

УДК 62-932.4

И.В. Скоробогатова (аспирант),
А.Б. Бирюков (докт. техн. наук, проф.), Б.В. Гавриленко (канд. техн. наук, доц.),
С.В. Неежмаков (канд. техн. наук, доц.), П.А. Гнитиев (аспирант)
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
кафедра горной электротехники и автоматики, кафедра технической теплофизики
E-mail: kitagea@rambler.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ В КАМЕРНОЙ ПЕЧИ

Обоснована необходимость проведения экспериментальных исследований по установлению влияния параметров пульсации расхода теплоносителя на значение коэффициента конвективной теплоотдачи. Для решения этой задачи разработана лабораторная экспериментальная установка для проведения исследований. В результате исследований частот пульсации расхода теплоносителя установлено повышение коэффициента конвективной теплоотдачи и сокращение времени нагрева заготовок. Показано усиление коэффициента конвективной теплоотдачи на величину до 45 %. Частота, при которой был получен технологический эффект усиления конвективной составляющей зафиксирована на уровне 54-100 об/мин, что соответствует 0,9-1,7 Гц.

Ключевые слова: экспериментальная установка, камерная печь, заготовки, эксперимент, пульсирующий режим.

Актуальность

Анализ структуры себестоимости конечного продукта металлургических и машиностроительных предприятий показывает, что второе место по расходу природного газа занимают нагревательные печи. Большинство существующих промышленных систем не в полной мере используют свои потенциальные производственные возможности, что не позволяет повысить показатели качества выпускаемой продукции.

В настоящее время имеется два способа подачи теплоносителя в печь: пульсирующий и традиционный [5]. Традиционный способ предполагает непрерывную подачу теплоносителя в печь. В условиях традиционной технологии нагрева материала в камерной печи с непрерывной подачей топлива эффективность использования природного газа остается низкой и, вместе с тем, незначительные усовершенствования в области управления работой камерной печи позволяют повысить величину КПД [4]. Согласно теоретическим исследованиям, пульсирующий способ позволяет увеличить производительность печи, повысить равномерность прогрева массивной садки и снизить расход топлива до 15% [11]. Кроме того, для энергосберегающего управления характерно плавное протекание тепловых процессов, это способствует повышению долговечности и безопасности эксплуатации оборудования.

Внедрение принципиально новой технологии нагрева заготовок в камерной печи требует поддержания заданной температурной карты тепловой обработки для выбранного сортамента стали. Вместе с тем, отклонение фактической температуры нагрева заготовок от заданного значения существенно влияет на качество выпускаемого продукта. И, как следствие, возникает необходимость разработки системы автоматики под новый энергосберегающий режим [9].

В настоящее время в литературных источниках отсутствует достаточно полное описание математической модели САУ энергосберегающими режимами в камерной печи.

Имеющихся сведений о настройке режимных параметров при управлении тепловой работой печи с использованием пульсирующего способа отопления недостаточно. Таким образом, не имея сведений о параметрах для выбора наилучших технологических режимов нельзя построить адекватную систему управления [10].

Кроме того, одним из главных сдерживающих факторов широкого внедрения оптимального энергосберегающего управления нагревом в камерной печи является отсутствие алгоритмов синтеза в реальном масштабе времени управляющих энергосберегающих воздействий, которые учитывают частую смену исходных данных и могут быть реализованы микропроцессорными устройствами.

Постановка задачи исследования

Для получения параметров процесса нагрева металла (измерение теплового потока, температуры факела и кладки), характеризующих надежный режим работы камерной печи необходимо проведение научных исследований на действующих высокотемпературных установках. Однако построение точной математической модели процесса в строгой адаптации модели на действующем агрегате не исключает проведение экспериментальных исследований. Следовательно, возникает проблема, связанная с проведением экспериментов на физических моделях [8].

