

УДК 621.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

*А. Б. Бирюков*

*Донецкий национальный технический университет, г. Донецк*

Экспериментально изучены некоторые аспекты интенсификации конвективного теплообмена при поперечном обтекании цилиндрического тела и импульсном режиме течения среды, создаваемом при вращении круглой заслонки в полости подводящего трубопровода.

*Ключевые слова:* конвективный теплообмен, течение среды, обтекание тела, критериальное уравнение.

**Введение.** В настоящее время сохранение предприятиями устойчивых позиций на рынке возможно только при постоянной работе над снижением уровня энергопотребления и повышением качества продукции. Данная задача требует для своего решения не только привлечения инвестиционных средств, но и постоянного проведения научных исследований и внедрения их результатов. Актуальным является поиск путей интенсификации теплообменных процессов с участием газообразных сред. Применительно к металлургической теплотехнике, данное направление исследований обусловлено тем, что сравнительно низкие значения коэффициентов конвективной теплоотдачи от газообразных сред или к ним определяют значительную продолжительность операций низкотемпературного нагрева или воздушного охлаждения материалов в печах, что снижает их технико-экономические показатели.

Теоретические аспекты различных подходов интенсификации конвективного теплообмена проанализированы в работах [1, 2]. Среди публикаций на тему интенсификации теплообмена в камерах печей за счет реализации импульсных режимов преобладают исследования практического характера, дающие представление об уровне экономии топлива, достигнутом авторами в конкретном случае [3 – 5]. Для целенаправленного достижения эффекта интенсификации теплообмена необходимо наличие расчетных зависимостей, позволяющих оценивать достигаемые значения коэффициента теплоотдачи в зависимости от параметров пульсации.

В данной работе решается задача экспериментальной проверки возможности интенсификации конвективного теплообмена при поперечном обтекании цилиндра и импульсном режиме течения среды. В результате обработки экспериментальных данных выводится критериальное уравнение, описывающее конвективный теплообмен для случая пульсации, созданной при вращении круглой заслонки в полости подводящего патрубка.

**Постановка и решение задачи.** Конвективный теплообмен при поперечном обтекании цилиндрических тел и стационарном течении среды описывается при помощи следующих критериальных уравнений [1]:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,56 Re^{0,5} \cdot Pr_{жс}^{0,36} (Pr_{жс} / Pr_{ст})^{0,25}, \text{ при } Re < 1000 \\ Nu &= 0,28 Re^{0,6} \cdot Pr_{жс}^{0,36} (Pr_{жс} / Pr_{ст})^{0,25}, \text{ при } Re \geq 1000. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr$  – критерий Прандтля; индексы «ж» и «ст» обозначают, что значение критерия берется при температуре среды в ядре потока и при температуре обтекаемой поверхности соответственно.

Критерий Нуссельта и Рейнольдса определяются так:

$$Nu = \alpha_k \cdot d / \lambda, \quad Re = w \cdot d / \nu,$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $d$  – характерный для рассматриваемого вида конвективного теплообмена размер твердой поверхности, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности греющей или охлаждающей среды при ее температуре, Вт/(м·К);  $w$  – характерная скорость потока газа или жидкости, м/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость потока, вычисленная при его температуре, м<sup>2</sup>/с.

Критерий Прандтля может быть найден в справочной литературе в зависимости от характерной температуры газового потока. По вычисленному при помощи соответствующего критериального уравнения значению критерия Нуссельта определяется искомое значение коэффициента конвективной теплоотдачи. Очевидно, что вид критериального уравнения, описывающего конвективный теплообмен при импульсном течении сред, должен быть изменен или расширен за счет введения дополнительных критериев.

С использованием основных положений теории размерностей установлено, что рассматриваемая задача с одним определяемым параметром (значение коэффициента конвективной теплоотдачи) и семью определяющими независимыми факторами (характерный размер тела, средняя скорость течения среды,

коэффициент теплопроводности среды, теплоемкость среды, плотность среды, коэффициент динамической вязкости, частота пульсации расхода среды) может быть описана при помощи (1+7- 4) четырех независимых критериев.

