

М.П. Ревун, профессор, д.т.н.

Ю.Н. Каюков, ассистент

А.И. Чепрасов, профессор, к.т.н.

В.И. Иванов, ст. преподаватель

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЛАМЕННОЙ ПЕЧИ КАМЕРНОГО ТИПА

(Сообщение 2)

Запорожская государственная инженерная академия

З використанням раніше розробленої математичної моделі виконано чисельні дослідження впливу довжини факела пальникових пристроїв та імпульсного режиму опалювання на якість нагрівання сталевих заготовок у полум'яній печі камерного ти-пу. Встановлено, що достатньо високої рівномірності нагрівання заготовок сягають під час спалювання палива у факелі, повна довжина якого є зіставленою із шириною робочого обсягу печі, а також реалізації імпульсного режиму її опалювання у період витримки.

С использованием ранее разработанной математической модели выполнены численные исследования влияния длины факела горелочных устройств и импульсного режима отопления на качество нагрева стальных заготовок в пламенной печи камерного типа. Установлено, что достаточно высокая равномерность нагрева заготовок достигается при сжигании топлива в факеле, полная длина которого сопоставима с шириной рабочего объема данной печи, а также реализации импульсного режима ее отопления в период выдержки.

Введение. В работе [1] описана математическая модель нагрева стальных заготовок в пламенной печи двухкамерного типа. Для расчета внешнего теплообмена применяли зональный метод [2,3] с допущением симметричности процессов теплообмена по высоте садки нагреваемых заготовок. Зональную модель представляли замкнутой системой, образованной поверхностями металла, кладки, печного термоэлектрического термометра и заполненной средой горящих газов. С целью учета влияния длины факела на качественные показатели нагрева указанную часть рабочего объема печи в направлении движения горящих газов разделяли на пять равных участков (подсистем). Взаимодействие смежных подсистем осуществляли через соответствующие условные абсолютно черные поверхности с использованием соотношения [4]:

$$q_{J,I} = -q_{I,J} = \sigma_0 \cdot (T_{J,I}^4 - T_{I,J}^4), \quad (1)$$

где $q_{J,I}$, $q_{I,J}$ - плотность потоков результирующего излучения, проходящих через условную абсолютно черную поверхность, отделяющую объемную зону подсистемы I от объемной зоны смежной подсистемы J и объемную зону подсистемы J от объемной зоны смежной подсистемы I , Вт/(м²·К) соответственно; $T_{J,I}$, $T_{I,J}$ - температура условной абсолютно черной поверхности, отделяющей объемную зону I от объемной зоны смежной подсистемы J и объемную зону J от объемной зоны смежной подсистемы I , К соответственно; σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Расчет полной длины факела в зависимости от изменения тепловой нагрузки печи производили в соответствии с [5] и учетом соотношений

$$\ell_n \approx 0,7 \cdot \ell_\phi, \quad (2)$$

$$\ell_{\text{ф.н.}} \approx 2 \cdot \ell_n, \quad (3)$$

где $\ell_{\text{ф}}$ – длина факела от выхода из горелки до поперечного сечения на его оси, где величина среднего химического недожога топлива составляет $q_{\text{с.х.н}} = 2 \%$; $\ell_{\text{ф.н.}}$ – полная длина факела от выхода из горелки до точки на его оси, где величина конечного химического недожога топлива составляет $q_{\text{к.х.н}} = 2 \%$; ℓ_n – длина пути подсоса факела, где степень выгорания топлива, по данным работ [6,7], составляет 0,85.

С учетом допущения о постоянстве величин, характеризующих теплообмен в пределах каждой расчетной зоны, задачу внутреннего теплообмена для объемных зон металла и кладки рассматривали как задачу нагрева бесконечных одно- и двухслойных пластин.

Постановка задачи. Задачей данной работы является проведение численных исследований режимов отопления двухкамерной нагревательной печи и анализ влияния параметров факела на качественные и количественные показатели ее работы.