В последнее время возрос интерес к изучению влияния колебаний потока на теплообмен при возникновении резонансных частот и амплитуд. В зависимости от частоты акустического воздействия могут быть реализованы два эффекта: интенсификация турбулентного смешения в струе при низкочастотном акустическом воздействии и ослабление турбулентного смешения при высокочастотном акустическом возбуждении, частота которого на порядок превышает частоту низкочастотного облучения. В ряде случаев для интенсификации смешения в струях применяются высокоамплитудные периодические пульсации с помощью различного рода пульсаторов, расположенных перед соплом, или колеблющихся крылышек, расположенных за плоским соплом [2]. Применение искусственной турбулизации потока газа является наиболее эффективным способом интенсификации теплообмена в рабочем пространстве печи. Таким образом, интенсификация теплообмена является эффективным путем рационального использования теплоносителя. Доказано, что при резонансных колебаниях энергоносителя коэффициент теплоотдачи увеличивается в 2-3 раза по сравнению со стационарным течением, как в ламинарном, так и в турбулентном режимах течения [3].

Решение задачи и результаты исследования

Новая технология направлена на качественный нагрев металла и снижение расхода газа. Основным преимуществом рассматриваемого режима является повышение турбулентности каналов сгорания и управление пламенем. Система управления в пульсирующем режиме должна обеспечить отсутствие проскока и отрыва пламени. Пульсирующий режим можно реализовать в виде синусоидального закона, то есть при работе групп горелок в противофазе и определенного соотношения между временем включения и выключения горелок, однако полностью выключать горелки не эффективно. Таким образом, изменение температуры дымовых газов td будет происходить также по синусоидальному закону [1]:

$$Td(\tau) = Tdsr + \Delta Td \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \tau\right),$$

где $Tdsr$ – средняя температура продуктов сгорания, °С; ΔTd – амплитуда колебания температуры, °С; T – период колебания температуры дымовых газов, с.

Определение рационального времени переключения горелок τ_p позволит получить технологический эффект от сжигания газа в пульсирующем режиме. Для решения этой

задачи авторами разработана лабораторная экспериментальная установка для проведения исследований пульсирующего режима (рис.1-7) [7].

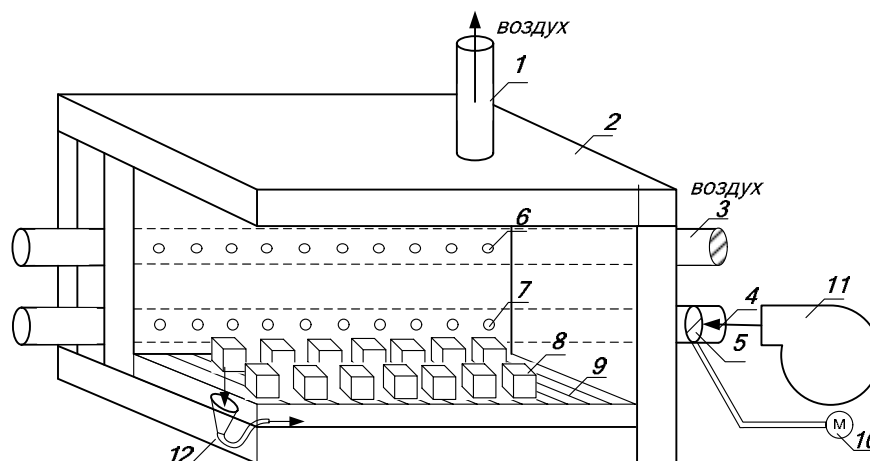


Рисунок 1 – Структурная схема лабораторной экспериментальной модели

При исследовании пульсирующего режима использовалась поворотная заслонка 5, которая устанавливалась в воздухопровод 4 печи 2, в качестве теплоносителя использовался воздух, а в качестве нагреваемого твердого тела использовались заготовки льда 8 (рис.1, 2). В камере стенда печи 2 формировалась круглая струя теплоносителя путем нагнетания электропылесосом 11 воздуха с температурой окружающей среды для плавления заготовок льда 8. В подающий воздухопровод печи 4 устанавливали поворотную заслонку 5, путем вращения которой на поверхности теплообмена создавалось вихревое течение воздуха (рис.1, 5).

