

УДК 662.9

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПЕЧАХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ И БЕЗИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМАХ ПОДАЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Гниги́ев П.А.

Донецкий национальный технический университет, ул. Артема, 58а, Донецк, 83003, Украина

В результаті проведення експериментальних досліджень на фізичній моделі, геометрично подібній типової камерної печі з викатним подом, досліджено конвективний теплообмін при імпульсному та безімпульсному режимах подачі теплоносія. Отримано критеріальні рівняння для обтікання тіл кубічної форми та обґрунтовано факт посилення коефіцієнту конвективної тепловіддачі на 10...15 % при переході на імпульсний режим подачі теплоносія.

В результате проведения экспериментальных исследований на физической модели, подобной типовой камерной печи с выкатным подом, исследован конвективный теплообмен при импульсном и безимпульсном режимах подачи теплоносителя. Получены критеріальні уравнения для обтекания тел кубической формы и обоснован факт усиления коэффициента конвективной теплоотдачи на 10...15 % при переходе на импульсный режим подачи теплоносителя.

As result of experimental studies on the physical model, which is geometrically similar to typical chamber furnace with rolled out hearth, was study of convective heat transfer in a pulsed and unpulsed coolant supply mode. Appropriate criteria equations are obtained for cross flow of cubic bodies and 10...15 % intensification of convective heat transfer coefficient is grounded in case of heat transfer agent supply change from unpulsed to pulsed mode.

Библ. 8, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: воздушное охлаждение, камерная печь, интенсификация конвективного теплообмена, импульсная подача теплоносителя.

a – коэффициент турбулентности потока;
 b – степень при критерии Re;
 c – степень при критерии Sh;
 D – диаметр струи в точке измерения, м;
 d – характерный размер обдуваемых тел, м;
 h – множитель импульсного критеріального уравнения;
 m – исходная масса обдуваемых тел, кг;
 n – количество кубиков, шт.;
 p – количество участвующих граней в теплообмене, шт.;
 q – удельный тепловой поток, Вт/м²;
 $q_{\text{плав}}$ – удельная теплота плавления льда, кДж/кг;
 r – радиус сопла, м;
 S – расстояние от сопла до кубика, м;
 Δt – разница температур тел и воздуха, °С;
 u – комплексный множитель для импульсного критеріального уравнения;
 ur – объем воды в мензурке, м³;
 V – средний секундный расход воздуха через сопло, м³/с;
 w – скорость потока воздуха, м/с;
 X – коэффициент, учитывающий переход формы от куба к шару;

x – комплексный множитель для безимпульсного критеріального уравнения;
 y – расстояние от оси до точки измерения скорости, м;
 z – множитель безимпульсного критеріального уравнения;
 Nu – критерий подобия Нуссельта;
 Pr – критерий подобия Прандтля;
 Re – критерий подобия Рейнольдса;
 Sh – критерий подобия Струхала;
 α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);
 ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с;
 ρ – плотность, кг/м³;
 τ – количество секунд между которыми происходит сравнение стока, с;
 φ – частота пульсаций потока, Гц.
Верхние и нижние индексы:
 исх – исходная;
 л – лед;
 в – вода;
 0 – относится к характерным размерам сопла;

p – относится к пятну струи;
 $ср$ – средний;
 $луч$ – лучистый;
 i – указатель момента времени с шагом 50 секунд.

Анализ публикаций по теме исследования

В настоящее время существует большое количество технологических процессов, связанных с конвективным теплообменом. Эффективность большей части таких процессов зависит от качественного проведения операций нагрева/охлаждения изделия, в особенности в низкотемпературном диапазоне [1]. Одной из проблем, связанных с расчетом конвективного теплообмена, является отсутствие данных о закономерностях его протекания в конкретных агрегатах [2]. Практически отсутствуют общепринятые методики для теплового расчета многих технологий, в основе которых лежит протекание конвективного теплообмена. Так, например, в литературе диапазон возможного изменения значения коэффициента конвективной теплоотдачи при воздушном обдуве заготовок в металлургический печах определяется как $10...30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, при этом выбор конкретных значений на практике производится на основании опыта исследователя [3].

Из литературы известен ряд критериальных уравнений, описывающих конвективный теплообмен в идеализированных условиях. Например, для определения усредненных по поверхности цилиндра значений коэффициента конвективной теплоотдачи для случая поперечного обтекания используются следующие критериальные уравнения [4]:

$$\text{при } Re < 1000 \quad Nu = 0,56 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,36} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25};$$

$$\text{при } Re \geq 1000 \quad Nu = 0,28 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr_{ж}^{0,36} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Стоит отметить, что в реальных агрегатах гидродинамическая картина, как правило, существенно отличается от идеализированных схем. Поэтому в идеальном случае каждой технологической ситуации должно быть сопоставлено свое критериальное уравнение. В данной работе исследование сосредоточено на воздушном обдуве тел кубической формы.

В практическом аспекте возникают проблемы при интенсификации конвективного тепло-

обмена в различных технологических процессах. Например, операция воздушного охлаждения изделий при отжиге стальных листов в колпаковых печах длится $60...90$ часов [5] и на практике имеется необходимость поиска путей ускорения этого процесса. Такого эффекта можно достичь различными способами, один из которых заключается в создании низкочастотного пульсирующего потока охлаждающей среды. Однако в настоящее время способы интенсификации конвективного теплообмена нуждаются в дополнительной теоретической, экспериментальной и технической проработке.

Постановка задачи исследования

Цель данной работы – исследование процесса конвективного теплообмена в печах камерного типа для случаев импульсного и безимпульсного обдува тел кубической формы, а также установление соответствующих критериальных зависимостей.

Изложение основных материалов исследования и результатов

Для проведения экспериментальных исследований процессов конвективного теплообмена создана лабораторная модель камерной печи с двадцатью соплами для истечения воздуха. Модель геометрически подобна камерной печи с выкатным подом, в которой могут реализовываться операции термической обработки изделий: нагрева, выдержки и воздушного охлаждения заготовок. Исследуемые тела представляют собой ледяные кубики с размерами граней 17 мм . Выбор материала исследуемых тел обусловлен отсутствием необходимости измерения температуры поверхностей обрабатываемых тел, поскольку при таком подходе их температура является постоянной (порядка $0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Для определения темпа плавления льда под печи выполнен двухуровневым. Первый, верхний уровень, является решетчатым и на нем располагаются заготовки, а второй уровень имеет двойной уклон и предназначен для сбора жид-

кости, образованной в результате оплавления тел. Корпус печи выполнен из теплоизоляционного материала, чтобы минимизировать теплообмен с окружающей средой через стенки. Фотография рабочей камеры установки приведена на рисунке 1.

Данная модель подключена к сети с нагнетателем типа ПН-125-65. По ходу канала расположено устройство для измерения расхода типа РГ-40. Лабораторная модель печи имеет два воздушных коллектора диаметром 45 мм, проложенных вдоль стен, и содержит двадцать сопел диаметром по 5 мм для истечения воздуха. Для удаления воздуха из модели предусмотрено отверстие в своде. В установку загружаются тела и располагаются напротив сопел на специальной решетке.

Для исследования пульсирующего режима подачи охлаждающего воздуха рассмотренная установка оснащена устройством для создания низкочастотных пульсаций в подводящем трубопроводе, представляющим собой заслонку, создающую 87% перекрытие сечения канала при повороте на 90°. Заслонка, в свою очередь, размещена на валу, вращаемом электродвигателем с помощью ременной передачи; при этом имеется возможность изменения частоты вращения. Движение заслонки происходит по гармоническому синусоидальному закону. Заявленный процент перекрытия сечения канала полу-

чен исходя из практических соображений: при внутреннем диаметре разводящего трубопровода 45 мм отступ заслонки по периметру канала выбран на уровне 1,5 мм для исключения заклинивания заслонки и снижения уровня перегрузки нагнетателя за счет отсутствия полного перекрытия канала. Устройство для создания пульсаций способно генерировать частоты в диапазоне от 0,1 до 1,7 Гц. В данной работе была выбрана частота 1,15 Гц. Фотография устройства приведена на рис. 1.

Проведение экспериментов в импульсном и безимпульсном режимах полностью аналогично. При проведении обоих экспериментов средний секундный расход среды составлял 0,012 м³/с. Объем воды фиксировался каждые 15 секунд, общее время проведения эксперимента составило 14 минут.

Изменение во времени объемов стекающей жидкости, образующихся при плавлении кубиков льда, для безимпульсного и импульсного режимов приведено на рис. 2. Из рисунка видно, что на первых минутах темп стока идентичен в двух режимах, но с течением времени импульсный вариант показывает прирост объема и к окончанию экспериментов разница достигает порядка 7 %.

Поскольку в течении исследования форма обдуваемых тел постепенно отклонялась от кубической за счет сглаживания граней, в работе вве-

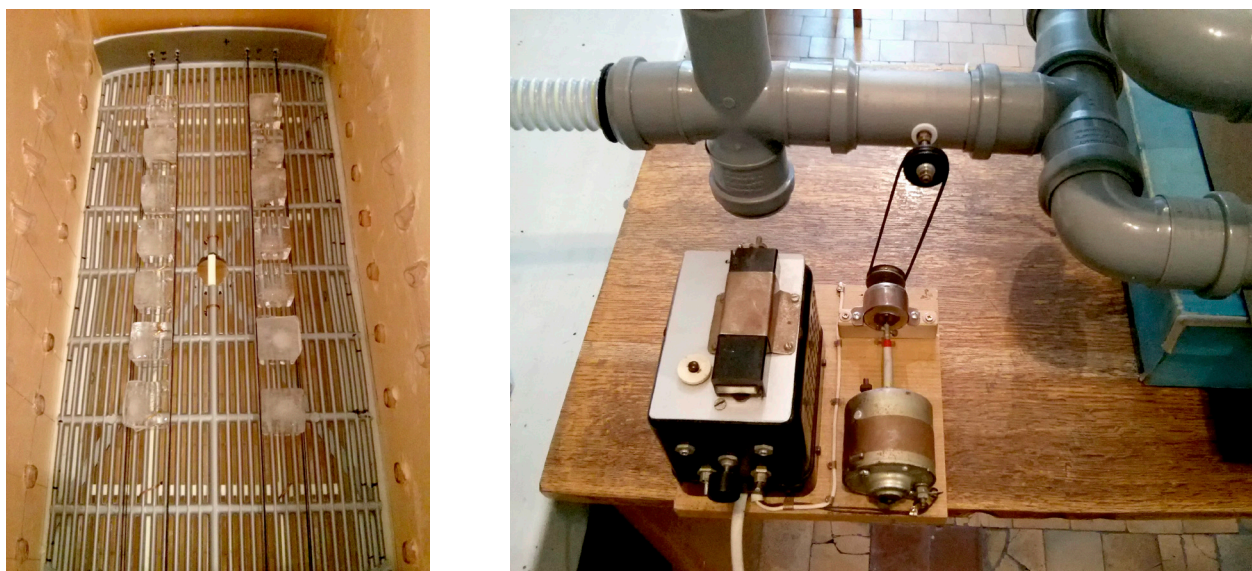


Рис. 1. Фотография рабочей камеры модели печи и устройства для создания пульсаций.

Частоты 0 и 1,15 Гц

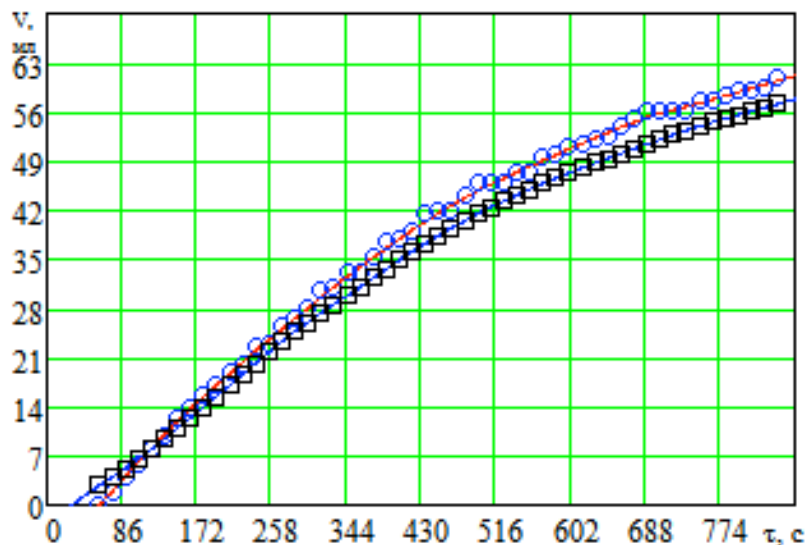


Рис. 2. Темпы стока воды в безимпульсном и в импульсном экспериментах,
 ○ – экспериментальные значения при импульсной подаче воздуха, мл;
 □ – экспериментальные значения в безимпульсном эксперименте, мл.

дено понятие коэффициента, учитывающего переход формы от куба к шару X . При этом $X = 1$ соответствует кубической форме, а $X = 0$ – шарообразной. Для исследованного промежутка времени в обоих экспериментах задано линейное изменение коэффициента X от 1 до 1/15 во времени.

Темп стока воды позволит определить изменение размера тел во времени. Для тела чисто кубической формы:

$$d_i^{куб} = 3 \sqrt{\frac{m_{исх} - ur_i \cdot \rho_B}{n \cdot \rho_L}} \quad (1)$$

Для тела шарообразной формы:

$$d_i^{шар} = 3 \sqrt{\frac{6 \cdot m_{исх} - ur_i \cdot \rho_B}{\pi \cdot n \cdot \rho_L}} \quad (2)$$

Тогда расчетное значение размера тел для произвольного момента времени определяется как:

$$d_i = X \cdot d_i^{куб} + (1 - X) \cdot d_i^{шар}.$$

Имея данные об изменении диаметров тел во времени можно рассчитать тепловой поток, подводимый к поверхности тел по формуле следующего вида:

$$q = [(ur_i - ur_k) \cdot \rho_B \cdot q_{плас} / \{ n \cdot \tau \cdot \left[X \cdot p \cdot \left[\frac{d_i^{куб^2} - d_k^{куб^2}}{\ln[d_i^{куб^2} / d_k^{куб^2}]} \right] \right] + (1 - X) \cdot \left(\pi \cdot \left[\frac{d_i^{шар^2} - d_k^{шар^2}}{\ln[d_i^{шар^2} / d_k^{шар^2}]} \right] \right) \}] - q_L \cdot \Delta t.$$

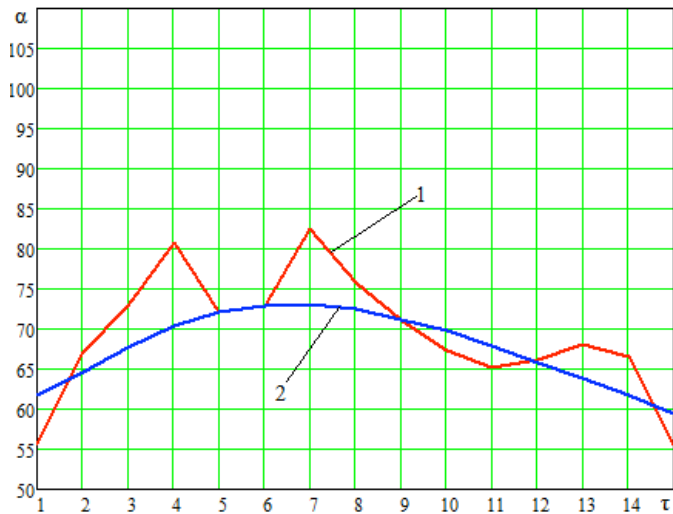
Полученный тепловой поток позволяет рассчитать коэффициент конвективной теплоотдачи для конкретных условий по формуле:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta t}.$$

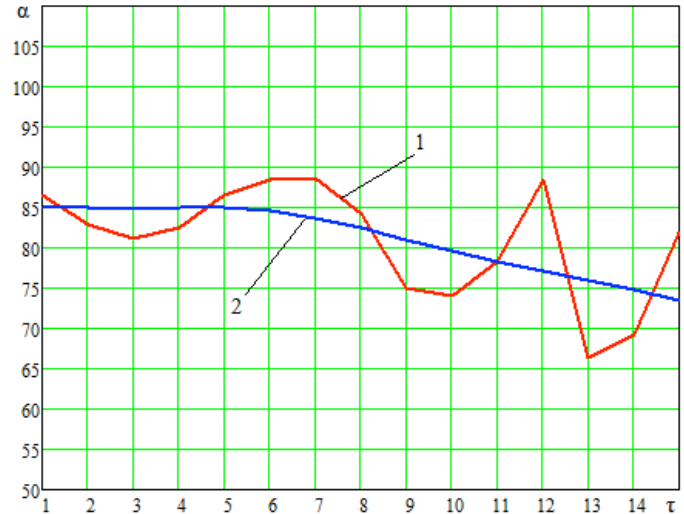
Ниже, на рис. 3, представлены два графика изменения среднего коэффициента конвективной теплоотдачи для двух случаев: безимпульсный, импульсный с частотой 1,15 Гц в зависимости от времени. Для дальнейшей обработки данных выделены 15 временных узлов через каждые 50 секунд.

Стоит отметить, что для последующего использования полученные кривые были регуляризованы [6].

Среднюю скорость среды у поверхности обдуваемых тел предложено определять как среднее арифметическое от значений скорости в четырех характерных точках, взятых на вертикаль-



безимпульсный вариант



импульсный вариант

Рис. 3. Изменение коэффициента конвективной теплоотдачи во времени для двух экспериментов, где 1 – ломаная, соединяющая вычисленные на основе экспериментальных исследований значения коэффициентов конвективной теплоотдачи; 2 – регуляризованная кривая.

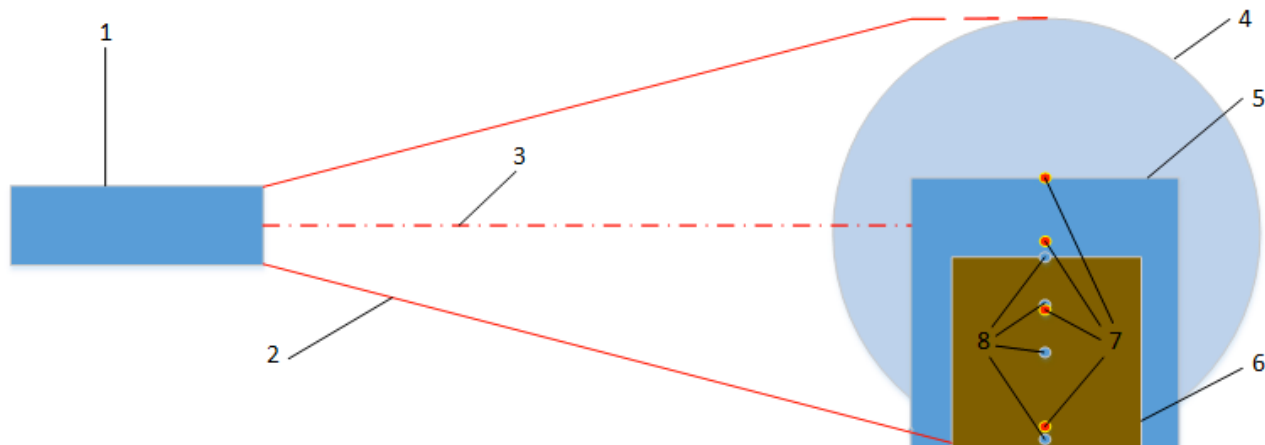


Рис. 4. Графическое представление схемы для определения средней скорости обтекания, где 1 – сопло; 2 – линии, показывающие границы струи; 3 – ось струи; 4 – пятно на границе контакта струи и кубика, развернутое на 90°; 5 – кубик в начальный момент времени; 6 – кубик в конце эксперимента; 7 – точки измерения в начальный момент времени; 8 – точки измерения в конечный момент времени.

ном отрезке, проходящем через ось торцевой со стороны обдува грани (1 – точка с координатой, равной высоте куба; 2 – 3/4 высоты; 3 – 1/2 высоты, 4 – точка пересечения нижней образующей струи с торцевой гранью тела). Графическая интерпретация этого подхода представлена на рис. 4.

При определении w_{cp} учтено изменение диаметра изделия при вычислении величины S .

Как видно на рисунке, струя с некоторой скоростью истечения раскрывается и покрывает кубик, находящийся на удалении 33 мм от сопла. Для определения скорости на оси струи, в точке, удаленной от сопла на расстояние S

используется формула [7]:

$$w_{ось} = \left(\frac{V_{cp}}{\pi \cdot D_0^2} \right) / 4 \cdot \frac{0,96}{(a \cdot S) / r_0 + 0,29} \quad (3)$$

Следующим шагом является определение скоростей на различном удалении от оси истечения в пределах пятна контакта струи и передней грани кубика. Для этого используется зависимость [7]:

$$w_r = \left[1 - (y/D_{II})^{3/2} \right]^2 \cdot w_{ось}$$

Диаметр пятна струи вычисляется по формуле:

$$D_{II} = (0,517 \cdot S/D_0 + 1) \cdot D_0$$

Полученные изменения коэффициентов конвективной теплоотдачи и средней скорости обтекания тел позволяют перейти к вычислению критериев подобия, таких как критерии Рейнольдса, Нуссельта для случая безимпульсной подачи среды и критерия Струхала для случая импульсной подачи среды по следующим формулам:

$$Re_i = \frac{w_{cp} \cdot d_i}{\nu}; \quad Nu_i = \frac{\alpha \cdot d_i}{\lambda_B}; \quad Sh_i = \frac{\varphi \cdot d_i}{w_{cp}} \quad (4)$$

На основании полученных расчетных данных для безимпульсного режима составлена

Табл. 1. Экспериментально полученные значения характерных физических величин для безимпульсного режима обдува

Интервалы времени	Средняя скорость среды около поверхности тела, м/с	Значение коэффициентов теплоотдачи Вт/(м ² ·К)	Диаметр тел, м	Значения характерных критериев		
				Re	Pr _{ст}	Nu
1	11,59	61,52	0,017	13055	0,703	36,36
3	11,46	67,37	0,016	12197		44,79
5	11,18	71,60	0,015	11081		41,23
7	10,69	72,43	0,014	9854		43,81
9	9,82	70,46	0,013	8361		34,87
11	8,94	67,06	0,012	7058		29,48
13	8,06	62,88	0,011	5867		28,39
15	7,19	58,48	0,01	4795		21,22

таблица 1, в которую вошли значения основных параметров процесса и критерии подобия, взятые через каждые 100 секунд.

Для безимпульсного эксперимента в качестве формы определяемого критериального уравнения принят стандартный для вынужденной конвекции шаблон:

$$Nu = f(Re, Pr) = z \cdot Re^b \cdot Pr^{0,36} \cdot (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}, \quad (5)$$

где искомыми величинами являются множитель z и показатель степени b . Так как множитель $z \cdot Pr^{0,36} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}$ является постоянным в течение всего эксперимента, то для нахождения искомого величин он обозначается через x , после чего производится логарифмирование левой и правой части выражения (5) с последующим представлением зависимости $\ln(Nu) = f \ln(Re)$ в декартовой системе координат. Решение будет получено при помощи аппроксимирования полученной кривой при помощи прямой линии. Искомые значения b и $\ln(x)$ будут найдены как параметры этой прямой (множитель перед аргументом и свободный член) проведенной через массив экспериментальных точек при помощи метода наименьших квадратов (рис. 5). Значения этих коэффициентов составляют 0,65 и -2,339 соответственно. Из полученного значения комплекса x можно найти величину множителя z , которая составляет 0,109.

В конечном итоге получаем критериальное уравнение, описывающее конвективный теп-

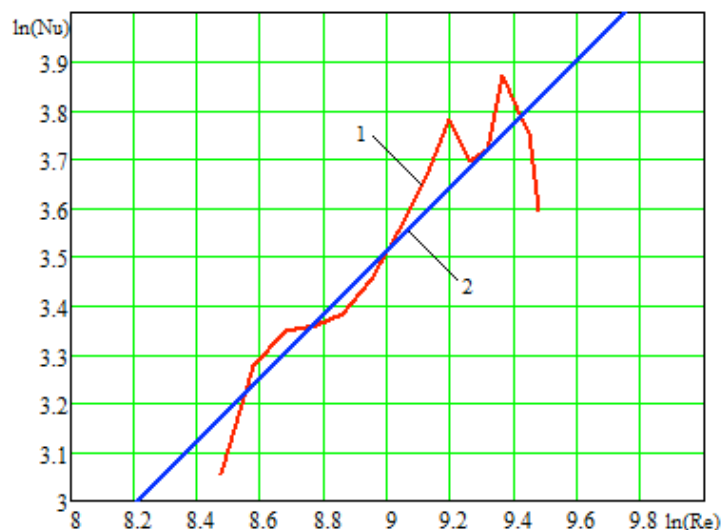


Рис. 5. Решение в логарифмических координатах, 1 – кривая экспериментальных значений логарифмов Nu , Re ; 2 – аппроксимирующая прямая.

лообмен для случая безимпульсного обдува кубических тел:

$$Nu = 0,11 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,36} \cdot (Pr_{жк}/Pr_c)^{0,25}.$$

Для качественной оценки аппроксимации воспользуемся формулами для нахождения коэффициентов детерминации R^2 и корреляции r [6]. Указанные показатели составили 0,79 и 0,89 соответственно. Согласно шкале Чеддока [8], нахождение r в интервале $0,7 < r < 0,9$ свидетельствует

о высокой качественной характеристике силы связи между полученными значениями при аппроксимации и данными, полученными в ходе проведения эксперимента и о том, что данную выборку значений справедливо обрабатывать линейной функцией.

Для получения критериального уравнения при импульсной подаче теплоносителя в качестве формы определяемого уравнения принят следующий шаблон, содержащий дополнительный критерий Струхала:

$$Nu = h \cdot Re^b \cdot Pr^{0,36} \cdot (Pr_{жк}/Pr_c)^{0,25} \cdot Sh^c, \quad (6)$$

который содержит уже три неизвестных величины. К аналогичным неизвестным безимпульсного режима добавлена степень при критерии Струхала.

Аналогично безимпульсному варианту обработки данных на основании полученных расчетных данных для импульсного режима составлена таблица 2, в которую вошли значения через каждые 100 секунд.

В результате логарифмирования выражения (6) получаем:

$$\ln(Nu) = b \cdot \ln(Re) + c \cdot \ln(Sh) + u,$$

где u – комплексный множитель, включающий в себя $h \cdot Pr^{0,36} \cdot (Pr_{жк}/Pr_c)^{0,25}$.

В результате регрессионного анализа получены три искомые величины: u , b , c , которые составляют -0,438; 0,62; 0,226 соответственно. От-

Табл. 2. Экспериментально полученные значения характерных физических величин для импульсного режима обдува

Интервалы времени	Средняя скорость	Значение коэффициентов теплоотдачи Вт/(м ² ·К)	Диаметр тел, м	Значения характерных критериев		
				Re	Nu	Sh
1	12,2	84,99	0,017	13801	56,91	0,0016
3	12,03	84,89	0,016	12659	49,67	0,0015
5	11,67	84,94	0,015	11385	49,12	0,0014
7	10,91	83,75	0,014	9749	46,03	0,0014
9	9,81	81,02	0,014	7995	35,53	0,0014
11	8,74	78,31	0,013	6511	33,91	0,0015
13	7,62	75,98	0,012	5108	25,86	0,0015
15	6,67	73,51	0,011	4048	28,89	0,0016

сюда легко найти величину множителя h , которая равна 0,733.

Аналогично воспользуемся формулами для нахождения коэффициентов детерминации R^2 и корреляции r [6], которые составили 0,94 и 0,97 соответственно. Согласно шкале Чеддока [8], это свидетельствует о высокой качественной характеристике силы связи между полученными значениями при регрессионном анализе и данными, полученными в ходе проведения эксперимента и о том, что данную выборку значений также справедливо обрабатывать линейной функцией.

В таком случае уравнение, описывающее конвективный теплообмен с учетом импульсной подачи теплоносителя для тел кубической формы имеет следующий вид:

$$Nu = 0,73 \cdot Re^{0,62} \cdot Pr^{0,36} \cdot (Pr_{ж}/Pr_{с})^{0,25} \cdot Sh^{0,23}.$$

Сравнивая коэффициенты теплоотдачи в случае импульсной подачи теплоносителя с безимпульсной можно сделать вывод об увеличении оно на 10...15 % во всем диапазоне времени. Такой эффект усиления достигается за счет срывания воздушного слоя у поверхности кубиков. При стационарном процессе обдува этот слой несколько занижает теплообмен между средой и телом.

Полученные уравнения дают возможность выполнения более точного расчета процессов воздушного обдува, низкотемпературного нагрева, контроля и управления названными процессами, как традиционными, так и при импульсной подачи теплоносителя.

Выводы

Для экспериментальных исследований конвективного теплообмена в условиях безимпульсной и импульсной подачи теплоносителя создана лабораторная модель камерной печи. В результате проведения экспериментов были получены соответствующие массивы данных, которые позволили составить критериальные уравнения, описывающие тепловые процессы при обтекании тел кубической формы. Сравнивая динамику стока жидкости в импульсном и безимпульсном режимах, можно заключить, что переход на импульсную пода-

чу теплоносителя позволяет усилить коэффициент конвективной теплоотдачи на 10...15 %. Полученные уравнения обладают весьма высокой силой связи с экспериментальными данными, что создает перспективу точного определения коэффициентов теплоотдачи от изделий к охлаждающему воздуху и, соответственно, возможность выдачи рекомендаций по количеству требуемого воздуха и расположению дутьевых устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губинский В.И. *Металлургические печи: учебн. пособие* / В.И. Губинский. – Днепропетровск: НМетАУ. – 2006. – 85 с.
2. Бирюков А.Б. *Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах: Монография* / А.Б. Бирюков. – Донецк: Ноулидж. – 2012. – 248 с.
3. Гусовский В.Л. *Методики расчета нагревательных и термических печей: учебно-справочное пособие.* / В.Л. Гусовский, А.Е. Лифшиц. – М.: Теплотехник. – 2004. – 400 с.
4. Михеев М.А. *Основы теплопередачи* / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия. – 1973. – 265 с.
5. Пат. 2132884 RU, МПК C21D9/663. *Устройство для охлаждения металла в одностопной колпаковой печи* / Алиев Эльдар Валяд Оглы; Антипенко А.И.; Беленький А.М. и др.; Акционерное общество "Магнитогорский металлургический комбинат"; Московский государственный институт стали и сплавов. – № 97114770/02; заявл. 02.09.1997; опубл. 10.07.1999.
6. Ткаченко В.Н. *Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов: серия задачи и методы: математика, механика, кибернетика.* – К.: Наукова думка. – 2008. – 244 с.
7. Абрамович Г.Н. *Теория турбулентных струй: репринтное воспроизведение издания 1960 г.* / Г.Н. Абрамович. – М.: ЭКОЛИТ. – 2011. – 720 с.
8. Chaddock, R.E. *Principles and methods of statistics.* Boston: Houghton Mifflin Company. – 1925.

THE CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN FURNACES UPON PULSED AND UNPULSED COOLANT SUPPLY

Gnitiev P.A.

Donetsk National Technical University, ul. Artema, 58a, Donetsk, 83003, Ukraine

As result of experimental studies on the physical model, which is geometrically similar to typical chamber furnace with rolled out hearth, was study of convective heat transfer in a pulsed and unpulsed coolant supply mode. Appropriate criteria equations are obtained for cross flow of cubic bodies and 10...15 % intensification of convective heat transfer coefficient is grounded in case of heat transfer agent supply change from unpulsed to pulsed mode.

Ref. 8, fig. 5, tabl. 2.

Key words: air cooling, chamber furnace, intensification of convective heat transfer, pulsed coolant supply.

1. *Gubinskij V.I.* Metallurgicheskie pechi: Uchebn. posobie / V.I. Gubinskij. – Dnepropetrovsk: NMetAU. – 2006. – 85 s.

2. *Biryukov A.B.* Energoeffektivnost i kachestvo teplovoj obrabotki materialov v pechax: monografiya / A.B. Biryukov. – Doneck: Noulidzh. – 2012. – 248 s.

3. *Gusovskij V.L.* Metodiki rascheta nagrevatelnyx i termicheskix pechej: uchebno-spravochnoe posobie. / V.I. Gusovskij, A.E. Lifshic. – M.: Teplotexnik. – 2004. – 400 s.

4. *Mixeev M.A.* Osnovy teploperedachi / M.A. Mixeev, I.M. Mixeeva. – M.: Energiya. – 1973. – 265 s.

5. *Pat. 2132884 RU*, MPK c21d9/663. Ustrojstvo dlya oxlazhdeniya metalla v odnostopnoj kolpakovoj pechi / Aliev Eldar Valjad Ogly; Antipenko A.I.; Belenkij A.M. i dr.; Akcionernoe obshchestvo "Magnitogorskij metallurgicheskij kombinat"; Moskovskij gosudarstvennyj institut stali i splavov. – № 97114770/02; zayavl. 02.09.1997; opubl. 10.07.1999.

6. *Tkachenko V.N.* Matematicheskoe modelirovanie, identifikaciya i upravlenie texnologicheskimi processami teplovoj obrabotki materialov: seriya zadachi i metody: matematika, mexanika, kibernetika. – K.: Naukova Dumka. – 2008. – 244 s.

7. *Abramovich G.N.* Teoriya turbulentnyx struj: reprintnoe vosproizvedenie izdaniya 1960 g. / G.N. Abramovich. – M.: Ekolit. – 2011. – 720 s.

8. *Chaddock, R.E.* Principles and methods of statistics. Boston: Houghton Mifflin Company. – 1925.

Получено 19.01.2015

Received 19.01.2015