

УДК 621.783.2:519.876.5

Ю.Г.КАЧАН, В.В.СТЕПКИН, Ю.Б.СПЕКТОРОВА

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАМЕРНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Y.KACHAN, V.STYOPKIN, Y.SPEKTOROVA

## THE MATHEMATICAL MODEL OF THE CHAMBER HEATING FURNACE

**Анотація.** Створена математична модель нагрівальної газової печі, що реалізує інженерні методи розрахунку та прогнозу температури не лише заготовки, що розігрівається, але і в конкретній точці усередині камери при заданих геометричних параметрах об'єкта. Розрахунок розподілу температури виконано чисельним методом. При цьому застосування інженерної методики дозволяє враховувати різні варіанти опалювання і зміни аеродинаміки печі, визначати зони з різною щільністю теплової енергії і вирішувати задачі більш ефективного нагріву металу в камерних газових печах.

**Ключові слова:** нагрівальна газова піч, математична модель, теплова енергія, нагрів металу, температурне поле.

**Аннотация.** Создана математическая модель нагревательной газовой печи, реализующая инженерные методы расчета и прогнозирующая температуру не только разогреваемой заготовки, но и в конкретной точке внутри камеры при заданных геометрических параметрах объекта. Расчет распределения температуры выполнен численным методом. При этом применение инженерной методики позволяет учитывать различные варианты отопления и изменения аэродинамики печи, определять зоны с разной плотностью тепловой энергии и решать задачи более эффективного нагрева металла в камерных газовых печах.

**Ключевые слова:** нагревательная газовая печь, математическая модель, тепловая энергия, нагрев металла, температурное поле.

**Annotation.** The created mathematical model of heating gas-furnace realizing the engineerings methods of calculation and forecasting the temperature of not only the warmed up die-stock, but also in a concrete point in a chamber with given geometrical parameter of furnace. The calculation of distributing of temperature is executed a numeral method. Thus application of engineering method allows to take into account the different variants of heating and change of aerodynamics of furnace, to determine zones with the different density of thermal energy and to solve the problems of more effective heating of metal in chamber gas-furnaces.

**Key words:** heating gas-furnace, mathematical model, thermal energy, metal heating, temperature field.

### Проблема и ее связь с научными и практическими результатами

Развитие исследований в области моделирования температурных полей камерных печей тесно связано с процессами нагрева металла в подобных технологических аналогах, суть которых заключается в следующем.

Как известно, термическая обработка металла в камерных печах производится для улучшения его структуры и придания свойств прочности, твердости, износоустойчивости, вязкости. Наиболее распространенными операциями такой обработки являются: отжиг, нормализация, закалка, отпуск и цементация. Отжигом является нагрев детали или заготовки до определенной температуры, выдержку при ней и медленное охлаждение печи. Производят его для получения равномерной структуры металла, свободной от внутренних напряжений. При отжиге сталь нагревают до температуры 750...1150°C в зависимости от ее состава.

Нормализацию применяют для устранения внутренних напряжений в стали. Она отличается от отжига тем, что после выдержки заготовка сразу выдается из печи и охлаждается на воздухе. Закалку – нагрев, выдержку и быстрое охлаждение (в воде, масле и пр.) – производят для придания стали твердости. При этом последнюю нагревают до температуры 850...900°C а специальные легированные стали – до 125°C. Отпуск применяют для устранения или уменьшения напряжений, полученных в результате закалки. При нем металл проходит те же операции, что и при отжиге или нормализации, но нагревается до более низких температур – 15...600°C. Цементацией называют химико-термический процесс поверхностного насыщения изделий из

стали углеродом с малым содержанием последнего (0,1...0,25%). При этом получают изделия с мягкой сердцевиной и твердой поверхностью.

Достоинством камерных печей, по сравнению с печами непрерывного действия, является их универсальность, т.е. возможность загружать в них каждый раз различные изделия, в том числе и неудобные для транспортирования в непрерывных печах, и варьировать режимы нагрева или термообработки в широких пределах. Однако для полного представления о тепловой нагрузке в камере таких печей, ее оценки по зонам и, в конечном счете, оптимального функционирования, необходимо иметь соответствующую математическую модель [1].

#### Анализ исследований и публикаций

В работе [2] рассмотрены вопросы энергосбережения в процессах теплообмена, где для каждого конкретного случая наряду с дифференциальным уравнением теплопроводности использованы новые математические условия и ряд дополнительных уравнений, что сильно усложняет построенную по такому методу математическую модель. В [3] рассмотрены численные методы решения тепловых задач нагрева металла и доказано, что результаты последних зависят не только от метода исследования, но и от сложности использованной математической модели. В работе [4] выполнен анализ пригодности известных моделей тепловых печей для решения задач энергоэффективности и показано, что наиболее приемлемой является та, которая представлена в работах [5-8]. В ней использована инженерная методика расчета.