Движение заслонки осуществлялось через редукторную передачу при помощи двигателя постоянного тока 10 (рис.1, 4). Заготовки льда укладывались на решетку 9. Под воздействием воздуха, истекающим из группы горелок 7, лед плавился, и образовавшаяся вода стекала в воронку 12, установленную на поду печи 2. Отходящий воздух отводился через воздухоотводящую трубу 1, установленную в своде печи. Протекание технологического процесса в печи визуализировалось при помощи web-камеры (рис.6,7).

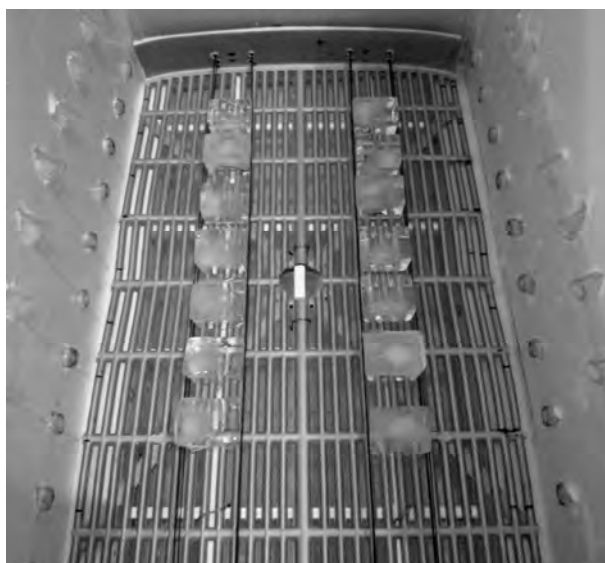


Рисунок 2 – Экспериментальная установка камерной печи (вид рабочего пространства)

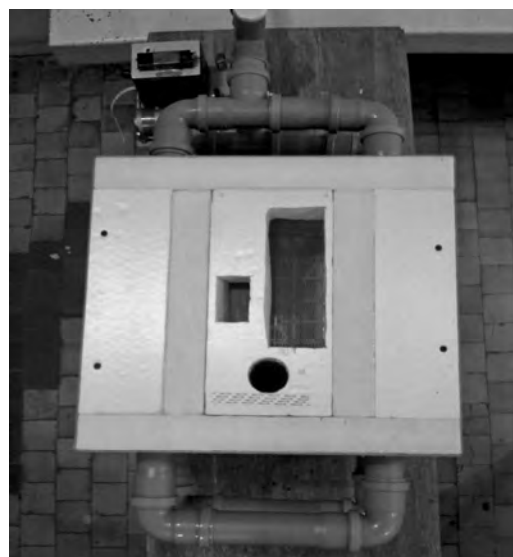


Рисунок 3 – Экспериментальная установка камерной печи (вид сверху)

