

СИСТЕМНО СТРУКТУРИРОВАННАЯ АДАПТАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КОТЛАХ

К.В. Осинцев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Представлена модель процессов теплообмена и горения в котельных агрегатах, разработанная методами системного анализа и адаптированная к пятиступенчатой схеме процессов. Для каждой из ступеней (локальных систем) сформулированы условия разделения всех факторов и параметров на входные, выходные и факторы управления, определены связи и границы между локальными системами. В качестве модельной схемы компоновки конструктивных элементов котельных агрегатов рассмотрена наиболее распространенная П-образная схема, которая легко преобразуется в другие схемы. Многообразие систем подготовки и подачи компонентов горения топлива унифицируется по выходным параметрам, которые являются входными параметрами для зоны интенсивного горения. Распределение температуры по зоне интенсивного горения топлива и основному объему топки реализовано на основе применения представлений теории вероятности к потоку топливо-воздушной смеси. Решенная задача является этапом при режимной и конструктивной оптимизации котельных агрегатов в стационарных условиях, в основном промышленных ТЭС средних параметров, но может быть распространена на котельные агрегаты других типов и параметров.

Ключевые слова: котельный агрегат, структура, управление, теплообмен, система потоков.

Введение

При проектировании котельных агрегатов (КА) возникает задача выбора варианта его компоновки и расчета тепловой схемы, при эксплуатации эта задача трансформируется в определение оптимальных технико-экономических показателей при учете режимных требований, в том числе, при изменении условий топливоснабжения. Конструктивные варианты реализации этих задач могут различаться составом поверхностей нагрева, последовательностью их расположения в потоке продуктов сгорания и включения по рабочему телу, температурой и величиной тепловых потоков в характерных сечениях и др. Тепловая схема КА предопределяет величину температурного перепада и интенсивность теплопередачи, что связано с уровнем капитальных и текущих затрат на производство энергии.

Энергетика РФ и других стран накопила обширный и достоверный материал по влиянию различных факторов конструктивного и режимного характера на реализацию тепловых схем и компоновок КА в направлении повышения их надежности и эффективности. В РФ при разработке тепловой схемы КА применяются два подхода – метод прототипов и метод исходной тепловой схемы; оба метода являются итерационными и требуют большого объема уточняющих вычислений. В качестве методик тепловых и аэромеханических расчетов применяются материалы нормативных методов [1, 2]. За рубежом ведущие котлостроительные объединения, например Alstom, применяют фир-

менные пакеты программ, которые уточняются и совершенствуются на основе опыта эксплуатации КА [3–5].

Ниже изложен альтернативный подход с позиций теории управления и теории вероятностей, что позволяет реализовать системно структурированную адаптацию процессов теплопередачи в КА, на основе которой возможно построение интегральной тепловой схемы агрегата с учетом конструктивных и режимных особенностей.

Постановка задачи, выбор методов решения

При синтезе систем управления процессами в котельном агрегате, как в любом техническом или технологическом устройстве, объект в статическом или динамическом режиме взаимодействует с внешней средой, что можно количественно оценить через входы с вектором $X_{вх}(\tau)$ и выходы с вектором $Y_{вых}(\tau)$; синтез системы также методически относится к управлению.

Входные контролируемые переменные, иначе называемые контролируруемыми возмущениями, $X(\tau)$ и управляющие переменные (управляющие воздействия) $U(\tau)$ в совокупности образуют $X_{вх}(\tau)$. Возмущающие переменные (возмущения) $E(\tau)$ – случайным образом изменяющиеся во времени неконтролируемые факторы, – относительно которых прогнозируются только гипотезы (предположения), непосредственно не измеряются. Таким образом, три входа: наблюдаемый, но не управляемый $X(\tau)$, управляемый и наблюдаемый $U(\tau)$

и ненаблюдаемый и неуправляемый $E(\tau)$, – все эти факторы в любой момент времени формируют выходные параметры объекта управления $Y_{\text{вых}}(\tau)$ [1, 2].

Измерительная система позволяет контролировать некоторые переменные векторы из совокупности $X(\tau)$, $U(\tau)$, $Y(\tau)$. В большинстве случаев фактическая размерность этих векторов больше размерности их измеренных значений $X_u(\tau)$, $U_u(\tau)$, $Y_u(\tau)$, так как часть переменных невозможно измерить из-за отсутствия соответствующих технических средств измерений, а некоторые из них в принципе измерить невозможно. Дополнительную неопределенность вносят погрешности измерений, случайные возмущения $E(\tau)$, действующие на измерительные системы $E_x(\tau)$, $E_u(\tau)$, $E_y(\tau)$. Результаты измерений в общем виде можно представить как

$$X_u(\tau) = \Phi_x [X(\tau), E_x(\tau)]; \quad (1)$$

$$U_u(\tau) = \Phi_u [U(\tau), E_u(\tau)]; \quad (2)$$

$$Y_u(\tau) = \Phi_y [Y(\tau), E_y(\tau)], \quad (3)$$

где Φ_x , Φ_u , Φ_y – операторы измерительной системы.