Численные исследования и анализ полученных результатов. Расчеты выполняли при следующих исходных данных: топливо – природный газ с теплотой сгорания $Q_n^p = 35,6$ МДж/м³; температура подогрева воздуха – 250 °С; температура выдержки печи – 1160 °С; нагреваемый материал – заготовки сечением 400 × 360 мм из стали Р6М5; кладка печи – одно- и двухслойные стенки, выполненные из шамотного и пенидиатомитового кирпича. Общий расход топлива на печь для периода подъема температуры составляет 250 м³/ч. Теплофизические свойства нагреваемого металла и кладки печи задавали по данным работ [8,9].

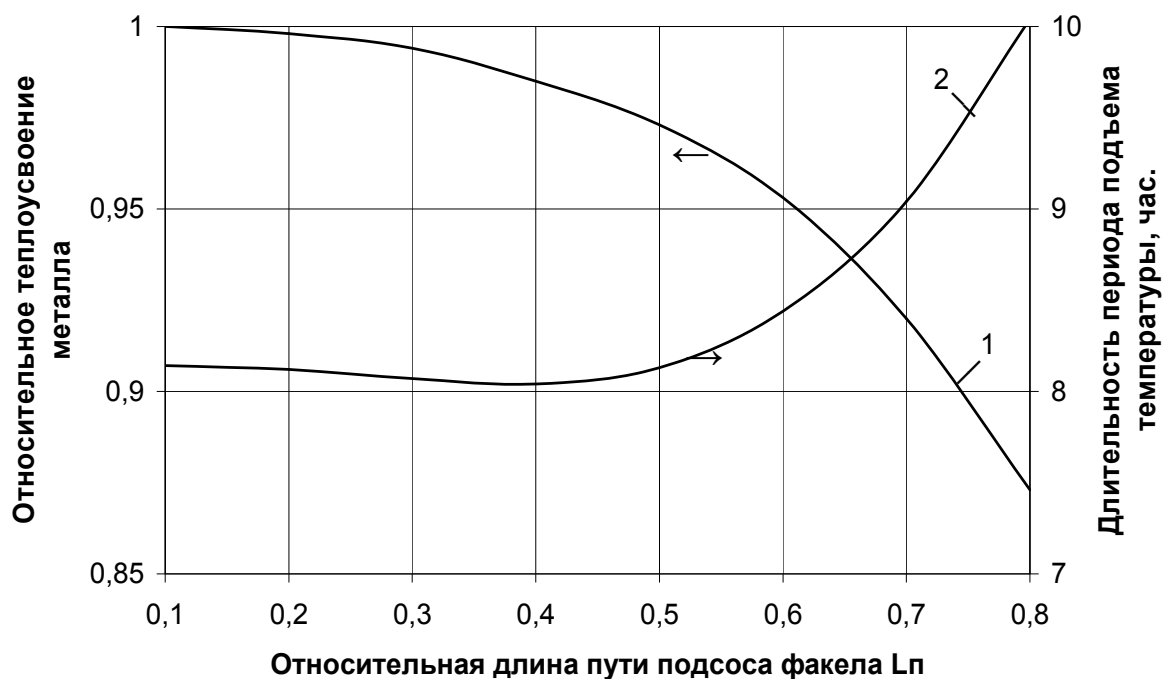
Оценку влияния длины факела на качественные и количественные показатели работы печи выполняли при достижении показаний печного термоэлектрического термометра (термодатчика) уровня температуры выдержки. Длину факела оценивали по относительной длине пути подсоса факела $L_n = \ell_n / b$, где ℓ_n , b – соответственно длина пути подсоса факела и геометрический размер рабочей камеры печи в направлении развития факела.

Проведенными расчетами определили средние по зонам температуры поверхностных и объемных расчетных зон газа, металла и кладки, суммарное усвоение теплоты садкой стальных заготовок, а также лучистые осевые результирующие тепловые потоки через сечения рабочего объема печи, перпендикулярные к продольной оси факела.

Для количественной характеристики влияния длины факела на интенсивность процессов теплообмена в рабочем объеме печи использовали относительное теплоусвоение садки стальных заготовок (за время равное восьми часам) $Q = Q_{\text{ф}} / Q_{\text{max}}$, где $Q_{\text{ф}}$ – суммарное теплоусвоение металла для факела определенной длины, Q_{max} – максимальное (в интервале изменений относительной длины подсоса факела L_n) суммарное теплоусвоение металла. Анализ изменения величины Q (рис. 1) показывает, что для исследованного интервала значений параметра L_n максимальной теплоотдачей обладает факел наименьшей длины.

