

B. K. Muhanov², K. K. Erenchinov², G. D. Bazil², L. K. Abzhanova¹

K. I. Satpaev Kazakh National Research Technical University Almaty, Kazakhstan,
Almaty University of Power Engineering & Telecommunications Almaty, Kazakhstan.
E-mail: laulasyn@mail.ru

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF BOILERS AS CONTROL SYSTEM

Abstract. The urgency of the problem of increasing the efficiency of the heat sources is a top priority in the development of new heat-generating devices and modernization of existing ones. Consideration of all processes occurring in the boiler will be carried out with the device for the synthesis of more efficient control.

Studying the contemporary works on boiler control, we should note that due to the complexity of the processes occurring in the boiler. Many works are devoted to individual paths, constituting the boiler as a whole. The subsystems of the boiler are considered independently by modern developers. For instance, A.V. Gil conducted researches on combustion processes. A.E. Medvedev wrote papers on forced-draft plants. A.A. Ponamorenko, V.F. Lozhechnik and a group of other scientists examined the gas-air path of the thermal power boiler. D.L. Piotrowski, N.A. Akilova and D.A. Telichenko considered the vapor-air path.

Mathematical models proposed by the above-mentioned authors are independent description of a particular process in the boiler, stating that other dynamic multivariable processes and systems can generally be neglected.

An analysis of the literature and practical problems of boiler control led to the conclusion about the necessity of constructing a mathematical model that takes into account the interdependence of all the control processes of the object as a whole.

This article provides an overview of existing mathematical models, giving the idea of a separate part of the boiler unit. The author tried to group mathematical models to paths that comprise the boiler unit. First, the mathematical model of the combustion process is given. Then the model of gas-air path and the water path is presented.

Keywords: power boilers, fuel path, gas-air path, water path, mathematical model, differential equations, balance equations.

УДК 621.5

Б. К. Муханов², К. К. Еренчинов², Г. Д. Базил², Л. К. Абжанова¹

Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева,
Алматы, Казахстан,
Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОТЛОАГРЕГАТОВ КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье дается обзор существующих математических моделей, дающих представление об отдельной части котельного агрегата. Автор попытался сгруппировать математические модели по трактам, составляющих котельный агрегат. Сначала приводятся математические модели процесса горения. Затем модели газо-воздушного тракта. Далее водяного тракта.

Ключевые слова: энергетические котлы, топливный тракт, газо-воздушный тракт, водяной тракт, математическая модель, дифференциальные уравнения, балансовые уравнения.

Энергетические котлоагрегаты – класс сложных теплоэнергетических установок, функционирующих в статических и динамических режимах, состоящих из большого числа разнотипных и повторяющихся элементов, объединенных технологическими связями, материальных и энергетических потоков между элементами.

Упрощенная технологическая схема теплоэнергетической установки приведена на рисунке 1.

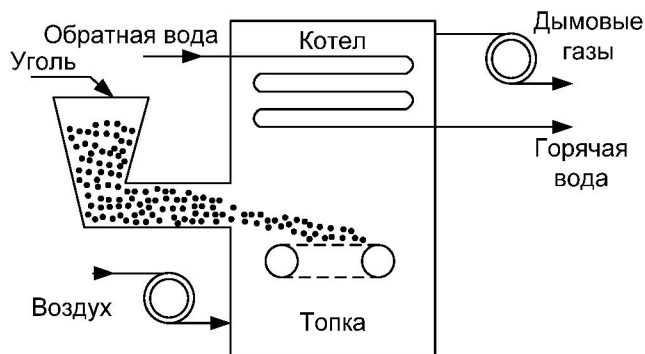


Рисунок 1 – Схема водогрейного котла

В целях упрощения и понимания процессов разной природы в котельных агрегатах обычно прибегают к разделению котельной на несколько частей. Каждый исследователь делит котел по своему усмотрению, например на пять или на три части. В целом в котле протекают такие процессы как, горение топлива, нагревание рабочей жидкости, нагнетание воздуха и вытяжка образовавшихся газов. (рисунок 2) [1]. Основным теплоносителем агрегата является вода.



