

Г. Н. ХУДЯКОВ и член-корреспондент АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ

ТЕПЛООБМЕН В ГАЗОВЗВЕСИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

При установившемся гидродинамическом режиме движения мелких частиц в газозвеси относительная скорость движения их в газе весьма невелика и значения критерия Re также незначительны. Теоретическое решение задачи для малых значений Re приводит для стационарного теплового режима к простому уравнению:

$$Nu_{\min} = 2, \quad (1)$$

где Nu_{\min} — минимальное значение критерия, равное $\alpha d / \lambda_r = \beta d / D$; α и β — коэффициенты тепло- и массообмена; d — определяющий размер частиц; λ_r — коэффициент теплопроводности газа и D — коэффициент молекулярной диффузии.

Теоретическое исследование процесса теплообмена в условиях образования ламинарного пограничного слоя у частицы позволяет ⁽¹⁾ вывести следующие уравнения:

$$Nu = 2 + a Re^{0,5} \quad (Re \text{ до } 100); \quad Nu = a_1 Re^{0,5} \quad (Re \text{ от } 100 \text{ и более}). \quad (2)$$

Экспериментальные исследования ^(2,3) теплообмена неподвижных частиц с газовым потоком хорошо подтверждают уравнения (1) и (2).

Практически всегда имеет место неустановившийся режим теплообмена, так как в начальный период времени должна наблюдаться резкая деформация кривых, определяющих температурное поле у частицы. Уравнения (1) и (2) отвечают «стационарному» периоду нагрева, когда наблюдается квази-стационарное поле температур. Очевидно, конечно, что этот нестационарный (в тепловом отношении) период охлаждения (нагрева) частиц будет всегда повышать интенсивность теплообмена.

При различии начальных скоростей движения газа и твердых частиц наблюдается, как показали наши исследования ⁽⁴⁾, резко нестационарный гидродинамический режим с переменными относительными скоростями движения частиц в газе. Эта нестационарность процесса может учитываться путем правильного определения величины Re .

Уравнения (1) и (2) справедливы только для неподвижных частиц, обтекаемых газовым потоком, в то время как для газозвеси, т. е. для движущихся частиц, они справедливы только для весьма малых значений Re , порядка 10, когда движение частиц не меняет характера процесса обтекания частиц газом. Как показал один из авторов ⁽⁵⁾ статьи, при движении частиц в газовом потоке вращение частиц приводит уже при небольших значениях Re к образованию турбулентного пограничного слоя.

В общем случае уравнение теплообмена для турбулированного пограничного слоя будет иметь следующий вид:

$$Nu \approx b Re^{0,83} + b_1 Re^{0,5}. \quad (3)$$

При незначительной величине ламинарного пограничного слоя

$$Nu = b Re^{0,83}. \quad (4)$$

Нестационарный (в тепловом отношении) период повысит величины \overline{Nu} . В общем случае это повышение будет функцией Re и степени нагрева (охлаждения) частиц Q/Q_0 , но, учитывая относительно