Для импульсного режима обтекания тел принято решение взять за основу базовое критериальное уравнение (1) с набором известных экспериментальных коэффициентов при критериях Nu, Re, Pr. Влияние импульсности учитывается за счет введения критерия Sr (Струхаль) с двумя неизвестными коэффициентами:

$$Nu_{\text{имп}} = 0,28 \cdot a \cdot Re^{0,6} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,36} \left( Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{ст}} \right)^{0,25} \cdot (Sr)^b, \quad (2)$$

где a и b – неизвестные коэффициенты, значения которых определяются из эксперимента.

Для экспериментального изучения влияния импульсного характера подачи газообразной среды на значение коэффициента конвективной теплоотдачи был создан экспериментальный комплекс, включающий в себя: 1 – дутьевой вентилятор, 2 – главная регулирующая заслонка, 3 – расходомер, 4 – узел прерывания течения воздуха, 5 – диффузор для истечения воздуха, 6 – изучаемое тело, 7 – штатив с консолью, 8 – блок питания для нагрева изучаемого тела, 9 – подвод напряжения к телу, 10 – термопара (рис. 1).

Созданный лабораторный комплекс включает в себя: штатив с подвешенным телом цилиндрической формы, подогреваемым электрическим током и охлаждаемым за счет конвекции; блок питания, выдающий постоянное напряжение, регулируемое в диапазоне от 0 до 20 В, снабженный амперметром и вольтметром; хромель-алюмелевая термопара и цифровой прибор, снабженный функцией обработки сигнала от термопары и выдачи значения термопары в цифровом формате; устройство для создания пульсаций (рис. 2), принцип действия которого основан на вращении круглой заслонки в полости трубки круглого сечения (диаметр трубки 30 мм, диаметр заслонки 26 мм, выходной диаметр диффузора 60 мм).

Для проведения экспериментов использовалось сопротивление ПЭВ-20, имеющее цилиндрическую форму (высота 36 мм, наружный диаметр 13 мм). Внутренние отверстия были заглушены теплоизолирующими пробками. В середине тела по высоте к его поверхности приклеен рабочий спай термопары (ТХА) и вся поверхность в один слой обернута изоляционной лентой толщиной 0,1 мм.

В основу работы экспериментального комплекса положен известный подход, согласно которому при подогреве тел электрическим током и охлаждении отдачей тепла в окружающую среду через некоторое время наступает тепловое равновесие. При этом тепловая мощность, отводимая от тела, равна подводимой тепловой мощности. Эта ситуация характеризуется определенной температурой поверхности исследуемых тел. Измеряя эту температуру и подводимую тепловую мощность, можно вычислить значение коэффициента конвективной теплоотдачи

$$\alpha_{\text{конв}} = \left( k \cdot Q - F \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{t_{\text{изм}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{ок}} + 273}{100} \right)^4 \right] \right) / (F \cdot (t_{\text{изм}} - t_{\text{ок}})), \quad (3)$$

где Q – подводимая тепловая мощность, Вт; F – боковая поверхность охлаждаемого тела, м<sup>2</sup>; k – тарировочный коэффициент, учитывающий утечку тепла от нагреваемого тела через подвеску; ε – степень черноты поверхности изучаемого тела; C<sub>0</sub>=5,67 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>); t<sub>изм</sub> – измеренная температура поверхности изучаемого тела, °C; t<sub>ок</sub> – температура окружаю-