Рисунок 2 – Структурная схема водяного котла

При описании математической модели процессов выработки тепловой энергии в классическом варианте используются балансовые уравнения сохранения массы, энергии и количества движений в котлоагрегатах в целом, либо их составных частей. Общий вид модели можно представить в следующем виде.

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}, \\ \frac{dQ}{dt} &= G_{\text{вх}} T_{\text{вх}} c\rho - G_{\text{вых}} T_{\text{вых}} c\rho, \\ dF - \frac{1}{\rho} dp - \frac{1}{2} d\mathcal{G}^2 &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где V – объем; $G_{\text{вх}}$ – расход входного потока; $G_{\text{вых}}$ – расход выходного потока; Q – количества тепла; $T_{\text{вх}}$ – температура на входе; $T_{\text{вых}}$ – температура на выходе; c – теплоемкость потока; ρ – плотность потока; F – сумма сил, действующих в потоке; p – гидродинамическое давление; \mathcal{G} – скорость движения потока.

Однако в зависимости от решаемой задачи, некоторые авторы описывают математическую модель процесса горения топлива [2, 3], другие же описывают процессы, происходящие в газозвдушном тракте [4-9], а некоторые – процессы нагревания теплоносителя [10]. В разных работах данные уравнения представляются по-разному, однако в большинстве случаев они описываются в частных производных.

Что касается описания процессов горения топлива, наиболее подробно математическая модель описывается в [2], где особое внимание уделяется математической постановке задачи сжигания полифракционного твердого топлива в камерных топках котельных агрегатов, верификации и адекватности численных результатов.

Считается, что подача топливовоздушной смеси и воздуха не зависит от времени и осуществляется равномерно по сечениям амбразуры горелок. Поступающие в топку полидисперсные частицы угольного топлива, содержат влагу после пылесистемы $W^{ni} \leq W^{su}$. Перемещаясь по топочному объему, частицы топлива продолжают нагреваться за счет радиационно-конвективного теплообмена и их сушка продолжается в топке. При дальнейшем нагреве (выше 600 К) начинается выход летучих компонентов, их воспламенение, горение и догорание коксового остатка. Предполагается, что газовая среда в топке состоит из химически инертных молекулярного азота n_2 , двуокиси углерода CO_2 , паров воды H_2O , а также реагирующих O_2 , CO и летучих.

Математическая модель включает:

1) Уравнение изменения массы газовой смеси за счет выхода влаги, летучих и горения коксового остатка,

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = J_{evap} + J_{vap} + J_{char}, \quad (2)$$

где ρ – плотность газовой смеси; U_i ($i = 1, 2, 3$) – компоненты скорости газа; x_i ($i = 1, 2, 3$) – декартовы координаты; J_{evap} , J_{vap} , J_{char} – массовые скорости испарения влаги, выхода летучих и догорания коксового остатка.

2) Уравнения изменения массы газовых компонентов,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho C_{N_2} U_i}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{N_2}}{\partial x_i} \right), \\ \frac{\partial \rho C_{O_2} U_i}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x_i} \right) - \beta_{vol} J_{vol} - \beta_{CO} J_{CO} - J_{char}^{O_2}, \\ \frac{\partial \rho C_{vol} U_i}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{vol}}{\partial x_i} \right) + \alpha_{vap} J_{vap} - J_{vol}, \\ \frac{\partial \rho C_{CO} U_i}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{CO}}{\partial x_i} \right) + J_{char}^{CO} - J_{CO}, \\ \frac{\partial \rho C_{H_2O} U_i}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial x_i} \right) + J_{evap} + \gamma(1 + \beta_{vol}) J_{vol}, \\ \sum_{j=N_2, O_2, vol, CO, CO_2, H_2O} C_j &= 1, \quad (C_{N_2} + C_{O_2} + C_{vol} + C_{CO} + C_{CO_2} + C_{H_2O} = 1). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь C_j – концентрации газовых компонентов; μ_t , Sc_t – турбулентная вязкость газа и турбулентное число Шмидта ($Sc_t = 0,9$); J_{vol} – массовая скорость горения летучих, зависящая от скорости химической реакции горения углеводородов $C_m H_n$, β_{vol} – количество O_2 , необходимое для сгорания 1 кг летучих, α_{vap} – массовая доля летучих.

