

УДК 669.041.001.24

ТЕПЛООБМЕН И ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ КОЛЬЦЕВЫХ ПЕЧЕЙ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Докт. техн. наук, проф. ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,
канд. физ.-мат. наук ГЕРМАН М. Л.,
канд. техн. наук КАБИШОВ С. М., инж. КОРНЕЕВ С. В.

*Национальная академия наук Беларуси,
Белорусский теплоэнергетический институт,
Белорусский национальный технический университет*

Нагреву заготовок в трубном производстве уделяется повышенное внимание, так как тепловые режимы нагревательных устройств влияют не только на расход топлива, а это более 50 % энергии, затрачиваемой на прокатку трубных заготовок, но и на равномерность нагрева заготовок, что отражается на качестве трубной продукции (отклонения диаметра и толщины стенки, овальность, различные дефекты поверхности и т. д.). Самое широкое распространение в трубном производстве получили нагревательные печи с подвижным кольцевым подом.

В связи с вводом в республике в эксплуатацию трубопрокатного стана с годовым выпуском 250 тыс. т труб с кольцевой нагревательной печью производительностью до 80 т/ч возникла необходимость в исследовании теплообмена и тепловых режимов кольцевых печей с целью разработки оптимальных по энергопотреблению и качеству нагрева режимов.

Приоритет в создании кольцевых печей принадлежит Советскому Союзу [1]. Первые печи имели открытую часть пода, на которой производились погрузка и разгрузка заготовок при помощи крановых устройств, что являлось их существенным недостатком. С развитием автоматизации, конструкции кольцевых печей совершенствовались и в 1960-е гг. приобрели оформление, существующее и в настоящее время, за исключением некоторых современных конструктивных и технологических особенностей (применение современных футеровочных материалов, комбинированное отопление, многозонное регулирование и т. д.).

В кольцевых печах заготовки, лежащие неподвижно на вращающемся поде, вместе с подом за время полного оборота проходят методическую, сварочную и томильную зоны. Во избежание подсоса холодного воздуха в рабочее пространство между стенами печи и вращающимся подом устанавливают специальные песочные или водяные затворы. Общий вид современной кольцевой печи приведен на рис. 1.

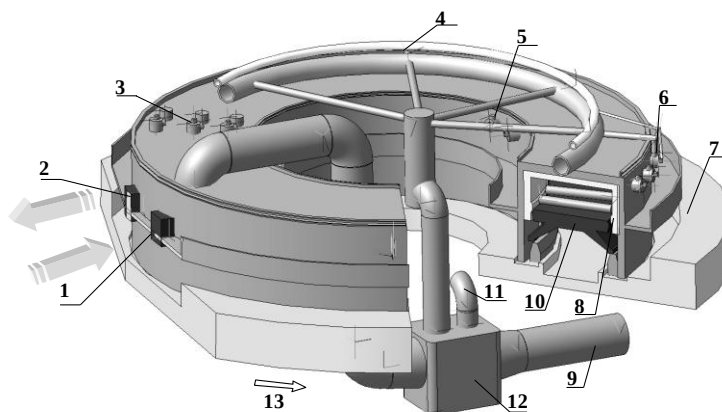


Рис. 1. Общий вид современной кольцевой печи: 1 – окно загрузки; 2 – то же выгрузки; 3 – сводовые плоскопламенные горелки; 4 – газо- и воздухопроводы; 5 – боковые горелки внутреннего кольца; 6 – то же внешнего кольца; 7 – фундамент; 8 – футеровка печи; 9 – дымоотводящий тракт; 10 – подвижный кольцевой под; 11 – вентиляторный воздух к recuperatorу; 12 – recuperator; 13 – направление вращения пода

Горелки устанавливают как на наружных, так и на внутренних стенах печи. Все шире применяется сводовое отопление. Печи с кольцевым подом оснащают recuperatorами.

По наружной окружности размещаются горелки, обеспечивающие примерно 75–80 % тепловой мощности печи, по внутренней – 20–25 %. При методическом режиме дымовые газы удаляются лишь через дымоходы, расположенные около окна загрузки, а температура печи изменяется по ходу нагрева металла приблизительно так же, как и в методических нагревательных печах других конструкций.

Исследования теплообмена и тепловых режимов кольцевых печей.

Первые исследования влияния технологических параметров на нагрев заготовок в кольцевых печах были проведены на этапах ввода в эксплуатацию и освоения кольцевых печей, разрабатываемых Гипрометзом, и подробно описаны В. Н. Григорьевым [1].

