

ЛОКАЛЬНИЙ ТЕПЛООБМІН ЩІЛЬНОГО ШАРУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ З ЦИЛІНДРОМ ЗА ВІДСУТНОСТІ ТА НАЯВНОСТІ ВІБРАЦІЇ

¹Одеський національний політехнічний університет

Проведені експериментальні дослідження з визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі поперечно омиваного щільним шаром циліндра за наявності та відсутності вібрації. Встановлено, що вібрація значно інтенсифікує теплообмін за малих швидкостей шару. Пов'язане це з тим, що вібрація циліндра істотно змінює картину обтікання, зменшуючи нерухому зону на лобовій частині циліндра та зменшуючи зону відриву шару у кормовій частині.

Ключові слова: теплообмін, вібрація, коефіцієнт тепловіддачі, параметри вібрації, швидкість шару.

Вступ

Процес теплообміну щільного шару сипкого середовища з циліндричною поверхнею викликає інтерес у багатьох дослідників, які розробляють теплообмінні апарати для хімічної, металургійної, енергетичної галузей, для переробки палива та ін. Деякі результати таких досліджень наведено в [1].

Під час обтікання циліндра на його лобовій частині утворюється призматична зона з малорухомих частинок, кормову частину займає зона відриву шару сипкого матеріалу («повітряний мішок») і лише в екваторіальній зоні спостерігається безвідривний рух частинок. Така картина спостерігається при візуалізації процесу.

Оскільки теплообмін поперечно омиваного щільним шаром циліндра відрізняється низькою інтенсивністю [2], потрібно знати локальний теплообмін і те, як ефективно використати вібрацію для інтенсифікації теплообміну.

Мета роботи — визначення коефіцієнтів тепловіддачі в кожній точці периметра циліндричної поверхні, що омивається щільним шаром сипкого середовища, за відсутності та наявності вібрації циліндра.

Методика досліджень, експериментальна установка та схема вимірювань повинні відповідати таким вимогам:

- отримання даних з точністю $\pm 15\%$, що достатньо для практичного використання;
- вивчення впливу основних визначальних факторів і параметрів вібрації, швидкості шару, співвідношення розмірів частинок матеріалу та циліндра, сипких властивостей шару тощо;
- можливість змінювати зазначені фактори у досить широкому діапазоні.

Експериментальне визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі

У дослідженнях теплообміну найширше застосування знайшов стаціонарний метод, за якого локальний коефіцієнт тепловіддачі визначають за формулою

$$\alpha_x = \frac{dQ}{dF(t_x - t_f)}, \quad (1)$$

де α_x — локальний коефіцієнт тепловіддачі; $\frac{dQ}{dF}$ — густина теплового потоку; t_x — локальна температура поверхні; t_f — температура потоку сипкого матеріалу.

Для проведення досліджень створено експериментальну установку, схема якої показана на рис. 1.