3) Уравнения количества движения для газовой фазы

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g_j + F_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[\rho k + (\mu + \mu_T) \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] \right]; j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где p – давление; μ_T – турбулентная вязкость; μ – молекулярная вязкость; k – энергия турбулентности; δ_{ij} – символы Кронеккера ($\delta_{ii} = 1$; $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$); g_j – проекции ускорения свободного падения на декартовы оси; F_j – компоненты силы межфазного взаимодействия между частицами и несущей средой.

4) Уравнение энергии для газа

$$\frac{\partial \rho U_i c T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + Q_{vol} J_{vol} + Q_{CO} J_{CO} - \frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i} + \Theta, \quad (5)$$

где c – теплоемкость смеси газов, Pr , Pr_t – молекулярное и турбулентное ($Pr_t = 0,9$) числа Прандтля; T – температура газа; Q_{vol} , Q_{CO} – тепловые эффекты реакций горения летучих и угарного газа; q_i^{rad} – компоненты вектора радиационного теплового потока; Θ – интенсивность тепло-обмена между несущей средой и частицами.

5) Уравнение состояния

$$\rho = \frac{p}{R_0 T \left[\frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{C_{vol}}{M_{vol}} + \frac{C_{CO}}{M_{CO}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right]}, \quad (6)$$

где M_j – молекулярные веса компонентов газовой смеси; R_0 – универсальная газовая постоянная; p – давление.

Поведение топливных и золовых частиц в топочном объеме описывается в рамках Лагранжева подхода. При этом интенсивность их тепло-массообмена с окружающей топочной средой определяется одной из следующих стадий:

6) Нагрев и сушка частицы. Если температура частицы T_p ниже температуры кипения воды, то в этом случае изменение ее массы и температуры описывается по следующим балансовым соотношениям:

$$\frac{dm_p}{dt} = h_c A_p \left[(\rho C_{H_2O})_s - (\rho C_{H_2O})_\infty \right],$$

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) + L_{vap} \frac{dm_p}{dt}, \quad (7)$$

где m_p – текущая масса частицы; T_p – текущая температура частицы; c_p – теплоемкость; A_p – площадь поверхности частицы; h_c и h – коэффициенты массо- и теплообмена; $(C_{H_2O})_s$ и $(C_{H_2O})_\infty$ – концентрация водяных паров у поверхности частиц и в газе; ε_p – степень черноты частицы; σ – постоянная Стефана-Больцмана; θ_R – температура излучения; L_{vap} – теплота парообразования, T_∞ – локальная температура сплошной среды.

7) Когда температура частицы достигает значения, соответствующего температуре кипения, предполагается, что в этом случае все потери, связанные с быстрым испарением влаги, компенсируются приходящими конвективно-радиационными потоками тепла. Поэтому до выполнения

условия $m_p = (1 - W_t^r / 100)m_p^0$ (W_t^r – влажность угольной пыли после размола в %; m_p^0 – начальная масса частицы) температура частицы не меняется, а масса частицы предсказывается по закону (14).

8) Выход летучих. После сушки частицы и достижения температуры начала выхода летучих T_{vap} начинается процесс термической деструкции частицы, в результате которого в окружающую сплошную среду поступают горючие (углеводороды) и инертные летучие продукты. Математическое моделирование выхода летучих осуществляется аналогично пп. 6 и 7.

