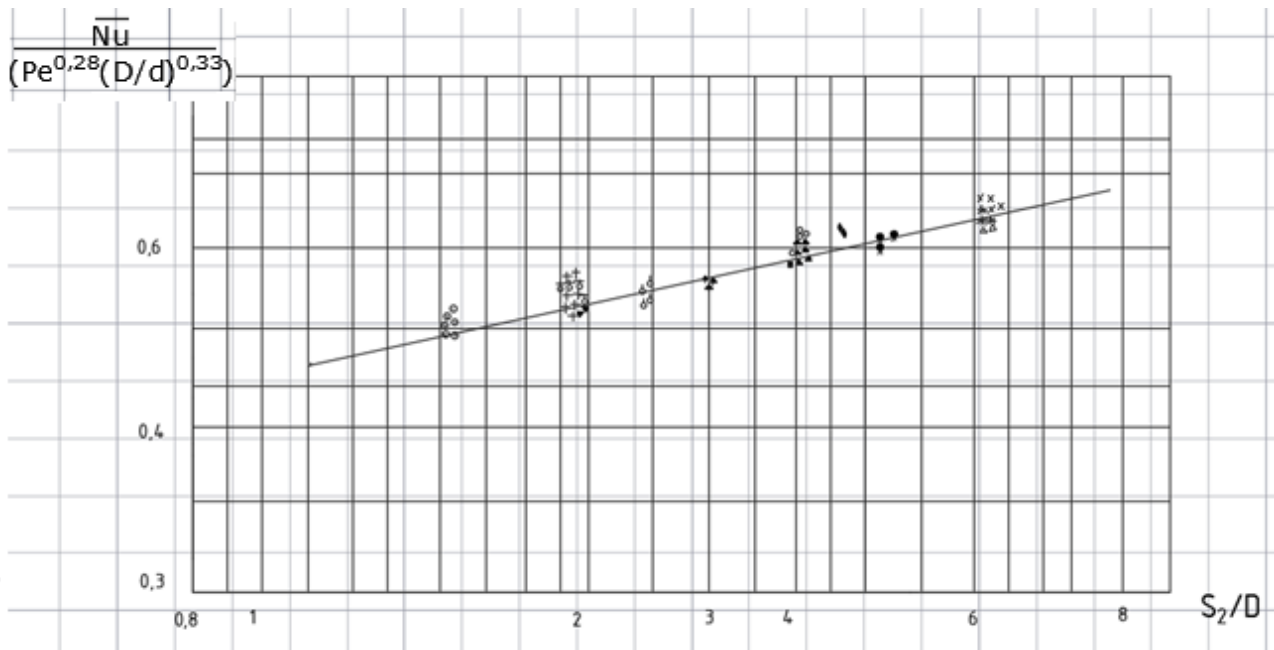


Фіг.3 Залежність інтенсивності теплообміну від критерія Пекле ($D=22\text{мм}$, $D=33\text{мм}$, $S_1/D=1,36$)



Фіг.4 Залежність $Nu=f(Pe)$ $D=22\text{мм}$, $S_2/D=idem$, $S_1/D=var.$

Узагальнююча залежність по теплообміну сумішей ідеально сипких та близьких до них матеріалів представлена на фіг.5



Фиг.5 Узагальнена залежність по теплообміну шару з пучками труб (о – наші данні по теплообміну полукокса $S_1/D=S_2/D=1,5$; інші умовні позначення у таблиці 1)

Для розрахунку трубчастих теплообмінних апаратів пропонується наступна критеріальна залежність:

$$Nu = 0,47Pe^{0,28} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,33} \left(\frac{S_2}{D}\right)^{0,2} \quad (2)$$

При $1,36 \leq S_1/D \leq 2,7$; $1,82 \leq S_2/D \leq 6,13$; $60 \leq Pe \leq 1500$; $45 \leq D/d \leq 1,5$.

Рівняння (2) з можливою помилкою $\pm 6\%$ справедлива при різних напрямках теплового потоку (нагрів, озолюдження) та температурі шару до $500-600^\circ\text{C}$.

Висновки

1. Досліди проведено у доволі широкому діапазоні геометричних та режимних характеристик (дивись межі застосування формули (2)).
2. В результаті експериментів в межах проведених досліджень не виявлено впливу поперечного кроку трубних пучків S_1/D на теплообмін.
3. Отримана критеріальна залежність, яка дозволяє розраховувати трубчасті теплообмінні апарати, що нагрівають (охолоджують) сипучий матеріал.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбис З.Р. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями/ З.Р. Горбис, В.А. Камендерьян. – М.: Энергия, 1975 – 296 с.
2. Бойкова И.Л. Исследование эффективности теплообмена в теплообменниках-утилизаторах с гранулированной насадкой/ И.Л. Бошкова, А.В. Солодкая// Энергетика. Теплообмены регионального развития. – 2016. – Т3, №32 – с.101 – 106.
3. Титар С.С. Интенсификация теплообмена сипучого матеріалу щільного шару з циліндром за допомогою вібрації/ С.С.Титар, О.С. Фурман// Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково – технічний збірник. – 2016. - №1 – с.65-70
4. Титар С.С. Локальний теплообмін щільного шару сипкого матеріалу з циліндром за відсутності та наявності вібрації/ С.С.Титар, О.М. Шраменко/ Вісник Вінницького політехнічного університету – 2018. - №1(136) – с.18-23.

Титар Сергій Семенович – к.т.н., професор кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій, Інститут енергетики та комп'ютерних систем управління, Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, email: titar.sergey@gmail.com

Бабаєв Євген Сергійович – студент 5 курсу, Інститут енергетики та комп'ютерних систем управління, Одеський національний політехнічний університет, email: babaev.evgeny1996@gmail.com

Titar Sergiy Semyonovich - Ph.D., Professor, Department of Heat Power Stations and Energy Technologies, Institute for Power Engineering and Computer Systems, Odesky National Polytechnic University, Odesa, email: titar.sergey@gmail.com

Babaev Evgen Sergiyovich - 5th year student, Institute of Power Engineering and Computer Management Systems, Odesky National Polytechnical Engineering University, email: babaev.evgeny1996@gmail.com