Таким образом, в основе процесса управления лежит следующая информация о сложившейся ситуации в объекте в любой момент времени:

$$J = \langle X_u, U_u, Y_u \rangle. \quad (4)$$

Эта информация всегда является неполной из-за ограниченности возможностей всякой системы и затрат на ее установку и функционирование.

Управление системой осуществляется управляющим устройством – виртуальным или системой автоматического управления, для целенаправленного функционирования которого кроме информации J необходима цель управления, к которой должно быть направлено функционирование системы. В большинстве случаев цель управления формально можно определить значением Z_y функционала Z , который является целевой функцией или критерием управления

$$Z_y = Z [Y_u(\tau), U_u(\tau), X_u(\tau)]. \quad (5)$$

В качестве критерия управления могут быть выбраны различные технические или технико-экономические показатели, например, отклонение температуры потока газов на выходе из топки t''_{τ} от заданного значения, или выход этого показателя за предел допустимого по условиям шлакования поверхностей пароперегревателя, или выход за пределы допустимого температуры перегретого пара или его давления и т. д. Критерии управления обычно разрабатываются достаточно условно в зависимости от общих требований по эксплуатации котельного агрегата. При углубленном подходе к критерию управления появляется необходимость оценивать задачу управления по нескольким качественно разнящимся частным критериям. Например, при управлении работой котельного агрегата (КА) необходимо обеспечить:

– заданную паропроизводительность $D_{\text{пн}}$ при необходимых параметрах $t_{\text{пн}}$, $P_{\text{пн}}$ (технологический критерий);

– максимум коэффициента полезного действия КА, связанный в основном с расходом топлива и температурой уходящих дымовых газов (технико-экономический критерий);

– минимум вредных выбросов в окружающую среду (экологический критерий).

Каждый из этих частных критериев имеет, как правило, единственное решение, но они различаются по результатам, поэтому многокритериальные задачи не имеют однозначного общего решения, так как не существует управления вообще, а есть управление в определенном заданном смысле.

Выбор критерия количественной оценки альтернатив является центральным вопросом методологии системных исследований. Такой критерий должен быть выражен в терминах цели управления системой, его назначение – это установление предпочтительного варианта выполнения работы по конструированию и эксплуатации КА или синтеза его системно-структурной модели (ССМ). При решении многокритериальных задач стремятся свести задачу к однокритериальной задаче, например, введением обобщенного показателя, включающего все частные критерии. Иногда производят ранжирование частных критериев и учитывают только главный критерий. Такой «суперкритерий» может быть сформирован как линейная комбинация модифицированных частных критериев, тогда дополнительные критерии суммируются с главным, каждый со своим весовым коэффициентом; в этой части анализа допустим также метод экспертных оценок.

Так, обычно экологический критерий приходит в противоречие с технико-экономическим критерием, связанным с полнотой сжигания топлива в КА, когда при достижении минимума вредных выбросов по оксидам азота увеличиваются потери с недожогом. Но имеется ряд технических решений, конструктивного и режимного характера, позволяющих сочетать эти два требования; эти решения необходимо рассмотреть дополнительно [6–8].

Целью управления или синтеза ССМ является [6–11] обеспечение наивыгоднейшего – максимального или минимального – значения функционала Z :

$$\text{Min}(\text{max}) Z [Y_u(\tau), U_u(\tau), X_u(\tau)] = Z^*. \quad (6)$$

В реальных условиях функционирования ССМ изменение векторов управления $U_u(\tau)$ и выходных параметров $Y_u(\tau)$ может происходить лишь в определенной конечной области их значений, что формально представляется системой следующих ограничений:

$$U_u(\tau) \in G_U, Y_u(\tau) \in G_Y. \quad (7)$$

Здесь G_U и G_Y – замкнутые и ограниченные области векторного пространства управлений и выход-

ных параметров. В элементах ССМ котельного агрегата определены ограничения, связанные с допустимыми значениями давления, скорости, температуры потоков теплоносителей, с предельными значениями тепловых потоков, с режимными и конструктивными ограничениями [12].