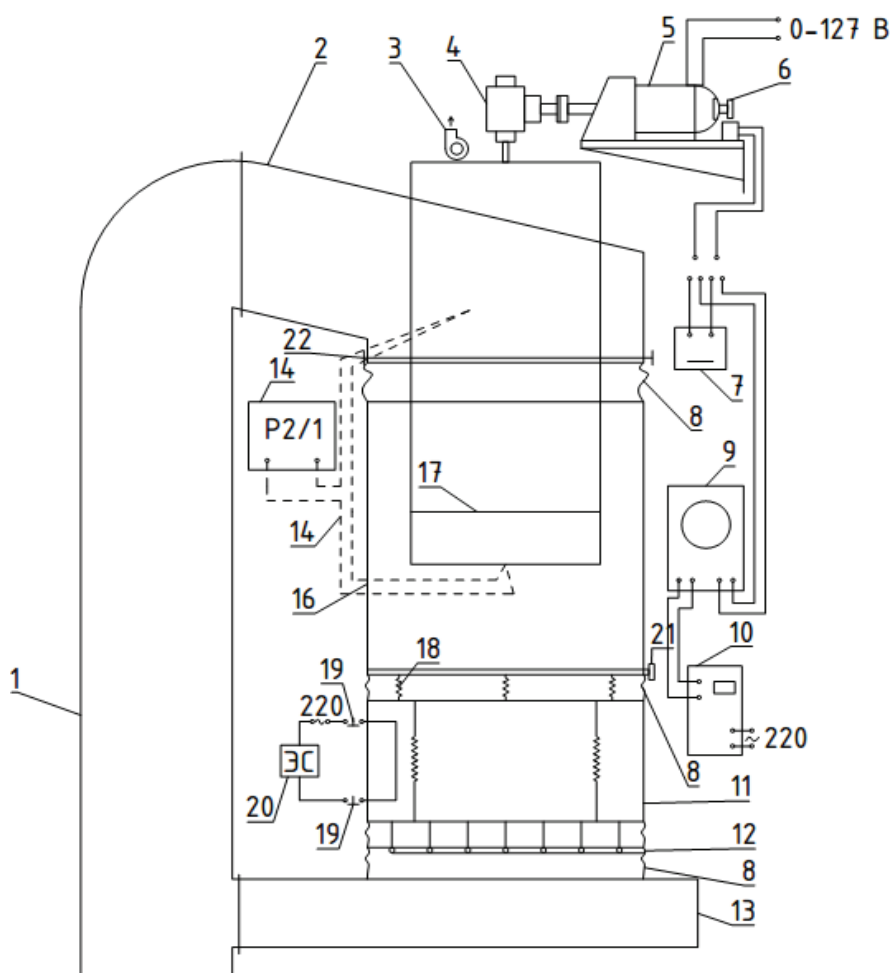


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 — ковшовий елеватор; 2 — нахилений жолоб; 3 — віброграф; 4 — вібратор; 5 — електродвигун; 6 — електромагнітний датчик; 7 — міліамперметр; 8 — сильфон; 9 — осцилограф; 10 — звуковий генератор; 11 — мірна ємність; 12 — привід жалюзі; 13 — транспортер; 14 — потенціометр; 15 — термopара; 16 — шахта; 17 — експериментальний циліндр; 18 — пружини; 19 — вимикач; 20 — секундомір; 21 — нижній шибер; 22 — верхній шибер

Сипкий матеріал у вигляді щільного шару під дією сили тяжіння з нахиленого жолобу 2 потрапляє у шахту 16, де в зоні рівномірного розподілу швидкості матеріалу горизонтально розміщений експериментальний циліндр 17. Рух у вигляді щільного шару сипкого матеріалу, рівномірний розподіл швидкості по перерізу, а також її регулювання забезпечувалось за допомогою спеціального дірчастого шибера 21, встановленого у випускному перетині шахти. Після проходження шахти та мірної ємності 11 матеріал потрапляє на горизонтальний транспортер 13, потім у ковшовий елеватор 1 і знову в нахилений жолоб 2, тобто рухався по замкненому контуру. Періодичне вимірювання витрати проводилося за допомогою мірної ємності 11.

В задачу досліджень входило визначення коефіцієнтів тепловіддачі як за наявності вібрації циліндра, так і за її відсутності. Вібрації створював дебалансний вібратор 4, який приводився в дію двигуном постійного струму 5. Частота вібрації змінювалась за допомогою змінення частоти обертання електродвигуна. Змінні ексцентрики вібратора 4 дозволяли міняти амплітуду вібрації.

Схеми експериментального зразка та вимірювань показані на рис. 2. Калориметр є порожнім циліндром, виготовленим 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 дозволила підняти температуру нагрівача вище 150°C .

Нагрівач виготовлено з каліброваної ніхромової стрічки, яка щільно приклеєна до поверхні каркасу. Товщина стрічки — $0,2 \text{ мм}$, ширина — 5 мм .

Стрічковий нагрівач приклеювався на каркас клеєм Бф-2 із зазорами $0,5 \text{ мм}$, які потім заливалися епоксидною смолою. Це дозволило отримати поверхню з приблизно однаковою шорсткістю, а нагрівач не чинив додаткового впливу на характер обтікання циліндра.

