

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Афтаниук В.В., Спинов В.М. (*Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса*)

Разработаны принципы математического моделирования котельного оборудования для автоматизации расчетов эффективности работы котла с учетом возможных энергетических потерь. Предложена математическая модель котла, ориентированная на обратный баланс, которая позволяет исследовать влияние на характеристику котла различных эксплуатационных параметров.

Перспективное проектирование является важнейшим этапом управления развитием теплоэнергетических систем. Оно заключается в разработке схем теплоснабжения городов, промышленных узлов и других территориально-промышленных комплексов – предпроектных документов, которые после утверждения служат исходными материалами для разработки проектов и рабочей документации.

Теплоэнергетическая система является единой сложной динамической системой, всесторонний анализ которой необходим как для обоснованного подхода к созданию новых регуляторов, так и для объективной оценки существующих. Важной составной частью такого анализа наряду с натурными испытаниями является математическое моделирование [1].

Математическая модель котельного оборудования входит в общую модель функционирования источника электроснабжения промышленного предприятия и предназначена для решения следующих частных задач [2]:

- расчета сожженного котлом топлива;
- расчета потерь теплоты и определения КПД котла брутто;
- исследования влияния на экономичность работы котла эксплуатационных параметров;
- обработки данных теплотехнических испытаний котла и построения его нормативной характеристики.

В разработанных в [1, 3, 4] автоматизированных системах используются математические модели котельного оборудования, соответствующие их рабочим либо нормативным характеристикам.

Под нормативной характеристикой котла понимается зависимость КПД котла η_k^{op} , потерь теплоты q_2, q_4, q_5 , коэффициента избытка воздуха за пароперегревателем $a_{пш}$ и температуры уходящих газов t_{yx} от тепловой производительности Q_k или паропроизводительности D_k для заданных условий построения нормативной характеристики [5]. Под эксплуатационной характеристикой понимается комплект тех же зависимостей, но приведенных к рабочим условиям эксплуатации и технического состояния оборудования.

К параметрам, определяющим условия построения характеристики, относятся: виды топлива и их долевого состав в смеси по теплоте; паропроизводительность; температуры питательной воды $t_{п.вх}$, холодного $t_{х.вх}$ и подогретого $t_{х.пх}$ воздуха; коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем $a_{пш х}$ и присосы воздуха в конвективную шахту $\Delta\alpha_{кшх}$.

Для приведения исходных данных к условиям построения характеристики (нормативным либо эксплуатационным) используется система поправок на изменение величин: коэффициента избытка воздуха за пароперегревателем как при организованной, так и при неорганизованной подаче воздуха в топку; присосов воздуха в конвективную шахту; температуры воздуха, подаваемого в топку, в зависимости от способа подогрева (калориферы, рециркуляция, отсутствие подогрева); температуры питательной воды; долевого состава каждого вида топлива в смеси. Эти поправки являются функциями нагрузки котла и его технического состояния. Они могут определяться по данным комплексных режимных испытаний котла либо с помощью полного теплового расчета котла (программы для ЭВМ, осуществляющие тепловые расчеты, широко используются в промышленной теплоэнергетике).

Тепловое совершенство конструкции котла, а также качество его эксплуатации характеризуются тепловым балансом, составляемым для установившегося режима работы

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (1)$$

или в долях располагаемой теплоты, внесенной в топку,

$$I = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6, \quad (2)$$

где Q_p^p - располагаемая теплота топлива;

Q_1, q_1 - теплота, полезно используемая в котле;

Q_2, q_2 - потери теплоты с уходящими газами;

Q_3, q_3 – потери теплоты от химической неполноты сгорания;

Q_4, q_4 – потери теплоты от механической неполноты сгорания;

Q_5, q_5 – потери теплоты в окружающую среду;

Q_6, q_6 – потери с физической теплотой шлака.

Для определения теплоты топлива Q_1 , полезно используемого в котле, обычно применяются два метода – прямой и косвенный (методы прямого и обратного баланса).

Выражение для определения полезно используемой теплоты по прямому балансу имеет вид

$$Q_1 = Q_{\text{бp}} / B; \eta_{\text{к}}^{\text{бp}} = q_1 = Q_1 / Q_{\text{p}}^{\text{p}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{бp}}$ – полное количество теплоты, полезно использованное котлом;
 B – расход топлива; $\eta_{\text{к}}^{\text{бp}}$ – тепловой КПД брутто котла.

