

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОИЗВОДСТВА ПАРА В КОТЛОАГРЕГАТАХ СКД

Дзюба А.В.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

кафедра автоматике и телекоммуникаций

E-mail: andy@fcita.dn.ua

Abstract

Dzyuba A.V. Calculation of steam development technological conditions main parameters in super critical pressure steam boilers. Current paper presents method for calculation of steam development technological conditions main parameters in super critical pressure steam boilers. Differential schemes for heat boil model and hydrodynamical model based on mathematical model of water heating and steam generation in furnace space are obtained. Algorithym for calculation of steam development technological conditions main parameters is developed.

Общая постановка проблемы

В настоящее время теплоэнергетика является одной из приоритетных отраслей развития для Украины. Возрастающая роль теплосиловых установок повышает требования к качеству регулирования. Большая часть теплоэлектростанций используют паротурбинные установки, получающие пар от котлоагрегатов. Для повышения надежности и продления срока службы теплоэнергетического оборудования необходимо управлять переходными режимами работы котлоагрегата СКД таким образом, чтобы исключить значительные градиенты температур во времени и пространстве в теплоэнергетическом оборудовании котла. Системы управления, основанные на применении локальных регуляторов, не обеспечивают достаточной плавности переходных процессов. Решение такой задачи (управление траекториями переходных процессов) может быть осуществлено на основе достаточно точной математической модели, учитывающей пространственную распределенность основных параметров котлоагрегата. Таким образом, для создания эффективных компьютерных систем управления необходима математическая модель, позволяющая рассчитывать требуемые управляющие воздействия.

Математическая модель

Полученная модель учитывает основные статьи теплового баланса в топочном пространстве и теплофизических свойств воды и водяного пара, которые зависят от температуры и давления, а также с учетом расхода тепла на фазовый переход воды в пар.

Основные параметры внешнего теплообмена полагаются изменяющимися по высоте топочного пространства по ходу движения продуктов горения, возникающих при сжигании топлива. Задача внутреннего теплообмена решается только для одной трубы пакета. Для описания изменения параметров пароводяной смеси используется другая пространственная координата, что позволяет рассматривать фактическую скорость движения пароводяной смеси относительно моделируемой трубы. Между обеими координатами устанавливается простая взаимосвязь, позволяющая проводить совместный расчет задач внешнего и внутреннего теплообменов. Таким образом, движущаяся смесь в трубе имеет кроме абсолютной скорости также и скорость относительно координаты y (по высоте топки котла).

Процесс нагрева внешней стенки трубы описывает балансовое соотношение

$$S_T C_T \rho_T \frac{\partial t_1(\tau, y)}{\partial \tau} = \alpha_1^1 (t_\phi(\tau, y) - t_1(\tau, y)) + \sigma (t_\phi^4(\tau, y) - t_1^4(\tau, y) - \alpha_2^1 (t_1(\tau, y) - t_s(\tau, y)) - \frac{\lambda_T}{l_T} (t_1(\tau, y) - t_2(\tau, y)), \quad (1)$$

$$t_1(0, y) = t_1^0(y),$$

где: S_T - толщина стенки трубы; C_T - коэффициент теплопроводности металла трубы; ρ_T - плотность металла трубы; t_1 - температура стенки трубы условно передней к факелу; t_2 - температура стенки трубы условно задней от факела; t_ϕ - температура факела; α_1^1 - коэффициент конвективной теплопередачи от факела к передней стенке трубы; σ - коэффициент теплопередачи излучением от факела к передней стенке трубы; α_2^1 - коэффициент теплопередачи от передней стенки трубы к воде; λ_T - коэффициент теплопроводности металла трубы; l_T - характерный размер стенки трубы (половина длины окружности диаметра равного полусумме внутреннего и внешнего диаметра трубы); t_1^0 - начальное распределение температуры в передней стенке трубы;

Еще одно балансовое соотношение описывает передачу тепла через заднюю стенку трубы от воды к стенке котла. Влияние воздушной прослойки на теплообмен между трубой и стенкой котла учитывается коэффициентом теплопередачи α_2^4

$$S_T C_T \rho_T \frac{\partial t_2(\tau, y)}{\partial \tau} = \alpha_1^4 (t_\phi(\tau, y) - t_2(\tau, y)) - \alpha_2^4 (t_2(\tau, y) - t(\tau, s, y)) + \frac{\lambda_T}{l_T} (t_1(\tau, y) - t_2(\tau, y)) - \alpha_3^4 (t_2(\tau, y) - t_s(\tau, y)) \quad (2)$$

$$t_2(0, y) = t_2^0(y),$$

где: α_2^4 - коэффициент теплопередачи от задней стенки трубы к стенке котла; t_2^0 - начальное распределение температуры в задней стенке трубы.