Исследования, направленные на совершенствование технологии нагрева цилиндрических слитков и заготовок в трубопрокатном производстве, были впервые проведены в СССР Н. Ю. Тайцем с сотрудниками [2]. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований было показано, что производительность кольцевых печей может изменяться в широких пределах в зависимости от расстояния между заготовками, их диаметров, тепловой мощности, марки стали. При этом удельная продолжительность нагрева может достигать значений 4–4,5 мин/см.

Значительный интерес представляют исследования М. К. Клейнера [3], который исследовал распределение тепловых потоков по поверхности цилиндров. Изучение явлений выполнено на моделях, представляющих собой секционные тепломеры и моделирующих цилиндр, состоящий из восьми секционных блоков. Результаты опытов позволили установить зависимости угловых коэффициентов излучения цилиндров на кладку печи от величины s/d . Теоретические исследования содержат результаты использования численных методов для расчета полей температур.

Наибольший интерес представляет работа [4], в которой обобщен опыт эксплуатации, а также приведены результаты экспериментальных исследований работы кольцевых печей Таганрогского металлургического завода, имевших основные размеры и конструктивные параметры, аналогичные таковым для кольцевой печи Белорусского металлургического завода. Печи отапливались природным газом, сжигаемым в двухпроводных горелках. Вентиляторный воздух, подаваемый к горелкам, подогревался в игольчатых рекуператорах до 400 °С. Температурные режимы работы исследовали путем измерения температуры кладки боковых стенок оптическим пирометром, а падающих на под тепловых потоков – тепломером. Для термометрирования заготовок было проведено три опыта с зачеканкой термопар. В частности, определено, что падающие тепловые потоки вблизи стен печи меньше максимальных на 5–12 %, а наиболее ощутимый эффект от увеличения относительного шага между нагреваемыми изделиями наблюдается в диапазоне его изменения от 1 до 2.

В 1980-е гг. с появлением достаточных вычислительных ресурсов стало возможно более детально исследовать процессы нагрева на основе моделирования работы кольцевых печей. В [5] отмечается, что тепловые расчеты при проектировании нагревательных печей, выпускавшихся в 1980-е гг., проводили по приближенным методикам, которые сводятся к оценке времени нагрева, а также удельных и суммарных расходов топлива, которые не позволяют выбрать максимальный и номинальный расходы топлива для каждой зоны управления. Далее анализируются экспериментальные данные, а также приводятся результаты расчета оптимальных режимов нагрева. Для расчета на каждом расчетном участке были выделены две объемные газовые зоны и пять поверхностных зон. Для расчета температурных полей в движущейся заготовке и поде была построена двумерная разностная сетка. Рассмотрено сравнение режимов при одинаковой производительности, а также при форсировании нагрева.

Из современных работ, посвященных исследованию теплообмена и тепловых режимов кольцевых печей, необходимо выделить монографии [6, 7], в которых обобщен опыт теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в разные годы в странах СНГ и за рубежом, а также приведены экспериментальные исследования кольцевых печей, проведенных под руководством и при участии В. И. Тимошпольского, а также теоретические исследования, выполненные совместно В. И. Тимошпольским и Ю. А. Самойловичем. Основными элементами разработанной модели являлись: совместное решение задач термоупругости и нестационарной теплопроводности для стальных заготовок круглого сечения; введение двух видов теплоносителя (греющих газов и нагретой подины), характеризующихся двумя парами показателей – температур греющей среды и подины, коэффициентов теплообмена излучением и конвекцией; применение метода конечных элементов при расчете поля температур и термических напряжений [7]. Основы предложенной физико-математической модели рассмотрены в [8].

Необходимо отметить, что, помимо таких эмпирических зависимостей, как теплофизические свойства металла и температура среды, к аналогичным эмпирическим параметрам в данной модели относится и приведенный

коэффициент теплообмена излучением $\sigma(\phi, T_{\text{печ}})$, значение которого существенно зависит от взаимного расположения заготовок на подине кольцевой печи и принимается в расчетах с использованием формулы

$$\sigma(\phi, T_{\text{печ}}) = \sigma_{\text{max}} \sum_{i=0}^6 n_i \cos(i\phi), \quad (1)$$

где σ_{max} – максимальное значение коэффициента, определяемое с учетом степени черноты греющих газов и поверхности металла, а также в зависимости от температуры газов и геометрических размеров рабочего пространства печи.

