УДК 621.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО МЕЖКОМПОНЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЗАКРУЧЕННОМ ГАЗОДИСПЕРСНОМ ПОТОКЕ С ПРОТИВОТОЧНЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ

Юдаков А.А.[1,2], Цыбульская О.Н.[1,2], Ксеник Т.В.[1]

[1]*Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия*
[2]*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования и науки РФ (контракт №02.G25.31.0035-225 от 12.02.2013;
соглашение №14.578.21.0015 от 05.06.2014)
и гранта Президиума ДВО РАН (проект №15-I-3-11)

АННОТАЦИЯ

Исследованы особенности теплообмена в закрученном газодисперсном потоке, установлены экспериментальные коэффициенты теплоотдачи, получены критериальные зависимости, позволяющие рассчитывать теплообмен для устройств, использующих закрученные двухкомпонентные потоки.

ВВЕДЕНИЕ

Задача о теплообмене движущейся твердой частицы с потоком газа лежит в основе расчета ряда технологических процессов, связанных с использованием дисперсных материалов. К таким процессам можно отнести различные виды термической и химико-термической обработки минерального и техногенного сырья. Кроме того, в химической промышленности, производстве стройматериалов, металлургии и других перерабатывающих отраслях также широко применяются процессы связанные с использованием технологических материалов в составе двухкомпонентных систем типа "газ - твердые частицы" при различных схемах движения твердой и газообразной сред.

В связи с этим в последнее время интерес к тепломассообменным процессам и аппаратам, использующим дисперсные системы, возрастает. Эффективность их работы определяется интенсивностью межфазного переноса тепла и массы. К настоящему времени определены основные закономерности тепломассопереноса в газодисперсных системах и существуют инженерные методы расчета для оценки интенсивности теплообмена в конкретных случаях обработки.

Известно, что изменение режимов движения фаз влияет на интенсификацию технологических процессов. Значительные возможности открывает обработка материала в закрученном газовом потоке, которая позволяет увеличить относительную скорость между газом и твердой фазой, наложить на частицы твердой фазы дополнительные силы, а также равномерно распределить частицы твердой фазы в объеме газообразной.

К недостаткам установок, использующих закрученные газовые потоки, можно отнести малое время пребывания материала в аппарате. Одним из перспективных технических решений авторам представляется организация технологического пространства, в котором реализуется вихревое разнонаправленное, хотя бы в начальный момент, движение газовой и твердой компонент.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ

В данной работе исследовались особенности внутреннего теплообмена в вихревой установке, где обеспечивается противоточное движение закрученного газового потока и обрабатываемого дисперсного материала в осевом направлении с нижним выводом обрабатываемого материала, рис. 1. Особенностью установки является наличие двух корпусов, из которых теплоизолирован лишь внешний, что позволяет

© Юдаков А.А., Цыбульская О.Н., Ксеник Т.В.

свести к минимуму погрешности экспериментов, вызванные охлаждением стенок внутреннего корпуса вихревой камеры и потерями теплоты в окружающую среду.

В качестве теплоносителя и реакционного газа в экспериментах использовались продукты сгорания технического пропан – бутана в воздухе. Расход газов, их температура и состав регулировались с помощью управляющего блока 5 горелки 4.

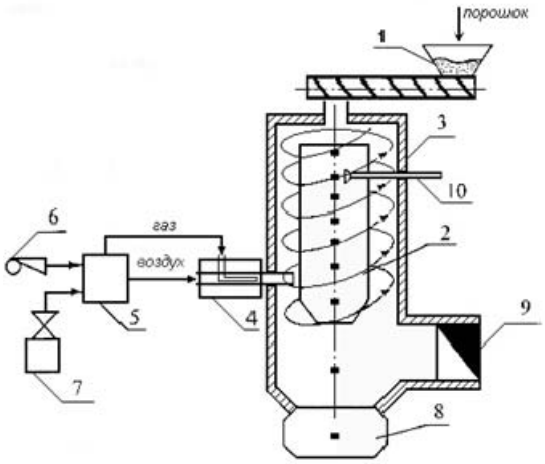

Рис. 1 Схема экспериментальной установки для исследования теплообмена в закрученном газодисперсном потоке: 1 – бункер-дозатор с регулируемым приводом, 2 – вихревая камера, 3 – внешний теплоизолированный корпус, 4 – горелка, 5 – блок управления горелкой, 6 – компрессор, 7 – газовый баллон, 8 – накопитель, 9 – выхлопной патрубок, 10 – зонд для измерения температур и отбора проб материала в потоке

