

## К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

И. К. ЛЕБЕДЕВ, В. В. ХАРЛАМОВ

(Представлена научным семинаром кафедры котлостроения и котельных установок)

Выбор наиболее экономичного варианта котельного агрегата по применяемому в настоящее время методу повариантного сравнения связан с проведением множества вариантов громоздких технических и экономических расчетов. Предлагаемая методика определения оптимальных конструктивных параметров котельных агрегатов ставит своей целью сокращение количества рассматриваемых при сравнении вариантов, ее применение дает возможность отыскания абсолютного минимума затрат на производство единицы пара.

Оптимальным вариантом котельного агрегата в последующем будет именоваться экономически наиболее выгодный вариант, удовлетворяющий ряду технических требований, обусловленных теплотехническими характеристиками топлива, параметрами рабочего теплоносителя, свойствами применяемых конструкционных материалов и т. д. В аналитической форме эти требования могут быть выражены следующими соотношениями:

а) для температуры уходящих дымовых газов

$$Q_2 + \alpha_{yx} I_{xв}^0 \geq \vartheta^0 \omega_{yx}, \quad (1)$$

где:  $\omega_{yx}$  — водяной эквивалент объемов уходящих дымовых газов, отнесенный к 1 кг топлива, ккал/кг град;

$\vartheta^0$  — минимальное предельно допустимое значение температуры дымовых газов по условиям кислотной коррозии поверхностей нагрева, °С.

В этой и последующих формулах общепринятые обозначения не оговариваются

б) суммарное тепловосприятие всех  $\kappa$  ступеней воздухоподогревателя из условия обеспечения нормального процесса горения топлива

$$\sum_1^{\kappa} Q_{вп\kappa} + \beta'' I_{хв}^0 \geq \beta'' \omega_{в} t_{ГВ}^0. \quad (2)$$

В соотношении (2):

$Q_{вп\kappa}$  — тепловосприятие  $\kappa$ -той ступени воздухоподогревателя, ккал/кг;

$t_{ГВ}^0$  — минимально допустимая температура подогрева воздуха из условия обеспечения нормального процесса горения топлива, °С;

$\omega_{в}$  — водяной эквивалент воздуха при  $t_{ГВ}^0$ , отнесенный к 1 кг топлива, ккал/кг град.

в) для температуры дымовых газов на выходе из топки

$$\sum_1^n Q_{нт_n} + \sum_1^p Q_{пеп}^{рад} \geq \varphi \left[ Q_p^p \frac{100 - q_3 - q_6}{100} - Q_{ввнш} + \sum_1^k Q_{вп_k} + rI_{гомб} + \right. \\ \left. + (3'' + \Delta\alpha_m + \Delta\alpha_{пл.у}) I_{ХВ}^0 - \omega_m'' t_1 \right]. \quad (3)$$

Здесь:  $Q_{нт_n}$  — тепловосприятие  $n$ -ного элемента парогенерирующих поверхностей топки, ккал/кг;

$Q_{пеп}^{рад}$  — тепловосприятие  $p$ -того элемента радиационного пароперегревателя, ккал/кг;

$t_1$  — предельно допустимая температура дымовых газов на выходе из топки по условиям шлакования °С;

$\omega_m''$  — водяной эквивалент дымовых газов при температуре на выходе из топки, ккал/кг град.

Подобно предшествующим, соотношение (3) определяет максимально допустимое значение температуры дымовых газов на выходе из топки, величина которой в оптимальном решении может быть и меньшей.

г) температура дымовых газов перед отдельными элементами котельного агрегата по условиям обеспечения надежной работы этих элементов

$$\vartheta_{ji} \leq \vartheta_i \quad \text{или} \quad \vartheta_{ji}\omega_i \leq \vartheta_i\omega_i \quad (4)$$

где:  $\vartheta_i$  — предельно допустимое значение температуры дымовых газов перед  $i$ -тым элементом котельного агрегата °С;

$\vartheta_{ji}$  — температура дымовых газов перед тем же элементом котельного агрегата в оптимальном его варианте, °С;

$\omega_i$  — водяной эквивалент дымовых газов в пределах газотока рассматриваемого элемента, ккал/кг град.

д) Сумма тепловосприятий отдельных элементов котельного агрегата:  
1. Подогревательные и испарительные поверхности

$$\sum_1^n Q_{нт_n} + \sum_1^m Q_{эк_m} = \frac{D_n}{B_p} (i_n'' - i_{пв}). \quad (5)$$

2. Пароперегревательные поверхности (первого, второго . . . .  $z$ -того перегрезов)

$$\sum_1^{p_z} Q_{пеп_{p_z}} = \sum_1^z \frac{D_z}{B_p} (i'' - i'). \quad (6)$$

В уравнениях (5) и (6) обозначено:

$D_i$  — расход нагреваемого теплоносителя через  $i$ -тый элемент котельного агрегата, кг/час;

$Q_{эк_m}$  — тепловосприятие  $m$ -ной ступени экономайзера, ккал/кг;

$i_n''$ ,  $i_{пв}$ ,  $i''$ ,  $i'$  — соответственно теплосодержания насыщенного пара, питательной воды, пара на входе и выходе  $z$ -того перегрезов ккал/кг.