Числовые значения коэффициентов n_i , входящих в (1), в зависимости от относительного значения межосевого расстояния s/d приведены в [3, 6, 7]. Результаты расчета при использовании указанной физико-математической модели нагрева были сопоставлены с экспериментальными данными [8], что показало достаточную для практики точность и адекватность модели. Кроме того, были выполнены расчеты нагрева заготовок Ø80–300 мм из различных марок стали [8]. Максимальные отклонения расчетных и экспериментальных данных по указанной модели наблюдаются в начале и середине нагрева.

Значения коэффициентов n_i , входящих в (1), были получены при обработке различных экспериментальных данных, в которых не представляется возможным охватить все случаи нагрева, поэтому предложенная ниже физико-математическая модель сопряженного теплообмена в рабочем пространстве печи является естественным продолжением идеологии моделирования. При этом она позволяет при помощи решения задачи переноса излучения находить радиационные потоки на поверхность заготовки, которые определяются, исходя из геометрической конфигурации (высоты печи, диаметра заготовки, межосевого расстояния) и физических свойств печной среды и поверхностей теплообмена.

Физико-математическая модель сопряженного теплообмена в рабочем пространстве кольцевой печи. Математическая формулировка задачи сопряженного теплообмена между дымовыми газами, футеровкой печи и нагреваемым металлом является сложной и взаимосвязанной [9], поэтому выделим три основные составляющие для теплового режима печи: тепловой режим печной среды, тепловой режим футеровки и тепловой режим металла. Условия работы футеровки в различных частях кольцевого канала несколько отличаются друг от друга, поэтому тепловой режим футеровки при моделировании для свода и стен печи рассматривается в квазистационарном приближении, а кольцевой под, проходящий через все температурные зоны, требует учета его нагрева и охлаждения во времени. На рис. 2а представлен продольный разрез печи по среднему диаметру кольцевого пода, на рис. 2б – поперечный разрез рабочего пространства печи, на рис. 2в – расчетная схема теплообмена. Фактически поперечное сечение кольцевого канала в модели используется только для нахождения тепловых потерь через ограждающие конструкции, а температура по длине заготовки считается постоянной. Это справедливо по той причине, что концы заготовки при равномерной температуре среды должны нагреваться

больше [4], тепловые потоки у стен меньше на 5–12 %, что равносильно выравниванию температурного поля по длине заготовок. Различного рода неравномерности нагрева зависят от таких факторов, как неправильная регулировка мощности горелок по обеим сторонам стен печи, подсосы воздуха в рабочее пространство, и других факторов, имеющих случайный характер, поэтому при моделировании не учитываемых.

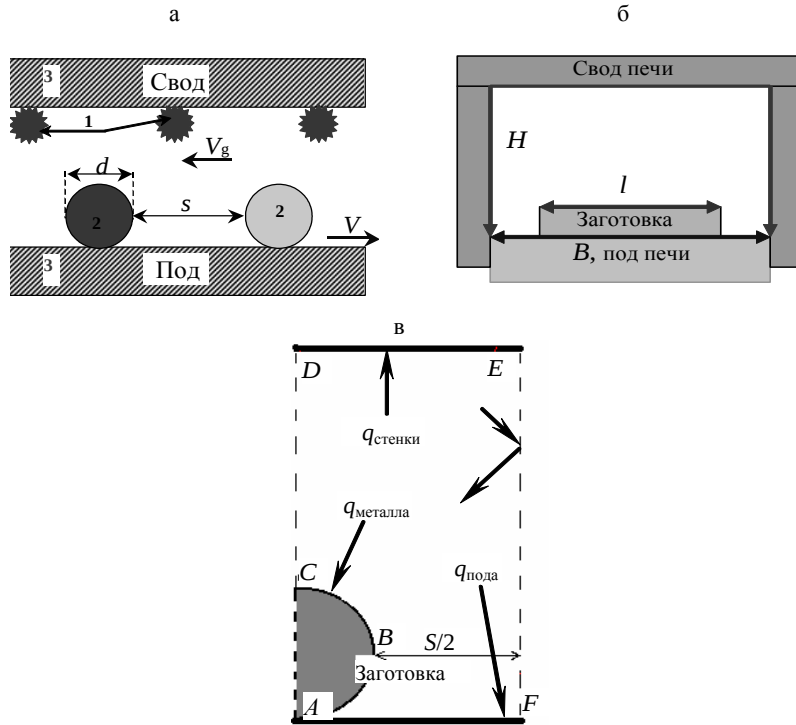


Рис. 2. Схема процесса нагрева заготовок в кольцевой печи в двумерной постановке: а – продольного сечения печи; б – поперечного сечения печи; в – расчетная 2-D; 1 – горелки; 2 – заготовка; 3 – футеровка