В качестве модельного материала применялся кварцевый песок и стандартный промышленный порошок железа. Используемый материал имеет, как правило, полидисперсный состав, характеризующийся наличием частиц различной крупности, время нагрева которых будет отличаться. Мелкие частицы, как в отношении времени нагрева, так и в отношении времени химических превращений будут находиться в более благоприятных условиях, чем крупные. Поэтому для исследований теплообмена в установке была использована фракция от 0,315 до 0,2 мм для кварцевого песка и фракция от 0,2 до 0,16 мм для железного порошка.

Расход материала задавался числом оборотов электродвигателя постоянного тока, служащего приводом тарированного питателя. Массовая концентрация для кварцевого песка составляла 0,46 кг/кг, для железного порошка 1,8 кг/кг, что соответствовало объемной концентрации частиц в потоке $0{,}121\cdot10^{-3}$ м^3/м^3 и $0{,}136\cdot10^{-3}$ м^3/м^3, соответственно. Так как, по данным Горбиса [1], условия стесненности при объемной концентрации (μ_V) менее $0{,}35\cdot10^{-3}$ м^3/м^3 на теплообмен практически не влияют, полученные результаты можно широко распространить на потоки с меньшими значениями μ_V, вплоть до закрученных газовых потоков с движущимися в них одиночными частицами.

В качестве характерной температуры, определяющей температурный режим всей установки, принималась средняя температура газового потока в зоне входа его в вихревую камеру ($t_{вх}$) при работе без подачи твердого материала. Сложную задачу представляло собой измерение температуры движущихся частиц. Для этого было изготовлено специальное приспособление, основным элементом которого является датчик-чашечка из огнеупорного материала, в которую вмонтирована малоинерционная хромель-алюмелевая термопара. Специально разработанная методика и многократность замеров позволили свести систематическую погрешность тепловых измерений к 1,6%.

В качестве основного параметра, определяющего аэродинамический режим работы установки, принималась скорость потока в точке входа в вихревую камеру. При дальнейшей обработке экспериментальных данных в безразмерном виде использовался критерий Рейнольдса ($Re_{вх}$).

Для измерения скоростей и давлений в объеме камеры применялись пневматические зонды с продувкой. Оценка погрешности экспериментов показала, что наиболее точно определяются величины максимума тангенциальной скорости (V_φ^{max}) и максимума полного вектора скорости (V_Γ^{max}), рис. 2.

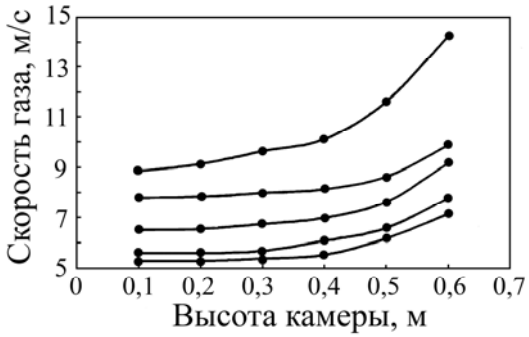

Рис. 2 Изменение величины максимума полного вектора скорости газа (V_Γ^{max}) по высоте камеры (L) при различной входной скорости ($V_{вх}=V_{L=0,6}$)

В качестве характерной скорости, по которой в экспериментах устанавливался аэродинамический режим, была принята максимальная полная скорость (V_Γ^{max}) в сечении L = 0,6, равная (в рамках погрешно-

сти замеров) средней скорости газового потока во входном тангенциальном канале ($V_{вх}$), расположенном в этом же сечении. Результаты измерений максимальной полной скорости в различных сечениях по высоте камеры при изменении $V_{вх}$ и, соответственно, $Re_{вх}$ приведены на рис. 2.

При изучении теплообмена изменялись следующие факторы эксперимента: температура $t_г$ и скорость газового потока ($V_{вх}$), массовая концентрация частиц в реакторе (μ), влажность ($W_н$), теплоемкость, плотность, размер частиц (d). В качестве "базового" принимался для железного порошка режим при: $V_{вх}$= 15,81 м/с, $t_г$= 260°C, $W_н$ = 0,515%, μ = 1,8 кг/кг, d = 0,18мм и для кварцевого песка режим при $V_{вх}$= 15,81 м/с, $t_г$ = 410°C, $W_н$ = 1,25%, μ = 0,46 кг/кг, d = 0,315 мм.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТА

Выполненные измерения позволили установить межкомпонентные коэффициенты теплоотдачи α в различных точках объема вихревой камеры при изменении указанных выше факторов. В основу определения α, характеризующего интенсивность межкомпонентного теплообмена, положен совместный анализ уравнения расчета количества теплоты, фактически полученной частицами за определенный интервал времени на рассматриваемом участке траектории движения:

$$\Delta q_т = c_т m_т (t_{т.к} - t_{т.о})$$

и закона Ньютона-Рихмана, записанного для этих же граничных условий:

$$\Delta q_т = \alpha F_т(t_{г.ср} - t_{т.ср}) \Delta\tau.$$

В результате из уравнения теплового баланса выводится формула для определения фактического коэффициента теплоотдачи в рассматриваемой области:

$$\alpha= [c_т m_т (t_{т.к} - t_{т.о})]/[F_т(t_{г.ср} - t_{т.ср}) \Delta\tau].$$

Для определения экспериментального значения локального коэффициента теплоотдачи α_i, характеризующего интенсивность теплообмена между двумя точками замеров n и (n+1) расчетная зависимость приобретает следующий вид:

$$\alpha_i = [2c_т m_т (t_{т(n+1)}-t_{тn})]/[F_т(t_{гn}+t_{г(n+1)}-t_{т..n}-t_{т(n+1)}) \Delta\tau].$$

На графике (рис. 3) значение α_i проставлялось между точками n и (n+1).

Кроме того, для проведения анализа теплообмена нами вводилось понятие "интегрального" коэффициента теплоотдачи α_Σ, характеризующего интенсивность конвективного теплообмена на участке от места ввода частиц в поток до рассматриваемой точки замеров (n), значение α_Σ проставлялось между точками 0 и n. Соответственно, расчетная формула принимала следующий вид:

$$\alpha_\Sigma = [2c_т m_т (t_{тn}-t_{то})]/[F_т(t_{го}+t_{гn}-t_{го}-t_{тn}) \Delta\tau].$$

Из общего массива экспериментальных значений α_i и α_Σ, полученных при вариациях значений скорости газового потока, температуры, массовой концентрации и влажности дисперсного материала были выделены зависимости, характеризующие влияние различных факторов на интенсивность внутреннего межкомпонентного теплообмена, на рис. 3 представлены изменения локальных коэффициентов теплоотдачи.