С увеличением длины факела наблюдали монотонное уменьшение общего теплоусвоения металла, что, по-видимому, связано с расширением зоны интенсивного выгорания топлива и снижением температурного напора между факелом и поверхностью нагреваемого металла. В интервале значений параметра $L_n = 0,1 \dots 0,5$ величина Q снижается незначительно (примерно на 3 %). С увеличением величины данного параметра более 0,5 длина факела выходит за пределы рабочей камеры печи, что приводит к появлению химического недожога топлива и существенному снижению уровня общей

теплоотдачи, при этом относительное теплоусвоение металла для наиболее длинного факела снижается на 13 % по сравнению с факелом наименьшей длины.



1 - относительное теплоусвоение металла;
2 - длительность периода подъема температуры печи

Рисунок 1 – Характер изменения длительности периода подъема температуры печи и относительного теплоусвоения металла в зависимости от относительной длины подсоса факела

Длительность периода подъема температуры τ_n характеризуется временем вы-хода показаний печного термодатчика на заданный уровень температуры выдержки и зависит от положения области максимальной температуры греющей среды. При изменении длины факела происходит смещение высокотемпературной зоны греющей среды относительно печного термоэлектрического термометра, что приводит (рис. 1) к некоторому уменьшению (при $L_n = 0,1 \dots 0,4$), а затем и повышению значения τ_n (при $L_n = 0,4 \dots 0,5$). Дальнейшее увеличение длины факела сопровождается, как отмечено выше, снижением интенсивности процессов теплообмена в рабочем объеме печи и уменьшением теплоотдачи, в том числе к тепловоспринимающей поверхности печного термодатчика. Понижение уровня теплоотдачи и смещение зоны максимальной температуры греющей среды приводит к уменьшению скорости роста показаний печного термодатчика и, как следствие, значительно увеличивает длительность периода подъема температуры.

Распределение температуры греющей среды и осевого результирующего теплового излучения в рабочем объеме печи представлены в табл. 1. Для рассмотренных вариантов изменения длины факела лучистые осевые результирующие тепловые потоки определяли в четырех сечениях, разделяющих объемные расчетные газовые зоны печи. В качестве величины, характеризующей уровень осевого излучения, принимали относительную плотность осевого результирующего теплового потока, то есть отношение межзональной плотности лучистого осевого результирующего теплового потока к плотности соответствующего зонального лучистого результирующего теплового потока для поверхности нагреваемого металла.

Таблица 1 – Значение относительной плотности осевого результирующего

*теплового излучения в рабочем пространстве двухкамерной
нагревательной печи*

Относительная длина пути подсоса фа-кела L_n , м	Температура греющей среды t_g , °С					Относительная плотность лучистого осевого теплового потока*			
	Номер объемной газовой зоны					Граница между объемными зонами			
	1	2	3	4	5	1-2	2-3	3-4	4-5
0,1	1409	1221	1168	1140	1123	2,42	2,62	2,05	1,29
0,2	1350	1253	1173	1141	1123	1,35	2,44	2,02	1,28
0,3	1218	1307	1189	1143	1123	-0,55	1,81	1,89	1,24
0,4	1092	1314	1219	1152	1126	-1,68	0,69	1,58	1,18
0,5	990	1287	1246	1174	1137	-2,28	-0,53	0,98	1,03
0,6	911	1249	1261	1201	1158	-2,65	-1,60	0,18	0,77
0,7	850	1209	1265	1226	1183	-2,99	-2,55	-0,7	0,39
0,8	805	1174	1262	1244	1206	-3,44	-3,53	-1,65	-0,074

Примечание: * «+», «-» - направление вектора относительной плотности лучистого осевого результирующего теплового потока соответственно в сторону развития факела и в сторону горелочного устройства

Установлено (табл. 1), что для факелов максимальной длины осевые результирующие тепловые потоки ориентированы к горелочным устройствам (знак «-»), для факелов минимальной длины – в сторону развития факела (знак «+»). Когда факелы имеют значения параметра L_n , равные 0,3...0,7, осевые результирующие тепловые потоки направлены в противоположные стороны от сечения, в котором температура греющей среды достигает своего максимального значения, при этом их наиболее равномерное распределение имеет место для факела с $L_n = 0,5...0,6$.