Процесс теплообмена в рабочем пространстве кольцевой печи между дымовыми газами и тепловоспринимающими поверхностями (футеровка и металл) описывается уравнением переноса энергии, которое в нестационарном случае имеет вид

$$c_p^g \rho_g \frac{\partial T_g(\mathbf{r})}{\partial t} + \text{div } c_p^g \rho_g \mathbf{v}(\mathbf{r}) T_g(\mathbf{r}) - \lambda_g \text{grad} T_g(\mathbf{r}) = q_c(\mathbf{r}) - \text{div} q_r(\mathbf{r}). \quad (2)$$

Здесь t – время; ρ_g , c_p^g и λ_g – соответственно плотность (кг/м^3), теплоемкость ($\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$) и эффективный (с учетом турбулентных пульсаций) коэффициент теплопроводности ($\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$) печной среды – дымовых газов.

Все коэффициенты (2) зависят от координаты $\mathbf{r}$ и температуры T_g . Для корректного определения поля температуры в объеме печи из уравнения (2) необходимо знать распределение скоростей $\mathbf{v}(\mathbf{r})$, объемную плотность тепловых (горение газа и окисление металла) $q_c(\mathbf{r})$ и радиационных $\text{div} q_r$ (Вт/м^3) источников.

Объемная плотность радиационных источников теплоты $\text{div} \mathbf{q}_r$ определяется из решения уравнения переноса излучения [10].

Поскольку в топочных процессах превалирует (до 90 %) перенос энергии излучением [9], особенно важно наиболее корректно учесть вклад радиационной составляющей теплообмена. В связи с этим полное решение газодинамической задачи не является необходимым и конвективный теплообмен газового потока с тепловоспринимающими поверхностями может быть учтен в виде закона Ньютона

$$\mathbf{q}_k(\mathbf{r}) = \alpha_g (T_g(\mathbf{r}) - T_w(\mathbf{r})), \quad (3)$$

где α_g – коэффициент конвективного теплообмена между газом и тепловоспринимающими поверхностями печи, который можно определять согласно нормативному методу [11], исходя из кинематической вязкости дымовых газов, скорости движения газов в рабочем пространстве, эффективного диаметра кольцевого канала и других параметров.

Математическая модель распространения теплоты в заготовках и поде базируется на решении нестационарного уравнения теплопроводности, которое при условии отсутствия внутренних источников теплоты имеет вид

$$c_p^m(T_m) \rho_m(T_m) \frac{\partial T_m(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla \lambda_m(T_m) \nabla T_m(\vec{r}, t), \quad (4)$$

где $\vec{r} = (x, y, z)$ – текущая координата точки m .

Начальное условие определяется исходным распределением температуры в теле.

Принимая во внимание конвективный и радиационный механизмы теплообмена, условия к уравнению (4) можно записать в виде

$$q_s(\vec{r}, t) = -\lambda_m(T) \frac{\partial T_m(\vec{r}, t)}{\partial \vec{n}} \Big|_{\vec{r} \in B} = \alpha_g T_g - T_m(\vec{r}, t) + q_{res}(\vec{r}), \quad (5)$$

где $\vec{n}$ – внешняя нормаль к границе тела B ; T_g – температура печной среды, контактирующей с рассматриваемым телом; α_g – коэффициент теплообмена тела с печной средой; $q_{res}(\vec{r})$ – плотность результирующего радиационного потока на поверхность тела.

Таким образом, зная теплофизические свойства материала тела (c_p^m , ρ_m и λ_m – соответственно теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности), ее геометрические размеры и распределение температуры в начальный момент времени, а также граничные условия (5), можно рассчитать распределение температуры во всех точках интересующего тела $T_m(\vec{r}, t)$ согласно уравнению теплопроводности (4).

Для решения нестационарного уравнения теплопроводности в стальных заготовках и подвижном поде удобно использовать метод конечных элементов.