Расчет температуры факела по высоте котла выполняется на основе следующего балансового уравнения:

$$S_\phi C_{nz} v_{nz} \frac{\partial t_\phi(\tau, y)}{\partial y} = - \frac{\partial q_f}{\partial y} \varepsilon + P_T [\alpha_1^1 (t_\phi(\tau, y) - t_1(\tau, y)) + \sigma (t_\phi^4(\tau, y) - t_1^4(\tau, y) + \alpha_1^4 (t_\phi(\tau, y) - t_2(\tau, y))], \quad (3)$$

где: S_ϕ - сечение факела; C_{nz} - коэффициент теплоемкости продуктов горения; v_{nz} - скорости движения продуктов горения; q_f - средний химический недожог (полагаем изменяющимся по экспоненте по высоте факела); ε - температура горения топлива; P_T - периметр трубы в поперечном сечении топки.

Для того чтобы учесть потери тепла на фазовый переход и гидравлическое сопротивление при движении в трубе пароводяной смеси, рассматривается гидродинамическая модель движения смеси в трубе.

Уравнение неразрывности представим в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (V_s \rho)}{\partial \xi} = 0 \quad (4)$$

где ξ - координата по длине трубопровода; S - сечение трубы, $S = \text{const}$; ρ - плотность пароводяной смеси; v_s - скорость движения смеси в трубе, V – удельный объём.

Уравнение движения для одномерного течения смеси:

$$\rho \frac{DV_s}{\partial \tau} + \frac{\partial P}{\partial \xi} + g\rho \frac{\partial h}{\partial \xi} + f_z = 0 \quad (5)$$

где f_z - гидравлическое сопротивление, отнесенное к единице длины трубы и к единице его сечения.

Уравнение сохранения энергии принимает следующий вид:

$$S \cdot \rho \left(\frac{\partial i}{\partial \tau} + V_s \frac{\partial i}{\partial \xi} \right) - S \left(\frac{\partial P}{\partial \tau} + V_s \frac{\partial P}{\partial \xi} \right) = q_{ct} + SV_s f_z \quad (6)$$

где P – давление, i - энтальпия смеси

q_{ct} - тепловой поток от стенки трубы к пароводяной смеси, приходящийся на единицу трубы.

Данная модель позволяет получить разностную схему для расчета основных тепловых параметров котлоагрегата.

Разностная схема

Для составления разностных схем тепловой и гидродинамической моделей котла необходимо ввести сетки по пространственным (длина и высота котла) и временной координате.

По длине котла: $\xi_i = ih, h_\xi = \frac{l_T}{N}, i = \overline{0, N}$.

По высоте котла: $y_i = ih, h_y = \frac{l_K}{N}, i = \overline{0, N}$.

Между шагом по длине h_ξ и высоте котла h_y существует связь: $h_y = \frac{l_K}{l_T} h_\xi$

По временной координате: $\tau_j = j\tau, j = 0, 1, 2, \dots$

По балансовому соотношению (1) составим разностную схему для нагрева внешней стенки трубы:

$$S_T C_T \rho_T \frac{t_{1,i}^{j+1} - t_{1,i}^j}{\tau} = \alpha_1^1 (t_{\phi,i}^j - t_{1,i}^j) + \sigma((t_{\phi,i}^j)^4 - (t_{1,i}^j)^4) - \alpha_2^1 (t_{1,i}^j - t_{s,i}^j) - \frac{\lambda_T}{l_T} (t_{1,i}^j - t_{2,i}^j) \quad (7)$$

$$t_{1,i}^0 = t_1^0(ih)$$

Разностную схему, описывающую передачу тепла через заднюю стенку трубы к стенке котла получим из балансового соотношения (2):

$$S_T C_T \rho_T \frac{t_{2,i}^{j+1} - t_{2,i}^j}{\tau} = \alpha_1^4 (t_{\phi,i}^j - t_{2,i}^j) - \alpha_2^4 (t_{2,i}^j - t_{k,i}^j) + \frac{\lambda_T}{l_T} (t_{1,i}^j - t_{2,i}^j) - \alpha_3^4 (t_{2,i}^j - t_{s,i}^j) \quad (8)$$

$$t_{2,i}^0 = t_2^0(ih)$$

Разностную схему для температуры факела по высоте котла составим из уравнения (3):

$$S_\phi C_{nz} v_{nz} \frac{t_{\phi,i+1}^j - t_{\phi,i}^j}{h_y} = - \frac{q_{f,i+1}^j - q_{f,i}^j}{h_y} \varepsilon + P_T [\alpha_1^1 (t_{\phi,i}^j - t_{1,i}^j) + \sigma((t_{\phi,i}^j)^4 - (t_{1,i}^j)^4) + \alpha_1^4 (t_{\phi,i}^j - t_{2,i}^j)], \quad (9)$$