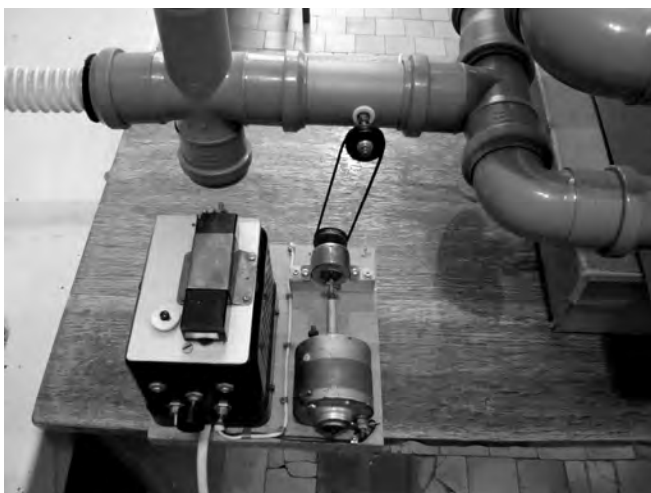


Рисунок 4 – Работа экспериментальной установки печи в пульсирующем режиме



Рисунок 5 – Установка поворотной заслонки

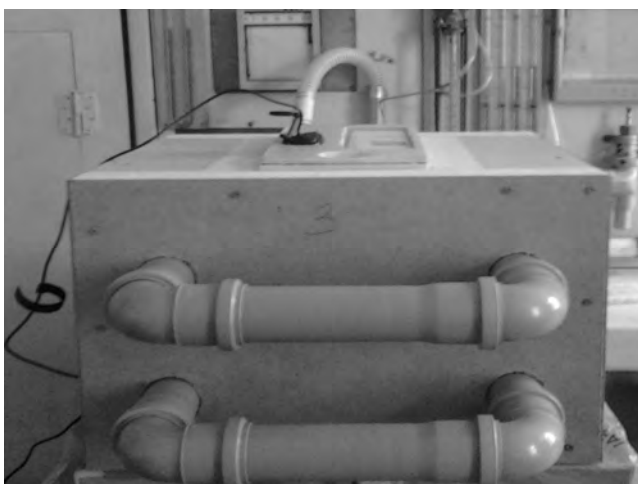


Рисунок 6 – Экспериментальная установка камерной печи (вид сбоку)



Рисунок 7 – Работа экспериментальной установки камерной печи с видеозаписью при помощи web-камеры

Первый эксперимент проводили при традиционном режиме подачи теплоносителя. Эксперименты при пульсирующей подаче теплоносителя проводились при таких же параметрах, но с установленной поворотной заслонкой 5 в подающий воздухопровод 4 [7].

В результате измерения и регистрации значений частоты вращения регулирующего органа, времени нагрева заготовок, температуры окружающей среды и расхода теплоносителя, косвенно определен коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{q \cdot \rho \cdot a \cdot m}{t_{os} \cdot n \cdot \tau},$$

где ρ – плотность льда, кг/м³;

a – усредненный линейный размер, м;

q – тепло, выделяемое при таянии льда, Дж/кг;

t_{os} – температура окружающей среды (воздуха), °С;

n – количество граней теплообмена;

τ – время плавления льда, с.

Результаты расчетов внесены в таблицу 1.

Таблица 1

Экспериментальное сравнение пульсирующего и традиционного режимов тепловой обработки заготовок в печи

№ п/п	Частота, Гц	Время, с	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	Температура, °С	ΔKt , %	$\Delta \tau$, %
1	0	978	52,55	18	0	0
2	0,7	800	59,59	19,5	12,8	18,2
3	1	790	61,63	19	17,3	19,2
4	1,13	780	62,42	19	18,8	20,2
5	1,23	775	64,52	18,5	22,8	20,8
6	1,4	750	64,91	19	23,5	23,3
7	1,67	720	69,45	18,5	32,2	26,4
8	1,75	714	76,21	17	45	27

Полученные данные (табл. 1) используются для оценки соответствия разработанной математической модели реальному тепловому процессу. Уменьшение времени нагрева в реальных условиях позволит сократить расход газо-воздушной смеси, а значит повысить эффективность использования дорогостоящего топлива (рис. 8). Увеличение коэффициента теплоотдачи с увеличением частоты свидетельствует об интенсификации конвективного теплообмена (рис. 9).

