

К ПОСТРОЕНИЮ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТРУБЧАТЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Докт. техн. наук, проф. КАРНИЦКИЙ Н. Б., асп. КАДАЧ Т. В.

Белорусский национальный технический университет

Сжигание низкосортных жидких топлив требует высокого подогрева воздуха с максимально возможным охлаждением дымовых газов. Для этих целей в конструкциях котельных агрегатов используются воздухоподогреватели. Благодаря им повышается степень использования теплоты, выделяемой сжигаемым топливом, и тем самым увеличивается КПД котлоагрегатов. Кроме того, благодаря подогреву воздуха повышается температура в топке, растут температурные напоры в тракте котла и, следовательно, уменьшаются температура уходящих газов и масса дорогостоящих поверхностей нагрева.

Рекуперативные воздухоподогреватели являются наиболее простыми теплообменниками. В процессе теплопередачи теплота передается непрерывно через стенку, с одной стороны омываемой газами, с другой – воздухом. Наиболее распространенный рекуперативный воздухоподогреватель – трубчатый (ТВП) – прост в изготовлении и надежен в эксплуатации, но имеет значительную массу и большой объем.

В то же время промышленно изготавливаемые ТВП имеют определенные недостатки, главным из которых является подверженность низкотемпературной коррозии и загрязнению поверхности нагрева при сжигании влажных и серосодержащих топлив, что существенно ограничивает возможность применения воздухоподогревателей, ухудшает эксплуатационные характеристики, а следовательно, сокращает срок их службы.

Отмеченные особенности определяют трудности проектирования и эксплуатации таких воздухоподогревателей, т. е. создание малогабаритных конструкций с минимально допустимым загрязнением и коррозионным износом, обеспечивающих надежность и экономичность парового котла.

Математическое моделирование ТВП.

Одним из подходов, повышающим качество исполнения ТВП, не требующим значительных дополнительных затрат, связанных с изменением конструкционных материалов или вида топлива, является применение математического моделирования ТВП с последующим сведением исходной задачи выбора его конструктивных и технологических параметров к задаче поисковой оптимизации.

При этом цель выбора параметров ТВП (значение критерия оптимальности) функционально представляется зависимостью

$$Y = F(X, P), \quad (1)$$

где Y – вектор показателей ВП; X – вектор оптимизируемых (искомых) параметров; P – вектор постоянных параметров; F – оператор математических и логических действий, устанавливающих соответствие между множествами.

В рассматриваемой задаче оптимизируемые параметры $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ для ТВП быты приняты две группы переменных:

а) конструктивные:

- число рядов труб по ходу воздуха и газов z_1 и z_2 , шт.;
- толщина стенки и диаметр трубки δ и d , м;
- поперечный и продольный шаги труб s_1 и s_2 , м;
- длина трубки l , м.

б) технологические (режимные):

- температура воздуха на входе и выходе $t'_{вп}$ и $t''_{вп}$, °С;
- температура газов на входе $\vartheta'_г$, °С;
- скорость воздуха и газов w_v и w_r , м/с;
- температура стенки трубки $t_{ст}$, °С;
- коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем $\alpha''_{пп}$;

- относительная нагрузка котла $\bar{D} = \frac{D}{D_{\text{ном}}}$,

где D и $D_{\text{ном}}$ – текущая и номинальная нагрузки котла соответственно.

Исходными данными при проектировании, определяющими вектор $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$, являются:

- состав и характеристики топлива: теплотворная способность топлива $Q_{\text{н}}^{\text{л}}$, ккал/нм³; объем дымовых паров $V_{\text{г}}$, нм³/кг; теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сгорания топлива, $V^{\text{о}}$, нм³/кг; теоретический объем водяных паров $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{о}}$, нм³/кг; объем трехатомных газов $V_{\text{RO}_2}^{\text{о}}$, нм³/кг; теоретический объем азота $V_{\text{N}_2}^{\text{о}}$, нм³/кг, и др.;

- коэффициенты и критерии, необходимые для расчета теплообмена в ТВП: ν – критерий Прандтля Pr , коэффициент кинематической вязкости, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м²; Re – критерий Рейнольдса; ψ – коэффициент тепловой эффективности и др.

Для оценки эффективности различных конструкций воздухоподогревателя используют характеристики теплообмена (массовые, габаритные), подверженность низкотемпературной коррозии и др.

Тепловая эффективность поверхности теплообмена может быть оценена коэффициентом теплопередачи, Вт/(м²·К):

$$k = f(d, w_{\text{в}}, w_{\text{г}}, z_2, s_1, s_2, Pr, \nu, \lambda) \rightarrow \max. \quad (2)$$

В рамках принятой упрощенной физико-химической модели скорости коррозии $C_{\text{к}}$ можно представить в следующем виде [1]:

$$C_{\text{к}} = f(\vartheta_{\text{yx}}, t_{\text{вп}}, d, w_{\text{в}}, w_{\text{г}}, z_2, s_1, s_2, D, \alpha_{\text{пп}}, t_{\text{ст}}, S^{\text{п}}) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Для оценки габаритных характеристик сравниваемых поверхностей нагрева используется коэффициент компактности N , м²/м³:

$$N = \frac{H}{V} = f(s_1, s_2, d) \rightarrow \max, \quad (4)$$

где H – площадь поверхности теплообмена, м²; V – объем воздухоподогревателя, м³.

Для оценки массовой характеристики используется соотношение нагрева M , кг/м²:

$$M = \frac{G}{H} = f(z_1, z_2, l, G) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где G – масса воздухоподогревателя, кг.

Также в качестве критериев оптимальности могут быть использованы такие показатели функционирования ТВП, как тепловосприятие поверхности нагрева $Q_{\text{т}}$, температурный напор ΔP и температура уходящих газов ϑ_{yx} [2].

Используемый для расчета котельных агрегатов нормативный метод [2] позволяет рассчитать характеристики теплообмена для ТВП в целом (тепловосприятие, конечные температуры теплоносителей), но не дает возможности проследить распределение температур внутри объекта. Кроме того, подразумевается, что температуры дымовых газов и воздуха распределены равномерно по всей входной плоскости и равны их средней величине. Таким образом, не учитывается существующая в реальных котлах температурная неравномерность, которая сильно влияет на скорость низкотемпературной коррозии. Особенно заметной нелинейность распределения температур вдоль трубы становится в местах с относительно большими температурными напорами (например, на участке входа холодного воздуха в ТВП). Устранить описанные выше недостатки возможно за счет более точного расчета проблемных участков.

Поэтому предлагается фрагмент модели, описывающей процесс теплообмена, рассчитывать с различной степенью точности в зависимости от стадии поиска и требований к проектированию. Так как процесс поиска циклический и расчет одного проектного решения занимает много времени, то на начальных этапах рационально использовать упрощенное описание элементов модели, полученное на основе методов вычислительного эксперимента. На заключительных этапах, когда требуется точное описание происходящих в ТВП процессов, для исследования объекта предусмотрена возможность использовать пакеты для решения конечно-элементных задач, позволяющие анализировать достаточно сложную трехмерную модель объекта, задавая различные граничные условия.

При определении оптимальных конструктивных и режимных параметров ТВП нужно отслеживать соответствие этих параметров условиям, заданным техническими ограничениями. В общем случае предельные значения каждого из рассмотренных выше показателей X_i определяются условиями проектирования и эксплуатации

$$X_{\text{min}} \leq X_i \leq X_{\text{max}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Помимо обеспечения заданной производительности ТВП должны обеспечиваться следующие технологические (функциональные) ограничения по:

- аэродинамическому сопротивлению [3];
- жесткости конструкций;
- выбросам в окружающую среду;
- $d \in D^{\text{зад}}$ и $\delta \in \Delta^{\text{зад}}$,

где $D^{\text{зад}}$ и $\Delta^{\text{зад}}$ – стандартные значения диаметров и толщин трубок.

В модели приняты следующие допущения:

1. Потоки воздуха и дымовых газов рассматриваются как сплошные среды.