Разностную схему гидродинамической модели, описывающей движение пароводяной смеси в трубе, получим из уравнения сохранения энергии (6), уравнения для одномерного течения смеси (5) и уравнения неразрывности (4):

$$\frac{u_i^{j+1} - u_i^j}{\tau} + v_{s,i}^j \frac{u_{i+1}^j - u_i^j}{h} + P_i^j \left\{ \frac{1}{\rho_i^{j+1}} - \frac{1}{\rho_i^j} \right\} \frac{1}{\tau} + v_{s,i}^j \left\{ \frac{1}{\rho_{i+1}^j} - \frac{1}{\rho_i^j} \right\} \frac{1}{h} \right\} = \frac{q_{d,i}^j}{S \rho_i^j} + v_{s,i}^j \frac{f_{z,i}^j}{\rho_i^j} \quad (10)$$

$$\rho_i^j \left\{ \frac{v_{s,i}^{j+1} - v_{s,i}^j}{\tau} + v_{s,i}^j \frac{v_{s,i+1}^j - v_{s,i}^j}{h} \right\} + \frac{P_{i+1}^{j+1} - P}{h} + g \rho_i^j \frac{h_{i+1} - h_i}{h} + f_{s,i}^j = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\rho_i^{j+1} - \rho_i^j}{\tau} + \frac{\rho_{i+1}^j v_{s,i+1}^j - \rho_i^j v_{s,i}^j}{h} = 0 \quad (12)$$

Давление в трубе найдем на основе уравнение состояния. Для расчета используем пакет программ "WaterSteam-Pro". Термодинамические свойства вычисляются по Формуляции 1997 года "Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam" IAPWS [2].

$$P_i^{j+1} = F(\rho_i^{j+1}, t_i^{j+1}) \quad (13)$$

Начальные условия:

$$P_i^0 = P_0(ih), v_{s,i}^0 = v_{s,0}(ih), u_i^0 = u_0(ih), \rho_i^0 = \rho_0(ih)$$

Граничные условия:

$$v'_{s,0} = v'_s(\tau)$$

Алгоритм расчета

1. По явной схеме из балансового соотношения (7) находим t_1 на $j+1$ временном шаге по всей высоте котла.
2. Из балансового соотношения (8) получаем t_2 на $j+1$ временном шаге по всей котла.
3. По явной схеме из балансового соотношения (9) находим t_0 по всей высоте котла.
4. Из разностной схемы для уравнения энергии (10) получаем u на $j+1$ временном шаге по всей длине котла, где q_0 на j -м шаге берем как $q_0 = \alpha_2^1(t_1 - t_s) + \alpha_3^4(t_2 - t_s(\tau, y))$.
5. По явной схеме для соотношения (11) определяем v_s на $j+1$ временном шаге по всей длине котла.
6. Из разностной схемы для уравнения неразрывности (12) находим ρ на $j+1$ временном шаге по всей длине котла.
7. Из уравнения состояния (13) находим P на $j+1$ временном шаге для всей длины котла.

Выводы.

Таким образом, полученная на основании математической модели нагрева воды и парообразования методика расчета позволяет определить параметры управления технологическими режимами производства пара в котлоагрегате СКД и получить математическую зависимость температуры пароводяной смеси на выходе из топочного пространства от расхода питательной воды и расхода топлива с учетом основных процессов теплообмена в топочном пространстве котла.

Список литературных источников

1. Bell, R. D., Astrom, K. J. Dynamic models for boiler-turbine-alternator units: Data logs and parameter estimation for a 160 MW unit. Report TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 2001
2. Ткаченко В.Н., Дзюба А.В. Математическая модель нагрева воды и парообразования в топочном пространстве котлоагрегата СКД// Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 107. – Донецьк: ДонНТУ, 2006 р.-, с. 17-22.
3. IAPWS «Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. International Association for the Properties of Water and Steam» / Executive Secretary R.B. Dooley. Electric Power Research Institute. Palo Alto. CA 94304, USA, 1997