9) Догорание коксового остатка. Когда заканчивается выход летучих из частиц, при определенном уровне локальных температур происходит воспламенение и догорание коксового остатка. В этом случае уравнения теплового баланса и изменения массы запишутся следующим образом:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p (T_\infty - T_p) - Q \frac{dm_p}{dt} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4),$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -h_D A_p (\rho C_{O_2})_\infty, \quad (8)$$

где Q – тепловой эффект от горения кокса; $(C_{O_2})_\infty$ – локальная концентрация молекулярного кислорода; h_D – скорость горения коксового остатка с учетом диффузии кислорода к поверхности частицы.

На основе вышеизложенных уравнений в [3] осуществлено моделирование на прикладном программном пакете Fire 3D, где проведен анализ термо-газодинамических процессов в топочной камере котла БКЗ-420-140 при различных параметрах крутки топливно-воздушной смеси и вторичного воздуха.

Однако для полномасштабного исследования водогрейного котла, кроме процессов горения, необходимо исследовать процессы тепло и массопередачи, как от топки, так и от газозвушных и водяных трактов. Процесс массопередачи обычно рассматривают при исследовании процессов газозвушного тракта. Так, например, в [4] построена модель газозвушного тракта, на основании закона сохранения масс (1), где с помощью физических законов как закон сохранения масс, уравнения состояния, уравнения гидродинамики, математическую модель преобразуют в систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} \dot{G}_{\text{вх}} = -\zeta_6 \frac{S_6}{l_6} G_{\text{вх}} + k_{\text{об}} \frac{S_6}{l_6} \omega_{\text{об}} - \frac{S_6}{l_6} p_m; \\ \dot{G}_{\text{вых}} = -\zeta_2 \frac{S_2}{l_2} G_{\text{вых}} + k_{\text{дс}} \frac{S_2}{l_2} \omega_{\text{дс}} - \frac{S_2}{l_2} p_m; \\ \dot{p}_m = \frac{1}{k_{\text{сост}}} G_{\text{вх}} - \frac{1}{k_{\text{сост}}} G_{\text{вых}} \end{cases} \quad (9)$$

где ζ_6 , ζ_2 – коэффициенты аэродинамического сопротивления воздушного и газового участков соответственно; l_6 – длина воздушного участка; S_6 – площадь поперечного сечения воздушного участка; l_2 – длина газового участка; S_2 – площадь поперечного сечения газового участка; $k_{\text{об}}$ – коэффициент состояния; p_m – разрежение в топке; $\omega_{\text{об}}$ – скорость вращения дутьевого вентилятора; $\omega_{\text{дс}}$ – скорость вращения дымососа.

Стоит отметить, что под массой здесь имеется в виду подаваемый в котел воздух и дымовые газы. Данная модель используется с целью выявления причин пульсации разрежения в топке котла. Для этого в качестве регулируемых величин рассматриваются расход воздуха, расход газа и разрежение в топке. Управляющими воздействиями принимаются расход нагнетаемого и удаляемого потоков дутьевых вентиляторов и дымососов соответственно. В результате осуществляется переход в пространство состояний, где в качестве переменных состояния принимаются расход воздуха, расход газа и разрежение в топке, а в качестве управляющих величин принимаются

скорость вращения двигателя дутьевого вентилятора и дымососа. Полученные результаты промоделированы в среде Simulink и получены переходные процессы расхода воздуха, газа и разряжения в топке.

В статье [5] также рассматривается газозвдушный тракт котельного агрегата. Математическая модель газозвдушного тракта, как и в [4], приводится дифференциальными уравнениями для газохода и воздуховода. В качестве регулируемых величин принимается: разрежение дымовых газов в верхней части топочной камеры (давление в топке) и избыток воздуха (его определяют по содержанию кислорода в дымовых газах CO_2), которые характеризуют экономичность процесса горения (рисунок 3).