Физико-математическая модель нагрева заготовок в кольцевой печи дополняется моделью термоупругих напряжений, которая рассмотрена

в [7, 12]. Задача термоупругости также решается при помощи метода конечных элементов, после того как найдены температуры в каждом узле сетки разбиения сечения заготовки. Для решения задачи переноса излучения вместо метода конечных элементов удобнее использовать метод, предложенный в [10, 13] и являющийся комбинацией метода дискретных ординат и метода трассировки луча, а также обладающий рядом преимуществ. Для пространственной дискретизации расчетной области используется идеология метода конечных элементов, что позволяет описывать сложные конфигурации и сохранять совместимость с расчетными схемами для других механизмов переноса энергии использующих метод конечных элементов.

Моделирование теплового режима кольцевой печи. Расчет теплового режима по предложенной физико-математической модели организован итерационным процессом, поэтому в начале расчета все элементы печи имеют начальную температуру (например, 20 °С). Далее за каждый оборот печи происходит разогрев пода, пока система не достигнет квазистационарного состояния (не изменяющиеся во времени температуры всех элементов по длине печи). После прогрева печи имеется разогретая футеровка стен, которая находится в стационарном режиме и под печи, испытывающий циклические температурные воздействия по ходу движения: неотапливаемая зона (450–850 °С) → томильная зона (≈ 1260 °С) → неотапливаемая зона. На разогретый под печи укладывают заготовки диаметром d с шагом s и продвигают через печь со средней скоростью $\vartheta_{\text{мет}}$ за время $t_k = L / \vartheta_{\text{мет}}$. При прохождении через печь заготовки должны разогреться до температур прошивки $T_m(\bar{r}, t_k) \approx T_{\text{вых}}$ (1160–1240 °С в зависимости от марки стали), причем для получения в дальнейшем качественной продукции максимальный перепад температур по сечению заготовки перед окном выгрузки не должен превышать некоторое максимальное значение $\Delta T_m(\bar{r}, t_k) \leq \Delta T_{\text{вых}}$ (≈ 20 °С), а во время всего процесса нагрева максимальный перепад температур по сечению заготовки не должен превышать некоторое максимальное значение $\Delta T_m(\bar{r}, t) \leq \Delta T_{\text{наг}}(T_m)$ (зависит от предела текучести металла при заданной температуре) для недопущения пластических деформаций (искривления) заготовки или трещинообразования для хрупких марок стали.

Важно отметить, что для наиболее эффективной работы печи нужен не максимально экономичный режим, а тот режим, который соответствует производительности прошивной машины, т. е. время нагрева заготовки $t_k = L / \vartheta_{\text{мет}}$ определяется производительностью технологической линии. В связи с этим можно сформулировать задачу оптимизации работы кольцевой печи следующим образом: определить для кольцевой печи с заданными конструктивными параметрами (геометрические размеры и конструкция футеровки, максимальную и минимальную скорости вращения, количество горелок, их мощность и месторасположение, а также глубину регулировки мощности) и заданным временем нагрева заготовок t_k оптимальный режим работы горелок, соответствующий минимальному топливопотреблению и окалинообразованию (стоимость топлива + стои-

мость потерь металла с окалиной $\rightarrow \min$) на единицу массы обрабатываемого металла при сохранении требуемых температурных условий $T_m(\bar{r}, t_k) \approx T_{\text{вых}}$; $\Delta T_m(\bar{r}, t_k) \leq \Delta T_{\text{вых}}$ и $\Delta T_{m1}(\bar{r}, t) \leq \Delta T_{\text{наг}}(T_m)$. Предложенные физико-математическая модель и методика расчета были положены в основу программы расчета нагрева заготовок в кольцевых печах.

Результаты расчетов, выполненные на основе программы, были сопоставлены с результатами экспериментальных измерений, проведенных на кольцевой печи Таганрогского металлургического завода [4]. В данной печи нагревали заготовки диаметром 385–369 мм длиной 1240–1600 мм, уложенные в два ряда соосно, расстояние между заготовками по ширине пода равно одному диаметру. Средний диаметр печи – 20 м, ширина пода – 4,15 м, высота рабочего пространства – 1,744 м. Штатные температуры по зонам печи равны: методическая – 960 °С, сварочные – 1270 °С, томильная – 1260 °С. В [4] также представлен характер изменения температур по длине и ширине печи по результатам измерения термомером. Исходные параметры режима и результаты расчета показаны на рис. 3, результаты расчета температур заготовки и пода – на рис. 3, тепловых потоков – на рис. 4. В табл. 1 приведены результаты расчета расхода газа по зонам для поддержания заданного профиля температур печи.