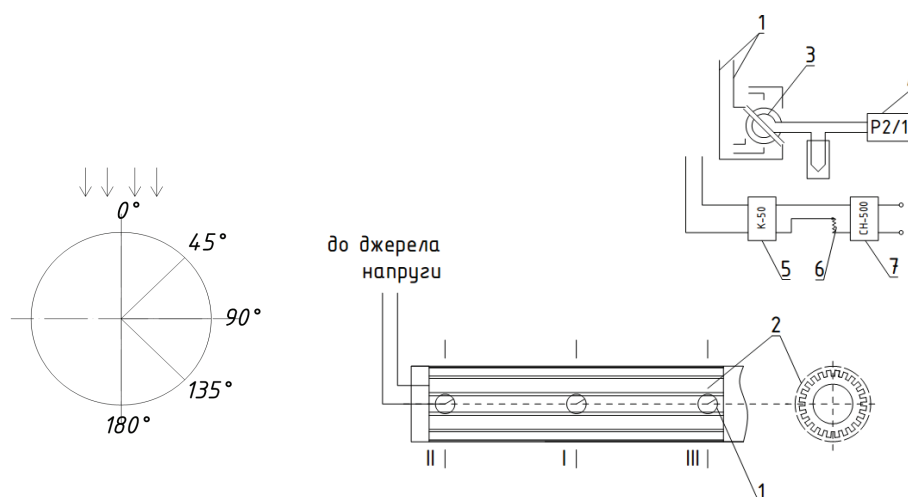


Рис. 2. Схема експериментального зразка та вимірювань: 1 — термопари; 2 — стрічковий електронагрівач; 3 — перемикач; 4 — потенціометр; 5 — вимірюючий комплект; 6 — трансформатор; 7 — стабілізатор

Контрольно-вимірювальні прилади мали клас точності 1 та 2 і забезпечували вимірювання всіх величин, необхідних для визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі. Таким же вимогам відповідали прилади, що реєстрували режимні умови дослідження (витрата сипкого матеріалу, його об'ємну вагу, параметри вібрації та ін.).

Температура поверхні вимірювалась мідно-константовими термопарами (діаметр термоелектродів 0,2 мм) в емалевій та шовковій ізоляції. Термопари укладались під стрічковим нагрівачем та виводились крізь порожнину каркасу циліндра (див. рис. 2).

Температура шару матеріалу на вході та виході з шахти вимірювалась ртутними термометрами з точністю 0,1 °С.

Вимірювання витрат матеріалу здійснювалось за допомогою мірної ємності (див. рис. 1) Параметри вібрації контролювались вібрографом ВР-1 (амплітуда) і за допомогою осцилографа за фігурами Ліссажу (частота).

В досліді площа поверхні теплообміну обчислювалась як πDL . Таким чином, в площу поверхні теплообміну включалася не тільки площина стрічкових нагрівачів, але й зазори між ними. Враховуючи, що середня температура зазору нижче температури стрічки, отриманий коефіцієнт тепловіддачі буде більшим за реальний. Як показали досліді, поправка до коефіцієнта тепловіддачі у цьому випадку не перевищує 1 %, тому не враховувалась.

Як сипкий матеріал використовувався повітряно-сухий кварцовий пісок.

У табл. 1 наведені характеристики режимів основних серій дослідів.

Всього проведено 60 дослідів, аналіз яких показав, що має місце значна зміна коефіцієнтів тепловіддачі по периметру циліндра, в той час як по довжині вони практично незмінні.

Таблиця 1

Режими дослідів

Серія	Швидкість шару, мм/с	Амплітуда коливань, мм	Частота, Гц	Швидкість вібрації, мм/с	Відносна швидкість вібрації
I	0,313...9,37	2	20	80	8,52...256
II	0,313...9,37	2,22	30	133,2	14,25...426
III	0,311...11,41	3	40	240	21...771
IV	2,56...11,24	3	50	300	26,7...117,1
V	0,233...10,4	1	40	80	7,68...343
VI	0,233...10,4	2,55...4,25	40	204...340	27,8...876
VII	0,271...11,3	1,5	50	150	13,3...553

Графіки розподілу інтенсивності теплообміну по периметру за різних параметрів вібрації і швидкостей шару показано на рис. 3. Там же для порівняння подані дані для нерухомого циліндра. За низьких швидкостей шару вібрація не вносить суттєвих змін в характер розподілу тепловіддачі: на лобовій частині циліндра ($0^\circ < \varphi < 30^\circ$) коефіцієнт тепловіддачі суттєво не змінюється, за відміткою $\varphi = 30^\circ$ — починає помітно зростати, досягає максимуму, коли $\varphi = 112^\circ$, потім зменшується до кормової відмітки (лінії 1, 3, 6). У разі високих швидкостей розподіл за відсутності вібрації

