

В системе оборотного водоснабжения предусмотрена автоматизация процессов, а именно:

- автоматический запуск резервного насоса;
- контроль давления и температуры воды во всасывающих и напорных патрубках насосов;
- контроль уровня воды в баке;
- сигнализация аварийного уровня воды в баке;
- контроль температуры и протока на сливных линиях охлаждаемых элементов.

Сброс технической воды (при периодическом сливе воды из системы оборотного охлаждения) выполнен в заводскую сеть производственной канализации КЗ.

В заключение стоит сказать, что данная система отвечает требованиям правил безопасности, проста в технологическом плане и сравнительно недорога. На этом поставленная задача считается выполненной. Результат проделанной работы можно будет оценить, когда на предприятии выполнят монтаж полученной системы.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК В ДВУХЗОННОЙ ЩЕЛЕВОЙ ПЕЧИ**

© Д.А. Иванов, Б.К. Сеничкин, 2012

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный  
технический университет имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск*

Математическое моделирование является эффективным инструментом для определения особенностей процессов тепломассообмена и газодинамики в печах и в нагреваемом материале. Особенно актуально создание математической модели исследуемого объекта на стадии проектирования, разработки и реконструкции технических устройств или технологических комплексов. В этом случае на основании результатов математического моделирования может быть произведено сопоставление теплотехнических характеристик объекта до и после реконструкции с анализом реализованных технических решений.

Для снижения удельного расхода энергии при нагреве концов прутков перед вальцовкой, была разработана энергосберегающая двухзонная щелевая печь. Подробнее о стадиях разработки и задачи исследований описано в публикации [1].

Для анализа разработанной печи в качестве объект моделирования рассматривается технология нагрева стального цилиндрического прутка. В щелевой печи пруток последовательно проходит 2 зоны, в каждой из которых установлена сводовая плоскопламенная горелка. Регулирование горелок происходит независимым образом, что позволяет создавать в каждой зоне различный тепловой поток для нагрева заготовки. Нагрев конца прутка осуществляется через боковую поверхность заготовки посредством конвекции и излучения от боковых и сводовых стенок печи. В цели моделирования входит определение изменения температурного поля прутка по длине печи и в отдельных зонах.

При моделировании принято ряд допущений: нагрева заготовки в рабочей камере печи разделяется на две зоны (секции): АВ и CD (рис. 1). Результирующий тепловой поток на металл в каждой секции зависит от температуры поверхности заготовки и расхода природного газа в соответствующей секции.

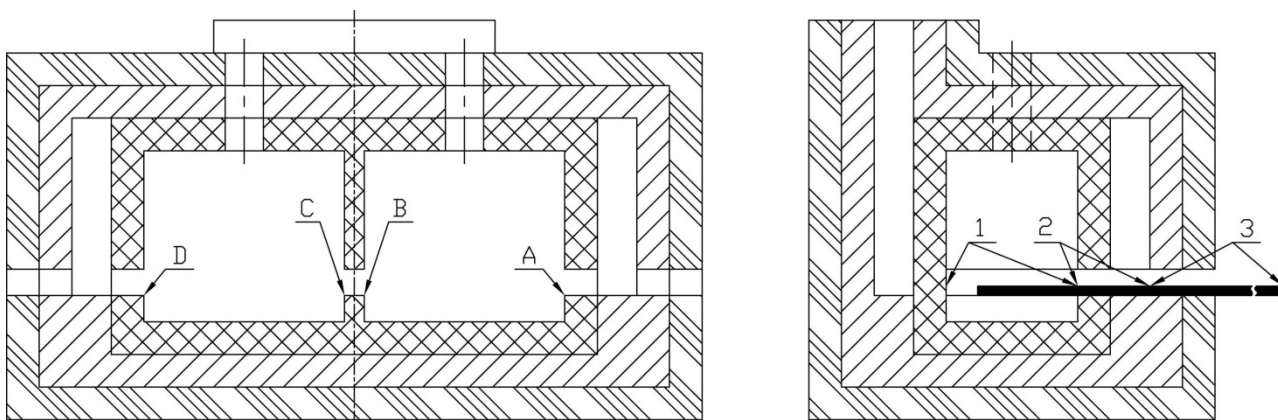


Рис. 1. Разбиение плоскости печи и нагреваемой заготовки по различным граничным условиям

Тепловая модель прутка диаметром  $d$  ( $d = 2R_0$ ) условно разделена на 3 участка (рис. 1, 2). Первая часть (длиной  $L_1$ ) находится в рабочей камере печи и нагревается только результирующим тепловым потоком соответствующей секции, включающим тепловой поток излучением  $Q_{изл1}$  и конвективный нагрев продуктами сгорания  $Q_{пс1}$ . Вторая часть заготовки (длиной  $L_2$ ) находится в области отвода продуктов сгорания и нагревается только результирующим тепловым потоком из дымового канала соответствующей секции, включающим тепловой поток излучением  $Q_{изл2}$  и тепловой поток конвективного теплообмена с продуктами сгорания  $Q_{пс2}$ . Третий участок (длиной  $L_3$ ) охлаждается за счет свободной конвекции  $Q_{конв3}$ . Причем теплообмен свободной конвекцией верхней  $(0; \pi)$  и нижней  $(\pi; 2\pi)$  частей заготовки описываются различными критериальными уравнениями. Между участками прутка существует теплообмен теплопроводностью  $Q_{тп1}$ ,  $Q_{тп2}$  (рис. 1, 2).