Задача синтеза ССМ включает необходимость отыскания таких значений векторов $U_u^*(\tau)$ и $Y_u^*(\tau)$, при которых достигается заданная цель управления Z^* при лимитированных ресурсах синтеза. В общем задача является оптимизационной, но в первую очередь необходимо учесть технические, технологические и ресурсные ограничения, затем можно решить задачу минимизации доли затрат в себестоимости продукции. Оптимизационная задача также может быть сформулирована и относительно минимума расхода энергии, максимума коэффициента полезного действия, минимума отрицательного воздействия на окружающую среду [13, 14], максимума коэффициента теплопередачи в элементе ССМ, оптимизации массогабаритных параметров оборудования и др. [14]. Задачу синтеза ССМ, таким образом, можно сформулировать в следующем виде: найти и реализовать функциональную зависимость

$$U_u^*(\tau) = \varphi[Y_u(\tau), U_u(\tau), X_u(\tau), Z^*], \quad (8)$$

обеспечивающую максимальное приближение к заданному значению Z^* при имеющихся ресурсах процесса синтеза ССМ.

Зависимость (8) определяется как алгоритм управления процессом синтеза ССМ, так как она формулирует четкое правило инструктивного характера для достижения заданной цели в определенной ситуации (1)–(7). Задача и алгоритм синтеза упрощаются, когда задача задается как вектор планируемого состояния, которое известно. Тогда критерий оптимальности синтеза ССМ можно представить функционалом

$$Z^* = Z[\varepsilon(\tau)] \quad (9)$$

от ошибки вектора выходных параметров $\varepsilon(\tau) = |Y_u^*(\tau) - Y_u(\tau)|$. Такую частную задачу управления можно назвать задачей регулирования синтеза ССМ. В более строгой постановке эту задачу можно назвать определением закона регулирования синтеза ССМ

$$U^*(\tau) = \varphi[\varepsilon(\tau)] \quad (10)$$

при заданном значении $Y_u^*(\tau)$ и при обеспечении минимума критерия Z^* .

Научная часть. Разработка системно структурированной схемы

Декомпозицию общей ССМ котельного агрегата GS на локальные системы можно представить в виде совокупности S1...S5, где соответственно обозначены локальные системы от системы подготовки и подачи компонентов горения S1 до конвективного газохода S5, на выходе которого опре-

деляется температура уходящих дымовых газов $t_{ух}$, в значительной степени влияющая на коэффициент полезного действия котельного агрегата. В качестве модельной схемы компоновки газоходов агрегата принята наиболее распространенная П-образная, но решения относительно легко распространяются на Г-образную и Т-образную и ряд других компоновок.

Границу каждого структурного элемента ССМ необходимо определять по осевой линии поперечного сечения газохода в долях от общей длины газоходов $L_i = l_i/l_{общ}$ с учетом компоновки КА. В случае сомкнутой компоновки, т. е. при отсутствии явно определяемого горизонтального газохода, допустимо определять длину «горизонтального» участка по расстоянию между средними точками на плоскостях, соединяющих внутренние и наружные углы поворотов газоходов. В общем случае граница каждой локальной системы S1...S5 устанавливается по тесноте связи, что в начальном варианте может означать коэффициент корреляции при стохастическом характере связи или параметр усиления при детерминированной связи.

При этом S1 характеризуется ограничениями G_y на выходе [15–17]: давление и температура воздуха, располагаемая тепловая мощность, связанная с расходом топлива и его теплотой сгорания $Q_{н}^p$, приведенными влажностью W^{mp} , золой A^{mp} и серой S^{mp} в твердом и жидком топливе. На ограничения влияют [18–20] конструкция топливосжигающих устройств $k_{к,х}$ и требования качества сжигания по химическому q_3 и механическому q_4 недожогу, содержанию оксидов азота и углерода, достижимой температуре горения и температура шлака [21] в адгезионном состоянии $t_{шл}$:

$$X_{S1} \in (W^{mp}, A^{mp}, S^{mp}, t_{шл}, t_{вз}, Q_{н}^p, k_{к,х}), \quad (11)$$

$$U_{S1} \in (B, \alpha_{ГСУ}, C_{пр}, t_r, k_{к,у}), \quad (12)$$

$$Y_{S1} \in (w_r, w_b, t_{ад}, L_{ф}, t_{ф}, k_{к,у}). \quad (13)$$

Введенные здесь конструктивные факторы на входе в S1 ($k_{к,х}$), в системе управления ($k_{к,у}$) и на выходе ($k_{к,у}$) означают учет особенностей схемы подготовки и подачи топлива и воздуха, схемы управления в этой системе и результирующие показатели этих процессов соответственно. Например, ранее в известной нормативной методике теплового расчета котельных агрегатов [1] при факельном сжигании топлив в качестве подобных критериев использовались M_0 , x_r , r_v – коэффициент, учитывающий тип горелочных устройств; относительный уровень расположения горелок; параметр забалластированности топочных газов соответственно.