В отличие от четырех предыдущих, соотношения (5) и (6) являются строгими равенствами, правые части которых определяются количеством пропускаемого через элемент котельного агрегата нагреваемого теплоносителя, конечными и начальными параметрами этого теплоносителя (давление и температура).

е) Тепловосприятие каждого элемента в оптимальном варианте котельного агрегата не может быть отрицательным  $Q_i \geq 0$  (7).

Совокупность соотношений (1) ÷ (7) с аналитической точки зрения является системой ограничений, в пределах которой должен быть найден экономически наивыгоднейший оптимальный вариант котельного агрегата.

Названным ограничениям может удовлетворять бесконечно большое число вариантов даже одного типа котельного агрегата, которые будут отличаться друг от друга конструктивными характеристиками элементов, скоростями теплоносителей в них, величинами тепловосприятий и температурными режимами элементов. Наибольшую трудность при отыскании оптимального варианта котельного агрегата представляет определение экономически наивыгоднейших величин тепловосприятий и соответствующих температурных режимов его элементов. Решению этой задачи и посвящается статья.

При этом конструктивные характеристики элементов котельного агрегата, скорости теплоносителей в них и, следовательно, коэффициенты теплопередачи, а также порядок расположения элементов предполагаются известными. В соответствии с такой оговоркой неизвестными этого варианта задачи оптимизации конструктивных параметров котельного агрегата будут величины тепловосприятий и температурные режимы его элементов. В качестве критерия оптимальности принимается минимум расчетных затрат.

По поверхностям нагрева котельного агрегата, в которых осуществляется передача тепла от дымовых газов к рабочему теплоносителю, затраты на единицу повышения энергетического потенциала нагреваемого теплоносителя независимо от его фазового состояния и параметров складываются из: 1. Стоимости тепловой энергии топлива франкотопка; 2. Затрат на организацию передачи тепловой энергии в элементе котельного агрегата от греющего теплоносителя к нагреваемому; 3. Дополнительных затрат, пропорциональных потерям тепловой энергии топлива, сопутствующим процессу передачи тепла от дымовых газов к нагреваемому теплоносителю.

Величина этих затрат определяется по формуле:

$$Z_1 = \frac{B_p}{Q_{ка}} \left[ \sum_1^m (y + p_{эк_m}) Q_{эк_m} + \sum_1^n (y + p_{нт_n}) Q_{нт_n} + \sum_1^{p_z} (y + p_{пеп_z}) Q_{пеп_z} + y Q_{потерь} \right]. \quad (8)$$

Здесь  $y$  — стоимость единицы тепловой энергии в топливе франкотопка, руб/ккал;

$p_i$  — удельные расчетные затраты по  $i$ -тому элементу котельного агрегата, необходимые на организацию передачи тепла в этом элементе от греющего теплоносителя к нагреваемому, руб/ккал;

Величина удельных расчетных затрат по отдельному элементу котельного агрегата за час выражается следующим соотношением:

$$p_i = \frac{\Sigma a \cdot Ц_i h_i}{n}, \quad (9)$$

где:  $\Sigma a$  — суммарный процент отчислений, включающий в себя расходы на текущий и капитальный ремонты, физическую амортизацию, отчисления на расширенное воспроизводство при нормативном сроке окупаемости дополнительных капиталовложений  $T_n = 8$  годам, 1/год;

$Ц_i$  — капиталовложения в единицу поверхности нагрева элемента котельного агрегата (включают в себя стоимость единицы поверхности

нагрева, каркаса, обмуровки, обшивки, лестниц, площадок, тяго-дутьевой установки и электроэнергии собственных нужд), руб/м<sup>2</sup>;

$h_i$  — величина удельной поверхности нагрева по тому элементу котельного агрегата, м<sup>2</sup>час/ккал;

$n$  — число часов пользования котельного агрегата в году.

Удельная поверхность нагрева в  $i$ -том элементе котельного агрегата определяется через коэффициент теплопередачи этого же элемента, принимаемый за постоянную величину, и температурный напор по уравнению

$$h_i = \frac{1}{k_i \Delta t_i}. \quad (10)$$

Рециркуляция тепла в котельном агрегате с воздухом и дымовыми газами обуславливает дополнительное увеличение затрат. Рециркуляция тепла с воздухом сопряжена с затратами на организацию передачи энергии топлива от газов к воздуху в воздухоподогревательных элементах и возврат в топочную камеру. Аналогично второй составляющей затрат по поверхностям нагрева котельного агрегата, в которых энергия передается нагреваемому рабочему теплоносителю, затраты по ступеням воздухоподогревателя определяются по уравнению

$$Z_{вп} = B_p \sum_1^{\kappa} P_{вп\kappa} Q_{вп\kappa}, \quad (11)$$

где:  $P_{вп\kappa}$  — удельные расчетные затраты по  $\kappa$ -той ступени воздухоподогревателя, руб/ккал;

Затраты на рециркуляцию тепла с дымовыми газами определяются по уравнению

$$Z_{рц} = B_p b_{рц} r I_{гомб}. \quad (12)$$

Здесь:  $b_{рц}$  — затраты на единицу рециркулируемого тепла, руб/ккал.

$r I_{гомб}$  — тепло рециркулируемых газов, ккал/кг.

Вместе с тем, на величину затрат по котельному агрегату значительное влияние оказывает величина температурного напора на холодном конце первой по ходу воды ступени экономайзера.

С учетом уравнений (8), (9), (10), (11), (12), часовые затраты по котельному агрегату выражаются следующим уравнением

$$\begin{aligned} Z = B_p \left[ \sum_1^m \left( y + \frac{\sum a \Pi_{эк\ m}}{n k_{эк\ m} \Delta t_{эк\ m}} \right) Q_{эк\ m} + \sum_1^n \left( y + \frac{\sum a \Pi_{ит\ n}}{n k_{ит\ n} \Delta t_{ит\ n}} \right) Q_{ит\ n} + \right. \\ \left. + \sum_1^{p_z} \left( y + \frac{\sum a \Pi_{пэ\ p_z}}{n \cdot k_{пэ\ p_z} \Delta t_{пэ\ p_z}} \right) Q_{пэ\ p_z} + \sum_1^{\kappa} \frac{\sum a \Pi_{вп\ \kappa}}{n k_{вп\ \kappa} \Delta t_{вп\ \kappa}} Q_{вп\ \kappa} + \right. \\ \left. + y Q_{потерь} + b_{рц} r I_{гомб} \right] \quad (13) \end{aligned}$$

Зная порядок расположения элементов котельного агрегата, с учетом ограничений (1) ÷ (4), могут быть заданы ориентировочно границы температур дымовых газов, в интервале которых возможно перемещение  $i$ -того элемента в процессе поиска оптимального решения. Учитывая это, по теплотехническим характеристикам топлива и расчетным характеристикам котельного агрегата с достаточной точностью могут быть определены средние значения водяных эквивалентов теплообменивающихся сред в пределах газохода каждого элемента. По этим характеристикам теплоносителей температурные режимы элементов выражаются в функции их величин тепловосприятий.

Из сказанного следует, что суммарные затраты по котельному агрегату можно выразить нелинейным уравнением в функции тепловосприятый его элементов.

Совокупность системы ограничений (1) ÷ (7) и уравнения затрат (13) представляют математическую модель котельного агрегата. Нелинейность уравнения затрат (целевой функции) обуславливает принадлежность этой задачи к одному из видов задач нелинейного математического программирования, решение которых возможно методами классического анализа.

Непрерывность уравнения (13) на всем допустимом множестве значений тепловосприятый элементов котельного агрегата позволяет заключить, что по меньшей мере один раз на этом множестве функция достигает максимального и минимального значений. В экстремальных точках функции первые частные производные ее равны нулю.

Следовательно, задача оптимизации конструктивных параметров котельного агрегата сводится к решению системы нелинейных уравнений, полученных на основе дифференцирования уравнения затрат (13) по всем входящим в его выражение линейно независимым переменным — по тепловосприятый элементов котельного агрегата, по проверке соответствия полученных решений требованиям системы линейных ограничений (1) ÷ (7). Решения, не удовлетворяющие требованиям системы ограничений (1) ÷ (7), являются недопустимыми.

### Выводы

1. В данной работе показана возможность построения общей математической модели котельного агрегата с целью применения к последнему методов количественного анализа в процессе поиска его оптимальных конструктивных параметров.

2. Чисто математическими приемами возможно выявление тенденций поведения уравнения затрат (13) по входящим в его выражение линейно независимым переменным — тепловосприятый отдельных элементов котельного агрегата.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Госэнергоиздат, 1957.
  2. Ч. Карр, Ч. Хоув. Количественные методы принятия решений в управлении и экономике. Издательство «Мир», 1966.
  3. Г. В. Веников, В. А. Строев. Применение математических методов и средств вычислительной техники в проектировании и эксплуатации энергетических систем. Издательство «Энергия», 1965.
-