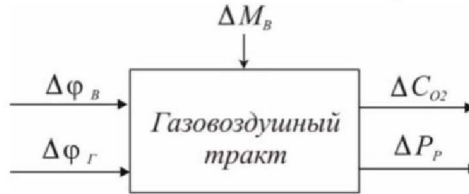


Рисунок 3 – Структурная схема газозвдушного тракта

Внешним возмущением принимается изменение расхода уходящих газов на притоке ΔM . Уравнение изменения давления в топке имеет вид

$$T_2 \Delta \ddot{P}_p + T_1 \Delta \dot{P}_p + \Delta P_p = k_4 \Delta \dot{\varphi}_z + k_3 \Delta \varphi_z + k_2 \Delta \dot{M} + k_1 \Delta M \quad (10)$$

Уравнение воздуховода вид

$$T_4 \Delta \ddot{M}_L + T_3 \Delta \dot{M}_L + \Delta M_L = k_6 \Delta \dot{\varphi}_B + k_5 \Delta \varphi_B \quad (11)$$

Уравнение газохода

$$T_6 \Delta \ddot{C}_{O_2} + T_5 \Delta \dot{C}_{O_2} + \Delta C_{O_2} = k_8 \Delta M_L (t - \tau) + k_7 \Delta M_B (t - \tau) \quad (12)$$

где P_p - давление в топке; φ_z, φ_B - положение направляющего аппарата дымососа и дутьевого вентилятора соответственно; ΔM - изменение расхода уходящих газов на притоке; M_L, M_B - расходы воздуха и топлива соответственно; τ - время транспортного запаздывания.

В результате, полученная многорежимная дифференциальная модель котла, линеаризованная в окрестностях возможных режимов функционирования, переводиться в пространство состояний, позволяющая исследовать возможности применения новых алгоритмов управления, в том числе оптимального многомерного управления.

В статье [6] предлагается математическая модель для анализа колебательных процессов в камере сгорания аппаратов пульсирующего горения. Исследование процессов теплопереноса в аэродинамике решено с использованием уравнения Навье-Стокса. Процессы исследуются касательно трех областей: камеры сгорания, водяной рубашки и стен.

Процесс горения состоит из уравнений определения температуры, давления, скоростей движения в газе, энергии и переменной плотности

$$\rho_z c_z \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial R} + V \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = \lambda_z \left(\frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) + \frac{\alpha_z}{l} (T_z - T_0) + KW(A, T) + Q_z \quad (13)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial R} + V \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial P}{\partial R} + v_z \left(\frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} + \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) + \left(\zeta - \frac{v_z}{3} \right) \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R \partial Z} + \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial R} - \frac{U}{R^2} \right) \right. \\ \left. \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial R} + V \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial P}{\partial Z} + v_z \left(\frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial R} + \frac{\partial^2 V}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) + \left(\zeta - \frac{v_z}{3} \right) \left(\frac{\partial^2 V}{\partial R \partial Z} + \frac{\partial^2 V}{\partial R^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial R} - \frac{V}{R^2} \right) \right. \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + U \frac{\partial A}{\partial R} + V \frac{\partial A}{\partial Z} = K_1 D \left(\frac{1}{R} \frac{\partial A}{\partial R} + \frac{\partial^2 A}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial Z^2} \right) - K_2 W(A, T) \quad (15)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_z \frac{U}{R} + \rho_z \frac{\partial U}{\partial R} + \rho_z \frac{\partial U}{\partial Z} = 0 \quad (16)$$

Уравнения движения жидкости в водяной рубашке составляют уравнение движения (17), уравнение теплопроводности (18), уравнение неразрывности (19):

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial R} + V \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho_{жк}} \frac{\partial P}{\partial R} + v_{жк} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} + \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) + \beta_{жк} \bar{f}(T_{жк} - T_0) \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial R} + V \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho_{жк}} \frac{\partial P}{\partial Z} + v_{жк} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial R} + \frac{\partial^2 V}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) + KP \end{cases} \quad (17)$$

$$\rho_{жк} c_{жк} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial R} + V \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = \lambda_{жк} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) + \frac{\alpha_{жк}}{l} (T_{жк} - T_0) \quad (18)$$

$$\frac{\partial U}{\partial R} + \frac{\partial V}{\partial Z} + \frac{U}{R} = 0 \quad (19)$$

Уравнение теплопроводности стенок

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_{cm1}}{c_{cm1} \rho_{cm1}} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_{cm2}}{c_{cm2} \rho_{cm2}} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (21)$$

Вследствие преобразования получаем уравнения для процесса горения, движения жидкости в трубах, и теплопроводности в стенках в безразмерных величинах с граничными условиями.

В [7, 8] приводятся результаты теплового расчета котла БКЗ 420-140-9 на основании схем парового и газозвоздушного трактов. Математическая модель котла приведена для однофазных участков и двухфазных участков как совокупность взаимодействия статических, параметрических и динамических моделей, которая состоит из материального баланса, теплового баланса пароводяного тракта, расхода рабочей среды, теплопередачи и газозвоздушного тракта.

Для двухфазного участка модели материального и теплового балансов

$$\lambda_{эжк} - \lambda_1 = T_1 \varphi_{p1} + T_2 \frac{d\varphi_h}{dt} - T_3 \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (23)$$

$$T_4 \frac{d\varphi_{p1}}{dt} + T_5 \frac{d\varphi_h}{dt} + T_6 \frac{d\lambda_1}{dt} = a_1 \lambda_{эжк} - \lambda_1 + a_2 \varphi_{p1} + a_3 \varphi_{\theta 1} + a_4 \psi_1 \quad (24)$$

$$B_1 \lambda_i + B_2 \varphi_{pi} + B_3 \varphi_{\theta i} + B_4 \varphi_{pi+1} + B_5 \varphi_{\theta i+1} + B_6 \mu_T = 0 \quad (25)$$

Для однофазного участка модели материального и теплового балансов

$$\lambda_{i-1} - \lambda_i = T_7 \frac{d\varphi_{pi}}{dt} - T_8 \frac{d\varphi_{\theta i}}{dt} \quad (26)$$

$$a_5 \lambda_{i-1} - a_6 \lambda_i + a_7 \psi_i + a_8 \varphi_{pi-1} + a_9 \varphi_{\theta i-1} + a_{10} \varphi_{pi} + a_{11} \varphi_{\theta i} = T_9 \frac{d\varphi_{pi}}{dt} + T_{10} \frac{d\varphi_{\theta i}}{dt} \quad (27)$$

$$B_1 \varphi_i + B_2 \varphi_{\theta i-1} + B_3 \varphi_{\theta i} + B_4 \mu_B + B_5 \Delta r + B_6 \mu_L = 0 \quad (28)$$

где $T_1 \div T_{10}$; $B_1 \div B_6$; $a_1 \div a_{11}$ - расчетные коэффициенты, исходя из теплового, гидравлического и др. расчетов котла; $\lambda_{эжк}$ - расход воды на выходе из экономайзера; λ_1, λ_i - расход рабочей среды на выходе из циркуляционного участка; $\varphi_{p1}, \varphi_{pi}$ - давление в конце циркуляционного контура; φ_h - уровень воды в барабане; $\varphi_{\theta 1}, \varphi_{\theta i}$ - температура рабочей среды; ψ_1, ψ_i - тепловосприятие на участке; $i, i-1$ - индексы для параметров на выходах из расчетных участков.

Котлоагрегат в работе [9] также условно разбивают на теплообменники (ТО1, ТО2 и ТО3) паровой и газовый тракты котельного агрегата. Границы разбиения определяются общей компоновкой котлоагрегата и его конструктивными параметрами. В ТО 1 происходит нагревание воды до температуры кипения, в ТО 2 вода превращается в пар, а в ТО 3 пар доводится до нужной температуры. При решении исследовательских задач процессы в ТО представляются нестационарной пространственно одномерной математической моделью, содержащей уравнения с частным производными. Общим способом решения таких задач являются сеточные методы. Для решения задач моделирования динамики теплоэнергетического оборудования на тепловой электростанции в реальном масштабе времени с учетом экономичности использования ресурсов ЭВМ иногда целесообразно создавать модели ТО как объектов с сосредоточенными параметрами.

Уравнение теплового баланса нагреваемой среды:

$$V_6 \rho_6 (P, \bar{I}) \frac{d\bar{I}}{d\tau} + G_6 (I - I_{ex}) = \alpha_6 F_6 [\theta - t_6(p, \bar{I})], \quad (29)$$

уравнение теплового баланса металла:

$$M_m c_m \frac{d\theta}{d\tau} = Q_l + \alpha_2 F_2 (\bar{t}_2 - \theta) - \alpha_6 F_6 [\theta - t_6(p, \bar{I})], \quad (30)$$

уравнение теплового баланса греющих газов:

$$V_2 \rho_2 c_2 \frac{d\bar{t}_2}{d\tau} + c_2 G_2 (t_2 - t_{2,ex}) = -\alpha_2 F_2 [t_2 - \theta], \quad (31)$$

уравнение материального баланса теплоносителя:

$$V_6 \frac{d\rho_6(p, \bar{I})}{d\tau} = G_{2,ex} - G_6, \quad (32)$$

уравнение материального баланса газов:

$$V_2 \frac{d\rho_2}{d\tau} = G_{2,ex} - G_6. \quad (33)$$

Здесь \bar{I} – средняя энтальпия теплоносителя, а \bar{t}_2 – средняя температура газа, Q_l – поток лучистого тепла.

Опыт применения подобных моделей показывает, что в большинстве случаев они обеспечивают приемлемую точность при описании системы ТО, инерционность тепловых процессов в которой существенно выше, чем в единичном элементе.

Выводы. В результате исследования существующих моделей, обнаружено что нет полноценной модели описывающей котельный агрегат как одно целое. Все рассмотренные статьи описывают определенную часть котельного тракта, что не дает полного математического описания процесса протекающего в агрегате.

Анализ математических моделей котлоагрегатов показал, что аналитическое описание процессов массо- и теплопередачи, а также массо- и теплообмена в основном описаны уравнениями баланса массы, тепла и количества движений. В основном модели описываются в дифференциальной форме описания. В некоторых случаях в частных производных.

В моделях [4, 5] для моделирования системы управления отдельными элементами, либо котлоагрегатом в целом, авторы переходят в пространство состояний, что представляется приемлемым с точки зрения теории управления. Однако для моделирования котлоагрегата как много-связного объекта, учитывающего весь технологический процесс выработки тепловой энергии, начиная с топливного тракта до передачи теплоносителя в турбину, более приемлемой для нас, как для «управленцев», представляются модели (23)-(31) и (45)-(49).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Садыков Р.А., Антропов Д.Н., Крайнов Д.В., Линючкин Д.Л. Компьютерная симуляция теплогенерирующих установок // Известия КазГАСУ. – 2009. – № 1 (11). – С. 196-200.
- [2] Гиль А.В. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода: монография – Томск: STT, 2011. – 81 с.
- [3] Гиль А.В., Заворин А.С., Старченко А.В., Обухов С.В. Численное исследование влияния параметра крутки горелочных устройств на термогазодинамические процессы в топке котла БКЗ-420-140. // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 26-31.

- [4] Понаморев А.А. Модель газовоздушного тракта теплоэнергетического котла как объекта регулирования // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 3(61). – С. 19-28.
- [5] Ложечников В.Ф., Михайленко В.С., Максименко И.Н. Аналитическая многорежимная математическая модель динамики газовоздушного тракта барабанного котла средней мощности // ААЭКС. – 2007. – № 2. – С. 29-33.
- [6] Миловская Л.С., Мозговой Н.В., Отришко Т.А. Математическая модель процессов теплообмена в аппаратах пульсирующего горения // Электротехнические комплексы и системы. – 2015. – №1. – С. 24-28.
- [7] Беднаржевский В.С. Математическое моделирование и компьютерные технологии в задачах проектирования энергетических паровых котлов // Вычислительные технологии. – 2002. – Т. 7, № 6. – С. 13-23.
- [8] Беднаржевский В.С., Добротина Г.Б., Левкин И.В., Поздеев С.Ю., Романов А.А. Применение информационных технологий при компьютерном моделировании паровых котлов // Известия АлтГУ. – 2003. – № 1. – С. 30-33.
- [9] Нгуен х.д. моделирование теплоэнергетических установок на основе теории дифференциально-алгебраических уравнений в частных производных: дис. ... Канд. Техн. Наук. – Иркутск, 2014.

