

Приборы и оборудование

УДК 536.24

Исследование теплообмена между движущимися частицами и твердой поверхностью

**Пикашов В.С., Троценко Л.Н.,
Великодный В.А., Виноградова Т.В.**

Институт газа НАН Украины, Киев

Представлена методика экспериментального исследования теплообмена между поверхностью и частицами дисперсного материала при их нагреве и охлаждении. Описана установка, на которой проводились исследования. Приведены обработанные результаты экспериментальных данных. Проанализировано влияние на суммарный теплообмен трех составляющих теплообмена (радиационного, конвективного, контактного), формы частиц и способа их движения (скольжение или скатывание), степени черноты. Полученные результаты могут быть применены для расчета аппаратов и устройств, где происходит теплообмен между частицами и твердой поверхностью.

Ключевые слова: теплообмен, температура, тепловой поток, коэффициент теплоотдачи. Представлено методику експериментального дослідження теплообміну між поверхнею та частинками дисперсного матеріалу при нагріванні та охолодженні. Описано установку, на якій проводилися дослідження. Наведено опрацьовані результати експериментальних даних. Проаналізовано вплив на сумарний теплообмін трьох складових теплообміну (радіаційного, конвективного, контактного), форми частинок та способу їх руху (ковзання або скачування), ступеня чорноти. Отриманні результати можуть бути застосовані для розрахунку апаратів та пристроїв, де відбувається теплообмін між частинками та твердою поверхнею.

Ключові слова: теплообмін, температура, тепловий потік, коефіцієнт тепловіддачі.

Известны теплообменные аппараты, в которых происходит нагрев или охлаждение частиц различных материалов, движущихся по твердой поверхности. К ним относятся вращающиеся печи для обжига глины до шамотного порошка, обжига известняка, производства цементного клинкера и других материалов [1]. В таких печах частицы материала нагреваются продуктами сгорания от пламени, а также от нагретой футеровки, скользя непосредственно по ней или пересыпаясь на внутренних устройствах (лопатках, лопастях, цепях и т.п.) при вращении пе-

чи. Для охлаждения частиц термически обработанного материала после выхода его из печи используются вращающиеся барабаны, в которых слой частиц контактирует с охлаждаемой поверхностью [2].

Предложены конструкции теплообменников-теплоутилизаторов для подогрева шихты в виде частиц дисперсных материалов отходящими продуктами сгорания из плавильных печей [3, 4]. Принцип работы теплообменника заключается в том, что частицы под действием силы тяжести соскальзывают или скатываются по

расположенным вдоль шихты полкам. Продукты сгорания под действием силы тяжести или с помощью дымососа поднимаются вверх, омывают полки и нагревают их. При контакте с полкой частицы дисперсных материалов нагреваются и падают в ванну печи.

Для тепловых расчетов таких аппаратов необходимы данные по теплообмену между частицами и поверхностью, которые скользят или скатываются по ней. Известны исследования по теплообмену между стенкой и различными слоями: плотным (продуваемым, непродуваемым, движущимся), псевдоожиженным, в виде взвеси [5–7]. Этих данных недостаточно для расчета процессов теплообмена в аппаратах, рассмотренных в [3, 4], поэтому необходимы дополнительные эксперименты.

Исследования теплообмена между поверхностью и частицами дисперсного материала, движущегося по этой поверхности, осуществлялись на двух лабораторных установках при охлаждении и при нагревании частиц.

Первая установка (рис.1) состояла из электрической трубчатой печи 1 с внутренним диаметром 25 мм и длиной 600 мм. Цилиндрический корпус печи имел возможность изменять угол наклона таким образом, чтобы ось печи могла располагаться горизонтально или под углом вплоть до 90°. Степень нагрева печи регулировали изменением напряжения на электронатгревателе автотрансформатором 2. Температуру внутри печи измеряли тремя термопарами 3 типа ХА, спаи которых крепились к внутренней поверхности трубы в середине и на расстоянии по 250 мм от ее центра. ЭДС термопар измерялась и записывалась на диаграмме потенциометром 4 типа КСП-4. Для уменьшения потерь тепла из трубы печи и достижения большей равномерности температуры с обоих концов в трубу устанавливали заглушки 5 из огнеупорной теплоизоляции с небольшими отверстиями. Частицы дисперсного материала 6 помещали внутрь печи. Для выдачи частиц из печи служил толкач 7 в виде стержня из огнеупорной керамики, один конец которого в процессе экспериментов находился в печи, а другой (холодный) снаружи. К одному из концов трубы присоединяли водоохлаждаемый желоб 8, изготовленный из алюминиевого профиля с гладкой поверхностью. Желоб устанавливали под углом к горизонту, чтобы частицы могли соскальзывать по нему. Желоб имел возможность изменять угол наклона в зависимости от условий эксперимента. Второй конец желоба был подведен к калориметру 9, который представляет собой сосуд Дьюара емкостью 0,7 л, заполненный дистил-