#### Постановка задачи

Применение простых и несущих достаточно полную информацию о температурном поле методов расчета, синтезированных на основе совместного использования численных и инженерных методов, может дать вполне удовлетворительные результаты. Этому в значительной степени способствуют большие возможности современной вычислительной техники. Таким образом, в данной работе поставлена задача синтезировать математическую модель камерной нагревательной печи на основе инженерной методики расчета с использованием численных методов для оценки распределения температурного поля по ее зонам.

#### Изложение материала и результаты

Исходными данными для такой математической модели являются: режимы термообработки в камерной печи с выкатным подом – отжиг, отпуск и закалка; размеры заготовок нагреваемого металла – длина  $l$ , ширина  $b$ , и толщина  $S$ ; масса  $M$  и качество последнего; вид топлива – природный газ с теплотой сгорания  $Q_n^p$ . Расчет распределения температуры выполнен с помощью численного метода [3] и при использовании известной инженерной методики [5-8]. Последняя позволила учесть различные варианты способов отопления и изменение аэродинамических параметров печи (размеров и места расположения в ней вытяжных окон).

Последовательность метода состоит из следующих расчетов: теплообмена в рабочем пространстве печи в период ее разогрева; нагрева металла; теплообмена в рабочем пространстве печи в период охлаждения; охлаждения металла; составление теплового баланса периодов нагрева и выдержки. Особенностью расчета теплообмена излучением для камерных печей с нагревом в продуктах сгорания является то, что кладка в них не является адиабатной, а поглощает или отдает тепло. Она остывает во время загрузки и при посадке холодного металла, поэтому в первый период нагрева является существенным потребителем тепла и по температуре сильно отличается от адиабатной. С течением времени кладка прогревается и ее температура приближается к адиабатной.

Расчет суммарного удельного теплового потока,  $W_{T/M^2}$ , излучением от продуктов сгорания и кладки на металл выполняется по формуле [9]:

$$q_{изл} = C_S \cdot A \cdot \left[ \left( \frac{t_z + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_M + 273}{100} \right)^4 \right] + C_S \cdot B \cdot \left[ \left( \frac{t_k + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_M + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

а коэффициент нагрева:

$$M = 1 - (1 - \varepsilon_z) \cdot (1 - \varepsilon_k) \cdot (1 - \varphi_{к.м}) - (1 - \varepsilon_z)^2 \cdot (1 - \varepsilon_M) \cdot (1 - \varepsilon_k) \cdot \varphi_{к.м}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_z, \varepsilon_k, \varepsilon_M$  – степени черноты соответственно продуктов сгорания, кладки и металла;

$\varphi_{к.м}$  – угловой коэффициент излучения кладки на металл;

$C_S$  – теплоемкость, кДж/кг;

$t_z, t_k, t_M$  – температуры соответственно продуктов сгорания, кладки и металла, °С.

Здесь:

$$B = \frac{\varepsilon_m \cdot \varepsilon_k \cdot (1 - \varepsilon_z)}{M} \tag{3}$$

$$A = \frac{\varepsilon_z \cdot \varepsilon_m \cdot [1 + (1 - \varepsilon_z) \cdot (1 - \varepsilon_k) \cdot \varphi_{k,m}]}{M} \tag{4}$$

Для расчета степени черноты продуктов сгорания  $\varepsilon_{CO_2}$  и  $\varepsilon_{H_2O}$  использована подпрограмма, описанная в работе [5].

Математическая модель предполагает задание рассматриваемых текущих координат по осям  $x, y, z$  в заданный момент времени с интервалом изменения последних  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ . Задачей численного метода в трехмерной постановке является получение распределения температуры в камере печи. Для этого достаточно оценить температуру в дискретных точках исследуемой области. Одним из возможных методов ее получения является нахождение значений температуры в узловых точках сетки, на которую разбивается область. При этом для неизвестных значений температуры записываются и решаются алгебраические уравнения. Такое упрощение, связанное с использованием алгебраических, а не дифференциальных уравнений, и позволяет применить инженерную методику расчета [5-8].

