

А.Б. Бирюков кандидат техн. наук, доцент ДонНТУ; Н.В. Алехина студент ДонНТУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ СРЕД НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛО И МАССОПЕРЕНОСА

В результате проведения ряда экспериментов на специально созданной лабораторной установке и анализа их результатов получено критериальное уравнение, описывающее конвективный теплообмен при поперечном обтекании цилиндрических тел и косинусоидальном изменении расхода среды. Предложено применение установленных закономерностей для интенсификации тепло и массопереноса в некоторых производственных технологиях

В последнее время усилия исследователей направлены на интенсификацию тепло и массопереноса в различных технологиях с целью повышения производительности, придания агрегатам более компактных размеров и форм, улучшения технико-экономических показателей [1, 2]. Особенно важным является достижение таких результатов в наиболее энергоемких и в то же время наиболее важных для отечественной и мировой экономики отраслях промышленности: металлургии, машиностроении, химической промышленности.

Одним из примеров работы в этом направлении является импульсное отопление печных агрегатов, применение которого позволяет при прочих равных условиях достигать экономию топлива до 15% [3]. Однако на сегодня нет четких представлений о том, что именно позволяет достигать такие результаты, как определять рациональные (оптимальные) параметры импульсов в каждом конкретном случае. Аналогичные вопросы должны быть решены применительно к влиянию импульсных явлений на конвективный

массоперенос. Причем это важно не только для классических технологий химического синтеза, но и для недавно возникших и динамично развивающихся направлений, например, производства углеродных наноматериалов [4].

В виду подобия явлений конвективного тепло и массопереноса и наличия объективных предпосылок, определяющих более благоприятные условия изучения влияния импульсной подачи сред на явления теплопередачи, в данной работе усилия сосредоточены на изучении конвективного теплообмена при поперечном обтекании цилиндрических тел и импульсном течении газообразной среды.

Конвективный теплообмен при поперечном обтекании цилиндрических тел и стационарном течении среды описывается при помощи следующих критериальных уравнений [5]:

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

где Nu – критерий Нуссельта, характеризующий отношение интенсивности передачи тепла конвекцией и теплопроводностью при конвективном теплообмене;

Re – критерий Рейнольдса, характеризующий соотношение сил инерции и вязкости в потоке жидкости;

Pr – критерий Прандтля, характеризующий меру подобия полей скоростей и температур в потоке жидкости или газа (нижние индексы «ж» и «с» обозначают, что значение критерия берется при температуре среды в ядре потока и при температуре обтекаемой поверхности соответственно);

$$\text{Критерий Нуссельта определяется как } Nu = \frac{\alpha_{\kappa} \cdot d}{\lambda},$$

где α_{κ} – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К);

d – характерный для рассматриваемого вида конвективного теплообмена размер твердой поверхности, м;

λ – коэффициент теплопроводности греющей или охлаждающей среды при ее температуре, Вт/(м·К).

Критерий Рейнольдса определяется как: $Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$,

где w – характерная скорость потока газа или жидкости, м/с;

d – характерный размер твердой поверхности, м;

ν – кинематическая вязкость потока, вычисленная при его температуре, м²/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 [5] 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), для составления единиц измерения которых используется четыре базовых размерности (м, кг, с, К) может быть описана при помощи (1+7- 4) четырех независимых критериев.

Используя типовые приемы, применяемые в рамках теории размерностей:

– составление системы из четырех уравнений (по числу используемых в рассматриваемой задаче размерностей), в которых фигурирует восемь

переменных (показатели степени при параметре и факторах); уравнения составляются исходя из того, что итоговая степень, соответствующая каждой размерности, должна равняться нулю;

– решение системы уравнений относительно четырех переменных;

– группировка определяемого параметра и факторов относительно определенных степеней (четыре переменных, относительно которых была решена система уравнений) и получение искомого критериев;

для рассматриваемой задачи были получены три критерия, традиционно используемые для описания конвективного теплообмена: Nu , Re , Pr , и еще

один критерий $\frac{v_{имп} \cdot d}{w}$, который носит название Sh (Струхаль) и

используется для описания нестационарных явлений.

В связи с этим для импульсного режима обтекания тел принято решение взять за основу базовое критериальное уравнение (1) с набором известных экспериментальных коэффициентов при критериях Nu , Re , Pr , а влияние импульсности учесть за счет введения критерия Sh с двумя неизвестными коэффициентами:

$$Nu_{имп} = 0,28 \cdot a \cdot Re^{0,6} \cdot Pr_{жс}^{0,36} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot (Sh)^b, \quad (2)$$

где a и b – коэффициенты, значения которых требуется определить в результате эксперимента.

Для экспериментального изучения влияния импульсного характера подачи газообразной среды на значение коэффициента конвективной теплоотдачи был создан экспериментальный комплекс, включающий в себя (рис. 1):

– 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 (представленное на 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).

В качестве тела 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 котором 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:

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

где Q – подводимая тепловая мощность, Вт;

F – боковая поверхность охлаждаемого тела, м^2 ;

k – тарировочный коэффициент, учитывающий утечку тепла от нагреваемого тела через подвеску;

ε – степень черноты поверхности изучаемого тела;

$C_0=5,67$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴);

$t_{\text{изм}}$ – измеренная температура поверхности изучаемого тела, °С;

$t_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды вокруг изучаемого тела, °С.

Вначале проведены исследования по определению значения тарировочного коэффициента установки для безимпульсных режимов поперечного обтекания цилиндрических тел.

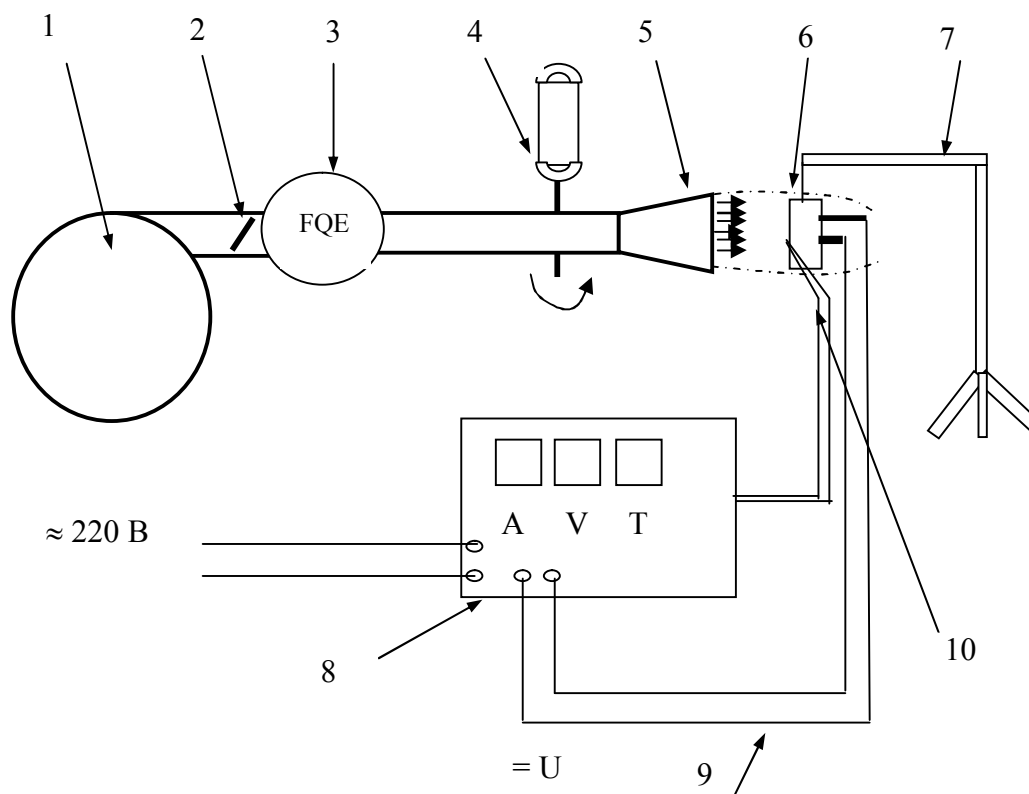


Рис. 1. Схема установки для изучения конвективного теплообмена (1 – дутьевой вентилятор, 2 – главная регулирующая заслонка, 3 – расходомер, 4 – узел прерывания течения воздуха, 5 – диффузор для истечения воздуха, 6 – изучаемое тело, 7 – штатив с консолью, 8 – блок питания для нагрева изучаемого тела, 9 – подвод напряжения к телу, 10 – термопара)

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, результаты которых представлены в таблице 1, было установлено значение тарировочного коэффициента установки в проведенных опытах.

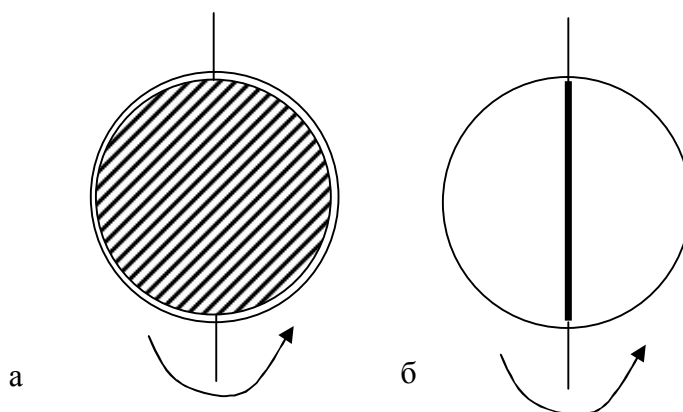


Рис. 2. Крайние положения устройства для создания пульсаций (а – полностью закрыто, б – полностью открыто)

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. Что касается природы расхождения между значениями тарировочных коэффициентов в различных опытах, то она может заключаться в колебаниях напряжения сети и, соответственно, колебаниях мощности, выделяемой на нагреваемом теле, а также в конечной цене деления расходомера и соответственно возможных ошибках, связанных с округлением расходов среды, определяющих расчетные значения скоростей истечения воздуха из диффузора.

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 ² ·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 косинусоидальном 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 таблице 2.

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

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

Получая для каждого конкретного эксперимента на основании экспериментальных замеров и их обработки $\alpha_{имп}$ и вычисляя по критериальному уравнению (1) $\alpha_{без\ имп}$, соответствующее средней скорости течения среды, получаем возможность определения коэффициентов а и b.

Наиболее удобно эта задача может быть решена при отображении экспериментальных точек в логарифмических координатах

$$\ln\left(\frac{\alpha_{имп}}{\alpha_{безимп}}\right), \ln(Sh).$$

Таблица 2 – Условия проведения экспериментов по изучению теплообмена при импульсном течении среды и их результаты.

№ эксп.	Расход среды через установку, м ³ /с	Частота вращения заслонки, с ⁻¹	Значение коэффициента теплоотдачи в эксперименте, Вт/(м ² ·К)	Значение коэффициента теплоотдачи в безимпульсном режиме при прочих равных условиях, Вт/(м ² ·К)
1	0,75	90	81,29	64,71
2	0,75	69	78,68	64,71
3	0,75	51	77,44	64,71
4	0,66	105	78,68	59,99
5	0,66	75	73,91	59,99
6	0,66	51	71,71	59,99
7	0,39	105	59,08	43,71
8	0,39	75	57,59	43,71
9	0,39	39	54,79	43,71

Тогда неизвестные коэффициенты b и 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 рисунке 3.

Таким образом, конвективный теплообмен при поперечном обтекании тел и импульсном характере течения среды с косинусоидальным изменением расхода описывается уравнением вида:

$$Nu = 0.33 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr_{жс}^{0,36} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}}\right)^{0,25} \cdot (Sh)^{0,0971}.$$

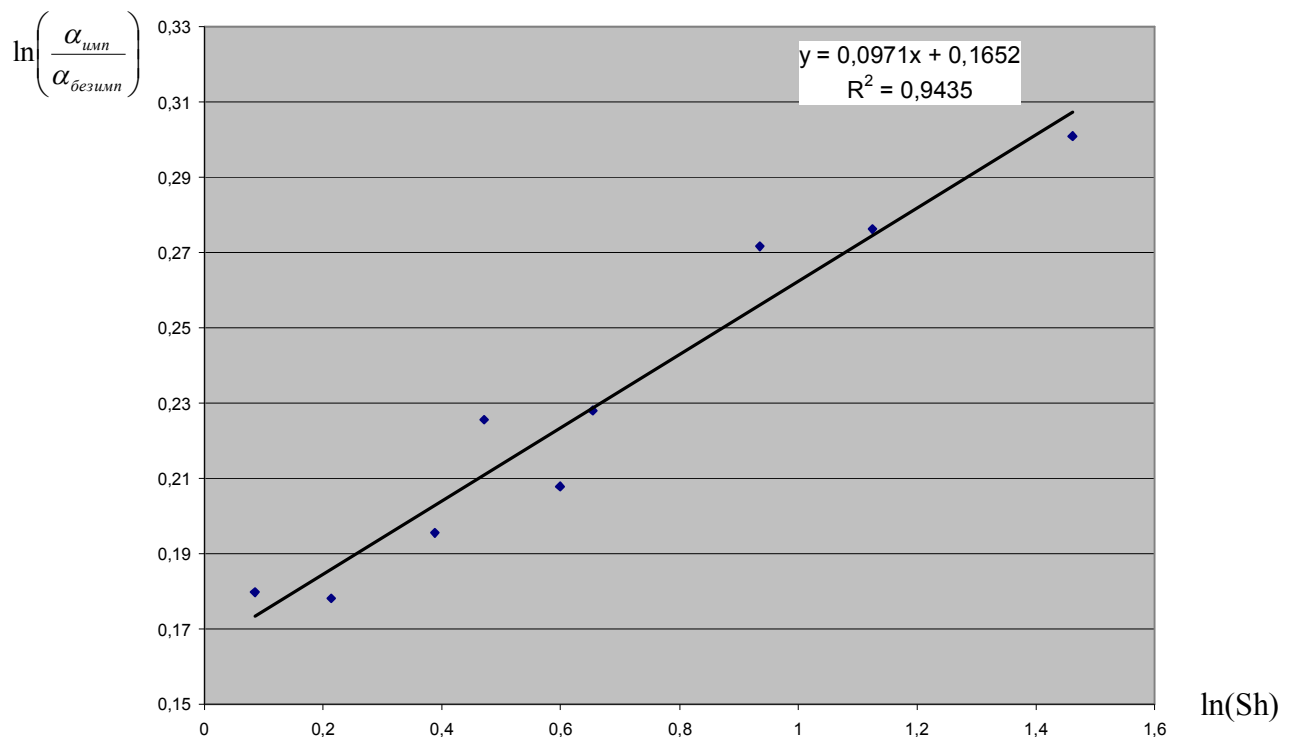


Рис. 3. Экспериментальные данные по изучению теплообмена при импульсном обтекании тел и аппроксимирующая прямая, полученная при помощи метода наименьших квадратов.

В качестве частоты пульсации для определения значения критерия Sh взята учетверенная частота вращения заслонки, так как за один ее оборот имеет место четыре полуволны смены скорости. Впрочем, выбор в качестве частоты пульсации любого значения, пропорционального частоте вращения заслонки, меняет лишь значения коэффициентов b и a при сохранении значения $a(Sh)^b$.

В строгом смысле, полученное уравнение описывает конвективный теплообмен при косинусоидальном изменении расхода среды для конкретного пульсатора, использованного в лабораторной установке (определенное соотношение диаметров трубопровода и заслонки, относительно расстояние от заслонки до среза диффузора).

Следует отметить, что для косинусоидальных пульсаторов, действие которых основано на вращающейся заслонке или схожем принципе, результат будет зависеть от соотношения диаметров трубопровода и заслонки. В данной работе, по мнению авторов, выбрано рациональное

соотношение, которое, с одной стороны, достаточно для обеспечения достаточно большой амплитуды колебаний (согласно специальным исследованиям она может достигать 50%), с другой стороны, 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 осознанно управлять импульсными режимами теплообмена (на количественном уровне для подобных рассмотренному пульсаторов и на качественном для других пульсаторов).

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.

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 быть добавлен критерий Струхала.

Для экспериментального изучения данного явления создана лабораторная установка, создающая пульсацию среды по косинусоидальному закону. 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 косинусоидальном изменении расхода среды.

Предложено применение установленных закономерностей для интенсификации тепло и массопереноса в некоторых производственных технологиях.

Список литературы

1. Пилипенко Р.А. Интенсификация тепловой работы камерных печей, отапливаемых природным газом / *Металлургическая теплотехника (Сб. науч. трудов НМетАУ)*. - Днепропетровск: НМетАУ, 2002. - Т.8. - С.99-105.
2. Губинский В.И. Нагревательные печи металлургии - сегодня и завтра // *Теория и практика металлургии*. - 2004. - № 6. - С.56-60.
3. Новые схемы импульсного отопления нагревательных и термических печей / М.П. Ревун, А.И. Барищенко, А.И. Чепрасов и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005.– №3.– с. 97-100.
4. Раков Э.Г. Нанотрубки и фуллерены: Учебн. Пособие. – М.: Университетская книга, Логос, 2006.– 376 с.
5. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи.– М.: Энергия, 1973.– 265с.
6. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, Глав. ред. физ. –мат. лит-ры, 1981. – 448 с.