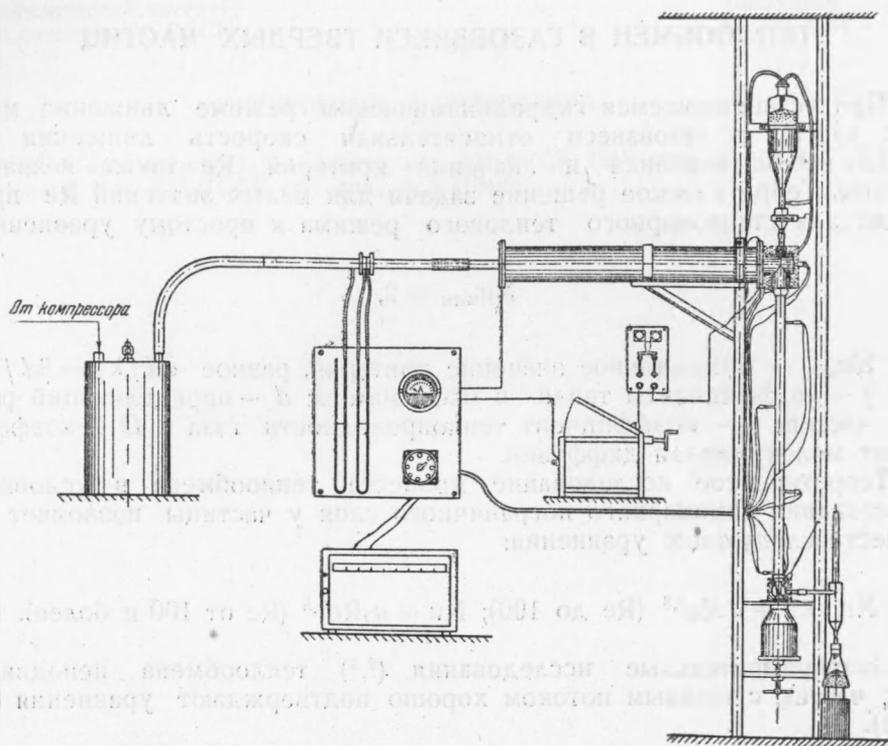


Рис. 1. Схема лабораторной установки по изучению теплообмена

небольшое влияние Re , для определенной степени нагрева повышение будет (приблизительно) постоянной величиной, и для $Re > 30$

$$Nu \approx c + b Re^{0,83} + b_1 Re^{0,5}; \quad Nu \approx c + b Re^{0,83}. \quad (5)$$

Из литературы известны три советских работы по экспериментальным исследованиям процесса теплообмена между падающими частицами и газом (6-8). В данной работе* проведено исследование теплообмена твердых частиц с воздухом в прямоходе на установке, разработанной Г. Н. Худяковым. Схема установки приведена на рис. 1.

Кварцевый двухстенный (труба в трубе) теплообменник крепится одним концом к нагревательной печи, а другим — к гибкой диафрагме. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду стенки теплообменника были посеребрены, и в кольцевом пространстве между трубками поддерживался вакуум до 0,001 мм рт. ст. Теплоноситель-воздух нагревается в электропечи до заданной температуры и

* В работе принимала участие Л. И. Дурьнина.

поступает в верхнюю часть внутренней трубки теплообменника. Перед входом воздуха в теплообменник имеется двухстенная посеребренная кварцевая трубка, через которую вводится необходимое количество пыли из бункера. Температура песка в бункере измеряется термопарой. Количество подаваемой в теплообменник пыли регулируется специальным вибрационным шибберным питателем. Температура теплоносителя замеряется перед смешением с пылью, а затем после выхода из теплообменника с точностью до $0,2^\circ$.

Смесь газа-теплоносителя и пыли из теплообменника попадает к циклон. Воздух-теплоноситель выходит из циклона в атмосферу, а пыль собирается в приемник, присоединенный к нижней части циклона. Как видно из рис. 2, в нижнем конце внутренней трубки теплообменника установлен шариковый клапан 9 с уплотняющим и «натягивающим» устройством 8. Над шариковым клапаном трубка теплообменника имеет продольные щели, через которые пыль и газ-теплоноситель, в том случае, если закрыт шариковый клапан, поступают по трубке 6 в циклон. Холодная пыль попадает в теплообменнике в поток горячего газа (воздуха) и нагревается. Температура пыли после выхода из теплообменника определялась калориметрическим способом, путем периодического забора пыли в калориметр 2 посредством открытия клапана.

Опыты по изучению теплообмена между газом-теплоносителем и пылью проводились в прямотоке при движении аэрозвеси сверху вниз в трубке диаметром $d = 14,3$ мм и длиной 1600 мм. Материалом пыли были кварцевый песок со средним диаметром фракций в 75, 150, 160, 200, 260, 320, 450, 700, 750, 845, 1100, 1200, 2000 и 2310 микрон. Окончательные замеры производились только после того, как устанавливался постоянный режим работы установки.

Полученные данные нанесены на рис. 3 в виде зависимости Nu от Re . Экспериментальные точки, как и следовало ожидать из теоретического анализа, не укладываются на кривую I, отвечающую ламинарному пограничному слою (уравнение (2)). Экспериментальные точки ложатся значительно ближе к кривой II, отвечающей уравнению (4) З. Ф. Чуханова, полученному для турбулентного пограничного слоя с коэффициентом $b = 0,2$. Несколько отклоняются от этой кривой точки, полученные при больших значениях Re с крупными частицами. Причина этого отклонения пока не ясна. Вполне возможно, что при больших значениях Re увеличивается доля нетурбулизированной поверхности. Для значений Re от 50 до 500 уравнение $Nu = 0,2 Re^{0,83}$ вполне пригодно для практических расчетов.