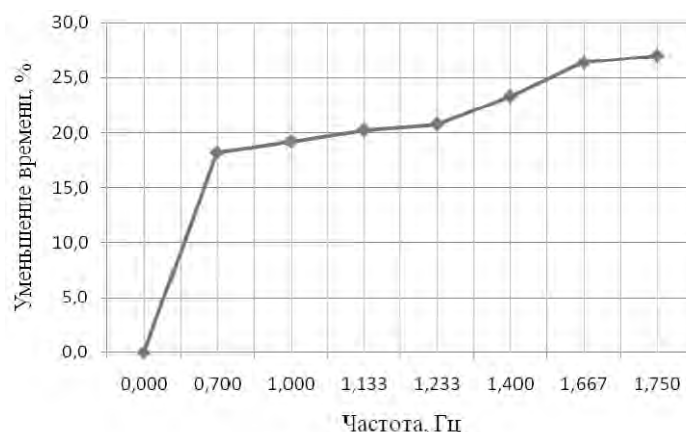


Рисунок 8 – Результаты экспериментальных исследований (уменьшение времени нагрева)

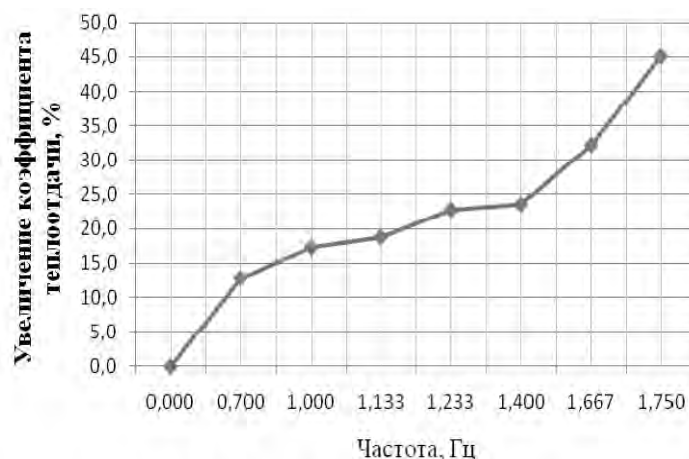


Рисунок 9 – Результаты экспериментальных исследований (увеличение коэффициента конвективной теплоотдачи)

Установленная закономерность усиления теплообмена в пульсирующем режиме, объясняется тем, что при волнообразном изменении теплоносителя происходит разрушение пограничного гидродинамического слоя, который формируется на значительной части периметра обтекаемых тел и определяет сопротивление теплопередаче.

Увеличение коэффициента использования топлива и сокращение расхода газа могут достигаться при снижении температуры продуктов сгорания и сохранении темпа нагрева [1, б]. При этом для сохранения скорости нагрева необходимо соблюдать условие: равенство итоговой плотности теплового потока для традиционного и пульсирующего режима [1]:

$$q = \alpha k_1 \cdot (td_1 - tm) + Cd(td_1) \cdot \left[\left(\frac{td_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{tm + 273}{100} \right)^4 \right] = \\ = \alpha k_2 \cdot (td_2 - tm) + Cd(td_2) \cdot \left[\left(\frac{td_2 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{tm + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где $\alpha k_1, \alpha k_2$ – значения коэффициентов конвективной теплоотдачи, Вт/м²*К;

td_1, td_2, tm – температура продуктов сгорания, температура поверхности металла, °С;

$Cd(td_1), Cd(td_2)$ – приведенный коэффициент излучения продуктов сгорания, Вт/м²*К.

Диапазон возможных на практике значений коэффициентов конвективной теплоотдачи: $\alpha k = 10-30$ Вт/м²*К. Повышение коэффициента до 20 Вт/м²*К и 30 Вт/м²*К позволяет сократить расход до 2,1% и 4,2% при тепловом потоке $q = 100$ кВт/м² и температуры поверхности металла $tm = 500$ °С.

Создание пульсирующего режима предполагает переключение горелочных устройств. Так как частота пульсаций f_p теплоносителя, при которой был получен технологический эффект, зафиксирована в экспериментах на уровне 54-100 об/мин или 0,9-1,7 Гц, то время переключения составит $\tau_p = 0,6-1$ с [1, 7]. Следовательно, для системы управления энергосберегающими режимами в камерной печи полученные значения позволят определить ограничения при формировании цели управления.