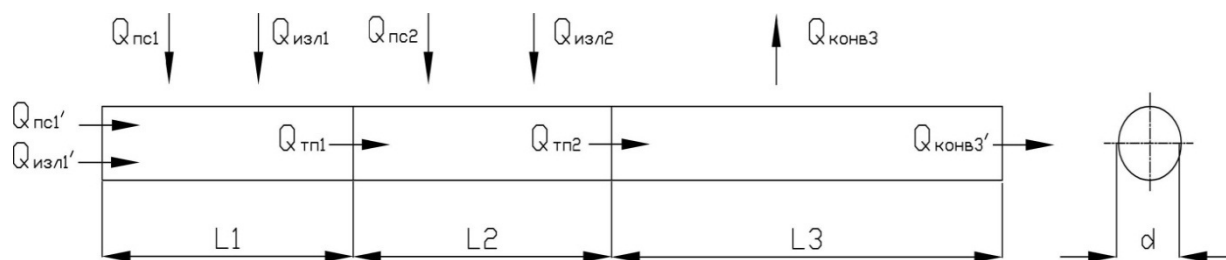


Рис. 2. Схема тепловых потоков в математической модели нагрева прутка в двухсекционной щелевой печи

Несимметричность нагрева заготовки учитывалось коэффициентом  $\mu = 0,8$ . Излучение металла и кладки серое, степени черноты кладки ( $\varepsilon_k$ ) и металла ( $\varepsilon_m$ ) постоянные и не зависят от температуры  $\varepsilon_k = \varepsilon_m = 0,8$ .

В математической модели рассматривается нагрев стальной заготовки при постоянной температуре греющей среды. Температурное состояние заготовки в любой момент времени определяется на основании дифференциального уравнения нестационарного распределения температуры в цилиндре при граничных условиях II рода («внутренняя задача»):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a(t) \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} \right), \quad (1)$$

где  $t$  – температура заготовки в цилиндрических координатах  $(r, \varphi, z)$ , °C;  $\tau$  – текущее время, с;  $a$  – коэффициент температуропроводности металла, м<sup>2</sup>/с.

Основным искомым параметром при решении «внешней задачи» является результирующий тепловой поток на металл, зависящий от температуры поверхности заготовки, который задается в качестве граничного условия для решения «внутренней задачи».

Поскольку теплообмен в печи происходит в системе трех тел: газ – кладка – металл, то для определения результирующих тепловых потоков на заготовку (2) и свод (3) использован метод сальдо-потоков с совместным решением уравнений теплового баланса печи на основании селективно-серой модели излучения газа [2, 3]. Согласно этой модели в пределах каждой полосы спектра поглощательная ( $A_\lambda$ ) и излучательная ( $\varepsilon_\lambda$ ) способности газового объема равны и не зависят от длины волны.

$$q_M(t_M) = \varepsilon_M \left\{ \begin{aligned} & \left[ C_{np} \left( \frac{T_{св}^{кл}}{100} \right)^4 - C_0 \left( \frac{T_M}{100} \right)^4 \right] - \varepsilon_{r1}(T_{r1}) \times \\ & \left[ C_{np} \left( \frac{T_{св}^{кл}}{100} \right)^4 - C_0 \left( \frac{T_{r2}}{100} \right)^4 \right] + \varepsilon_{r1}(T_{r1}) \times \\ & \times [1 - \varepsilon_{r2}(T_{r2})] \left[ C_0 \left( \frac{T_{r1}}{100} \right)^4 - C_{np} \left( \frac{T_{св}^{кл}}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \right\} + \alpha_{кон}^{r2}(t_M) [T_{r2} - T_M], \quad (2)$$