REFERENCES

- [1] Sadykov R. A., Antropov D.H., Krainov D.V., Linyuchkin D.L., Komputernaya simulyaciya teplogeneriruyushih ustanovok, Izvestiya KazGASU, **2009**, №1 (11), s. 196-200. (in Russ.)
- [2] Gil A.V., Primeneniye chislennogo modelirovaniya topochnyh processov dlya praktiki perevoda: monografiya, Tomsk: STT, **2011**, 81 c. (in Russ.)
- [3] Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V., Obuhov S.V., Chislennoe issledovanie vliyaniya parametra krutki gorelochnyh ustroystv na termogazodinamicheskie processy v topke kotla BKZ-420-140, Izvestiya TPU, **2013**, T. 323, № 4, s. 26-31. (in Russ.)
- [4] Ponomarev A. A., Model gazovozdushnogo trakta teploenergeticheskogo kotla kak obekta regulirovaniya, Sbornik nauchnyh trudov NGTU, **2010**, № 3(61), s. 19-28. (in Russ.)
- [5] Lozhechnikov V.F., Mihailenko V.S., Maksimenko I.N., Analiticheskaya mnogorezhimnaya matematicheskaya model dinamiki gazovozdushnogo trakta barabannogo kotla srednei moshnosti, AAЕКС, **2007**, №2., s. 29-33. (in Russ.)
- [6] Milovskaya L.S., Mozgovoy N.V., Otrishko T. A., Matematicheskaya model processov teplomassoobmena v apparatah pulsiruyushogo goreniya, Elektrotehnicheskiye komplekсы b sistemy, **2015**, №1, s. 24-28. (in Russ.)
- [7] Bernardzhevskii V.S., Matematicheskoye modelirovaniye I kompyuternye tehnologii v zadachah proektirovaniya energeticheskikh parovykh kotlov, Vychislitelnye tehnologii, **2002**, T.7, № 6, s. 13-23. (in Russ.)
- [8] Bednarzhevskij V.S., Dobrotina G.B., Levkin I.V., Pozdeev S.Ju., Romanov A.A. Primenenie informacionnyh tehnologij pri komp'yuternom modelirovanii parovykh kotlov // Izvestija AltGU. – **2003**. – № 1. – S. 30-33.
- [9] Nguen h.d., modelirovaniye teploenergeticheskikh ustanovok na osnove teorii differencialno-algebraicheskikh uravneniy v chastnykh proizvodnyh, dissertaciya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tehnikeskikh nauk, irkutsk, 2014. (in russ.)

ҚАЗАНДЫҚ ҚҰРЫЛҒЫСЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛДЕРІН БАСҚАРУ ОБЪЕКТІЛЕРІ РЕТІНДЕ ТАЛДАУ

Б. К. Муханов², К. К. Еренчинов², Г. Д. Базил², Л. К. Абжанова¹

Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан,
Алматы Энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

Аннотация. Берілген мақалада қазанды құрығының дербес бөліктерін сипаттайтын математикалық моделдерге шолу жасалған. Автор өз кезегінде берілген моделдерді жану, ауа-газ және су жолдары бөліктеріне жіктеп топтастырған. Алдымен жану жолы, сосын ауа-газ жолы, кейін су жолы бөліктерінің математикалық сипатталуы келтірілген.

Түйін сөздер: энергетикалық қазандықтар, жану жолы, ауа-газ жолы, су жолы, математикалық модел, дифференциалды теңдеу, тепе-теңдік теңдеуі.