Расчет температуры кладки в начальных условиях (заданы координаты положения металла в печи и температура газов) выполняется по формуле [9]:

$$t_{кл} = 100 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{t_m + 273}{100}\right)^4 + \left[\left(\frac{t_z + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_m + 273}{100}\right)^4\right] \cdot \left[1 + \varphi_{k,m} \cdot \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_z} \cdot \frac{\varepsilon_m \cdot (1 - \varepsilon_z)}{1 + \varphi_{k,m} \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot (1 - \varepsilon_m)}\right]^{-1}} - 273 \tag{5}$$

а температуры в камере печи в заданный момент времени [2]:

$$t = 100 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{t + 273}{100}\right)^4 + \left[\left(\frac{t + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t + 273}{100}\right)^4\right] \cdot \left[1 + \varphi \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon \cdot (1 - \varepsilon)}{1 + \varphi \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (1 - \varepsilon)}\right]^{-1}} - 273 \tag{6}$$

Температура в точке с заданными координатами определяется по дискретному уравнению, отражающему интенсивность переноса теплоты через поверхность контрольного объема (рис.1) [3]:

$$t_A = \frac{a_{x3} \cdot t_{x3} + a_{x4} \cdot t_{x4} + a_{y3} \cdot t_{y3} + a_{y4} \cdot t_{y4} + a_{z3} \cdot t_{z3} + a_{z4} \cdot t_{z4}}{a_A} \tag{7}$$

где  $a_{x3}, a_{x4}, a_{y3}, a_{y4}, a_{z3}, a_{z4}$  – коэффициенты проводимости в направлениях между точкой А и соседними точками в трехмерной плоскости ( $x, y, z$ ), определяемые как:

$$a_{x3} = \frac{k_{x2} \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{(\delta x)_{x2}}, \quad a = \frac{k \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{(\delta x)}, \quad a_{y3} = \frac{k_{y2} \cdot \Delta x \cdot \Delta z}{(\delta y)_{y2}}, \quad a_{y4} = \frac{k_{y1} \cdot \Delta x \cdot \Delta z}{(\delta y)_{y1}}, \tag{8}$$

$$a_{z4} = \frac{k_{z1} \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{(\delta z)_{z1}}, \quad a_{z4} = \frac{k_{z2} \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{(\delta z)_{z2}}, \quad a_A = a_{x3} + a_{x4} + a_{y3} + a_{y4} + a_{z3} + a_{z4}, \tag{9}$$

Здесь  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – расстояние между точками контрольного объема;

$\delta x, \delta y, \delta z$  – расстояние между точкой А и точкой контрольного объема ( $x1, x2, y1, y2, z1, z2$ ) в соответствии с рис.1;

$k$  – коэффициент теплоотдачи граней контрольного объема.

На рис.2, в качестве примера, приведены полученные поверхности распределения температур  $385^\circ\text{C}$  в камере печи для режима «отжига», который разделен на следующие периоды, в соответствии с заданным режимом термообработки: выдержки, охлаждения, выдержки, нагрева и снова выдержки.

Нагревательная печь представлена в виде параллелепипеда в трехмерном пространстве, с определенным началом координат и внутренними размерами каеры  $L \times B \times S$ . Заданы координаты окон для отвода продуктов сгорания из последней, загрузочного окна и места установки горелок. Камера условно разделена на две зоны нагрева, что обусловлено наличием на реальных печах двух термпар: сводовой и торцевой. Заданы координаты установленных торцевых термпар ХА в

комплекте с КСП-3 со шкалой (0...1000)°С и сводовой термопары ПП в комплекте с КСП-4 со шкалой (0...1300)°С.