Выводы

Усиление конвективной составляющей теплообмена до 45%, зафиксированное в экспериментальных исследованиях, является достаточно существенным, однако в высокотемпературных печах указанный уровень усиления конвективного теплообмена приведет к незначительному усилению итогового теплообмена. Вместе с тем, за счет обеспечения равномерного температурного поля, цикл нагрева заготовок в пульсирующем режиме сокращается по сравнению с традиционным режимом сжигания газа.

Список использованной литературы

1. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах: Монография / А.Б. Бирюков. – Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 2012. – 248 с.
2. Гиневский А.С. Акустическое управление турбулентными струями // А.С. Гиневский, Е.В. Власов, Р.К. Карвасов – М.: Физматлит, 2001. – 237 с.
3. Жукаускас А.А. Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи 2/ А. А. Жукаускас, О.Г. Мартыненко – Вильнюс.: Мокслас, 1988. – с. 15 – 17
4. Скоробогатова И.В. Пути повышения эффективности использования топлива при решении задач автоматического управления / И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. Випуск 183(21)/ – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – 48-54 с.
5. Скоробогатова И.В. Технология энергосберегающего управления работой печи периодического действия с выкатным подом / Б. В. Гавриленко, А. Б.Бирюков, П.

- А.Гнитиев // IV міжнародна наукова конференція «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу» - Дніпропетровськ, 1-3 листопада, 2012 року, с.207-210
6. Скоробогатова И.В. Анализ эффективности управления термической обработкой металла в камерной печи / И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “ Обчислювальна техніка та автоматизація ”. Випуск 200 (22)/ – Донецьк: ДонНТУ. – 2012. – 35-40 с.
 7. Скоробогатова І. В. Спосіб інтенсифікації конвективного теплообміну/ Бірюков О. Б., Гавриленко Б. В., Гнітійов П. О. // патент України на корисну модель № 85127 від 11.11.2013 р.
 8. Скоробогатова И.В. Специфика управления нагревом материалов в камерных печах/ Б. В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // XIII Международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических объектов. Поиск молодых» - Донецк: ДонНТУ, 14-17 мая, 2013 г.
 9. Скоробогатова І.В. Аналіз проблем побудови системи автоматичного управління тепловою роботою камерної печі / І.В. Скоробогатова // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / ТДАТУ. –Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – Вип.13, т.5. – 140-144 с.
 10. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
 11. Evaluation of thermal characteristics of oscillating combustion // International Journal of Engineering, Science and Technology. Vol. 2, No. 2, 2010. – pp. 165-173.

References

1. Birukov, A.B. (2012), *Energy efficiency and quality of thermal processing of materials in furnaces* : Monograph, Donetsk : Noulidzh (Donetsk Branch).
2. Ginevsky, A.S., Vlasov, Ye.V. and Karavosov, R.K.(2001), *Acoustic control of turbulent jets*, Fizmatlit, Moscow
3. Zhukauskas A.A. and Martynenko O.G. (1988), *Heat transfer . Advances heat 2*, Vilnius . Mokslas , pp. 15 – 17.
4. Skorobogatova, I.V., Gavrylenko, B.V. and Neyezhmakov S.V. (2011), *Ways to increase fuel-use efficiency in the decision of automatic control problems*, Proc. of Donetsk National Technical University. Series: "Computers and Automation". Vol. 183 (21), pp.48-54.
5. Skorobogatova, I.V., Birukov, A.B., Gavrylenko, B.V. and Gniteev, P.A. (2012), *Energy-saving control technology of chamber furnace*, IV International Conference " Applied problems aerohidromehanyky and mass transfer ", Dnepropetrovsk, November 1-3 2012 , pp.207 - 210.
6. Skorobogatova, I.V. and Gavrylenko, B.V. (2012), *Control efficiency analysis of the thermal processing of metal of chamber furnace*, Scientific papers of of Donetsk National Technical University. Series: "Computers and Automation". Vol. 200 (22), pp.35-40.
7. Skorobogatova, I.V., Birukov, A.B., Gavrylenko, B.V. and Gniteev, P.A. (11.11.2013) *Method intensification of convective heat transfer* , Patent of Ukraine for useful model № 85127.
8. Skorobogatova, I.V., Gavrylenko, B.V. and Neyezhmakov, S.V. (2013), *Specificity control of the heating materials in chamber furnaces*, XIII International Scientific and Technical Conference "Automation of technological objects. Search young ", Donetsk : Donetsk National Technical University , 14-17 May 2013.
9. Skorobogatova, I.V. (2013), *The analysis of problems of automatic control system of heat work chamber furnace*, Proc. of Tauride Agrotechnological State University, Vol.5 , no.13, pp. 140-144.