Система S2 – зона интенсивного горения, которая может быть оформлена по разному в КА различной конструкции в зависимости от вида топлива и назначения КА. На основе выходных данных из S1 при учете процессов в ЗИГ форми-

руются выходные данные из S_2 по расходу, температуре и составу продуктов горения. Здесь уже учитываются процессы теплообмена [22–25] факела и топочных газов с участием ограждения с водопаровой средой в поверхностях тепловосприимчивости учетом типа ЗИГ и ограждения [26–28]. Все многообразие конструктивного оформления ЗИГ может быть учтено с применением концепции факельного континуума, которая описывает теплообмен в системе из трех тел: двух газообразных – топочного газа и факельной среды – и одного твердого – ограждения ЗИГ. В этом случае результирующий тепловой поток определяется на основе закона Стефана – Больцмана с приведенным коэффициентом излучения $C_{пр}$.

$$X_{S_2} \in (w_r, w_b, t_{ад}, t_{ф}, L_{ф}, t_r, F_{ф}, F_{ог}), \quad (14)$$

$$U_{S_2} \in (q_{рез}^{р.ф}, C_{пр}, t_{г.вых}, q_3), \quad (15)$$

$$Y_{S_2} \in (w_{пс}, t_{пс}, q_3, Re, Gr, Nu, Bu). \quad (16)$$

В формулах (14)–(16) $w_r, w_b, w_{пс}$ – скорости топочного газа, вторичного воздуха, продуктов сгорания на выходе из ЗИГ соответственно; $t_{ад}, t_{ф}, t_r, t_{г.вых}, t_{пс}$ – температура адиабатическая, факела, топочного газа, топочного газа на выходе из ЗИГ, продуктов сгорания соответственно; $L_{ф}$ – длина горизонтального участка факела; $F_{ф}, F_{ог}$ – площадь поверхности теплообмена и площадь ограждений ЗИГ; $q_{рез}^{р.ф}$ – результирующий тепловой поток в системе теплообмена топочный газ – факельная среда – ограждения ЗИГ. Обозначения в формулах (14)–(16) стандартные, соответствуют обозначениям, принятым в нормативных методиках теплового [1] и аэродинамического расчета [2] котельных агрегатов.

Применение методов теории вероятностей с учетом фракционного состава реагирующих в S_2 компонентов горения позволяет определить факельные характеристики – длину начального участка и полную длину факела при заданной степени недожога, распределения локальных адиабатических температур и фактические температуры с учетом теплообмена [26–28]. На выходе S_2 формируются основные факторы и параметры для основного объема топки, где процессы описываются на основе парадигмы тепломассообмена.

Система S_3 – основной объем топки КА, где происходит догорание остатков топливных компонентов [15–17] и радиационно-конвективный теплоперенос к тепловоспринимающим поверхностям, в которых происходит нагрев и испарение водяного теплоносителя [18–20]. Собственно с системы S_3 происходит бифуркация задачи математического моделирования процессов в КА [29–32], задача становится сопряженной в смысле получения решений уравнений теплопереноса. В этом случае необходимо решать задачу относительно аэромеханики и теплообмена газообразной среды,

считая известными данные о водопаровой среде, которые в этом случае считаются условиями однозначности, затем последовательно решать задачу гидродинамики и теплообмена для водопаровой среды, считая условиями однозначности данные об аэромеханике и теплообмене в газообразной среде. После получения достоверных данных и функциональных зависимостей для двух потоков возможно получение решения сопряженной задачи. В соответствии с термодинамическими принципами необходимо в первую очередь определить основные характеристики газообразного потока, для которого система факторов и параметров записывается в виде:

$$X_{S_3} \in (Re, Gr, Nu, Bu, w_r, t_r, \psi), \quad (17)$$

$$U_{S_3} \in (t_{г.вых}, w_r, G_{рец}), \quad (18)$$

$$Y_{S_3} \in (t_r'', w_r). \quad (19)$$

Основной объем топки конструктивно может быть решен в различных вариантах в соответствии в общей компоновке КА [33, 34]. По тракту продуктов сгорания допустимо применение парадигмы тепло- и массообмена, которая позволяет значительно сократить число факторов и параметров процесса за счет их объединения и сочетания. При этом характеристики потока газов при входе в S_3 учитываются в математической модели парадигмы в качестве условий однозначности. Характеристики водопарового потока имеют ограничения по тепловому потоку для исключения возможности наступления кризисов теплообмена 1 и 11 рода, а также превышения температурой стенки поверхностей нагрева критического значения.