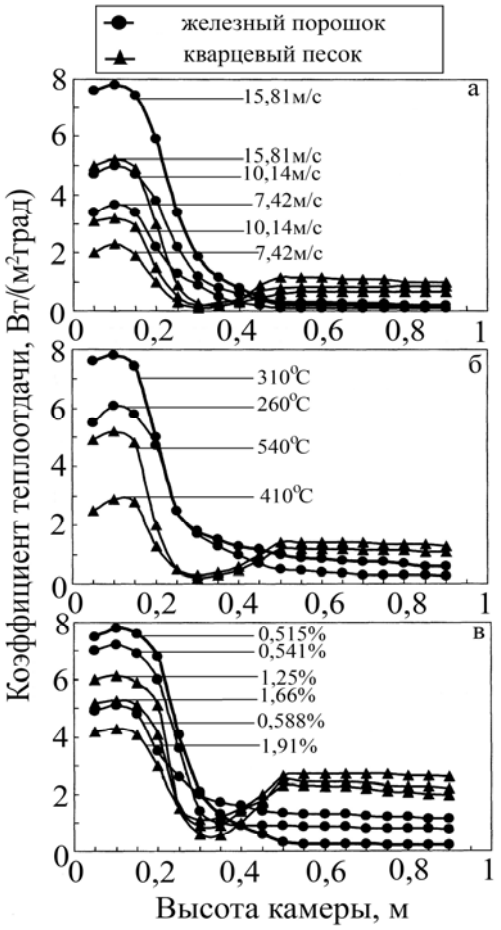

Рис. 3 Коэффициенты теплоотдачи локальные в объеме камеры при различных $V_{вх}$ (а), $t_г$ (б), $W_н$ (в).

Из результатов экспериментов видно, что максимальные значения α имеют место в верхней части реактора, несмотря на то, что в нижней части температура и скорость газового потока выше. Величина

этих значений $\alpha_{max}=6{,}2\cdot10^3$ Вт/м^2·град для частиц кварцевого песка и $\alpha_{max}= 7{,}9\cdot10^3$ Вт/м^2·град для частиц железного порошка, что указывает на интенсивный теплообмен в аппарате.

В исследованном диапазоне рассмотренных факторов скорость потока, в первую очередь, и влажность материала оказывают заметное влияние на интенсивность межкомпонентного теплообмена. Следует отметить, что условия взаимодействия газового потока и частиц в верхней части исследованной камеры характерны для всех вихревых аппаратов с осевым вводом обрабатываемого материала.

Для обобщения многочисленных опытных данных и последующего их применения целесообразно использовать не абсолютные значения замеряемой при экспериментах скорости, а критерий Рейнольдса $Re_т=U\cdot d_т/\nu$. При этом для анализа локального теплообмена в качестве характерной скорости принималась относительная скорость между газом и частицей U (скорость обтекания), определяемая по отработанным ранее расчетным и экспериментальным методикам [2], а характерным линейным размером являлся диаметр частицы. Были определены численные значения безразмерного коэффициента теплоотдачи, критерия Нуссельта $Nu=\alpha\cdot d_т/\lambda$, а также оценена зависимость Nu_{max} от скорости обтекания и, соответственно, от критерия Рейнольдса.

При обобщении опытных данных учитывалось, что в общем случае критерий Нуссельта, зависит от критерия Грасгофа ($Gr= d^3\cdot g\cdot\beta\cdot\Delta t/\nu^2$) и Прандтля ($Pr = \nu/a$). Однако, численный анализ показал, что в абсолютном большинстве реальных технологических процессов в вихревых аппаратах влияние подъемных сил столь незначительно, что при обобщении опытных данных ими, а следовательно и критерием Gr, можно пренебречь. В то же время, обработка данных с использованием критерия Pr, характеризующего соотношение между молекулярным переносом количества движения и теплоты в газе, дает возможность распространить полученные зависимости на аппараты с другими газовыми теплоносителями (рис. 4).

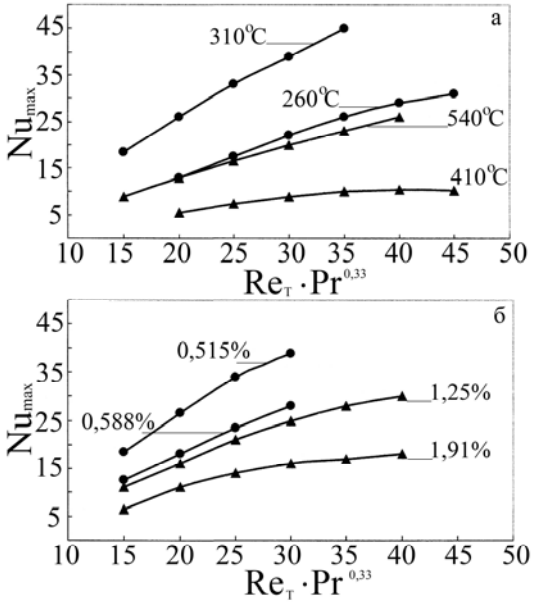

Рис. 4 Критериальная зависимость $Nu_{max}=f(Re_тPr^{0,33})$ при изменении температуры газового потока $t_г$(а) и исходной влажности материала $W_н$ (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщение экспериментальных данных показало, что они с погрешностью до 1–3 % (для различных опытов) могут быть описаны в исследованном диапазоне зависимостью вида:

$$Nu_{max}= 2 + A\cdot Re_т\cdot Pr^{0,33},$$

где значение A зависит от теплофизических свойств материала и теплоносителя. Так, для железного порошка, A при базовом режиме составляет 1,23 и имеет следующую зависимость от температуры газа:

$$A = 1{,}23 + 0{,}0114\cdot(t – 310).$$

Зависимость A от влажности имеет следующий вид:

$$A = 1{,}23 – 5{,}48\cdot(W – 0{,}515\%).$$

Аналогично, для кварцевого песка зависимости A от температуры и влажности (A при базовом режиме составляет 0,63) можно описать уравнениями:

$$A = 0{,}63 + 0{,}0033\cdot(t – 540),$$

$$A = 0{,}63 – 0{,}227\cdot(W – 1{,}25\%).$$

Представленные результаты дают возможность оценить интенсивность теплообмена на различных участках траектории движения частиц в объеме аппарата и, в первую очередь, в зоне максимально интенсивного теплопереноса, характерной для практически любого типа вихревых устройств.

Однако, при решении многих практических задач для оценки эффективности работы всего устройства в целом необходимо связать коэффициент межкомпонентного теплообмена не только с характеристиками частиц и условиями их обтекания, но и с геометрическими и режимными параметрами аппарата. Представляется целесообразным увязать интегральные характеристики теплообмена с аэродинамической обстановкой в аппарате. Соответственно, для обобщения экспериментальных данных в безразмерном

виде следует использовать зависимость вида $Nu = f(Re_{вх})$, где критерий Рейнольдса рассчитывается по эквивалентному диаметру частицы, кинематическому коэффициенту вязкости и скорости газа на входе в вихревую камеру. Возможность распространения полученных результатов на процессы с другими газами – теплоносителями дает обработка данных с привлечением критерия Pr в традиционной форме.

Последующее обобщение и математическая обработка экспериментальных зависимостей позволяет получить эмпирическую формулу для расчета интенсивности теплообмена в аппарате в целом:

$$Nu_{\Sigma} = 2 + A \cdot Re_{вх(т)} \cdot Pr^{0,33},$$

где А в базовом режиме составляет 0,207 для железного порошка и 0,093 для кварцевого песка, не зависит от влажности, но зависит от температуры газа согласно следующих формул для железного порошка:

$$A = 0,207 + 0,00134 \cdot (t - 310),$$

и для кварцевого песка:

$$A = 0,093 + 0,00033 \cdot (t - 540^{o}).$$

Полученные экспериментальные результаты и зависимости дают возможность рассчитать теплообмен в вихревых аппаратах в широком диапазоне изменения конструктивных и режимных параметров при обработке различных дисперсных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М.: Энергия, 1970. 423 с.

   Gorbis Z.R. Heat Exchange of Hydromechanics of Disperse Through-Flows. Moscow: Energia, 1970. 423 pp.

2. Юдаков А.А. Закрученные газодисперсные потоки в технологических аппаратах. Владивосток: Дальнаука, 2000. 278 с.

   Yudakov A.A. Swirling Gas Disperse Flows in Technological Devices. Vladivostok: Dalnauka, 2000. 278 pp.

3. Кузма-Китча Ю.А. Методы интенсификации теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 112 с.

   Kuzma-Kitcha Yu.A. Methods of Heat Exchange Intensification. Moscow: MEI, 2001. 112 pp.

4. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. М.: Теплотехник, 2011. 335 с.

   Laptev A.G., Nikolaev N.A., Basharov M.M. Methods of Intensification and Modelling of Heat-and-Mass Exchange Processes. Moscow: Teplotehnik, 2011. 335 pp.

© Юдаков А.А., Цыбульская О.Н., Ксеник Т.В.