Стремление к достижению максимального теплопоглощения в нагревательных печах лимитируется требованием обеспечения заданного качества нагрева металла, показатели которого оцениваются температурой, равномерностью и стандартностью нагрева [10]. Температура и равномерность нагрева характеризуют достигнутый уровень температуры поверхности и перепад температуры между поверхностью и тепловым центром металла. Стандартность нагрева характеризует обеспечение идентичности температуры поверхности и равномерности нагрева отдельных заготовок садки нагреваемого металла. Для количественной характеристики влияния факела на условия теплообмена в рабочем объеме печи использовали критерий неравномерности распределения тепловых потоков $K_q = q_{max} / q_{cp}$, где q_{max} , q_{cp} – соответственно (для факела определенной длины) максимальная и средняя по поверхности садки нагреваемого металла плотность результирующего теплового потока. Качество нагрева металла оценивали критериями $\sigma_{1\Delta t}$ и $\sigma_{2\Delta t}$, где $\sigma_{1\Delta t}$, $\sigma_{2\Delta t}$ – среднеквадратичные отклонения от среднего значения соответственно разностей температуры между показанием печного термодатчика и зональными температурами поверхности металла t_n и зональных перепадов температуры между поверхностью t_n и тепловым центром садки нагреваемого металла $t_{ц}$. Результаты расчетов влияния длины факела на качественные показатели работы печи представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Качественные показатели работы двухкамерной нагревательной печи при сжигании топлива в факелах различной длины

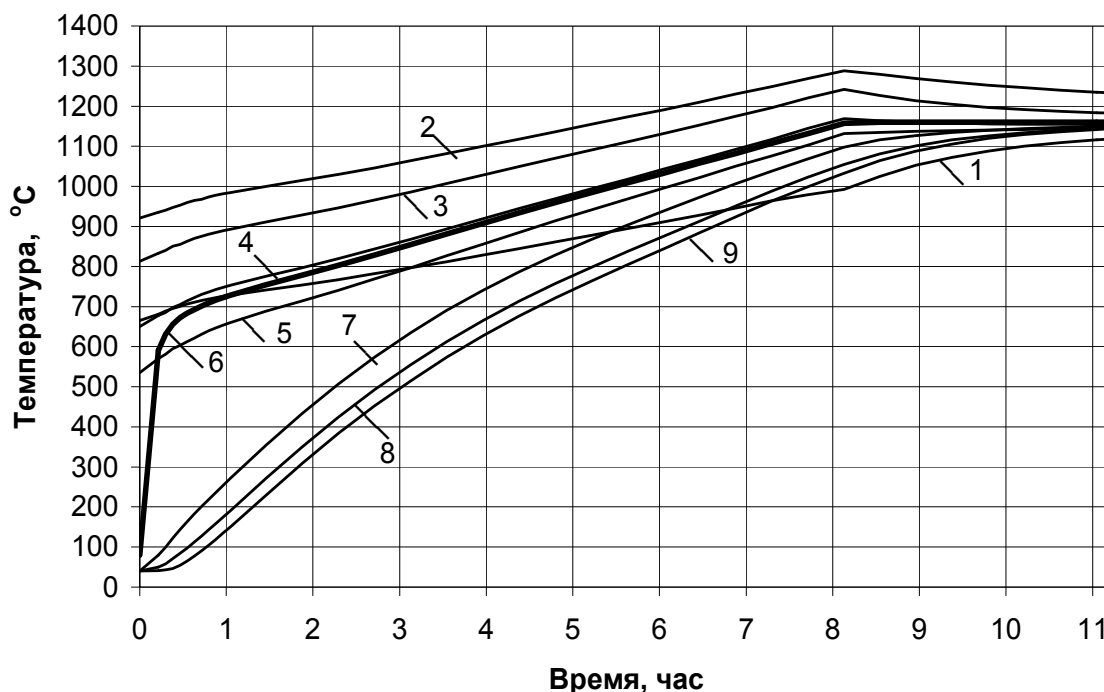
Величина	Относительная длина пути подсоса факела L_n							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