10. Tkachenko, V.N. (2008), *Mathematical modeling, identification and control of technological processes of heat treatment of materials* : Monograph, Naukova Dumka, Kiev.
11. Evaluation of thermal characteristics of oscillating combustion // International Journal of Engineering, Science and Technology. Vol. 2, No. 2, 2010. – pp. 165-173.

Надійшла до редакції:
28.04.2014 р.

Рецензент:
докт. техн. наук, проф. Зорі А.А.

I.V. Skorobogatova, O.B. Biryukov, B.V. Gavrilenko, S.V. Neyezhnikov, P.O. Gnityev
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Експериментальне дослідження енергозберігаючих режимів в камерній печі.
Обґрунтовано необхідність проведення експериментальних досліджень по встановленню впливу параметрів пульсації витрати теплоносія на значення коефіцієнта конвективної тепловіддачі. Для вирішення цього завдання розроблена лабораторна експериментальна установка для проведення досліджень. У результаті дослідження частот пульсації витрати теплоносія встановлено підвищення коефіцієнта конвективної тепловіддачі і скорочення часу нагрівання заготовок. Показано посилення коефіцієнта конвективної тепловіддачі на величину до 45 %. Частота, при якій був отриманий технологічний ефект посилення конвективної складової, зафіксована на рівні 54-100 об/хв, що відповідає 0,9-1,7 Гц.

Ключові слова: експериментальна установка, камерна піч, заготовки, експеримент, пульсуючий режим.

I.V Skorobogatova, Biryukov A.B, Gavrilenko B.V., Neyezhnikov S.V., Gnityev P.A.
Donetsk National Technical University

Experimental investigation of power saving mode in the chamber furnace. Heating furnaces are the second largest natural gas consumption. Most of the existing industrial systems do not fully use their potential production capacity. It is not possible to increase the performance of product quality. Currently, there are two ways to supply fuel to the furnace: pulsating and traditional. The traditional method of combustion gas based on the continuous supply of fuel to the furnace. Introduction of new technology in the metal billet heating furnace chamber requires the maintenance of a specific temperature heat treatment for the selected card assortment steel. It is necessary to develop automation system for the new power-saving mode. There is a problem with the experiment. Pulsing mode can be implemented in the form of sine law: work groups in anti-burners and a certain ratio between the time on and off the burner, but the burner is not completely off effectively. The ratio of gas to air should be calculated and must always equal the total hydraulic resistance. The authors have created an experimental setup for the study of convective heat transfer. The description of the plant in a traditional oven chamber and pulsed. Experimental studies. The main parameters affecting the efficiency of the use of gas. Increase the heat transfer coefficient with increasing frequency indicates the intensification of convective heat transfer. Reduced heating time under actual conditions allow to reduce fuel consumption and hence more efficient use of the gas. Control consumption of gas in the pulsating mode involves reducing the time on and off the burner compared to the traditional mode. Switching time burners determined by the frequency of rotation of the damper, fixed in experimental studies. The frequency at which the effect was obtained by the process was 54-100 rpm/min, that corresponds 0,9-1,7 Hz or 0,6-1 sec. Consequently, system control for energy-saving modes obtained values allow to impose restrictions in the formation of control objectives.

Keywords: experimental unit, chamber furnace, billet, experiment, pulsed mode.