Тот факт, что $Nu = 2$ для малых значений Re , говорит о незначитель-

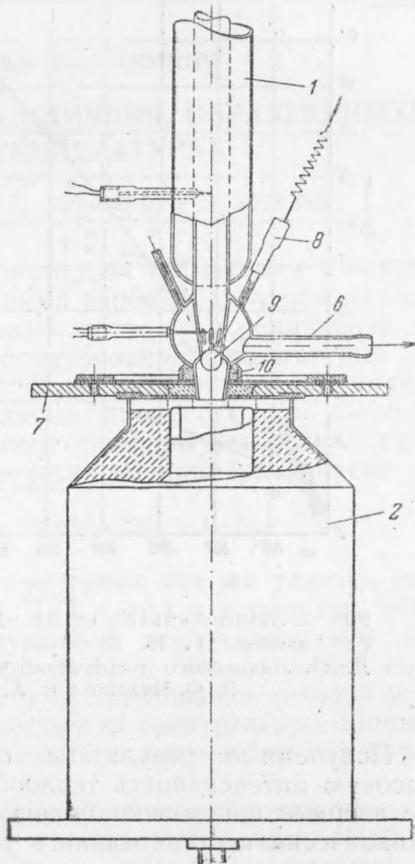


Рис. 2

ной роли тепловой нестационарности процесса теплообмена, а следовательно, и о возможности считать c в уравнении (5) близким к нулю.

На рис. 3 нанесены экспериментальные данные Д. Н. Ляховского, а также А. М. Николаева и З. Ф. Чуханова. Все эти экспериментальные данные удовлетворительно совпадают между собой.

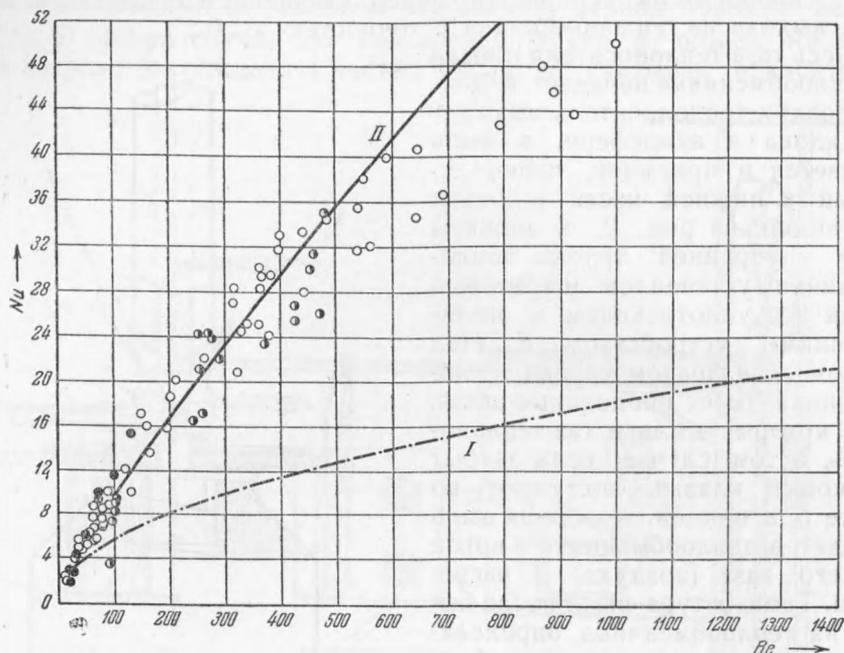


Рис. 3. Зависимость Nu от Re . I — $Nu = 0,56 Re^{0,5}$ II — $Nu = 0,2 Re^{0,83}$
 ○ — данные Г. Н. Худякова (прямоток сверху вниз), ● — данные Д. Н. Ляховского (свободное падение в воздухе) остальные — данные З. Ф. Чуханова и А. М. Николаева (падающий слой)

Полученные результаты опытов подтверждают исключительно высокую интенсивность теплообмена газа с пылью в газозвеси, а также впервые показывают большую интенсифицирующую роль гидродинамически нестационарного участка потока газозвеси на теплообмен. В промышленных аппаратах необходимо эффективно использовать этот участок гидродинамически нестационарного движения газозвеси для интенсификации тепло- и массообмена.

Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского
 Академии наук СССР

Поступило
 6 VIII 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. П. Сокольский, Экспериментальное исследование процессов горения, диффузии и теплообмена при пылесжигании, ЛИИ, 1941. ² Д. Н. В ы р у б о в, ЖТФ, 9, в. 21 (1939). ³ Л. И. Кудряшев, ДАН, 63, № 1 (1948); Изв. АН СССР, ОТН, № 2 (1951). ⁴ Г. Н. Худяков и З. Ф. Чуханов, ДАН, 78, № 4 (1951). ⁵ З. Ф. Чуханов, Изв. АН СССР, ОТН, № 10 (1947). ⁶ Д. Н. Ляховский, ЖТФ, 10, в. 12 (1940). ⁷ А. М. Николаев и З. Ф. Чуханов, ДАН, 78, № 2 (1951). ⁸ И. Н. Федоров, Современные проблемы сушильной техники, 1941.