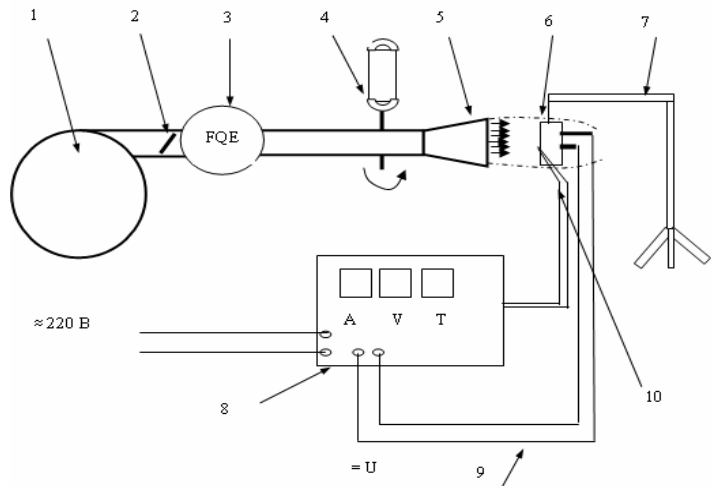


Рис. 1. Схема установки для изучения конвективного теплообмена

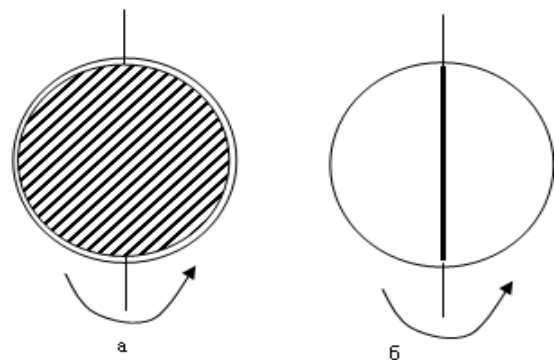


Рис. 2. Крайние положения устройства для создания пульсаций (а – полностью закрыто, б – полностью открыто)

шей среды вокруг изучаемого тела, °С.

Вначале проведены исследования по определению значения тарировочного коэффициента установки для безимпульсных режимов поперечного обтекания цилиндрических тел. Для каждой скорости обдува, устанавливаемой при помощи главной заслонки, фиксируются установившееся значение равновесной температуры поверхности тела, температура среды, истекающей из диффузора. При помощи выражения (1) вычисляется соответствующее скорости течения среды значение коэффициента теплоотдачи. Далее определяется такое значение тарировочного коэффициента, при котором обе части выражения (3) становятся равными.

В результате проведения ряда опытов (табл. 1), установлено значение тарировочного коэффициента установки в проведенных опытах. Значения этой величины в различных опытах колебались от 0,903 до 0,916; максимальная относительная разница между тарировочными коэффициентами составляла не более 1,6%. Отличие полученных значений тарировочного коэффициента от единицы определяется рассеиванием части тепла от обдуваемого тела через поддерживающую систему. Расхождение между значениями тарировочных коэффициентов в различных опытах обусловлено колебаниями напряжения в сети, изменениями мощности, выделяемой на нагреваемом теле, а также конечной ценой деления расходомера и возможными ошибками, связанными с округлением расходов среды.

Таблица 1

Результаты экспериментов по определению тарировочного коэффициента для созданной экспериментальной установки

№ эксп.	Подводимое напряжение, В	Выделяющаяся тепловая мощность, Вт	Скорость вытекания среды из диффузора, м/с	Значение равновесной температуры поверхности тела, °С	Значение коэффициента конвективной теплоотдачи по критериальному уравнению, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Значение тарировочного коэффициента
1	10	5,29	4,835	69	69,635	0,916
2	10	5,29	4,095	72	63,034	0,9012
3	10	5,29	2,844	81	50,684	0,903

Для изучения возможности усиления конвективного теплообмена при импульсном режиме подачи теплоносителя принято значение тарировочного коэффициента 0,91. В рамках проведенных экспериментальных исследований изучались импульсные режимы при изменении расхода, определяемом конструкцией устройства для создания пульсации. Всего было проведено 9 экспериментов, в которых варьировались средняя скорость течения среды и частота пульсации (частота вращения заслонки). Данные о значениях факторов, установленных в эксперименте, и значениях искомого параметра приведены в табл. 2.

Таблица 2

Условия проведения экспериментов по изучению теплообмена при импульсном течении среды и их результаты.