Все поверхности теплообмена, расположенные в соединительном газоходе, и их характеристики объединены в систему S_4 . Основным критерием выбора границы между S_3 и S_4 служит температура на выходе из топки t_r'' , которая для пылеугольных КА определяется температурой начала шлакования $t_{шл} \approx t_{12}$ [21], а для газомазутных КА – технико-экономическим анализом, определяемым условиями надежности металла поверхностей пароперегревателей и факторами генерации пара требуемых параметров в S_3 . В простом варианте установки в соединительном газоходе только пароперегревателя граница перехода к конвективной части S_5 определяется температурой $t_{кч} \leq 0,95t_{шл}$, а $t_{кч}$ – по изменению энтальпии потока газов в соединительном газоходе Δi_{S_4} , которое должно соответствовать приращению энтальпии пара в этом участке за исключением теплоты, переданной в фестоне. Система S_4 конструктивно может быть выполнена [33, 34] по различным схемам. Основные ограничения при синтезе: не допускать температуры образования липких отложений t_1 в начале и температуры образования плотных золовых отложений t_2 в конце S_4 , а также окисления трубных досок в воздухоподогревателе.

$$X_{S4} \in (t''_T, \rho w, k_{S4}, G_{\text{рец}}), \quad (20)$$

$$U_{S4} \in (t_1, t_2, \Delta i_{\text{ш}}), \quad (21)$$

$$Y_{S4} \in (t''_{S4}, \rho w''). \quad (22)$$

Все поверхности теплообмена конвективного газохода объединены в систему S5, основными входными факторами которой являются плотность потока массы на входе $\rho w''_{S4}$, конструктивный фактор k_{S5} и температура потока газов на входе $t'_{S5} = t''_{S4}$:

$$X_{S5} \in (\rho w''_{S4}, t''_{S4}, k_{S5}), \quad (23)$$

$$U_{S5} \in (k_{S5}, t_{\text{пв}}, t_{\text{хв}}), \quad (24)$$

$$Y_{S5} \in (t_{\text{yx}}, q_2, \eta_{\text{ка}}). \quad (25)$$

Рамки каждой из локальных систем S1...S5 устанавливаются с учетом уравнений сохранения потоков энергии, массы, импульсов, аэромеханических напоров с учетом феноменологических факторов – коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи между теплоносителями и окружающей средой [22–25].

Практическая значимость.

Реализация разработки в промышленности

Разработанный вариант системно-структурированной адаптации теплопередачи применим в проектах конструкций котельных агрегатов различных мощностей и назначения. В энергетическом парогенераторостроении актуально использование единой универсальной схемы расчета, учитывающей основные параметры процессов приготовления топлива, его сжигания, особенности компоновки оборудования, экологические аспекты горения. Предварительные расчеты по универсальной схеме для П-образного котла показали согласованность результатов в пределах инженерной погрешности с данными прямых физических измерений в ходе экспериментов и режимно-наладочных испытаний, проведенных ранее на натурном котельном агрегате БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 [35, 36].

Заключение

Разработанная системно структурированная модель процессов теплообмена в КА (11)–(25) при технологической адаптации конструктивных факторов позволяет оптимизировать характеристики агрегата в стационарном режиме при варьировании вида и характеристик компонентов горения и других режимных и конструктивных факторов и параметров.

Литература

1. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. – 256 с.
2. Аэродинамический расчет котельных ус-

тановок (Нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. – Изд. 3-е. – Л.: Энергия, 1977. – 184 с.

3. Pollard, D. Market Opportunities in the Power Generation Sector / D. Pollard. – May, 2006. – 30 p. (www.alstom.com).

4. Modelling and optimization of combined cycle power plant based on exergoeconomic and environmental analyses / A. Ganjehkaviri, M.N.M. Jaafar, P. Ahmadi, H. Barzegaravval // Appl Therm Eng. – 2014. – Vol. 67. – P. 566–578. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.018>.

5. Exergoenvironmental optimization of Heat Recovery Steam Generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis / A.G. Kaviri, M.N.M. Jaafar, T.M. Lazim, H. Barzegaravval // Energy Convers Manage. – 2013. – Vol. 67. – P. 27–33. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.017>.

6. Nise, N.S. Control Systems Engineering / N.S. Nise. – 3rd ed. – USA: John Wiley & Sons, Inc., 2000. – 970 p.

7. Modelling study of supercritical power plant and parameter identification using genetic algorithms / M. Omar, W. Jihong, G. Shen et al. // Proceedings of the World Congress on Engineering. – London, 2010. – Vol. II. – P. 973–978.

8. Optimization of heat transfer coefficient correlation at supercritical pressure using genetic algorithms / J. Yu, B. Jia, D. Wu, D. Wang // Heat Mass Transf. – 2009. – Vol. 45. – P. 757–766. DOI: 10.1007/s00231-008-0475-4

9. Jones, J.C. Combustion Science: principles and practice / J.C. Jones. – Australia: Millennium Books, 1993. – 306 p. DOI: 10.1016/0010-2180(95)00222-7

10. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion / T.C. Bond, D.G. Streets, K.F. Yarber et al. // J. Geophys. Res. – 2004. – Vol. 109. – P. D14203. DOI: 10.1029/2003JD003697

11. Raask, E. Mineral impurities in coal combustion: behaviour, problem and remedial measures / E. Raask. – Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1985. – P. 283–310.

12. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса: учеб. для вузов / В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, М.Г. Ладыгичев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 1999. – 520 с.

13. Росляков, П.В. Методы защиты окружающей среды / П.В. Росляков. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 336 с.

14. Law, C.K. Combustion physics / C.K. Law // Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – P. 309.

15. The transition of heterogeneous-homogeneous ignitions of dispersed coal particle streams / Y. Ye, S. Li, G. Li et al. // Combust Flame. – 2014. – Vol. 161. – P. 1458–1468. DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.03.008

16. Particle composition and size distribution in coal flames – the influence on radiative heat transfer /

- D. Bäckström, D. Gall, M. Pushp et al. // *Exp Thermal Fluid Sci.* – 2015. – Vol. 64. – P. 70–80. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.02.010
17. Measurement and modeling of particle radiation in coal flames / D. Bäckström, R. Johansson, K. Andersson et al. // *Energy Fuels.* – 2014. – Vol. 28. – P. 2199–2210. DOI: 10.1021/ef402271g
18. Measurements of the flame emissivity and radiative properties of particulate medium in pulverized-coal-fired boiler furnaces by image processing of visible radiation / C. Lou, H.-C. Zhou, P.-F. Yu, Z.-W. Jiang // *Proc Combust Inst.* – 2007. – Vol. 31. – P. 2771–2778. DOI: 10.1016/j.proci.2006.07.178
19. Zima, W. Simulation of fluid heating in combustion chamber waterwalls of boilers for supercritical steam parameters / W. Zima, M. Nowak-Oclon, P. Oclon // *Energy.* – 2015. – Vol. 92. – P. 117–127. DOI: 10.1016/j.energy.2015.02.111
20. Thermodynamic analysis and optimization of a double reheat system in an ultra-supercritical power plant / Y. Li, L. Zhou, G. Xu et al. // *Energy.* – 2014. – Vol. 74. – P. 202–214. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.057
21. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: справ. / В.В. Богомолов, Н.В. Артемьева, А.Н. Алехнович и др. – Челябинск, УралВТИ, 2004. – 304 с.
22. Телегин, А.С. Тепломассоперенос: учеб. пособие для вузов / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Металлургия, 1995. – 400 с.
23. Taler, J. Solving direct and inverse heat conduction problems / J. Taler, P. Duda. – Berlin: Springer, 2006. DOI: 10.1007/978-3-540-33471-2
24. Diller, T. Advances in heat flux measurements / T. Diller // *Adv Heat Transf.* – 1993. – Vol. 23. – P. 279–368.
25. Incropera, F.P. Fundamentals of heat and mass transfer / F.P. Incropera. – John Wiley & Sons, 2011.
26. Торопов, Е.В. Концепция факельного континуума для зоны интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».* – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 5–10. DOI: 10.14529/power150301
27. Торопов, Е.В. Математическая модель теплообмена в зоне интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».* – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 19–25. DOI: 10.14529/power150403
28. Торопов, Е.В. Основные характеристики факельного континуума в зоне интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».* – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 14–22. DOI: 10.14529/power160202
29. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учеб. пособие для вузов / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
30. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 320 с.
31. Yin, C. Oxy-fuel combustion of pulverized fuels: combustion fundamentals and modeling / C. Yin, J. Yan // *Appl Energy.* – 2016. – Vol. 162. – P. 742–762. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.149
32. Chui, E. Implementation of the finite volume method for calculating radiative transfer in a pulverized fuel flame / E. Chui, P.M. Hughes, G. Raithby // *Combust Sci Technol.* – 1993. – Vol. 92. – P. 225–242. DOI: 10.1080/00102209308907673
33. Тепловые схемы котлов / А.А. Паршин, В.В. Митор, А.Н. Безгрешнов и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
34. Basu, P. Boilers and burners: design and theory / P. Basu, C. Kefa, L. Jestin. – Springer Science & Business Media, 2012.
35. Shifting the equipment of thermal power stations for firing different kinds of fuels in flames using the technology of distributed admission of reagents into the furnace / K.V. Osintsev, V.V. Osintsev, M.P. Sukharev, E.V. Toropov // *Thermal engineering (English translation of Теплоэнергетика).* – 2008. – Vol. 55, no. 4. – P. 355–360. DOI: 10.1134/S0040601508040174
36. Осинцев, К.В. Сжигание различного по теплофизическим характеристикам твердого топлива в низкотемпературном факеле / К.В. Осинцев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».* – 2011. – Вып. 16, № 34 (251). – С. 4–7.

Осинцев Константин Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; osintsev2008@yandex.ru.