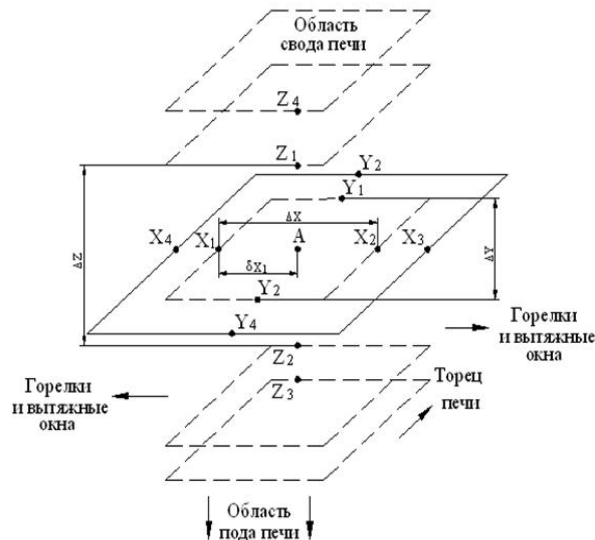


Рис.1. Контрольный объем в трехмерном пространстве

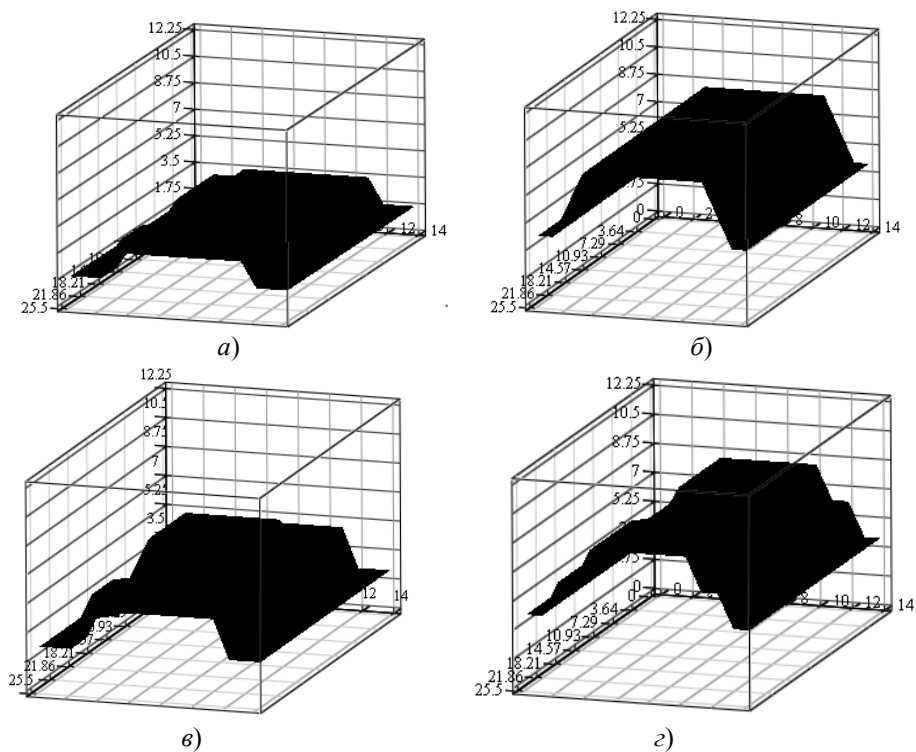


Рис.2. Поверхности распределения температур в камере печи в процессе «отжига»: а) выдержка; б) охлаждение; в) выдержка; г) нагрев

### Выводы

1. В результате получена математическая модель, прогнозирующая при заданных геометрических параметрах печи распределение температуры в ее камере. Она позволяет решать задачи энергоэффективности рассматриваемых объектов в зависимости от изменения способа их отопления и существующей аэродинамики.
2. Приведенные в качестве примера использования модели поверхности распределения температуры 385°С в камере нагревательной печи свидетельствуют о том, что в период ее нагрева в основном разогревается свод, а не под, с расположенными на нем заготовками, что не может не снизить энергоэффективность установки.

**Литература**

1. Ю.Г. Качан, В.В. Степкин, Ю.Б. Спекторова. О проблеме энергоэффективности нагревательных газовых печей // Вісник Східноукраїнського національного університету ім.В.Даля. – 2011. – № 11. – С.84–87.
2. Фокин В. М. Основы энергосбережения и энергоаудита. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006.– 256с.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с., ил.
4. Ю.Г. Качан, В.В. Степкин, Ю.Б. Спекторова. Анализ существующих математических моделей нагревательных печей // Metallургическая теплотехника: сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – 2011. – № 3(18). – С.15–21.
5. Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Степкин. Алгоритм расчета процесса горения топлива в методической печи // Теория и практика металлургии. – 2007. – №2–3. – С. 131–134.
6. Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Степкин. Расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве методической печи // Теория и практика металлургии – 2007. – №4–5. – С. 77–78.
7. Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Степкин. Моделирование процесса нагрева металла в методической печи // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2007. – №5. – С.74–76.
8. Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Степкин. Алгоритм расчета теплового баланса методической печи // ЗГИА, Металлургия (Наукові праці ЗДІА). – 2007 – № 16. – С. 120–126.
9. Расчет нагревательных и термических печей: Справ. изд. под ред. Тымчака В.М. и Гусовского В.Л. Авт.: Василькова С.Б., Генкина М.М., Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е., Масалович В.Г., Перимов А.А., Спивак Э.И., Тымчак В.М. М.: Металлургия, 1983.– 480 с.