где  $q_M$  – результирующий тепловой поток на заготовку, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_M$  – температура металла, К;  $\varepsilon_M$  – степень черноты заготовки,  $\varepsilon_M = 0,8$ ;  $C_0$  – константа излучения черного тела,  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $C_{np}$  – приведенный коэффициент излучения [64, 70], Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{св}^{кл}$  – температура свода внутри печи, К;  $T_{r1}$  – температура газа в зоне горения, К;  $T_{r2}$  – температура газа в зоне теплообмена, К;  $\varepsilon_{r1}(T_{r1})$  – степень черноты газа в зоне горения в зависимости от температуры  $T_{r1}$ ;  $\varepsilon_{r2}(T_{r2})$  – степень черноты газа в зоне теплообмена в зависимости от температуры  $T_{r2}$ ;  $\alpha_{кон}^{r2}(t_M)$  – коэффициент теплоотдачи продуктов сгорания к металлу в зависимости от температуры поверхности заготовки  $t_M$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Действительная температура горения, температура свода печи (4) и температура газов в рабочей камере определяется на основании решения уравнений теплового баланса (5). Тепловой баланс составляется как для каждой секции, так и для всей печи.

$$q_{св} = C_0 \left\{ \varepsilon_{r1}(T_{r1}) \left( \frac{T_{r1}}{100} \right)^4 + \varepsilon_{r2}(T_{r2}) [1 - \varepsilon_{r1}(T_{r1})] \left( \frac{T_{r2}}{100} \right)^4 \right\} + \alpha_{кон}^{r1} \left( \frac{G_z}{G_z^{ном}} \right) [T_{r1} - T_{св}^{кл}], \quad (3)$$

где  $q_{св}$  – результирующий тепловой поток на свод, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha_{кон}^{r1}(T_{r1})$  – коэффициент теплоотдачи продуктов сгорания к своду печи в зависимости от отношения фактического расхода газа на горелку ( $G_z$ , м<sup>3</sup>/с) к номинальному значению  $G_z^{ном}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Температура свода печи определяется из выражения

$$T_{св}^{кл} = 100 \sqrt{\frac{q_{св}^{конв}}{C_0 \varepsilon_\kappa} + \frac{1}{C_0} \left[ q_{св}^{изл} + \varepsilon_M C_0 \left( \frac{T_M}{100} \right)^4 [1 - \varepsilon_{r1}(T_{r1})] [1 - \varepsilon_{r2}(T_{r2})] \right]}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_\kappa$  – степень черноты кладки свода,  $\varepsilon_\kappa = 0,8$ ;  $q_{св}^{конв}$  – плотность конвективного теплового потока от продуктов сгорания к своду печи  $q_{св}^{конв} = \alpha_{кон}^{r1} \left( \frac{G_z}{G_z^{ном}} \right) [T_{r1} - T_{св}^{кл}]$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{св}^{изл}$  –

плотность теплового потока излучением к своду печи,

$$q_{св}^{изл} = C_0 \left\{ \varepsilon_{r1}(T_{r1}) \left( \frac{T_{r1}}{100} \right)^4 + \varepsilon_{r2}(T_{r2}) [1 - \varepsilon_{r1}(T_{r1})] \left( \frac{T_{r2}}{100} \right)^4 \right\}, \text{ Вт/м}^2.$$

Тепловой баланс секции и печи включает следующие составляющие

$$Q_x + Q_{ф.в.} + Q_{экз} = Q_{пол} + Q_{нагр} + Q_{mn} + Q_{yx} + Q_{кл} + Q_{изл} + Q_{охл}, \quad (5)$$

где  $Q_{нагр}$  – потери теплоты за счёт нерационального нагрева части заготовки, не участвующей в технологическом процессе вальцовки, Вт;  $Q_{mn}$  – потери теплоты теплопроводностью металла, Вт.

Степень черноты газов в зонах горения  $\varepsilon_{r1}(T_{r1})$  и теплообмена  $\varepsilon_{r2}(T_{r2})$  определялась на основании экспериментальных исследований Хоттеля и Эгберта в зависимости от температуры газов в соответствующей области [4].

Отличительной особенностью данной модели является учет коэффициента теплоотдачи от продуктов сгорания к своду печи, который имеет зависимость от тепловой мощности горелки. Необходимость точного расчета  $\alpha_{кон}^{r1}$  можно проследить на основании работ [5, 6]. Так при изменении  $\alpha_{кон}^{r1}$  в пределах 50–400 Вт/(м<sup>2</sup>·К) при определенных условиях относительная погрешность в расчетах температуры кладки может составить до 5 %, а в определении относительного теплового потока – до 23 %. Еще большую погрешность (до 185 %) может вызвать определение плотности конвективного теплового потока у свода печи  $q_{св}^{конв}$ , а так как в реальных печах косвенного радиационного нагрева доля конвективного теплового потока в общем потоке на металл может составлять от 43 до 80 % (в среднем 57%) в зависимости от удельной тепловой мощности горелки, то задача точного определения  $\alpha_{кон}^{r1}$  представляется крайне актуальной.

Определение коэффициента теплоотдачи произведено при совместном решении следующих моделей и уравнений: модель слабосжимаемого течения (уравнение Навье – Стокса) и смешения, уравнение конвективно-диффузионного переноса, уравнение энергии, уравнение состояния, диффузионная модель излучения (P1), пульсационной модели горения.

Результатом совместного решения перечисленных уравнений стали численные скалярные и векторные данные полей скоростей, концентраций, температур и других теплофизических параметров, которые позволили составить критериальные уравнения определения параметров конвективного теплообмена в зависимости от производительности горелки (тепловой мощности), температуры свода и размеров камеры (удельной тепловой мощности) [7, 8].

С использованием математического аппарата формул (1)–(5) при учете граничных условий, учитывающих все особенности процессов газодинамики и теплообмена в печи, описанные выше, была решена задача внешнего теплообмена в печи и в дымовом канале. В результате решения определен результирующий тепловой поток на металл в зависимости от температуры поверхности заготовки. Регрессия данных зависимости теплового потока от температуры поверхности прутка использовалась в качестве граничного условия в решении внутренней задачи нагрева заготовки численными методами. В результате решения задачи нагрева заготовки тепловым потоком из рабочей камеры и дымового канала получены температурные поля, характеризующие термическое состояние заготовки в каждый момент времени.

На основании полученного в результате решения массива данных, учитывающих различные особенности процесса нагрева (распределение температур внутри секций печи, расход газа по секциям, производительность печи по нагреваемого материалу и геометрические размеры нагреваемых заготовок) произведена разработка технологии нагрева стальных заготовок с минимальным потреблением природного газа на печь.

Полученные данные позволят не только облегчить производство пуско-наладочных работ при запуске печи, но и вывести печь на энергосберегающие режимы работы [9].

#### Список использованных источников

1. *Иванов Д.А., Сеничкин Б.К.* Результаты исследования тепловой работы щелевых печей // Известия вузов «Черная металлургия». 2007. № 7. С. 48–50.
2. *Зеньковский А.Г., Герцык С.И., Костяков В.В.* Расчет теплообмена в печах с излучающим сводом // Известия вузов «Черная металлургия». 1971. № 5. С. 166–169.
3. *Ключников А.Д., Иванцов Г.П.* Теплопередача излучением в огнетехнических установках (инженерные решения задач). М.: Энергия, 1970. 296 с.
4. *Лисиенко В.Г.* Интенсификация теплообмена в пламенных печах. М.: Металлургия, 1979. 224 с.
5. *Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л.* Учет селективности излучения газа при сводовом отоплении камерных печей // Металлургическая теплотехника : сб. науч. тр. национальной металлургической академии Украины. Том 9. Днепропетровск: НМетАУ, 2003. С. 144–153.
6. *Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л.* Анализ эффективности сводового отопления камерных пламенных печей // Металлургическая теплотехника : сб. науч. тр. в национальной металлургической академии Украины. Т. 8. Днепропетровск: НМетАУ, 2002. С. 56–66.
7. *Иванов Д.А., Сеничкин Б.К.* Аналитическое определение коэффициента теплоотдачи с помощью пристеночных функций // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: материалы 8-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и специалистов / под общ. ред. Б.К. Сеничкина. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 141–145.
8. *Иванов Д.А., Сеничкин Б.К.* Особенности теплообмена и газодинамики факела плоскопламенных горелок // Теория и практика нагревательных печей в XXI веке : тр. Всерос. науч.-практ. конф. 25–26 мая 2010 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. С. 193–195.
9. *Иванов Д.А., Сеничкин Б.К.* Разработка энергосберегающих режимов нагрева заготовок в щелевой печи // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : сб. материалов Всерос. студенческой олимпиады, науч.-практ. конф. и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых. 22–26 ноября 2010 г. Екатеринбург: УрФУ, 2010. С. 82–84.

#### ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СЛОЖНОСТИ ФОРМЫ ДЕТАЛИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ГРОССМАНА ПРИ ЗАКАЛКЕ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

© С.В. Иванов, Л.А. Ошурина, В.А. Скуднов, 2012

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный  
технический университет имени Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

С использованием синтетических сред возникает вопрос о методике анализа их свойств, способствующей улучшению качества готовых деталей. Главная характеристика любой закалочной среды – способность поглощать тепло от детали со скоростью не меньшей критической скорости охлаждения, по крайней мере, в верхнем слое металла, а во многих случаях на заданном участке или по всему сечению. Выполнение этого условия имеет целью предупредить диффузионные превращения переохлажденного аустенита и получить преимущественно мартенситную структуру или структуру нижнего бейнита.

Современные закалочные среды должны обладать следующим набором характеристик [1]:

1) отсутствие чрезмерных закалочных деформаций, зависящих от кинетики охлаждения во всей температурной области и, в особенности, от достаточно малой его скорости при температурах ниже  $M_n$ ;