K_q	1,26	1,25	1,21	1,17	1,11	1,07	1,11	1,13
$\sigma_{1\Delta t}, ^\circ\text{C}$	45,00	40,10	31,00	22,40	18,40	22,50	29,30	34,40
$\sigma_{2\Delta t}, ^\circ\text{C}$	12,50	11,30	9,20	7,00	4,60	3,50	3,70	3,40

Установлено, что:

- зависимость изменения критериев K_q , $\sigma_{1\Delta t}$ и $\sigma_{2\Delta t}$, характеризующих неравномерность нагрева металла, от длины факела имеет экстремальный характер;
- в исследованном интервале значений параметра L_n наибольшую неравномерность нагрева зафиксировали для факела минимальной длины;
- при увеличении длины факела величина критериев неравномерности нагрева монотонно уменьшается и достигает своего минимального значения при $L_n = 0,5 \dots 0,6$;
- для факела с относительной длиной подсоса $L_n > 0,6$ наблюдается рост неравномерности распределения результирующих тепловых потоков, что, в свою очередь, приводит к снижению качественных показателей нагрева металла.

На рис. 2 представлен расчетный температурный режим нагрева металла в двухкамерной нагревательной печи при сжигании топлива в факеле с $L_n = 0,5$.



- 1 - 5 - температура соответствующих объемных газовых зон;
 6 - температура печного термодатчика; средняя по садке
 нагреваемого металла температура: 7 - поверхности,
 8 - среднemasсовая, 9 - теплового центра

Рисунок 2 – Расчетный температурный режим нагрева металла в двухкамерной нагревательной печи (относительная длина пути подсоса факела $L_n = 0,5$)

Режим состоит из двух периодов: периода подъема температуры печи и периода выдержки. Период нагрева реализуют при постоянном расходе топлива в течение 8,13 ч: в этот период наблюдается монотонное увеличение как температуры металла, так и температуры расчетных газовых зон при неизменном характере распределения температуры греющей среды по длине факела. Исключение составляет первая расчетная газовая зона, где, помимо сжигания топлива, осуществляется подогрев до температуры горения всего объема топлива и воздуха, подаваемых через горелки. В течение периода выдержки печи система автоматического регулирования реализует поддержание показаний печного термодатчика на уровне заданного значения температуры, что сопровождается

непрерывным снижением расхода топлива и, соответственно, уменьшением длины факела. В период выдержки металла наблюдается выравнивание условий теплоотдачи в рабочем объеме печи, которое характеризуется монотонным снижением неравномерности поля температуры греющей среды.

Одним из направлений повышения качества нагрева металла является применение импульсного режима отопления, основанного на периодическом изменении процессов теплообмена в рабочем объеме печи [11]. Импульсный режим отопления предусматривает подачу постоянного расхода топлива в период подъема температуры в печи и его импульсную подачу в период выдержки, то есть топливо подают в печь при снижении температуры до минимально допустимого уровня и прекращают при повышении ее до максимально допустимой величины. Длительность подачи топлива во время одного импульса при импульсном режиме отопления определяется автоматически: в начальный период выдержки она имеет максимальную величину, в конце данного периода – минимальное значение [12-14].

Сравнительную оценку качества нагрева металла при импульсном и традиционном режиме отопления производили по завершении периода выдержки одинаковой длительности. Расчетные значения температуры газа t_g , поверхности t_n и теплового центра нагреваемого металла t_u по зонам печи представлены в табл. 3.

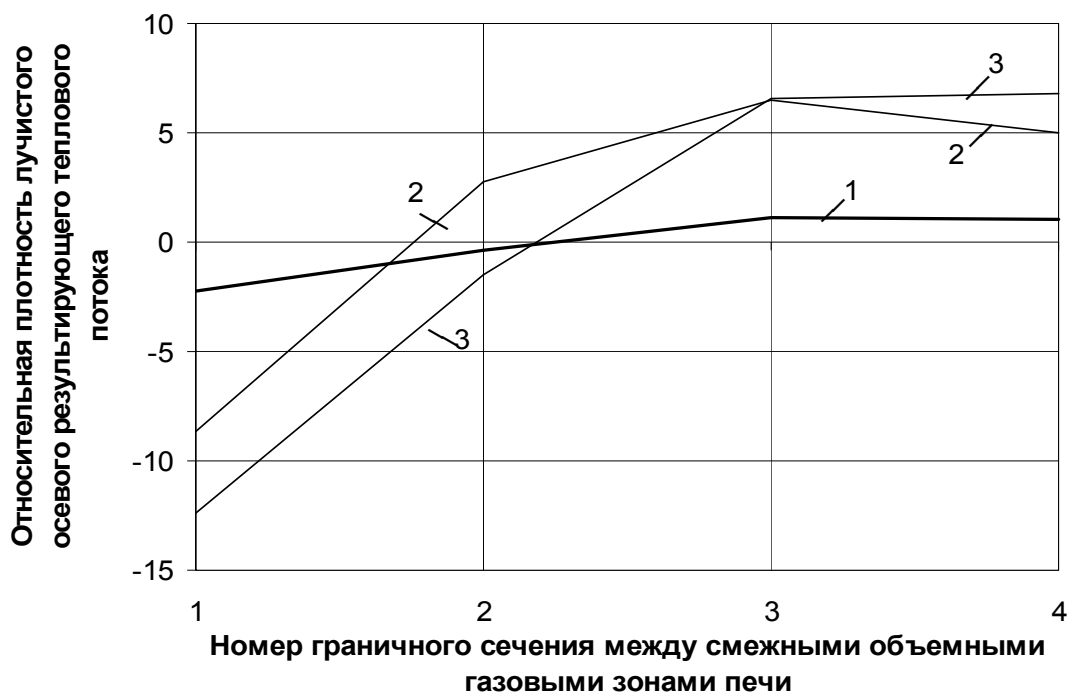
Таблица 3 – Распределение температуры при завершении периода выдержки по зонам печи (относительная длина пути подсоса факела $L_n = 0,5$)

Параметры	Режим нагрева с непрерывно изменяющимся расходом топлива в период выдержки печи					Режим нагрева с импульсной подачей топлива в период выдержки печи *				
	Номер объемной зоны					Номер объемной зоны				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
t_g , °C	1119	1233	1183	1155	1145	1109	1218	1197	1169	1155
t_n , °C	1145	1163	1157	1147	1140	1146	1162	1163	1155	1148
t_u , °C	1135	1157	1153	1141	1131	1137	1158	1159	1148	1139

Примечание: * средние значения температур за время цикла изменения температуры печи

Анализ полученных результатов показывает, что импульсная подача топлива обеспечивает ступенчатое изменение длины факела от максимального до минимально допустимого значения, а, следовательно, позволяет использовать преимущества длинного факела в период выдержки печи.

Наличие пульсирующего факела способствует снижению неравномерности распределения температуры газовой среды в зонах печи и, соответственно, увеличению равномерности распределения тепловых потоков по поверхности нагреваемого металла. Применение импульсного отопления позволяет повысить температуру в последних по ходу факела объемных газовых зонах, что, несмотря на увеличение потерь теплоты с отходящими продуктами сгорания, способствует увеличению теплосодержания металла.



- 1 - завершения периода подъема температуры печи;
 2 - завершение периода выдержки при традиционном режиме отопления;
 3 - завершение периода выдержки при импульсном режиме отопления

Рисунок 3 – Изменение относительной плотности лучистых осевых результирующих тепловых потоков в рабочем объеме двухкамерной нагревательной печи в направлении движения горящих газов (относительная длина пути подсоса факела $L_n = 0,5$) в момент:

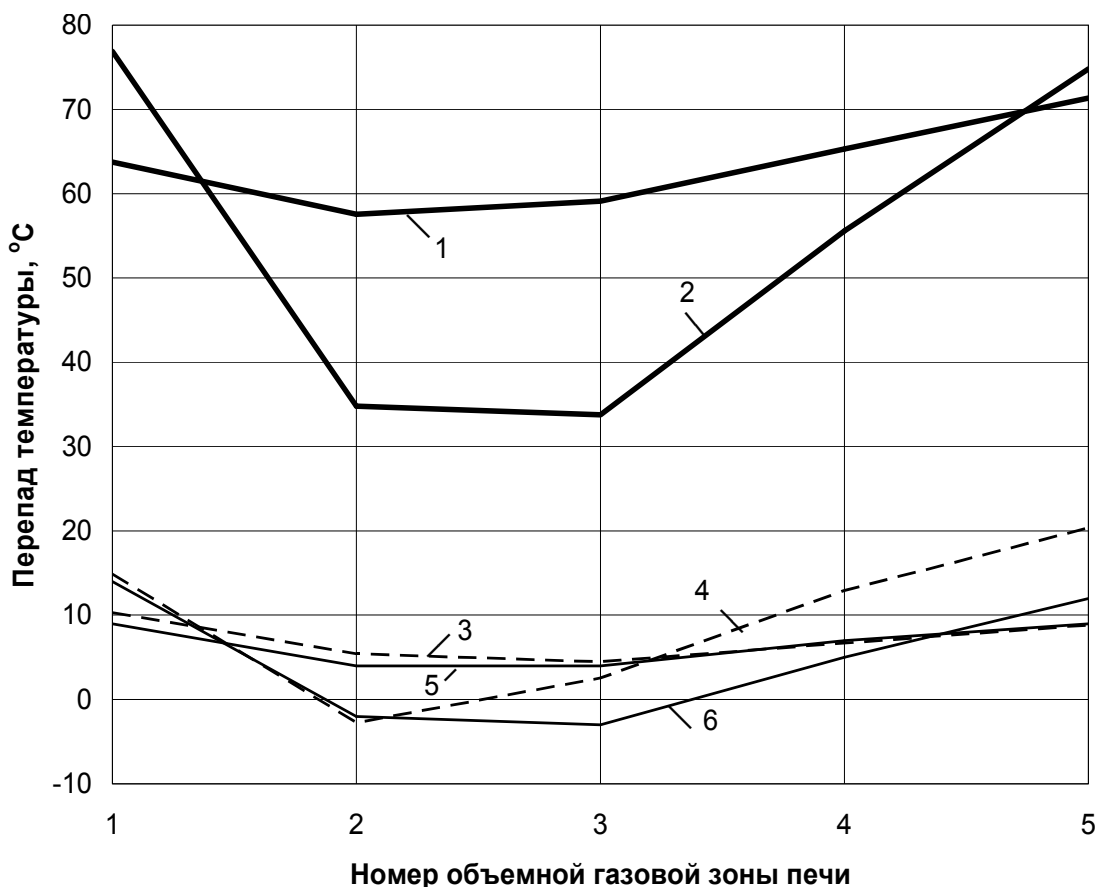
При завершении периода подъема температуры осевое излучение в рабочем объеме печи сопоставимо с тепловыми потоками, направленными непосредственно на нагрев металла (рис. 3).

На завершающей стадии периода выдержки металла в печи из-за значительного снижения теплотребления металла относительный уровень лучистых осевых результирующих тепловых потоков существенно возрастает. При импульсной подаче топлива характер распределения осевого излучения остается неизменным. В то же время при непрерывном уменьшении расхода топлива изменение длины факела и смещение максимума его температуры сопровождается монотонным искажением поля излучения и снижением равномерности распределения лучистых осевых результирующих тепловых потоков в рабочем объеме печи.

Качественные показатели нагрева металла оценивали по величине перепадов температуры для поверхности (разности температур между показанием печного термоматчика и температурами поверхности металла t_n по зонам печи) и по сечению нагреваемого металла в объемных газовых зонах печи (рис. 4).

При импульсном режиме отопления характер изменения перепадов температуры по зонам печи в конце периода выдержки по отношению к значению данных показателей при завершении периода подъема температуры в печи остается неизменным. В то же время при традиционном режиме отопления печи уменьшение длины факела сопровождается смещением зоны максимальной температуры греющей среды к корню факела и снижением равномерности поля излучения. Понижение уровня теплоотдачи во второй половине рабочего объема печи снижает теплосодержание металла и достигнутый уровень температуры его поверхности. Сопоставление равномерности нагрева металла в рассматриваемых случаях показывает улучшение качества нагрева при импульсном

режиме отопления печи: разность температуры для поверхности металла в момент выдачи из печи не превышает 12 °С, тогда как при традиционном режиме отопления достигает 20 °С



1, 3, 5 - перепады температуры по сечению металла; 2, 4, 6 - перепады температуры по поверхности металла; — перепады температуры при завершении периода подъема температуры печи; ---- перепады температуры при завершении процесса нагрева для режима с непрерывным изменением расхода топлива в период выдержки; — перепады температуры при завершении процесса нагрева для режима с импульсной подачей топлива в период выдержки

Рисунок 4 – Зональные перепады температуры на поверхности и по сечению нагреваемого металла (относительная длина пути подсоса факела $L_n = 0,5$) в зонах печи

Заключение. Результаты численного исследования теплообмена в двухкамерной нагревательной печи с односторонним боковым отоплением показали, что для достижения высокого качества нагрева металла наиболее предпочтительной является система отопления, обеспечивающая сжигание топлива в факеле с относительной длиной подсоса $L_n \approx 0,5$. Сравнительная оценка качества нагрева садки металла при импульсном и традиционном режимам отопления печи показала преимущество импульсного режима, заключающееся в практически двукратном понижении конечного значения перепада температуры для поверхности металла в момент его выдачи из печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое моделирование нагрева металла в пламенной печи камерного типа (сообщение 1) / М. П. Ревун, Ю. Н. Каюков, А. И. Чепрасов, В. И. Иванов // *Металургія: наукові праці ЗДІА*. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – Вип. 20. – С. 130-140.
2. Арутюнов В. И. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. И. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. – М.: *Металлургия*, 1990. – 239 с.

3. *Крупенников С. А.* Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена: основные положения и способы численной реализации / С. А. Крупенников // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 3. – С. 59-62.
4. *Бухмиров В. В.* Упрощенный зональный метод расчета радиационного теплообмена в поглощающей и излучающей среде / В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 1. – С. 68-70.
5. Расчеты нагревательных печей / *А. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, В. В. Кравцов* [и др.]; под ред. Н. Ю. Тайца. – [2-е изд.]. – Киев: Техника, 1969. – 539 с.
6. *Лисиенко В. Г.* Интенсификация теплообмена в пламенных печах / В. Г. Лисиенко. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.
7. *Лисиенко В. Г.* Теплофизика металлургических процессов / В. Г. Лисиенко, В. И. Лобанов, Б. И. Китаев. – М.: Металлургия, 1982. – 239 с.
8. Расчеты нагревательных и термических печей: Справочник / Под ред. *В. М. Тымчака* и *В. Л. Гусовского*. – М.: Металлургия, 1983. – 481 с.
9. *Казанцев Е. И.* Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. – [2-е изд.]. – М.: Металлургия, 1975. – 367 с.
10. *Губинский В. И.* Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра / В. И. Губинский // Теория и практика металлургии. – 2004. – № 6 (44). – С. 56-60.
11. *Ревун М. П.* Интенсификация работы нагревательных печей / М. П. Ревун, В. И. Гранковский, А. Н. Байбуз. – Киев: Техника, 1987. – 137 с.
12. А. с. 1086023 (СССР), МКИ³ С21D 9/70. Способ отопления камерных нагревательных печей / *М. П. Ревун, Я. Ю. Сайфаров, Ф. Ф. Франк* и др. (СССР). Заявлено 12.08.82; опубл. 14.04.84. Бюл. № 14.
13. Система импульсного отопления камерных нагревательных печей / *М. П. Ревун, Ф. Ф. Франк, Б. Г. Высочин* и др. // Сталь. – 1983. – № 9. – С. 84-87.
14. Импульсное отопление нагревательных колодцев / *М. П. Ревун, А. И. Чепрасов, Ю. Н. Каюков* и др. // Черная металлургия. – 1987. – № 8 (1036). – С. 58-59.

Стаття надійшла до редакції 29.10.2010 р.
Рецензент, проф. В.М. Голубцов