Поступила в редакцию 17 апреля 2017 г.

SYSTEMICALLY STRUCTURED ADAPTATION OF HEAT TRANSFER IN STEAM GENERATORS

K.V. Osintsev, osintsev2008@yandex.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper presents a model of the processes of heat exchange and combustion in steam generators. The model was created by the methods of system analysis and adapted to a five-step process scheme. For each of the stages (local systems) certain conditions for the separation of all factors and parameters into input, output and control factors are formulated, and the connections and boundaries between local systems are defined. As a model scheme of arrangement of structural elements of steam generators the most common U-shaped scheme is considered which is easily transformed into other schemes. The variety of systems for the preparation and supply of fuel combustion components is unified by output parameters which are input parameters for the intense combustion zone. The temperature distribution along the zone of fuel intensive combustion and the main volume of the furnace is realized basing upon the application of the theory of probability to the fuel-air mixture flow. The solved problem is a stage at a mode and constructive optimization of steam generators under stationary conditions, mainly, industrial TPP of average parameters, but can be extended to steam generators of other types and parameters.

Keywords: steam generator, structure, control, heat exchange, system of flows.

References

1. *Teplovoy raschet kotlov. Normativnyy metod* [Thermal Design of Boilers. Standard method]. 3^d ed., revised and enlarged. St. Petersburg, NPO TsKTI-VTI Publ., 1998. 256 p.
2. *Aerodinamicheskiy raschet kotel'nykh ustanovok (Normativnyy metod)* [Aerodynamic Design of Boiler Units. Standard method]. 3^d ed., revised and enlarged, ed. S.I. Mochan. Leningrad, Energy Publ., 1977. 184 p.
3. Pollard D. *Market Opportunities in the Power Generation Sector*. – May, 2006. – 30 p. (www.alstom.com).
4. Ganjehkaviri A., Jaafar M.N.M., Ahmadi P., Barzegaravval H. Modelling and Optimization of Combined Cycle Power Plant Based on Exergoeconomic and Environmental Analyses. *Appl Therm Eng*, 2014, vol. 67, pp. 566–578. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.018>.
5. Kaviri A.G., Jaafar M.N.M., Lazim T.M., Barzegaravval H. Exergoenvironmental Optimization of Heat Recovery Steam Generators in Combined Cycle Power Plant Through Energy and Exergy Analysis. *Energy Convers Manage*, 2013, vol. 67, pp. 27–33. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.017>.
6. Nise N.S. *Control Systems Engineering*. 3^d ed. – 2000, USA, John Wiley & Sons, Inc. 970 p.
7. Omar M., Jihong W., Shen G., Bushra A., Jianlin W. Modelling Study of Supercritical Power Plant and Parameter Identification Using Genetic Algorithms. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, 2010, vol. II, pp. 973–978.
8. Yu J., Jia B., Wu D., Wang D. Optimization of Heat Transfer Coefficient Correlation at Supercritical Pressure Using Genetic Algorithms. *Heat Mass Transf*, 2009, vol. 45, pp. 757–766. DOI: 10.1007/s00231-008-0475-4
9. Jones J.C. *Combustion Science: Principles and Practice*. Australia, Millennium Books, 1993. 306 p. DOI: 10.1016/0010-2180(95)00222-7
10. Bond T.C., Streets D.G., Yarber K.F., Nelson S.M., Woo J.H., Klimont Z. A Technology-Based Global Inventory of Black and Organic Carbon Emissions from Combustion. *J. Geophys. Res.*, 2004, vol. 109, pp. D14203. DOI: 10.1029/2003JD003697
11. Raask E. *Mineral Impurities in Coal Combustion: Behaviour, Problem and Remedial Measures*. Washington, DC, Hemisphere Publishing Corporation, 1985, pp. 283–310.
12. Shvydkiy V.S., Spirin N.A., Ladygichev M.G. et al. *Elementy teorii sistem i chislennyye metody modelirovaniya protsessov teplomassoperenosa* [Elements of Theory of Systems and Numerical Methods for Modeling Heat and Mass Transfer Processes: Textbook for Universities]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ, 1999. 520 p.
13. Roslyakov P.V. *Metody zashchity okruzhayushchey sredy* [Methods of Environmental Protection]. Moscow, MEI Publ., 2007. 336 p.
14. Law C.K. *Combustion Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 309 p.
15. Ye Y., Li S., Li G., Wu N., Yao Q. The Transition of Heterogeneous-Homogeneous Ignitions of Dispersed Coal Particle Streams. *Combust Flame* 2014, vol. 161, pp. 1458–1468. DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.03.008
16. Bäckström D., Gall D., Pushp M., Johansson R., Andersson K., Pettersson J.B.C.. Particle Composition and Size Distribution in Coal Flames – the Influence on Radiative Heat Transfer. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2015, vol. 64, pp. 70–80. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.02.010

