

Б.Г. Сапожников, Ю.О. Зеленкова, Е.Г. Решетников, Г.Б. Сапожников,
Н.П. Ширяева

Уральский государственный технический университет – УПИ, Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ВИБРОКИПАЩИМ СЛОЕМ И ПОГРУЖЕННОЙ В НЕГО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ВИДЕ ЗМЕЕВИКА ТРУБ

АННОТАЦИЯ

Приводятся новые экспериментальные данные по коэффициентам теплоотдачи между виброкипящим слоем и погруженной в него вертикальной поверхностью в виде змеевика труб в зависимости от параметров вибрации и размера частиц

1. ВВЕДЕНИЕ

Известны свойства виброкипящего слоя [1], позволяющие значительно интенсифицировать процессы в гетерогенных системах газ-твердое такие, как восстановление и окисление, сублимация и десублимация, сушка, нагрев или охлаждение сыпучих материалов и др. При осуществлении теплонапряженных процессов широко применяются размещенные в слое развитые поверхности теплообмена в виде вертикальных и горизонтальных пучков труб [2, 3]. Другой возможностью является размещение в виброслое вертикального трубчатого змеевика, оказывающего положительное влияние на гидродинамику в слое в целом и отличающегося технологичностью изготовления. Однако в настоящее время сведения о процессах теплообмена для такой поверхности с виброкипящим слоем в литературе отсутствуют.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Исследования проводились на экспериментальной установке (калориметре), приведенной на рис. 1. Калориметр представляет собой цилиндрический сосуд 1 диаметром 150 и высотой 215 мм. В центральной части его размещена развитая поверхность в виде змеевика 3, выполненного из труб нержавеющей стали Х18Н9Т ($\lambda_c = 14,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$) диаметром 14х2 мм. Число витков – 8, средний диаметр их – 80 мм. Витки плотно прижаты друг к другу без зазора. Для большей жесткости возможна сварка между витками. Штуцеры входа и выхода охлаждающей воды расположены на боковой стенке цилиндра. Сверху калориметр закрывается крышкой 4, на которой смонтированы два кармана для хромель-

копелевых термопар 5 и 6. Под дном сосуда находится нагреватель 2. Все наружные поверхности калориметра теплоизолированы.

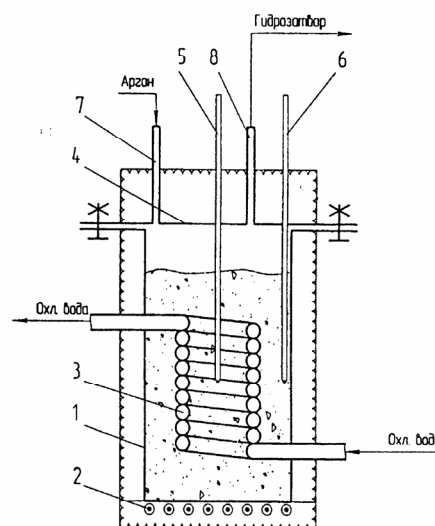


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – корпус сосуда; 2 – нагреватель; 3 – змеевик; 4 – крышка; 5, 6 – термопары; 7, 8 – штуцеры

В качестве дисперсного материала использовались: электрокорнд узких фракций с размером частиц $d_T = 0,1, 0,32$ и $0,63$ мм, а также кварцевый песок следующего гранулометрического состава:

d_i , мм	0 ÷ 0,063	0,063 ÷ 0,2	0,2 ÷ 0,32	0,32 ÷ 0,4	0,4 ÷ 0,63
%	2,0	32,5	39,8	23,2	2,5

со средним диаметром $d_T = 0,243$ мм. Высота неподвижного слоя во всех опытах $H_0 = 200$ мм.

Исследования проводились при частоте вибрации $f = 25$ Гц, которая при данной высоте слоя согласно [4, 5] является оптимальной; амплитуда вибрации A изменялась от 1,0 до

2,5 мм. При этом относительное ускорение вибрации $K = 4\pi^2 A f^2 / g = 2,52 - 6,29$.

Для охлаждения змеевика (а значит и слоя) использовалась проточная вода с температурой на входе $5 \div 10$ °С и расходом $G = 90 \div 515$ л/ч.

3. ВЫБОР МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕЕ АПРОБАЦИЯ

При выборе методики исследования основывались на таком известном свойстве вибрирующего слоя, как высокая равномерность распределения температуры по объему слоя, которая обусловлена интенсивным движением и перемешиванием сыпучего материала в такой системе. Поэтому была выбрана методика определения коэффициента теплоотдачи при охлаждении тела с малым числом Био ($Bi < 0,1$).

Такой процесс всегда является регулярным [6]. В этом случае темп охлаждения тела $m = \psi \frac{\alpha \cdot F}{C}$, где

α – искомый коэффициент теплоотдачи; F – поверхность охлаждения тела; C – полная его теплоемкость, а коэффициент неравномерности распределения температуры $\psi = 1$.

Для проверки принятой методики исследования была проведена серия опытов со слоем кварцевого песка при различных расходах охлаждающей воды.

Опыты проводились следующим образом. Сосуд заполнялся исследуемым материалом, закрывался крышкой и жестко крепился к столу вибростенда. После запуска вибростенда устанавливались частота и амплитуда вибрации. Затем включался нагреватель калориметра 2 и температура слоя доводилась до 300 °С. После некоторой выдержки нагреватель отключался, а в змеевик подавалась охлаждающая вода с заданным расходом; при этом одновременно фиксировались показания термопар с интервалом $\Delta\tau = 1$ мин. После достижения температуры слоя порядка 50 °С опыт прекращался. Для проведения следующего опыта змеевик предварительно продувался сжатым воздухом.

Результаты одной из серий опытов при различных расходах охлаждающей воды приведены на рис. 2 в полулогарифмических координатах, где ϑ – избыточная температура, равная разности между температурой слоя и средней температурой охлаждающей воды в змеевике.

Во всех опытах показания термопар 5 и 6 (рис. 1) отличались друг от друга не более, чем на 5 °С, что свидетельствовало о высокой равномерности распределения температуры в слое, а следовательно, и о приближении свойств изучаемой системы к высокотеплопроводным телам.

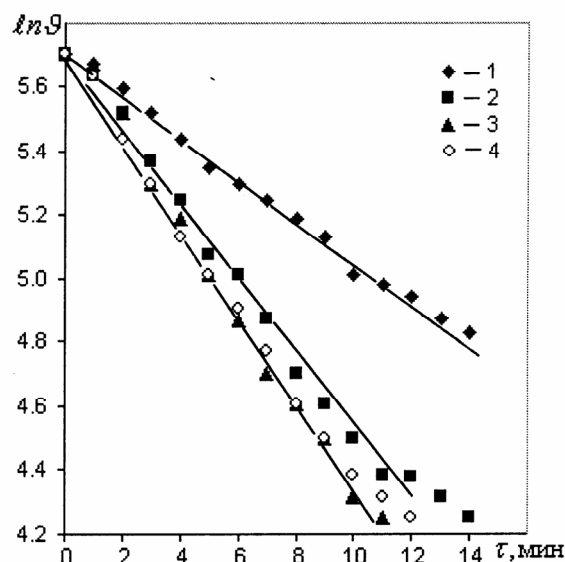


Рис. 2. Зависимость $\ln \vartheta$ от времени τ ; $A = 2,5$ мм, $f = 25$ Гц: 1 – $G = 90$ л/ч, $w = 0,318$ м/с, $m = 1,1 \cdot 10^{-3}$ 1/с; 2 – $180, 0,637$, $2,05 \cdot 10^{-3}$; 3 – $360, 1,273, 2,21 \cdot 10^{-3}$; 4 – $515, 1,82, 2,21 \cdot 10^{-3}$

Кроме того, из рис. 2 следует, что во всех случаях сразу же наблюдался регулярный режим охлаждения слоя, так как опытные точки с момента начала охлаждения хорошо аппроксимируются линейными зависимостями, а это в свою очередь подтверждает принятое предположение, согласно которому для виброслоя $Bi < 0,1$. Видно также, что угол наклона, а значит, и темп охлаждения m зависят от расхода охлаждающей воды. Это связано с тем, что в выражение для полного термического сопротивления переносу тепла от виброслоя к охлаждающей воде

$$\frac{1}{\alpha_{эф}} = \frac{1}{\alpha_{ст}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{вод}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{эф}$ – эффективный или приведенный коэффициент теплоотдачи, кроме термического сопротивления теплоотдачи $1/\alpha_{ст}$ на границе виброслой – наружная поверхность змеевика и термического сопротивления стенки трубки δ_c / λ_c , которые в опытах, приведенных на рис. 2, сохранялись постоянными, входит термическое сопротивление теплоотдачи $1/\alpha_{вод}$ на границе внутренняя поверхность трубки – охлаждающая вода, расход которой менялся. Расчеты показали, что в этом случае коэффициенты $\alpha_{вод}$ изменялись от 750 Вт/(м²К) при $G = 90$ л/ч до 7500 Вт/(м²К) при $G = 515$ л/ч. Однако, как можно видеть на рис. 2, при $G \geq 360$ л/ч (кривые

3 и 4) изменение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{вод}$ практически не влияет на величину темпа охлаждения. Поэтому в дальнейшем эксперименты проводились при расходе охлаждающей воды $G \geq 360$ л/ч.

Для получения надежных данных, учитывая вероятностную природу циркуляционных контуров частиц и их групп в виброкипящем слое, опыты при каждом режиме повторялись 4 - 6 раз. При этом среднеквадратичная относительная погрешность при определении m лежала в пределах 6,3 – 8,7 %.

Используя опытные осредненные значения m , эффективный коэффициент теплоотдачи рассчитывался по формуле

$$\alpha_{эф} = m \cdot \frac{C}{F}. \quad (2)$$

Полная теплоемкость C определялась экспериментально при охлаждении исследуемой системы в интервале температур 300 – 50 °С по количеству охлаждающей воды за опыт. Измерения показали, что с погрешностью ± 5 % ее значение составляет 9480 кДж / К. Площадь теплообмена F относилась к гладкой поверхности змеевика и равнялась 0,0588 м².

Результаты, полученные в опытах, после их осреднения приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	d_T , мм	A , мм	K	$m \cdot 10^3$, 1/с	$\alpha_{эф}$, Вт/м ² К
1	0,243	1,0	2,52	1,66	268
2		1,5	3,78	2,09	337
3		2,0	5,04	2,20	355
4		2,5	6,29	2,62	423
5	0,10	2,0	5,04	2,64	426
6	0,10	2,5	6,29	3,28	529
7	0,32	1,5	3,78	2,04	329
8		2,0	5,04	2,16	349
9		2,5	6,29	2,14	345
10	0,63	1,5	3,78	1,67	295
11		2,0	5,04		
12		2,5	6,29		

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Используя формулу (1) с учетом данных в табл. 1, были вычислены значения коэффициентов $\alpha_{сл}$, представленные на рис. 3 и 4. Здесь же для сравнения нанесены опытные точки, полученные в работе [7] для гладкой вертикальной пластины

размерами 55x55 мм, погруженной в виброкипящий слой.

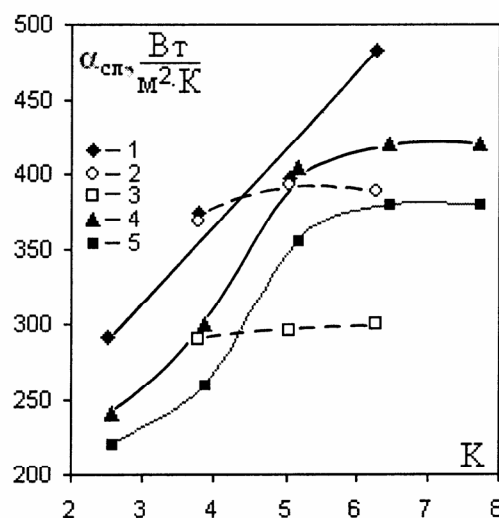


Рис.3. Зависимость коэффициента $\alpha_{сл}$ от относительного ускорения вибрации K : змеевик 3 (рис.1), $f = 25$ Гц, $H_0 = 200$ мм : 1 – $d_T = 0,243$ мм; 2 – 0,32; 3 – 0,63; вертикальная гладкая пластина 55 x 55 мм [7]; $f = 40$ Гц, $H_0 = 120$ мм : 4 – $d_T = 0,32$ мм; 5 – 0,63 мм

Анализ этих данных позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, с ростом относительного ускорения вибрации K наблюдается тенденция к увеличению коэффициентов $\alpha_{сл}$ (рис. 3, кривые 1-3), особенно существенному в слое кварцевого песка (кривая 1), так как с ростом параметров вибрации одновременно возрастает интенсивность движения частиц слоя и их групп. Для полифракционного материала (кривая 1), содержащего к тому же 34 % мелкой фракции, высокая интенсивность движения частиц имеет место лишь при достаточно больших значениях K . В слоях узких фракций из более крупных частиц (кривые 2 и 3) коэффициенты $\alpha_{сл}$ меньше, а их предельные значения достигаются при $K > 4$.

Аналогично изменяются коэффициенты $\alpha_{сл}$ и для вертикальной пластины (рис. 3, кривые 4 и 5). Однако бóльшие предельные значения коэффициентов $\alpha_{сл}$ в этом случае обусловлены меньшей протяженностью пластины, а значит большей частотой смены свежих порций материала у поверхности; кроме того, существенную роль играет и меньшая стесненность слоя такой поверхностью по сравнению с более громоздким змеевиком.

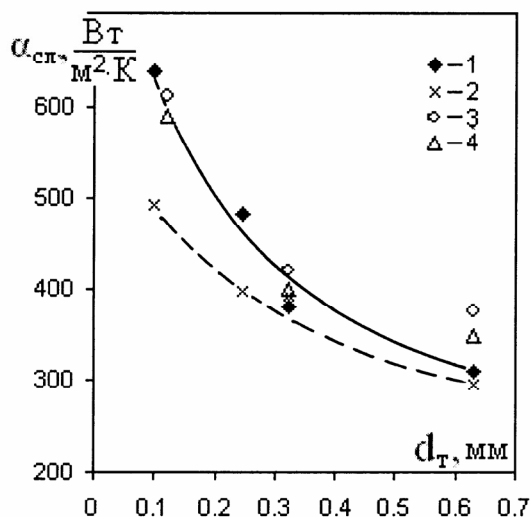


Рис. 4. Зависимость коэффициента $\alpha_{сл}$ от

размера частиц d_T : змеевик (рис. 1)

$f = 25 \text{ Гц}$, $H_0 = 200 \text{ мм}$: 1 – $A = 2,5 \text{ мм}$, $K = 6,3$; 2 – $A = 2,0 \text{ мм}$, $K = 5,04$; вертикальная гладкая пластина $55 \times 55 \text{ мм}$ [7], $f = 40 \text{ Гц}$,
 $H_0 = 120 \text{ мм}$: 3 – $A = 1,0 \text{ мм}$, $K = 6,45$;
 4 – $A = 0,8 \text{ мм}$, $K = 5,16$

Во-вторых, с ростом размера частиц слоя наблюдается монотонное уменьшение коэффициентов $\alpha_{сл}$ (рис.4), что хорошо согласуется с известными литературными данными, в том числе и с [7], так как при достаточно высокой интенсивности движения материала основным термическим сопротивлением является эффективная толщина воздушной прослойки на границе поверхность – первый ряд частиц, которая тем меньше, чем мельче частицы.

Наконец, следует отметить хорошее согласование данных по коэффициентам теплоотдачи слоя для рассмотренных систем при $K \geq 5$ и $d_T \leq 0,32 \text{ мм}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Членов В.А., Михайлов Н.В. Виброкипящий слой. М.: Наука. 1972. 326 с.
2. Сапожников Г.В., Сыромятников Н.И., Сапожников Б.Г. Особенности теплообмена виброкипящего слоя с погруженным в него пучком вертикальных труб // Изв. вузов. Энергетика. 1983. № 4. С. 96-99.
3. Сапожников Б.Г., Косенко Г.Д., Решетников Е.Г. Нагрев дисперсного материала в виброкипящем слое с насадкой из горизонтальных труб // ТОХТ. 1977. Т. 11. № 4. С. 622-625.
4. Калиновская О.П., Денисов П.Д., Лабай В.И. Опыт использования вибрационных сушилок в комбикормовой промышленности. М.: ЦНИИТЭИМингаз СССР. 1977. 36 с.
5. Рыжков А.Ф., Микула В.А. Резонансные режимы в продуваемых, разнофракционных и влажных виброслоях // Инж.-физ. Журнал. 1991. Т. 61. № 5. С. 782-789.
6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1970. 560 с.
7. Сапожников Б.Г., Хлюпин П.В., Свиридов А.М. Влияние искусственной шероховатости на теплообмен между вертикальной пластиной и виброкипящим слоем // Журн. Всесоюз. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. 1976. Т. 21. № 2. С. 229-230.