Подсчет $\eta_{\text{к}}^{\text{бp}}$ по обратному балансу имеет ряд преимуществ по сравнению с прямым балансом. Обратный баланс дает необходимую информацию для детализированного анализа экономичности работы котла и выявления причин пережогов топлива. Кроме того, обратный баланс не требует непосредственного измерения расхода и теплоты сгорания топлива, что существенно повышает точность при определении $\eta_{\text{к}}^{\text{бp}}$ по сравнению с прямым балансом (особенно при сжигании мазута и угля).

Поэтому предлагаемая математическая модель котла ориентирована на обратный баланс. В общем виде математическая модель котла (по обратному балансу) может быть представлена следующим набором функционалов:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{p}}^{\text{p}} &= F(C_i, \alpha_i, Q_{\text{BH}}, Q_{\text{ТЛ}}, Q_{\text{Ф}}); \\ q_2 &= F(W_{\text{к}}, C_i, \alpha_i, O_2, t_6, t_{\text{XB}}, t_{\text{BN}}, q_4); \\ q_3 &= F(C_i, \alpha_i, O_2, H_i); \\ q_4 &= F(\Gamma_{\text{ш}}, \Gamma_3, \Gamma_{\text{ун}}, a_{\text{ш}}, a_{\text{ун}}, A^{\text{p}}); \\ q_5 &= F(W_{\text{к}}); \\ q_6 &= (a_{\text{ш}}, C_{\text{ш}}, t_{\text{ш}}, A^{\text{p}}); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_{\text{к}}^{\text{бp}} = q_1 &= 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6); \\ B &= Q_{\text{бp}} / \eta_{\text{к}}^{\text{бp}}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} W_{\max} &= F(C_i, t_b, t_{xв}, S_{\text{тех}}, N_{\text{тд}}); \\ W_{\max} &= F(C_i, t_b, t_{xв}, S_{\text{тех}}, N_{\text{тд}}, N_{\text{ц}}); \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Эксплуатационные ограничения

$$W_{\min} \leq W_{\text{к}} \leq W_{\max} \quad (7)$$

где C_i – элементарный состав каждого вида топлива;
 α_i – доля каждого вида топлива в смеси по теплоте;
 $Q_{\text{вн}}$ – теплота, вносимая в топку с воздухом, подогретым вне котла;
 $Q_{\text{тл}}$ – теплота, вносимая в топку с топливом, подогретым вне котла;
 $Q_{\text{ф}}$ – теплота, вносимая в топку с форсуночным паром;
 $W_{\text{к}} = D_{\text{к}}$ – паровая нагрузка котла или $W_{\text{к}} = Q_{\text{к}}$ – теплопроизводительность водогрейного котла;
 O_2 – содержание кислорода в уходящих газах;
 $t_{\text{в}} = t_{\text{пв}}$ – температура питательной воды парового котла или $t_{\text{в}} = t_{\text{св}}$ – температура сетевой воды водогрейного котла;
 $t_{\text{хв}}, t_{\text{вп}}$ – температура холодного и подогретого воздуха;
 H_i – долевого состав продуктов неполного сгорания топлива в уходящих газах ($\text{CO}, \text{H}_2, \text{CH}_4$ и др.);
 $\Gamma_{\text{ш}}, \Gamma_{\text{з}}, \Gamma_{\text{ун}}$ – содержание горючих в шлаке, золе и уносе;
 $a_{\text{ш}}, a_{\text{з}}, a_{\text{ун}}$ – доля золы в шлаке, золе и уносе;
 $A^{\text{р}}$ – зольность на рабочую массу топлива;
 $c_{\text{ш}}, t_{\text{ш}}$ – теплоемкость и температура шлака;
 $S_{\text{тех}}$ – техническое состояние котла;
 $N_{\text{тд}}$ – мощность тягодутьевой установки;
 $N_{\text{ц}}$ – мощность циркуляционных насосов водогрейного котла;
 W_{\max}, W_{\min} – эксплуатационные ограничения по максимальной и минимальной паропроизводительности D_{\max}, D_{\min} – парового котла или теплопроизводительности водогрейного котла Q_{\max}, Q_{\min} .