2. Теплообмен с окружающей средой отсутствует.

3. Коэффициент теплоотдачи между потоком и поверхностью трубы определяется только его конвективной составляющей.

4. Давление дымовых газов и воздуха принимается постоянным в любой точке ТВП.

Для решения задачи в многокритериальной постановке (при выборе параметров и режимов работы ТВП по совокупности критериев) был использован подход, развивающий метод исследования пространства параметров, предложенный в [4] и используемый при разработке диалоговой системы поддержки принятия проектных решений DMS.

Система генерирует решения и далее, если проектировщик может задать приоритет критериев оптимальности, строится обобщенный критерий по выбранной схеме компромиссов (аддитивный, мультипликативный и минимаксный) и задача решается методами поисковой оптимизации нулевого порядка. В противном случае множество решений сужается до области Парето, и окончательное решение определяется с помощью библиотеки формальных и неформальных методов.

Пример использования системы. В качестве базового варианта был рассмотрен воздухоподогреватель котла ТП-87, параметры и характеристики которого, а также найденного с помощью системы DMS проектного варианта приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение результатов расчетов

| Оптимизируемые параметры | Базовый вариант | Проектный вариант |
|--|-----------------|-------------------|
| 1 Число рядов труб по ходу воздуха z_1 | 440 | 420 |
| 2 Число рядов труб по ходу газов z_2 | 38 | 42 |

Окончание табл. 1

| Оптимизируемые параметры | Базовый вариант | Проектный вариант |
|---|-----------------|-------------------|
| 3 Толщина стенки трубки δ | 0,0016 | 0,0014 |
| 4 Диаметр трубки d | 0,04 | 0,045 |
| 5 Поперечный шаг труб s_1 | 0,062 | 0,057 |
| 6 Продольный шаг труб s_2 | 0,0404 | 0,045 |
| 7 Длина трубки l | 9,2 | 10,7 |
| 8 Температура воздуха на входе $t'_{\text{вп}}$ | 80 | 75 |
| 9 Температура воздуха на выходе $t''_{\text{вп}}$ | 241 | 246 |
| 10 Температура газов на входе ϑ'_r | 287 | 280 |
| 11 Скорость воздуха $w_{\text{в}}$ | 6,2 | 5,7 |
| 12 Скорость газов w_r | 9,7 | 10,2 |
| 13 Температура стенки трубки $t_{\text{ст}}$ | 105 | 86,25 |
| 14 Коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем $\alpha''_{\text{пн}}$ | 1,18 | 1,13 |
| 15 Относительная нагрузка котла \bar{D} | 0,83 | 0,913 |
| Критерии оптимальности | | |
| 1 Температура уходящих газов $\vartheta_{\text{ух}}$ | 165 | 150 |
| 2 Коэффициент теплопередачи k | 14,4 | 13,7 |
| 3 Температурный напор ΔP | 60,5 | 47,67 |
| 4 Тепловосприятие Q_r | 556 | 592 |
| 5 Скорость коррозии C_k | 0,35 | 0,307 |
| 6 Коэффициент компактности N | 0,099 | 0,125 |
| 7 Массовая характеристика M | 1,286 | 0,9 |

ВЫВОД

Выполненные исследования позволяют заключить, что предложенная математическая модель ТВП и методика поиска, реализованная в системе DMS, могут быть использованы при проектировании паровых котлов с целью повышения их качества. Анализ вариантов показал, что даже при небольшом количестве испытаний $N = 50$ найдено проектное решение, которое лучше базового по первому, четвертому, пятому, шестому и седьмому критериям при незначительном ухудшении остальных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кункевич, С. В. К тепловому расчету трубчатого воздухоподогревателя на ЭВМ / С. В. Кункевич, Н. Б. Карницкий // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1993. – № 1–2. – С. 84–90.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н. В. Кузнецова [и др.]. – М.: Энергия, 1973. – С. 296.
3. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) / под ред. С. И. Мочана. – 3-е изд. – Л.: Энергия, 1977. – 256 с.
4. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 157 с.

Поступила 30.03.2006