Нагрев заготовок из стали 40 диаметром $D = 385$ мм и длиной $l = 1400$ мм, расположенных в два ряда (шаг раскладки – 770 мм; $s/d = 3$), с производительностью кольцевой печи $P = 229$ т в смену (28,6 т/ч).

Время нагрева до необходимой температуры – 240 мин.

Эксперимент	Расчет
Удельный расход условного топлива, кг у.т./т	
44	43
Угар, %	
0,6–1	0,6

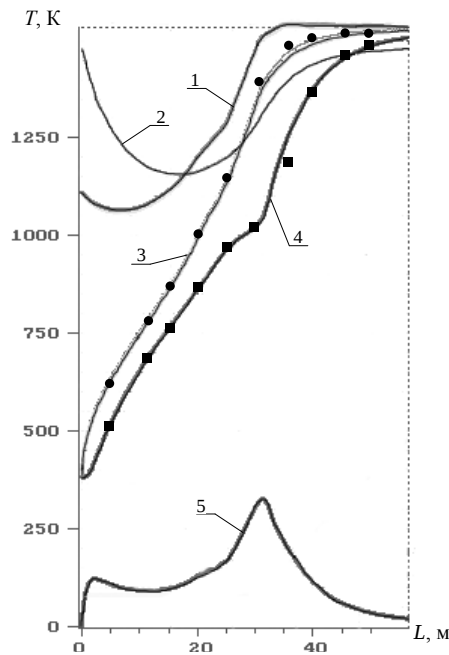
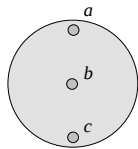


Рис. 3. Результаты сопоставления моделирования и производственных (экспериментальных) данных для режима нагрева: 1, 2 – температуры печи и пода; 3, 4 – минимальная и максимальная температуры по сечению заготовки; 5 – температурный перепад в процессе нагрева; a, b, c – места зачеканки термопар; ● – максимальная температура по сечению заготовки (температура поверхности – термопара a); ■ – то же минимальная (термопары b и c)

Сопоставление показало хорошую точность расчета основных технологических параметров работы рассматриваемой нагревательной печи. Отклонение среднего удельного расхода условного топлива за два месяца ра-

боты (15–20 %) связано с тем, что опытные данные получены при обработке статистических данных, при этом туда попадают варианты работы печи вхолостую при технологических остановках прокатного стана.

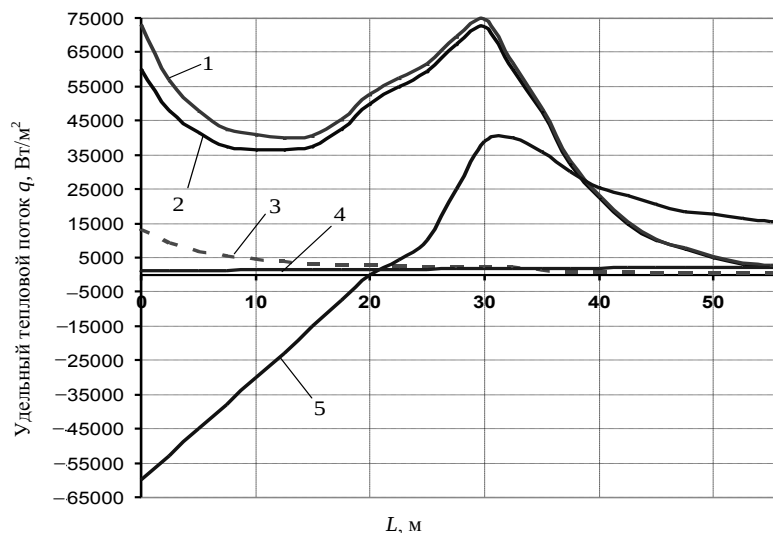


Рис. 4. Тепловые потоки, падающие на поверхности объектов для случая, приведенного на рис. 3: 1 – суммарный тепловой поток на заготовку; 2 – радиационный на заготовку; 3 – конвективный на заготовку; 4 – суммарный тепловой на свод печи; 5 – суммарный тепловой на под печи

Отклонение удельного расхода условного топлива с учетом простоев печи равно 2,3 % (рис. 3). В [4] показано, что для некоторых слитков угар составлял более 1 % при средних значениях 0,6–0,7 %. В ходе моделирования не учитывались химический состав среды, подсосы воздуха и другие случайные факторы.