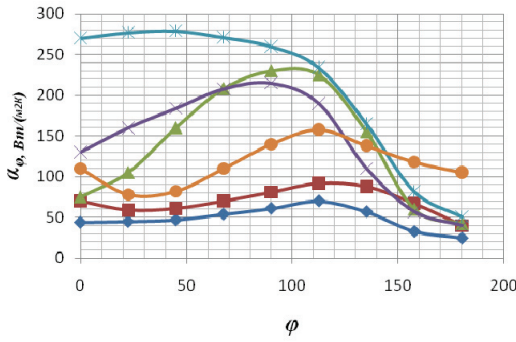


Рис. 3. Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по периметру циліндра: 1 — серія I, $V = 0,31$ мм/с; 2 — серія I, $V = 9,4$ мм/с; 3 — серія III, $V = 0,31$ мм/с; 4 — серія III, $V = 11,0$ мм/с; 6 — без вібрації, $V = 0,31$ мм/с; 7 — без вібрації, $V = 10,6$ мм/с

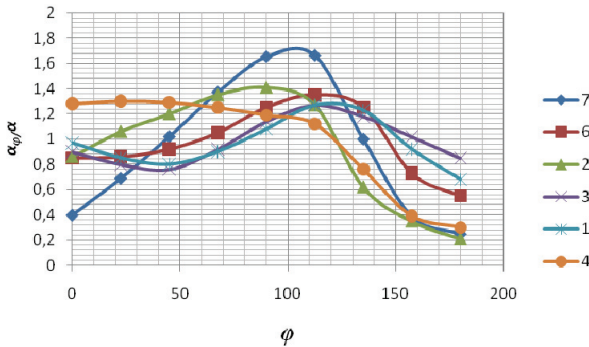


Рис. 4. Розподіл ступеня нерівномірності по периметру циліндра

стає ефективність всієї верхньої половини циліндра: так, якщо $V_{ш} = 11$ мм/с та $f = 0$ Гц, значеннями $\frac{\alpha_\phi}{\alpha} > 1$ характеризується тільки ділянка $45^\circ < \phi < 135^\circ$, то якщо $f = 20$ Гц та $2A = 3$ мм її межі розширюються до $20^\circ < \phi < 130^\circ$, а за $f = 40$ Гц і такій самій амплітуді — до $0^\circ < \phi < 90^\circ$. У разі низьких швидкостей шару поліпшується використання нижньої частини циліндра.

Залежність локальних коефіцієнтів тепловіддачі від швидкості шару також змінюється під впливом вібрації. В табл. 2 подані значення показників ступеня у формулах типу $\alpha_\phi = cV_{ш}^n$ для характерних ділянок за наявності вібрації з різними параметрами, а також без неї. Аналіз цих даних показує, що за відсутності вібрації зростання швидкості шару інтенсифікує теплообмін на всій поверхні, причому це особливо помітно на боковій поверхні, а менше — на лобовій. У разі вертикальної вібрації зростання швидкості приводить до поліпшення тепловіддачі тільки на лобовій та бокових ділянках, а коли $\phi > 130^\circ$ тепловіддача погіршується. Як свідчить таблиця, за незмінних параметрів вібрації показник n має максимальне значення на ділянці $\phi = 0^\circ$, потім у разі віддалення від неї зменшується, а якщо $\phi > 130^\circ$, то набуває знаку мінус.

Чим вищі параметри вібрації, тим слабше вплив швидкості на більшій частині поверхні і тим нижчий показник ступеня n за інших рівних умов. Це пояснюється, тим що за наявності вібрації швидкість шару перестає бути єдиним фактором, що визначає характер омивання та тепловіддачу. Суттєвішу роль відіграє вібрація.

Таблиця 2

Показник ступеня n в залежності $\alpha_\phi = cV_{ш}^n$

№ серії	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 180^\circ$
Без вібрації	0,16	0,37	0,18
I	0,22	0,30	-0,06
V	0,23	0,09	-0,32

відрізняється значною нерівномірністю (лінія 7).

Вібрація суттєво змінює картину на верхній частині циліндра, приводячи до вирівнювання тепловіддачі. Зі зростанням параметрів вібрації цей ефект посилюється і максимум зміщується до лобової частини (лінії 2, 4). Так, за частоти 40 Гц та швидкості шару 11 мм/с тепловіддача на відмітці ($0^\circ < \phi < 90^\circ$) близька до максимуму, а потім знижується, причому найбільш різко в зоні ($120^\circ < \phi < 150^\circ$).

Нерівномірність розподілу тепловіддачі по периметру, що характеризується відношенням

$$k = \frac{\alpha_\phi}{\alpha}$$

як за вібрації, так і без неї. Це можна побачити на рис. 4 (лінії 1 та 2, 3 та 4, 6 та 7). За $V_{ш} = \text{idem}$ вібрація вирівнює нерівномірність тим значніше, чим вище її параметри. Наприклад, коли $V_{ш} = 11$ мм/с і $2A = 3$ мм, екстремальні значення становили: якщо $f = 40$ Гц — $k_{\max} = 1,12$, $k_{\min} = 0,3$; $f = 20$ Гц — $k_{\max} = 1,45$, $k_{\min} = 0,25$; $f = 0$ Гц — $k_{\max} = 1,7$, $k_{\min} = 0,25$.