№ эксп.	Характеристика подачи среды		Значение коэффициентов теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)		Значения характерных критериев в эксперименте			
	Средняя скорость среды у тела, м/с	Частота вращения заслонки, об/мин	в эксперименте	В аналог. безимпульсном режиме	Re	Pr <sub>ст</sub>	Sr	Nu <sub>имп</sub>
1	4,266	90	81,29	64,71	3760	0,694	0,0306	43,33
2	4,266	69	78,68	64,71	3760	0,694	0,0239	41,94
3	4,266	51	77,44	64,71	3760	0,694	0,0172	41,28
4	3,754	105	78,68	59,99	3309	0,694	0,0402	41,94
5	3,754	75	73,91	59,99	3309	0,694	0,0287	39,40
6	3,754	51	71,71	59,99	3309	0,694	0,0200	38,23
7	2,218	105	59,08	43,71	1955	0,692	0,0689	31,49
8	2,218	75	57,59	43,71	1955	0,692	0,0488	30,70
9	2,218	39	54,79	43,71	1955	0,692	0,0258	29,21

Отношение коэффициентов теплоотдачи при импульсном и безимпульсном режимах отопления может быть определено как отношение соответствующих критериев Нуссельта, взятых по критериальным уравнениям (1) и (2):

$$\alpha_{имп} / \alpha = Nu_{имп} / Nu = a(Sr)^b.$$

Получая для каждого конкретного эксперимента на основании экспериментальных замеров и их обработки  $\alpha_{имп}$  и вычисляя по критериальному уравнению (1)  $\alpha$ , соответствующее средней скорости течения

среды, получаем возможность определения коэффициентов  $a$  и  $b$ . Наиболее удобно эта задача может быть решена при отображении экспериментальных точек в логарифмических координатах  $\ln(\alpha_{\text{имп}}/\alpha)$ ,  $\ln(Sr)$ .

Тогда неизвестные коэффициенты  $b$  и  $\ln(a)$  определяются как параметры прямой (множитель перед аргументом и свободный член), проведенной через массив экспериментальных точек при помощи метода наименьших квадратов. Графическое представление обработки экспериментальных данных и нанесенная аппроксимирующая прямая представлены на рис. 3. Таким образом, конвективный теплообмен при поперечном обтекании тел и импульсном характере течения среды с изменением расхода, достигаемым путем вращения круглой заслонки в полости подводящего патрубка, описывается уравнением вида:

$$Nu = 0.494 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0.36} (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0.25} \cdot (Sr)^{0.0971}.$$

Значение частоты пульсации для определения значения критерия  $Sr$  взята учетверенная частота вращения заслонки, так как за один ее оборот имеет место четыре полуволны сменны скорости. В качестве характерного размера условно выбрана полудлина периметра обтекаемого тела. Выбор любого значения частоты пульсации, пропорционального частоте вращения заслонки и диаметру тела поменяет лишь значения коэффициентов  $b$  и  $a$  с сохранением значения выражения  $a(Sr)^b$ .

**Анализ результатов исследования.** В строгом смысле, полученное уравнение описывает конвективный теплообмен для конкретного пульсатора, использованного в лабораторной установке (определенное соотношение диаметров трубопровода и заслонки, относительно расстояние от заслонки до среза диффузора). Полученное уравнение справедливо в диапазоне изменения критерия  $Sr$  от 0,017 до 0,068. Следует отметить, что для пульсаторов, действие которых основано на вращающейся заслонке или схожем принципе, результат будет зависеть от соотношения диаметров трубопровода и заслонки. В данной работе выбрано рациональное соотношение достаточное для обеспечения большой амплитуды колебаний (согласно специальным исследованиям она может достигать 50%). Зазор два миллиметра в канале  $((30-26)/2=2)$  позволяет избежать заклинивания устройства и обеспечивает его свободное вращение даже при некоторых смещениях заслонки на оси.

Установленное критериальное уравнение позволяет управлять импульсными режимами теплообмена на количественном и качественном уровнях. Согласно известным представлениям, установленная закономерность усиления теплообмена при импульсном течении среды, объясняется тем, что при волнообразном изменении ее расхода происходит разрушение пограничного гидродинамического слоя, который формируется на значительной части периметра обтекаемых тел и определяет сопротивление теплопередаче.

Интересной особенностью полученного критериального уравнения является достаточно слабое влияние частоты пульсации (показатель степени при критерии  $Sr$  порядка 0,1) на итоговое значение коэффициента теплоотдачи. В то же постоянная составляющая, связанная с переходом на импульсное отопление, достаточно значительна (1,764). По мнению автора, эта ситуация объясняется противоречивым влиянием частоты пульсации: с одной стороны при увеличении частоты разрушение пограничного слоя происходит более часто, с другой стороны, степень разрушения пограничного слоя с ростом частоты снижается из-за влияния инерционных явлений.

Усиление конвективной составляющей теплообмена на 20-30%, зафиксированное в экспериментах, является достаточно существенным и позволяет, например, достичь примерно такого же ускорения нагрева в низкотемпературных печах или аналогичное ускорение воздушного охлаждения в печах. Что касается нагрева материалов в высокотемпературных печах, указанный уровень усиления конвективного теплообмена, приведет к незначительному усилению итогового теплообмена.

Подобие явлений тепло- и массообмена делает возможным, с некоторой условностью, применение этой закономерности для усиления и осознанного управления интенсивностью массообмена, что особенно важно в технологиях химического синтеза, как классических, так и недавно возникших и динамично развивающихся, например, нанотехнологиях.

**Выводы.** Определен набор критериев для описания конвективного теплообмена при импульсном режиме течения сред. По сравнению с уравнением, описывающим безимпульсный теплообмен, должен

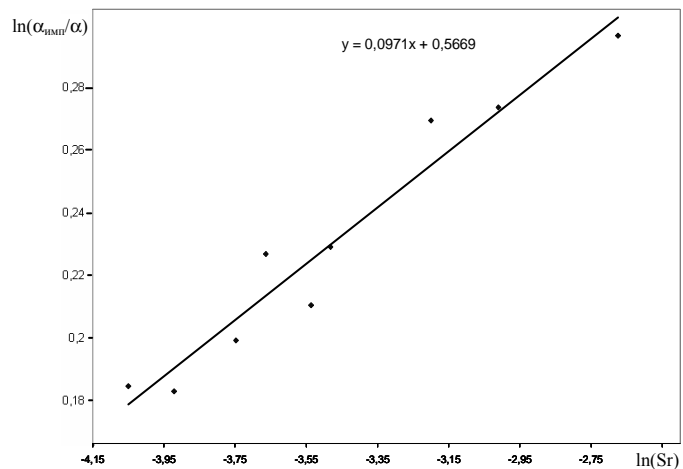


Рис. 3. Экспериментальные данные по изучению теплообмена при импульсном обтекании тел и аппроксимирующая прямая, полученная при помощи метода наименьших квадратов

быть добавлен критерий Струхаля.

Для экспериментального изучения данного явления создана лабораторная установка, создающая пульсацию среды за счет вращения круглой заслонки в полости подводящего патрубка. Тарировочный коэффициент для установки был определен на основании анализа ряда экспериментальных точек, снятых для безимпульсного режима, описываемого известным экспериментальным уравнением.

На основании ряда экспериментов для импульсного режима течения среды и анализа их результатов получено критериальное уравнение, описывающее конвективный теплообмен при поперечном обтекании цилиндрических тел и создании пульсации расхода среды путем вращения круглой заслонки в полости подводящего патрубка.

#### РЕЗЮМЕ

Експериментально досліджено деякі аспекти інтенсифікації конвективного теплообміну при поперечному обтіканні циліндричного тіла та імпульсному режимі течії середі, який утворюється завдяки обертанню круглої заслонки в порожнині трубопроводу, що підводить середу

*Ключові слова:* конвективний теплообмін, течія середі, обтікання тіла, критериальне рівняння

#### SUMMARY

Some aspects of convective heat transfer intensification on cylindrical body cross-flow and medium impulse flow regime caused by cut-off plate in supply pipe rotation are experimentally studied.

*Keywords:* convective heat exchange, medium flow, body cross-flow, criteria equation

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1973. – 265с.
2. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – Новосибирск: Наука, 1970. – 659 с.
3. Пилипенко Р.А. Интенсификация тепловой работы камерных печей, отапливаемых природным газом / Р.А. Пилипенко // Металлургическая теплотехника. – Днепропетровск, 2002. – Т. 8. – С. 99-105.
4. Губинский В.И. Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра / В.И. Губинский // Теория и практика металлургии. – 2004. – № 6. – С.56-60.
5. Новые схемы импульсного отопления нагревательных и термических печей / М.П. Ревун, А. И. Баришенко, А.И. Чепрасов и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – № 3. – С. 97-100.

*Поступила в редакцию 22.02.2012 г.*