17. Bäckström D., Johansson R., Andersson K., Johnsson F., Clausen S., Fateev A. Measurement and Modeling of Particle Radiation in Coal Flames. *Energy Fuels*, 2014, vol. 28, pp. 2199–2210. DOI: 10.1021/ef402271g
18. Lou C., Zhou H-C., Yu P-F., Jiang Z-W. Measurements of the Flame Emissivity and Radiative Properties of Particulate Medium in Pulverized-Coal-Fired Boiler Furnaces by Image Processing of Visible Radiation. *Proc Combust Inst*, 2007, vol. 31, pp. 2771–2778. DOI: 10.1016/j.proci.2006.07.178
19. Zima W., Nowak-Oclon M., Oclon P. Simulation of Fluid Heating in Combustion Chamber Waterwalls of Boilers for Supercritical Steam Parameters. *Energy*, 2015, vol. 92, pp. 117–127. DOI: 10.1016/j.energy.2015.02.111
20. Li Y., Zhou L., Xu G., Fang Y., Zhao S., Yang Y. Thermodynamic Analysis and Optimization of a Double Reheat System in an Ultra-Supercritical Power Plant. *Energy*, 2014, vol. 74, pp. 202–214. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.057
21. Bogomolov V.V., Artem'eva N.V., Alekhovich A.N. et al. *Energeticheskie ugli vostochnoy chasti Rossii i Kazakhstana* [Energy Coals in the Eastern Part of Russia and Kazakhstan: Reference book]. Chelyabinsk, UralVTI Publ., 2004. 304p.
22. Telegin A.S., Shvydkiy V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplomassoperenos* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, Academkniga Publ., 2002. 455 p.
23. Taler J., Duda P. *Solving Direct and Inverse Heat Conduction Problems*. Berlin: Springer; 2006. DOI: 10.1007/978-3-540-33471-2
24. Diller T. Advances in Heat Flux Measurements. *Adv Heat Transf*, 1993, vol. 23, pp. 279–368.
25. Incropera F.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
26. Toropov E.V., Osintsev K.V. The Concept of the Flame Continuum for Zone of Intense Burning of Boiler Unit. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 5–10. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150301
27. Toropov E.V., Osintsev K.V. Mathematical Model of Heat Transfer into the Intensive Burning Zone of Steam Generator. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 19–25. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150403
28. Toropov E.V., Osintsev K.V. Main Characteristics of Flame Continuum within Active Combustion Area of Boiler Unit. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 14–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160202
29. Arutyunov V.A., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovoy raboty promyshlennykh pechey* [Mathematical Modeling of Thermal Operation of Industrial Furnaces: Manual for Universities]. Moscow, Metallurgy Publ. 1990. 239 p.
30. Samarskiy A.A., Mikhaylov A.P. *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery* [Mathematical Modeling: Ideas. Methods. Examples]. Moscow, Science. Fizmatlit. Publ., 1997. 320 p.
31. Yin C., Yan J. Oxy-Fuel Combustion of Pulverized Fuels: Combustion Fundamentals and Modeling. *Appl Energy*, 2016, vol. 162, pp. 742–762. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.149
32. Chui E., Hughes P.M., Raithby G. Implementation of the Finite Volume Method for Calculating Radiative Transfer in a Pulverized Fuel Flame. *Combust Sci Technol*, 1993, vol. 92, pp. 225–242. DOI: 10.1080/00102209308907673
33. Parshin A.A., Mitor V.V., Bezgreshnov A.N. et al. *Teplovye skhemy kotlov* [Heat Circuits of Steam Generators]. Moscow, Mechanical Engineering, 1987. 224 p.
34. Basu P., Kefa C., Jestin L. *Boilers and Burners: Design and Theory*. Springer Science & Business Media; 2012.
35. Osintsev K. V., Osintsev V. V., Sukharev M. P., and Toropov E. V. [Shifting Equipment of Thermal Power Stations for Firing Different Kinds of Fuels in Flames Using Technology of Distributed Admission of Reagents into the Furnace]. *Thermal engineering (English translation of Teploenergetika)*, 2008, vol. 55, no. 4, pp. 355–360. DOI: 10.1134/S0040601508040174
36. Osintsev K.V. [Combustion of Solid Fuels Different in Thermal and Physical Characteristics in Low-Temperature Flame]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2011, vol. 16, no. 34 (251), pp. 4–7. (in Russ.)

Received 17 April 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Осинцев, К.В. Системно структурированная адаптация теплопередачи в котлах / К.В. Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 5–12. DOI: 10.14529/power170301

FOR CITATION

Osintsev K.V. Systemically Structured Adaptation of Heat Transfer in Steam Generators. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 5–12. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170301