Таблица 1

Результаты расчета режима нагрева при производительности 28,6 т/ч

Параметр	Значение
Расход газа по зонам печи, м ³ /ч	
I методическая зона	0
II методическая зона	68,8
I сварочная зона	472,9
II сварочная зона	368,3
Томильная зона	165,1
Общий:	1075,1
Конечная температура заготовки, °C	1242
Максимальный перепад температуры в процессе нагрева, °C	327
Перепад температуры по сечению в момент выдачи из печи, °C	19
Время нахождения заготовки в печи, мин	254

Сопоставление изменения температурного поля в процессе нагрева (рис. 3) показало единственное отклонение в пределах 7 % в районе окон-

чания фазового перехода и очень малую погрешность на других участках (менее 3 %). Данная погрешность, вероятнее всего, связана с погрешностью эксперимента и обработки экспериментальных данных (температура поверхности вычислялась теоретически [4], исходя из показаний термпар, находящихся под поверхностью), а также погрешностями задания профиля температур по длине печи (при моделировании).

Приведенные факты свидетельствуют о хорошей адекватности предложенной модели и позволяют использовать разработанную программу для расчета технологически и экономически оптимальных режимов нагрева. Отметим, что нахождение оптимального режима требует выполнения большого объема вычислительной работы.

Результаты исследования влияния конструктивных и технологических параметров на эффективность работы кольцевой печи. Исследования показали, что с понижением температуры печи и соответственно температуры нагрева заготовок уменьшаются максимальная удельная производительность печи U и величина оптимальной раскладки s/d , т. е. предпочтительна более плотная раскладка заготовок.

Величина смещения теплового центра заготовки относительно геометрического и температурный градиент по сечению на выдаче существенно зависят от производительности печи, шага раскладки и диаметра заготовок. Очевидно, что в реальных условиях нагрева металла в методической печи чем быстрее движется заготовка, тем большее значение температурного перепада по сечению достигается в процессе нагрева. В то же время температурный перепад по сечению заготовки на выдаче из печи с ростом межосевого расстояния снижается, но при этом уменьшается и производительность печи. Так как в условиях действующего производства кольцевая печь должна обеспечивать конкретную производительность и требуемое качество нагрева в зависимости от профиля проката, актуальной является задача определения оптимального шага раскладки при фиксированной производительности.

При проведении расчетов варьировали производительностью печи (40, 60 т/ч), диаметром заготовок (100, 200 мм) и шагом раскладки заготовок на поде печи. Для обеспечения корректности сравнения и анализа полученных результатов в процессе исследований моделировали нагрев металла в двухзонной печи, где первая зона – безгорелочная, вторая – отапливаемая (с постоянной температурой). При нагреве заготовок одного диаметра с постоянной производительностью, но при различном шаге раскладки температура в отапливаемой зоне подбиралась таким образом, чтобы обеспечить в момент выдачи заданную температуру на поверхности заготовки.

Качественный анализ полученных результатов показывает, что с увеличением шага раскладки уменьшается величина угара металла. С повышением производительности указанная тенденция сохраняется, но увеличение расстояния между заготовками приводит к существенному росту температурного градиента во время процесса нагрева. Расход топлива с увеличением шага раскладки монотонно возрастает.

Кривая температурного перепада имеет оптимум. Например, при нагреве заготовок Ø100 мм с производительностью 40 т/ч минимальное значе-

ние $\Delta T_{\text{вых}}$ достигается при $s/d \approx 1,55$ (s – расстояние между осями заготовок). С ростом производительности до 60 т/ч оптимум смещается несколько левее и находится на уровне $s/d \approx 1,45$. Аналогичная тенденция наблюдается при нагреве заготовок $\varnothing 200$ мм. Но в данном случае минимальный температурный перепад при производительности 40 т/ч наблюдается в окрестностях точки $s/d \approx 1,35$, а с увеличением скорости нагрева при производительности 60 т/ч – уменьшается до $s/d \approx 1,3$.

Следовательно, с увеличением производительности и диаметра нагреваемых заготовок оптимальный шаг раскладки, с точки зрения температурного перепада, по сечению в процессе нагрева и на выдаче из печи уменьшается. В действительности необходимо также учитывать минимально возможный конструктивный шаг раскладки, зависящий от параметров загрузочной и разгрузочной машин, так как оптимальная величина шага раскладки находится в пределах минимального расстояния обеспечиваемого погрузкой и разгрузкой заготовок.