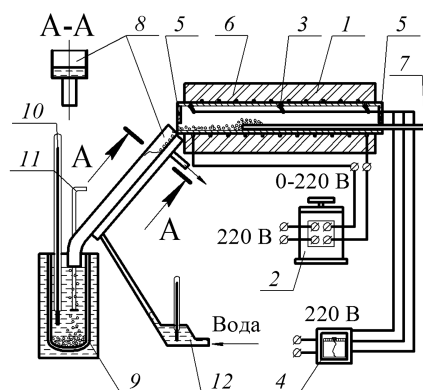


Рис.1. Схема установки для исследования теплообмена при охлаждении частиц.

лированной водой (0,5 л). В этот калориметр падали исследуемые частицы. Температуру воды в сосуде измеряли термометром 10 типа Бекмана с ценой деления 0,01 °С при разнице температур до 5 °С или термометром с ценой деления 0,1 °С. Для перемешивания воды в сосуде с целью достижения равномерности температуры по объему использовалась ручная мешалка 11. Температуру поверхности желоба принимали равной температуре охлаждающей воды, измеряемой термометром 12 с ценой деления 0,1 °С.

Вторая установка (рис.2), на которой исследовался теплообмен при нагреве частиц, состояла из этой же электрической печи 1, но в данном случае ось печи располагалась под углом 20–30° к горизонтали. По нагретой трубе под действием силы тяжести частицы соскальзывали или перекатывались в зависимости от их формы, нагревались и попадали в калориметр. Для подачи частиц небольшими порциями служил ковшик 13. Другие приспособления и обозначения позиций на рис.2 такие же, как и в случае первой установки.

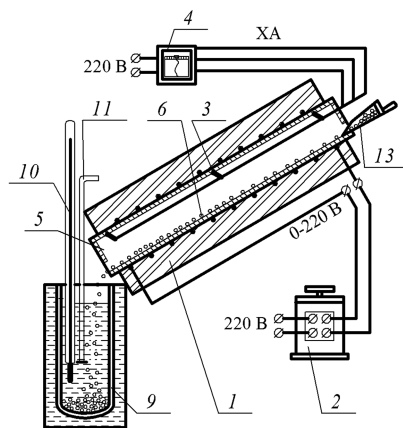


Рис.2. Схема установки для исследования теплообмена при нагреве частиц.

Эксперименты проводили по следующей методике. Вначале определяли теплоемкость калориметра СК (внутренней части сосуда Дьюара совместно с термометром и мешалкой), приведенной к теплоемкости воды. Для определения теплоемкости в калориметр наливали строго взвешенную массу воды $M_{B'}$ (400 г) с удельной теплоемкостью c_B , перемешивали ее и измеряли температуру $t_{B'}$. Затем в калориметр доливали известную массу воды $M_{B''}$ (100 г), температуру которой $t_{B''}$ измеряли в отдельном сосуде. В калориметре всю воду перемешивали и измеряли температуру $t_{B'''}$. Для взвешивания воды использовали электрические весы типа ВЛКТ-2-М с погрешностью 0,1 г. В первом случае теплоемкость системы будет, Дж:

$$C' = (c_B M_{B'} + C_K) t_{B'}. \quad (1)$$

Во втором случае, Дж:

$$\begin{aligned} C'' &= (c_B M_{B'} + C_K) t_{B'} + c_B M_{B''} t_{B''} = \\ &= (c_B M_{B'} + c_B M_{B''} + C_K) t_{B'''}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда, как следует из формулы (2), теплоемкость калориметра будет, Дж:

$$C_K = [c_B M_{B'} t_{B'} + c_B M_{B''} t_{B''} - (M_{B'} + M_{B''}) t_{B'''}] / (t_{B'''} - t_{B'}). \quad (3)$$

Согласно измерениям, при заполнении калориметра водой массой 500 г, что имело место во всех опытах, C_K равнозначна добавке 20 г воды, или поправке 4 %.

Удельную теплоемкость дисперсного материала $c_{\text{ч}}$, которая была необходимой для дальнейших расчетов, определяли экспериментально следующим образом.

Горстку частиц массой от 20 до 50 г в зависимости от условия опыта загружали в среднюю горизонтально расположенной трубы печи, разогретой до температуры $t_{\text{П}}$. Когда частицы прогревались до температуры печи, ее резко наклоняли на 45–60°. Возле нижнего конца трубы находился калориметр в рабочем положении с известной температурой воды $t_{B'}$, массой воды 500 г и расчетной массой 520 г. Частицы под действием силы тяжести быстро высыпались в воду калориметра и отдавали ей тепло. Воду перемешивали, после чего измеряли температуру $t_{B''}$. Затем воду с частицами выливали на сито. Оставшиеся на сите частицы высушивались тепловентилятором. Их масса определялась с помощью лабораторных рычажных весов с погрешностью 0,01 г. Разница в теплоемкости калориметра до и после этой операции равнялась изменению теплоемкости частиц, Дж:

$$c_B M_B (t_{B''} - t_{B'}) = c_{\text{ч}} M_{\text{ч}} (t_{\text{П}} - t_{B''}), \quad (4)$$

где $M_{\text{ч}}$ — масса частиц после высушивания.

Находили удельную теплоемкость дисперсного материала из формулы (4), Дж:

$$c_{\text{ч}} = [c_B M_B (t_{B''} - t_{B'})] / M_{\text{ч}} (t_{\text{П}} - t_{B''}). \quad (5)$$

Для каждого из используемых в опытах материалов выполняли три измерения $c_{\text{ч}}$ и рассчитывали их среднее значение. Средняя квадратичная ошибка определения $c_{\text{ч}} - \sigma_{n-1} = 2,0$ %. Поскольку теплоемкость материала изменяется с температурой, то $c_{\text{ч}}$ измеряли при двух температурах $t_{\text{П}}$ и для расчетов принимали их среднее значение.

Остальные характеристики дисперсного материала определяли таким образом (таблица). Вид материала — по паспортным данным и ви-

Характеристики дисперсного материала и параметры теплообмена

Номер опыта	Характеристики материала						Параметры теплообмена					
	Вид	Размер, мм	ε^{CP}	$f_{\text{ч2}}$, мм	$m_{\text{ч}}^{\text{CP}}$, мг	c_{M}^{CP} , кДж/(кг·°C)	τ , с	$t_{\text{П}}$, °C	Δt_{OX} , °C	q_{Σ} , кВт/м ²	q_{P} , кВт/м ²	α_{Σ} , Вт/(м ² ·°C)
1	Корунд (белый)	1,6–2,5	0,45	13,2	17,7	1,092	1,57	1059	305	283	51,0	280
2	Корунд (белый)	1,0–1,6	0,54	5,31	3,38	1,092	1,73	1055	549	312	41,8	261
3	Шамот (белый)	1,0–1,6	0,64	5,31	3,21	0,954	1,94	1030	516	154	48,3	183
4	Шамот (черный)	1,0–1,6	0,90	5,31	3,21	0,965	1,94	1045	554	176	54,1	198
5	Шамот (белый)	1,6–2,5	0,63	13,2	10,15	1,06	1,83	1061	409	181	64,2	193
6	Корунд (черный)	2,5–4,0	0,90	33,2	33,0	1,01	1,60	1049	298	185	95,4	190
7	Корунд (белый)	2,5–4,0	0,45	33,2	33,0	1,06	1,60	1032	265	173	48,8	176
8	Корунд (прозрачный)	0,63–1,0	0,25	2,09	0,588	1,06	1,76	1055	738	124	15,5	180

Примечание. ε^{CP} — средняя степень черноты частиц; $m_{\text{ч}}^{\text{CP}}$ — усредненная масса частиц; c_{M}^{CP} — средняя удельная теплоемкость частиц; τ — время прохождения частиц по желобу (в случае охлаждения) или трубе (в случае нагрева); $t_{\text{П}}$ — температура разогретой печи; Δt_{OX} — падение температуры частиц при охлаждении; q_{Σ} — плотность теплового потока; q_{P} — плотность теплового потока радиационной составляющей; α_{Σ} — коэффициент теплоотдачи от частиц к поверхности за счет суммарного теплообмена. Форма частиц — круглая.

зуально. Размер частиц — согласно ячейкам сит, через которые просеивали материал. Площадь поверхности частиц рассчитывали, исходя из среднего диаметра, причем поверхность частиц крошки принимали как для шара. Массу среднестатистической частицы для конкретной фракции рассчитывали как частное деления определенной взвешенной массы частиц (от 5 до 20 г) на их количество (от 500 до 1500 шт.), которые подсчитывали визуально.

Степень черноты брали как для плоской поверхности исходного материала из справочника [8]. Для определения вклада радиации в суммарный теплообмен проводили сравнительные опыты вначале с частицами исходного материала (белыми), а потом с такими же частицами, но вся поверхность которых была покрыта тонким огнеупорным слоем около 50 мкм с большой степенью черноты. Технология покрытия изложена в [9], а степень черноты покрытия определена в работе [10].

Перед исследованием теплообмена определяли время τ , за которое частицы проходили по поверхности желоба или трубы печи, заданный угол наклона которых определялся угломером УМ-2. Частицы по одной кляли сверху в начале наклонной поверхности, чтобы их скорость была нулевой, и засекали время секундомером. Под действием силы тяжести частица равноускорялась и двигалась вниз. После выхода частицы из теплообменной поверхности засекали время вторично. С этой целью использовались фотоэлементы и электронный секундомер, скорость срабатывания которых и точность измерения немного больше, чем ручных. Принимали среднее значение из 25 измерений. Средняя квадратичная погрешность σ_{n-1} составляла от 5 до 12 %.

Исследование теплообмена при охлаждении частиц происходило следующим образом (см. рис.1). Горстку частиц располагали в середине горизонтально установленной трубы печи, разогретой до постоянной температуры. После прогрева частиц их небольшими порциями (3–5 % от горстки) плавно выталкивали на желоб так, чтобы их скорость в начале движения была приблизительно нулевой. Частицы передвигались по желобу вниз и попадали в калориметр. Далее процесс измерения был таким же, как и при определении теплоемкости. Разница в теплоемкости калориметра до и после попадания частиц в него равнялась теплоемкости частиц на выходе из желоба, Дж:

$$c_B M_B (t_B'' - t_B') = c_{\text{ч}} M_{\text{ч}} (t_{\text{ч}}'' - t_{\text{ч}}'). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что температура частиц на выходе из желоба, К:

$$t_{\text{ч}}'' = [c_B M_B (t_B'' - t_B') + M_{\text{ч}} c_{\text{ч}} t_B''] / (M_{\text{ч}} c_{\text{ч}}). \quad (7)$$

Аналогичным способом проводили опыты при нагревании частиц. В этом случае холодные частицы небольшими порциями сыпали ковшиком в разогретую трубу печи, наклоненную под углом (см. рис.2). После продвижения внутри печи частицы нагревались и падали в калориметр. Их температуру определяли так же, как и ранее.

Выполнено 120 опытов, в которых использовались различные материалы: а) корунд — чисто-белого цвета, форма близка к сферической, фракционный состав 0,63–1; 1,0–1,6 и 1,6–2,5 мм; б) корунд — крошка черного и белого цвета, фракция 2,5–4,0 мм; в) корунд — крошка, прозрачный (плавленый), 0,63–1,0 мм; г) шамот — крошка белого цвета с сероватым оттенком, фракционный состав 0,63–1; 1,0–1,6 и 1,6–2,5 мм; д) шамот — черный, размер 1,0–1,6 мм; е) базальт, 2,5–4,0 мм (см. таблицу.).

Исследование теплообмена вышеперечисленных частиц проводилось при их охлаждении и нагреве. Основное количество экспериментов выполнено при температуре печи $t_{\text{П}} = 1050 \pm 15$ °С и угле наклона теплообменной поверхности 30°. Часть опытов выполнена при температурах 300, 600, 800 и 1150 °С и угле наклона 15, 20, и 27°.

Падение температуры частиц за время их контакта с поверхностью в случае их охлаждения рассчитывали следующим образом, К:

$$\Delta t = t_{\text{П}} - t_{\text{ч}}, \quad (8)$$

а в случае нагрева, К:

$$\Delta t = t_{\text{ч}} - t_{\text{ОС}}, \quad (9)$$

где $t_{\text{ч}}$ — температура частиц; $t_{\text{ОС}}$ — температура окружающей среды.

Средняя плотность теплового потока от частиц за время τ их охлаждения или нагрева определяли по формуле, кВт/м²:

$$q_{\Sigma} = c_{\text{ч}} M_{\text{ч}} \Delta t / (\tau f_{\text{ч}}), \quad (10)$$

где $f_{\text{ч}}$ — площадь поверхности частиц; индекс Σ в формуле (10) обозначает, что охлаждение (нагрев) частиц происходит за счет суммарного теплообмена, включающего в себя радиационный $q_{\text{Р}}$, конвективный $q_{\text{К}}$ и контактный при скольжении частиц $q_{\text{СК}}$.

Точно экспериментально определить вклад каждого вида теплообмена в суммарный не представлялось возможным. Можно долю каж-

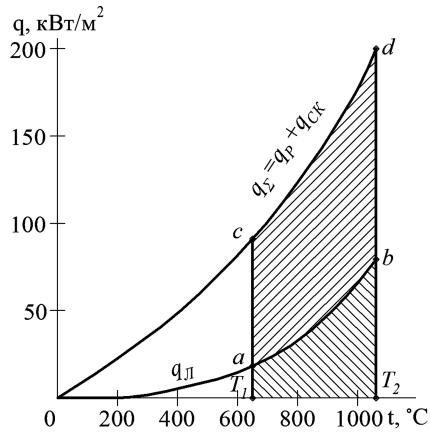


Рис.3. Графическая интерпретация зависимости тепловых потоков от температуры (по данным опыта 5).

дого вида оценить расчетным путем. При скоростях частиц относительно воздуха, которые имели место в опытах (до 1,5 м/с), доля конвективной составляющей была не более 2 %, что меньше погрешности опытов. Поэтому ею можно пренебречь. Вклад q_P рассчитывали, исходя из закона Стефана—Больцмана, а $q_{СК}$ — по закону Ньютона. Рассчитывали среднее значение q за время пребывания частиц в зоне теплообмена, то есть при средней температуре, а затем при поточной. На рис.3 для наглядности приведены данные опыта 5 (см. таблицу) $q = f(t)$. Чтобы рассчитать среднее значение q_P , необходимо площадь (T_1abT_2) разделить на $(T_2 - T_1)$, кВт/м²

$$q_P = \frac{\sigma_0 - \varepsilon}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} T^4 dT = \frac{\sigma_0 - \varepsilon}{5} \frac{T_2^5 - T_1^5}{T_2 - T_1}, \quad (11)$$

где σ_0 — константа; ε — степень черноты поверхности частицы.

Подобным образом для определения составляющей теплообмена скольжением необходимо площадь ($acdb$) разделить на $(T_2 - T_1)$, кВт/м²:

$$q_{СК} = \frac{\alpha_{СК}}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} T dT = \frac{\alpha_{СК}}{2} \frac{T_2^2 - T_1^2}{T_2 - T_1}, \quad (12)$$

где $\alpha_{СК}$ — коэффициент теплоотдачи скольжением.

По известным ε и $\alpha_{СК}$ можно рассчитать текущие значения q_P и $q_{СК}$.

Коэффициенты теплоотдачи рассчитывали как суммарные ввиду того, что выделить отдельно составляющие не было возможным. Как следует из расчетов, радиационная составляющая в большинстве опытов имеет значение от 5 до 30 %.

Коэффициенты теплоотдачи α_Σ от частиц к поверхности определяли по полученным экспериментальным данным на основе теории регулярного теплового режима [11, 12]. В нашем случае принимали частицу за β -калориметр. Использование этой теории возможно для тел, у которых критерий $Bi < 15$. Для исследуемых частиц критерий Bi находился в пределах от 0,01 до 0,1. При таких значениях Bi иррегулярный режим занимает ничтожное время, поэтому этим режимом пренебрегали и для расчетов принимали полное время соскальзывания частиц.

Данные результатов некоторых опытов при охлаждении частиц на желобе, наклоненном под углом 30°, приведены в таблице. Как видно, время соскальзывания частиц находится в пределах 1,60–1,94 с; среднее значение его из всех опытов 1,75 с; $\sigma_{n-1} = 8,5$ %. В пределах каждого опыта погрешность σ_{n-1} была от 4,5 до 12 %. Падение температуры частиц при относительно постоянной температуре печи за время соскальзывания или скатывания было от 265 до 738 °С в основном за счет размера частиц. Плотность теплового потока q_Σ различалась в 2,5 раза. Рассчитанная плотность радиационного потока изменялась еще сильнее, поскольку она определялась в первую очередь четвертой степенью средней температуры и степенью черноты.

Аналогичные результаты получены при нагреве частиц при прохождении их внутри трубы печи, наклоненной под углом.

Выводы

Созданы экспериментальная установка и методика, позволяющая исследовать теплообмен между твердой поверхностью и частицами дисперсного материала с учетом влияния на него трех составляющих теплообмена (радиационного, конвективного и контактного), формы и степени черноты частиц, способа их движения (скольжение или скатывание).

Рассчитанный по результатам опытов коэффициент теплоотдачи α_Σ зависел только от формы частиц и не зависел от других параметров. Поэтому на основе результатов экспериментальных данных при расчете теплообмена частиц, скользящих по поверхности, для дисперсных материалов в виде крошки можно рекомендовать значения $\alpha_\Sigma = 186$ Вт/(м²·°С) ± 5 %, а для частиц, форма которых близкая к шару $\alpha_\Sigma = 278$ Вт/(м²·°С) ± 5 %. Эту погрешность в α_Σ можно объяснить способом движения частиц по желобу или внутри трубы печи. Частицы в виде шара скатываются и все время контактируют с желобом или трубой разными точками поверх-

ности и таким образом охлаждаются со всех сторон, а частицы в виде крошки сползают одной стороной, что вызывает относительно неравномерный теплообмен.

Полученные данные по теплообмену между твердой поверхностью и частицами огнеупорного материала при их движении могут быть использованы для расчета аппаратов: утилизаторов теплоты со скользящим слоем, вращающихся барабанных печей и других устройств.

Список литературы

1. Детков С.П., Еринов А.Е. Тепловые процессы в печных агрегатах алюминиевой промышленности. — Киев : Наук. думка, 1987. — 270 с.
2. Павлов В.Ф., Никифорова Н.М. Теплотехника и теплотехническое оборудование заводов промышленности строительных материалов и изделий. — М. : Высш. шк., 1965. — 572 с.
3. А. с. 1815566 СССР, МКИ⁵ F 28 C 3/12. Устройство для обработки сыпучих материалов / В.С. Пикашов, В.А.Великодный, В.И.Бабич и др. — Оpubл. 15.15.93, Бюл. № 18.
4. Пат. 3043 Укр., МКИ⁵ F 27 B 1/00. Підігрівач шихти / Б.Д.Сезоненко, В.І.Бабич, Є.Р.Крамаренко та ін. — Оpubл. 26.12.94, Бюл. № 5-1.
5. Справочник по теплообменникам / Под ред. Б.С. Петухова. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — Т. 1. — 560 с.
6. Горбис З.Р. Теплообмен и гидродинамика дисперсных потоков. — М. : Энергия, 1987. — 424 с.
7. Махорин К.Е., Пикашов В.С., Кучин Г.Л. Теплообмен в высокотемпературном кипящем слое. — Киев : Наук. думка, 1981. — 148 с.
8. Излучательные свойства твердых материалов : Справ. / Под ред. А.Е.Шендлина. — М. : Энергия, 1974. — 435 с.
9. А. с. 947141 СССР, МКИ³ C 04 B 41/06. Состав для покрытия кладки печей / В.С.Пикашов, А.Е. Еринов, В.А.Великодный и др. — Оpubл. 30.07.82, Бюл. № 28.
10. Пикашов В.С., Великодный В.А. Исследование радиационных характеристик покрытий для чернения кладки печей // Пром. теплотехника. — 1985. — № 3. — С. 102-105.
11. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. — М. : Гостехиздат, 1954. — 408 с.
12. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. — М. : Энергия, 1969. — 392 с.

Поступила в редакцию 06.05.11

The Investigation of Heat Exchange between Moving Particles and Solid Surface

*Pikashov V.S., Trotsenko L.N.,
Velikodny V.A., Vinogradova T.V.*

The Gas Institute of NASU, Kiev

The technique of heat exchange between surface and disperse material particles during their heating and cooling experimental research is presented. The installation for the researches conduction is displayed. The processed results of experimental data are exhibited. The influence of heat exchange three components such as radiative, convectional and contact on total heat exchange, particles shape and they motion process type such as gliding or sliding, dark degree are analyzed. The obtained results are applied for calculation of units and devices with interior heat exchange between particles and a solid surface.

Key words: heat exchange, temperature, heat flow, heat-transfer coefficient, solid surface.

Received May 6, 2011