Представление математической модели в виде набора функционалов иллюстрирует влияние рассматриваемых переменных на характеристику котла. Однако получение указанных зависимостей в явном виде представляется нецелесообразным из-за громоздкости расчета значений промежуточных величин. Поэтому принятое построение математической модели основано не на многофакторных функциях по виду функционала, а на алгоритмах последовательного расчета промежуточных величин.

При решении каждой конкретной задачи в зависимости от требований, предъявляемых к точности модели, и наличия исходных данных количество переменных в функционалах (4) – (6) может быть ограни-

чено. Например, если математическая модель применяется при решении задач расчета и анализа эксплуатационных показателей котла, используется весь набор параметров математической модели, так как, с одной стороны, это необходимо для проведения детализированного анализа, а с другой стороны, значения параметров известны по данным измерений. Если же математическая модель котла используется при решении задач оптимизации проектирования или планирования, значения многих параметров математической модели неизвестны, а степень их влияния на характеристику котла находится за пределами точности, предъявляемой к таким расчетам. В этих случаях математическая модель котла может быть значительно упрощена.

Предлагаемая математическая модель позволяет не только решать задачу определения КПД котла и расхода топлива, но также исследовать влияние на характеристику котла различных эксплуатационных параметров и производить перерасчет характеристики на новые значения параметров. Например, введение в число переменных C_i и a_i позволяет анализировать влияние состава топлива на экономичность работы котла, а введение $t_{в}$, $t_{хв}$, $t_{вп}$, O_2 дает возможность приводить характеристику к новым условиям построения для сравнения.

Из тепловых потерь котла наибольшими являются потери с уходящими газами q_2 . Величина q_2 для современных котлов составляет 5-8 % при сжигании высококалорийных топлив (природный и коксовый газы, мазут, каменный уголь) и 9-14 % при сжигании низкокалорийного топлива (доменный и генераторный газы).

С помощью данной математической модели можно производить анализ влияния на потери теплоты q_2 различных смесей топлив, элементарного состава одного вида топлива, температуры уходящих газов, холодного и подогретого воздуха, питательной воды, содержания кислорода в уходящих газах (O_2) и других параметров.

Алгоритм расчета потерь теплоты q_2 построен таким образом, что все виды газообразных топлив, входящих в смесь, пересчитываются на элементарный состав твердого топлива, а затем расчет производится для одного смешанного вида топлива, физические характеристики которого являются средневзвешенными по тепловым долям компонентов смеси. Для проведения расчетов создан каталог топлив, содержащий данные о составе каждого вида топлива, что дает возможность вести многовариантные исследования как по изменению элементарного состава, так и по комбинациям топлива в смеси.

Выводы

1. Математическая модель котла ориентирована на обратный баланс, который не требует непосредственного измерения расхода и теплоты сгорания топлива, что существенно повышает точность при определении теплового КПД брутто котла.
2. Предлагаемая математическая модель позволяет исследовать влияние различных эксплуатационных параметров на потери теплоты Q_2 , Q_3 , Q_4 с различными вариантами элементарного состава газообразного, твердого, жидкого топлива, а также смесей топлив и заданному набору значений O_2 , (a_{yx}) , t_{y3} , $t_{xв}$, H_i .
3. Разработанная математическая модель котельного оборудования входит в общую математическую модель функционирования источника энергоснабжения промышленного предприятия.

Литература

1. Алгоритмы оптимизации проектных решений / Под ред. Половинкина А.И. – М.: Энергия, 1976. – 264 с.
2. Афтанюк В.В. Научно-технические основы анализа и синтеза энергоэффективных теплоэнергетических систем промышленных предприятий. // Энергоснабжение. Энергетика. Энергоаудит. – 2007. - № 8. – С. 34-38.
3. Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф., Берзиньш Э.Я. Производственные отопительные котельные. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 248 с.
4. Вульман Ф.А., Хорьков Н.С. Тепловые расчеты на ЭВМ теплоэнергетических установок. – М.: Энергия, 1975. – 244 с.
5. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермьяков Б.А. Теплогенерирующие установки. – М.: Стройиздат, 1986. – 356 с.