Рис. 4. дозволяє також визначити, як змінюється під впливом вібрації ефективність використання окремих ділянок поверхні циліндра. Якщо за відсутності вібрації ефективно працюють бокові ділянки, то за наявності вібрації істотно зростає ефективність всієї верхньої половини циліндра: так, якщо $V_{ш} = 11$ мм/с та $f = 0$ Гц, значеннями

Інтенсифікація теплообміну під впливом вібрації на різних ділянках неоднакова. Ступінь інтенсифікації може бути визначений як відношення локального коефіцієнта тепловіддачі за наявності вібрації до відповідного значення без вібрації (за інших однакових умов) На рис. 5 показані зміни цієї характеристики по периметру за різних режимів.

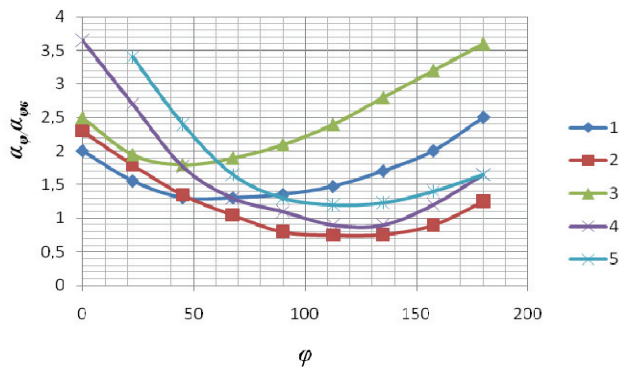


Рис. 5. Розподіл ступеня інтенсифікації по периметру циліндра:
5 — серія IV, $V_{ш} = 2,13$ мм/с

тає під впливом вібрації тільки за низьких швидкостей гравітаційного руху шару та високих параметрів вібрації. Зі зростанням амплітуди і частоти коливань ступінь інтенсифікації по всьому периметру збільшується за інших рівних умов.

Вплив вібрації на теплообмін пояснюється змінами характеру обтікання циліндра. Цей вплив є суттєвішим на тих ділянках, де рух повільний і, отже, має місце великий термічний опір. За малих швидкостей шару під впливом вібрації покращується обтікання по всьому периметру: зменшуються розміри нерухомої зони на лобовій частині та зони відриву в кормі, на бокових поверхнях поліпшується перемішування частинок і, як наслідок, знижується час їх контакту з поверхнею. Можна вважати, що завдяки вібрації, матеріал у застійній зоні набуває деяку рухомість, однак за малих швидкостей шару цей ефект ще не дуже значний і зруйнувати застійну зону вібрація не може.

Зі зростанням швидкості шару спільний вплив сил інерції та вібрації підсилює перемішування матеріалу застійної зони, а коли ці сили перевищують сили тертя, вона повністю руйнується. У разі $f = 40$ Гц, $2A = 3$ мм і $V_{ш} = 11$ мм/с (лінія 4, рис. 3), коефіцієнти тепловіддачі на лобовій поверхні досягають таких же значень, як і на бокових, застійна зона відсутня. На екваторіальних ділянках, де за великих швидкостей шару спостерігається інтенсивне перемішування і безвідривний рух без вібрації, остання не приводить до покращення теплообміну. У деяких випадках вона може навіть впливати негативно, приводячи до розпушування шару. З цих причин інтенсифікація руху та теплообміну в таких умовах спостерігається тільки на незначній частині поверхні. До аналогічних висновків привели візуальні спостереження за обтіканням віброуючого циліндра, які проводилися за допомогою пофарбованих шарів матеріалу.

Висновки

Дослідження локального теплообміну циліндра, що поперечно омивається шаром сипкого матеріалу, дозволили встановити:

1. У разі нерухомого циліндра теплообмін змінюється по периметру і ці зміни тим суттєвіші, чим вище швидкість шару. Так, якщо $V_{ш} = 0,31$ мм/с, то $\alpha_{\phi}^{\min} = 20$ Вт/(м²К), $\alpha_{\phi}^{\max} = 70$ Вт/(м²К), якщо $V_{ш} = 10,6$ мм/с, то $\alpha_{\phi}^{\min} = 40$ Вт/(м²К), $\alpha_{\phi}^{\max} = 235$ Вт/(м²К).

2. Вібрація циліндра покращує теплообмін практично на всіх ділянках периметра (див. криві 4 та 7 на рис. 3.)

3. Вплив вібрації на теплообмін зумовлений зміною характеру обтікання циліндра. Цей вплив суттєвіший на тих ділянках периметра, де рух шару менш інтенсивний (наприклад, нерухома зона на лобовій ділянці).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.

[1] С. С. Титар, та О. С. Фурман, «Інтенсифікація теплообміну щільного шару сипкого матеріалу з циліндром за допомогою вібрації», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. № 1(20), 2016.

- [2] З. Р. Горбис, «Теплообмен и гидродинамика дисперстных сквозных потоков,» Москва, Россия: Энергия, 1970.
 [3] С. С. Титар, *Системи енергопостачання промислових підприємств*. Одеса, Україна: АТ БАХВА, 2002, 356 с.
 [4] В. П. Исаченко, В. А. Осипова, и А. С. Сукомёл, *Теплопередача*. Москва, Россия: Энергия, 1975, 423 с.

Стаття рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.10.2017

Титар Сергій Семенович — канд. техн. наук, професор кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій;

Шраменко Олександр Миколайович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій, e-mail: alexandr.shramenko@gmail.com

S. S. Tytar¹
O. M. Shramenko¹

Local Heat Exchange of Dense Layer of Bulk Material with Cylinder in the Absence and Presence of Vibration

¹Odessa National Polytechnic University

Experimental studies have been carried out to determine the local heat transfer coefficients of a transversely streamlined cylinder with a dense layer of bulk material in the absence and presence of vibration. The effect of vibration on the heat transfer of a cylinder with a dense layer is explained by changes in the nature of the flow around the cylinder. This effect is more significant in areas where the movement is slow and there is more thermal resistance. It is established that the effect of vibration on the heat transfer intensity depends substantially on the velocity of the dense layer. At low layer velocities, the flow around the perimeter improves under the influence of vibration: the dimensions of the stationary zone on the frontal part and the tearing zone in the stern are reduced, mixing of the particles improves on the side surfaces and, as a consequence, their contact time decreases. At low layer velocities, vibration provides a significant intensification of heat transfer along the entire perimeter: the maximum on the bottom surface of the cylinder, the smaller - the upper and the minimum on the lateral. At higher layer velocities, the intensification reaches a maximum value on the frontal surface, the heat transfer on the side surfaces does not improve, and in some cases deteriorates. At equatorial sections, where intensive mixing and continuous motion without vibration are observed at high layer velocity, vibration does not lead to an improvement in heat transfer. In some cases, it can even affect negatively, leading to loosening of the layer. With the growth of the layer velocity, the joint influence of inertia and vibration forces intensifies the mixing of the material of the stagnant zone, and when these forces exceed the frictional forces, it completely collapses.

Keywords: heat transfer, vibration, heat transfer coefficient, vibration parameters, layer velocity.

Tytar Serhii S. — Cand. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Thermal Power Engineering and Energy Technology;

Shramenko Oleksandr M. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Thermal Power Engineering and Power Engineering Technologies, e-mail: alexandr.shramenko@gmail.com

С. С. Титарь¹
А. Н. Шраменко¹

Локальный теплообмен плотного слоя сыпучего материала с цилиндром при отсутствии и наличии вибрации

¹Одесский национальный политехнический университет

Проведены экспериментальные исследования по определению локальных коэффициентов теплоотдачи поперечно обтекаемого цилиндра с плотным слоем сыпучего материала при отсутствии и наличии вибрации. Установлено, что вибрация существенно интенсифицирует теплообмен при небольших скоростях слоя. Связано это с тем, что вибрация цилиндра существенно изменяет картину обтекания цилиндра, уменьшая застойную зону на лобовой части цилиндра и уменьшая зону отрыва слоя в кормовой части.

Ключевые слова: теплообмен, вибрация, коэффициент теплоотдачи, параметры вибрации, скорость слоя.

Титарь Сергей Семёнович — канд. техн. наук, профессор кафедры тепловых электрических станций и энергосберегающих технологий;

Шраменко Александр Николаевич — канд. техн. наук, профессор кафедры тепловых электрических станций и энергосберегающих технологий, e-mail: alexandr.shramenko@gmail.com