Принимая во внимание противоположный характер кривых расхода топлива и угара металла в зависимости от шага раскладки, оптимум с точки зрения расхода топлива и окисления металла может быть определен в каждом конкретном случае с учетом соотношения цен на природный газ и металл.

ВЫВОД

В работе рассмотрены опыт исследования теплообмена и тепловых режимов кольцевых печей и подходы, применяемые при моделировании нагрева, а также предложены физико-математическая модель и методика теоретического исследования эффективности нагрева трубных заготовок в кольцевой печи. Приведено сопоставление расчетов с экспериментальными данными.

Результаты проведенного исследования позволяют утверждать, что уменьшению удельных затрат на нагрев заготовок может способствовать изменение раскладки заготовок на поду печи, задание оптимального температурного профиля по зонам печи, а также применение современных волокнистых футеровок, позволяющих снизить теплоемкость и тепловую инерционность печи (что особенно важно при технологических простоях).

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, В. Н. Кольцевые печи для нагрева металла / В. Н. Григорьев. – М.: Металлургиздат, 1958. – 292 с.
2. Тайц, Н. Ю. Технология нагрева стали / Н. Ю. Тайц. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургиздат, 1962. – 567 с.
3. Клейнер, М. К. Исследование несимметричного нагрева круглых заготовок с помощью водоохлаждаемых секционных калориметров / М. К. Клейнер, Г. А. Эммануэль // Известия вузов. Черная металлургия. – 1971. – № 12. – С. 135–139.
4. Ситковский, И. С. Нагрев круглых слитков в кольцевых печах / И. С. Ситковский, М. К. Клейнер, Г. А. Эммануэль // Сталь. – 1971. – № 3. – С. 272–276.
5. Лисиенко, В. Г. Улучшение топливо-использования и управление теплообменом в металлургических печах / В. Г. Лисиенко, В. В. Волков, Ю. К. Маликов. – М., 1988. – 250 с.

6. Тимошпольский, В. И. Кольцевые печи: теория и расчеты / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, М. Я. Пекарский. – Минск: Вышэйш. шк., 1993. – 246 с.
7. Тимошпольский, В. И. Теоретические основы тепловой обработки стали в трубопрокатном производстве / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович. – Минск: Белорусская наука, 2005. – 303 с.
8. М а т е м а т и ч е с к о е моделирование процессов нагрева трубных заготовок в кольцевых печах / В. И. Тимошпольский [и др.] // Весці НАН Беларусі. – 2004. – № 3. – С. 99–103.
9. М а т е м а т и ч е с к о е моделирование сопряженного теплообмена в нагревательных печах с подвижным подом / В. И. Тимошпольский [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79, № 3. – С. 3–11.
10. Ч и с л е н н о е решение уравнения переноса излучения в поглощающей, излучающей и рассеивающей среде со сложной 3-D геометрией / В. И. Тимошпольский [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, № 1. – С. 138–147.
11. Т е п л о в о й расчет котельных агрегатов: нормативный метод. – М.: Энергия, 1973. – 232 с.
12. Г е р м а н, М. Л. Определение температурных напряжений при нагреве стальных заготовок с использованием метода конечных элементов / М. Л. Герман, С. В. Корнеев, И. В. Файн // Металлургия. – Вып. 29. – 2005. – С. 59–67.
13. Г е р м а н, М. Л. Численный метод расчета переноса излучения в двухфазных средах сложной геометрии / М. Л. Герман, В. П. Некрасов, Е. Ф. Ноготов // Докл. АН Беларуси. – 1996. – Т. 40, № 3. – С. 122–126.

Поступила 29.08.2007

УДК 658.26:681.5.015

ПУТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Канд. техн. наук СЕДНИН А. В., асп. БОГДАНОВИЧ М. Л.

Белорусский национальный технический университет

Рациональное размещение и строительство когенерационных электростанций малой и средней мощностей имеет серьезное значение. Эти установки внедряются многочисленными предприятиями различных министерств, действия которых в вопросах энергоснабжения в большинстве случаев технически не координируются, что препятствует правильному решению вопросов развития энергетики и ведет к существенным недостаткам в области планирования, проектирования, строительства и эксплуатации энергетических установок. В сложившихся условиях целесообразно обратиться к опыту прошлых лет.

В [1] М. М. Бессонов констатирует: «Основными недостатками в развитии промышленной энергетики в пятой пятилетке следует считать следующее: