

УДК 621.301

## **Методы анализа и синтеза технологических схем ТЭУ на базе решения вспомогательных задач линейного программирования\***

**А.М. Клер, А.С. Максимов, Н.О. Епишкин**

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск*

E-mail: maxalex@isem.irk.ru

Работа посвящена созданию метода анализа технологических схем теплоэнергетических установок на основе решения вспомогательных задач линейного программирования. Этот метод предполагает решение задач линейного программирования с целью оценки эффекта от подвода или отвода разных по величине тепловых или материальных потоков в различные точки технологической схемы теплоэнергетической установки. Эффективность разработанного метода продемонстрирована на примере пылеугольного паротурбинного энергоблока с номинальной электрической мощностью 660 МВт. В результате его работы было найдено изменение технологической схемы блока, обеспечивающее снижение цены электроэнергии на 0,3 %.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, теплоэнергетические установки, анализ технологических схем, оптимизация параметров.

### **Введение**

Оптимизация непрерывных параметров теплоэнергетических установок (ТЭУ) сводится к решению достаточно хорошо изученных задач нелинейного математического программирования (НЛП), для которых разработаны эффективные математические методы [1–4]. Однако существует проблема — решение задач большой размерности в условиях, когда нелинейные системы уравнений, описывающие ТЭУ и ее элементы, могут быть решены лишь приблизительно, что создает «шумы» при оптимизации [5]. В этом случае помимо оптимизации параметров сложных ТЭУ возникает необходимость оптимизации технологических схем этих установок. Для решения такого рода задач существует ряд методов. К первым из них отнесем методы прямого решения задач синтеза оптимальной схемы [6–11]. Эти методы возможны только при оптимизации отдельных энергетических объектов и подсистем, как, например, при оптимизации системы теплообменных аппаратов. В работе [1] решение такой задачи сводится к решению транспортной задачи линейного программирования. Для сложных энергетических объектов и подсистем прямое решение задач синтеза оптимальной схемы невозможно, поскольку эти задачи оптимизации не попадают в класс математических задач с эффективными методами решения. Ко второй группе можно отнести методы оптимизации максимально сложной схемы [12, 13]. Их суть заключается в построении максимально сложной схемы.

---

\* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 16-19-10174) в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск, Россия).

После этого последовательно отключают элементы до получения «подозрительной на оптимальность» схемы. Поиск оптимальной схемы осуществляется с помощью решения задач нелинейного дискретного программирования. Оптимизируемыми параметрами выступают переменные, являющиеся признаками включения элементов в схемы. Также к этой группе методов относится метод определяющих параметров. Перечисленные здесь методы находят свою применимость лишь среди заранее выбранных схемных решений. Особенность методов, относящихся к третьей группе, заключается в назначении ограниченного числа вариантов схем, выделенных на основе неформального анализа [14], которое происходит следующим образом. Выбирается несколько вариантов схем. Затем для каждого варианта проводится оптимизация параметров, определяются технико-экономические показатели и критерий эффективности, сопоставление значений этого критерия позволяет выбрать наилучший вариант. Этот подход малоэффективен, поскольку варианты назначаются без анализа результатов расчета схем. Четвертую группу составляют методы последовательного улучшения схемы [8, 10], где в ходе итеративного процесса на основе анализа результатов расчета предыдущего шага в схему добавляются изменения, которые по некоторым оценкам могут поднять эффективность установки. Для сложных энергетических объектов анализ и назначение изменения формальными методами является трудной задачей.

В рамках развития методов последовательного улучшения схемы в работе [1] был предложен метод анализа схем, базирующийся на оценке влияния подвода (или отвода) к различным точкам технологической схемы малых тепловых или материальных потоков. Анализ основан на использовании теории двойственности в нелинейном математическом программировании. Он позволяет оценить изменение оптимального значения целевой функции при введении дополнительного малого теплового или материального потока в некоторую точку технологической схемы.

Рассматривается оптимизационная задача

$$\min f(x, z) \tag{1}$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} g_1(x, z) &\geq 0, \\ g_2(x, z) &\geq 0, \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} g_m(x, z) &\geq 0, \\ \underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \end{aligned} \tag{3}$$

где  $f$  — целевая функция (например, цена электроэнергии при заданной норме возврата капиталовложений),  $x$  — вектор непрерывных оптимизируемых параметров,  $z$  — вектор материальных или тепловых потоков, подводимых к схеме извне (оптимизация проводится при  $z = z^* = 0$ ),  $j$ -ая компонента  $z_j$  вектора  $z$  соответствует подводу материального или теплового потока в  $j$ -ую точку технологической схемы;  $g_i$ ,  $i = 1, \dots, m$  — ограничения-неравенства;  $\underline{x}$ ,  $\bar{x}$  — ограничения сверху и снизу на компоненты вектора  $x$ .

Обозначим решение задачи (1)–(3) через  $x^*$ . Считаем, что задача (1)–(3) является гладкой и локально выпуклой в окрестности решения. Из теории двойственности в нелинейном программировании [15] следует, что малые изменения оптимального значения целевой функции при малом изменении параметра  $z_j$  определяются как

$$\Delta f_j = \left[ \left( \frac{\partial f(x^*, z^*)}{\partial z_j} \right) + \sum_{i=1}^m u_i \left( \frac{\partial g_i(x^*, z^*)}{\partial z_j} \right) \right] (z_j - z_j^*), \tag{4}$$

где  $\left(\frac{\partial f(x^*, z^*)}{\partial z_j}\right)$  — производная целевой функции по  $z_j$ ,  $\left(\frac{\partial g_i(x^*, z^*)}{\partial z_j}\right)$  — производная

$j$ -го ограничения-неравенства по  $z_j$ , где подстрочным индексом  $j$  обозначается  $j$ -ая компонента соответствующего вектора;  $u_i$  —  $i$ -ая двойственная переменная (множитель Лагранжа). Отметим, что поскольку  $z_j^* = 0$ , то  $z_j = \Delta z_j$  и замена  $\Delta z_j$  на равную по модулю величину, но имеющую противоположный знак, приведет к получению  $\Delta f_j$ , равного по модулю, но имеющего противоположный знак. В связи с этим отвод единичного теплового потока от некоторой точки схемы окажет равное по модулю, но противоположное по знаку влияние на целевую функцию по сравнению с подводом единичного потока.

Определяя из выражения (4) эффект от подвода (и отвода) тепловых и материальных потоков для различных точек технологической схемы, можно определить пары точек (с учетом их температур и давлений), между которыми могут быть организованы малые тепловые и/или материальные потоки и при этом произойдет уменьшение значения целевой функции. Применительно к тепловым потокам суммарный эффект от передачи тепла из точки  $p$  к точке  $k$  определится как

$$\Delta f_{pk} = \Delta f_k - \Delta f_p, \quad (5)$$

где  $\Delta f_p$ ,  $\Delta f_k$  — изменение целевой функции при подводе малого потока к точкам  $p$  и  $k$ .

Если оцениваемый эффект от организации потока достаточно большой, то формируются соответствующие изменения технологической схемы для реализации этого потока, решается новая оптимизационная задача и определяется реальный эффект. Если этот эффект существенный, то изменение схемы принимается и описанный выше анализ повторяется для новой схемы. В противном случае для начальной схемы выбирается другой «перспективный» поток, формируется новая схема и оценивается реальный эффект от реализации этого потока. Процесс может продолжаться до тех пор, пока не будет найдено ни одного потока, дающего достаточно большой эффект.

В работе [16] этот метод получил свое развитие в направлении усовершенствования информативности процесса оценки влияния организации малых потоков между точками схемы. Суть усовершенствования заключается в оптимизации параметров исходной схемы совместно со значениями новых тепловых и материальных потоков, организуемых между ее заранее назначенными точками. Сам процесс основывается на изменении уравнений тепловых и материальных балансов, связанных с узлами подключения, путем добавления переменных, показывающих изменение температуры, энтальпии и массового расхода теплоносителя. Новые переменные включаются в состав оптимизируемых параметров и ограничений-неравенств.

Достоинством рассмотренного подхода является простота анализа на основе выражения (4), а недостаток его связан с тем, что он не позволяет оценить, как изменится эффект  $\Delta f_j$  с изменением величины подводимого (или отводимого) потока тепла или вещества. Кроме того, на его основе невозможно определить, какое предельное значение может принять данный поток и как при этом изменятся термодинамические параметры рабочего тела в точках подвода и отвода теплового или материального потока.

#### **Метод анализа технологической схемы, основанный на решении вспомогательных задач линейного программирования**

В настоящей работе предлагается подход, в значительной мере свободный от указанных недостатков. Суть его состоит в том, что для анализа схем вместо выражения (4)

предлагается использовать решение вспомогательной задачи линейного программирования (ЛП). Эта задача формируется следующим образом.

В точке решения задачи нелинейного программирования (1)–(3) определяются производные функций  $f, g_1, \dots, g_m$  по параметрам  $x$  и  $z$ . Для каждой точки подвода/отвода тепловых или материальных потоков  $j$  формируется следующая задача ЛП:

$$\min_x \left[ f(x^*, z^*) + \sum_{l=1}^L \frac{\partial f(x^*, z^*)}{\partial x_l} (x_l - x_l^*) + \frac{\partial f}{\partial z_j} \Delta z_j \right] \quad (6)$$

при условиях

$$g_i(x^*, z^*) + \sum_{l=1}^L \frac{\partial g_i(x^*, z^*)}{\partial x_l} (x_l - x_l^*) + \frac{\partial g_i(x^*, z^*)}{\partial z_j} \Delta z_j \geq 0, \quad i = 1, \dots, M, \quad (7)$$

$$\underline{x}_l \leq x_l \leq \overline{x}_l, \quad l = 1, \dots, L. \quad (8)$$

Основная идея предлагаемого подхода состоит в том, чтобы решать задачу (6)–(8) при различных значениях  $\Delta z_j$ , имеющих как положительное значение (подвод тепла или вещества), так и отрицательное (отвод тепла или вещества). Следует заметить, что для реализации такого подхода нужно в первую очередь определить допустимые границы изменения  $\Delta z_j$ , т.е. такие  $\underline{\Delta z_j}$  и  $\overline{\Delta z_j}$ , что при выполнении условия  $\underline{\Delta z_j} \leq \Delta z_j \leq \overline{\Delta z_j}$  задача (6)–(8) будет иметь допустимое решение. Для поиска  $\underline{\Delta z_j}$  решается задача линейного программирования (ЛП) вида  $\underline{\Delta z_j} = \min_{\Delta z_j, x} \Delta z_j$  при условиях (7), (8), а также при условии  $\overline{z_j} \leq \Delta z_j \leq 0$ , где  $\overline{z_j}$  — отрицательное число, заведомо меньшее, чем  $\underline{\Delta z_j}$ . Для поиска  $\overline{\Delta z_j}$  решается задача вида  $\overline{\Delta z_j} = \max_{\Delta z_j, x} \Delta z_j$  при условиях (7), (8), а также при условии  $0 \leq \Delta z_j \leq z_j^+$ , где  $z_j^+$  — положительное число, заведомо большее чем  $\overline{\Delta z_j}$ .

Интервал  $[\underline{\Delta z_j}, 0]$  разбивается на заданное число  $N_1$  малых одинаковых интервалов. Аналогично интервал  $[0, \overline{\Delta z_j}]$  разбивается на заданное число  $N_2$  малых интервалов. Назначается  $N_1$  значений  $\Delta z_{js}^-$ , определяемых как

$$\Delta z_{js}^- = -|\underline{\Delta z_j}|s/N_1, \quad s = 1, \dots, N_1, \quad (9)$$

и  $N_2$  значений  $\Delta z_{jq}^+$ , имеющих вид

$$\Delta z_{jq}^+ = |\overline{\Delta z_j}|q/N_2, \quad q = 1, \dots, N_2. \quad (10)$$

Подставляя в задачу (6)–(8) вместо  $\Delta z_j$  соответствующие значения  $\Delta z_{js}^-$ ,  $s = 1, \dots, N_1$  и решая  $N_1$  задач ЛП (6)–(8) на отвод потока тепла из  $j$ -ой точки схемы, получаем  $N_1$  оптимальных значений целевой функции  $f_{js}^-$ . Аналогичным образом при подстановке вместо  $\Delta z_j$  величин  $\Delta z_{jq}^+$ ,  $q = 1, \dots, N_2$  решаются  $N_2$  задачи ЛП на подвод теплового потока в точку  $j$  и определяются оптимальные значения  $f_{jq}^+$ .

Кроме значений целевой функции при каждом значении потока  $\Delta z_j$  необходимо знать расход, температуру (или энтальпию) и давление рабочего тела перед точкой подвода/отвода потока при различных  $\Delta z_j$ . Эти величины могут быть оценены с использованием следующих линейных уравнений:

$$t_j^{\text{BX}}(\Delta z_j) = t_j^{\text{BX}}(x^*, z^*) + \sum_{l=1}^L \frac{\partial t(x^*, z^*)}{\partial x_l} (\hat{x}_l - x_l^*) + \frac{\partial t(x^*, z^*)}{\partial z_j} \Delta z_j, \quad (11)$$

$$H_j^{\text{BX}}(\Delta z_j) = H_j^{\text{BX}}(x^*, z^*) + \sum_{l=1}^L \frac{\partial H(x^*, z^*)}{\partial x_l} (\hat{x}_l - x_l^*) + \frac{\partial H(x^*, z^*)}{\partial z_j} \Delta z_j, \quad (12)$$

$$P_j^{\text{BX}}(\Delta z_j) = P_j^{\text{BX}}(x^*, z^*) + \sum_{l=1}^L \frac{\partial P(x^*, z^*)}{\partial x_l} (\hat{x}_l - x_l^*) + \frac{\partial P(x^*, z^*)}{\partial z_j} \Delta z_j, \quad (13)$$

$$G_j^{\text{BX}}(\Delta z_j) = G_j^{\text{BX}}(x^*, z^*) + \sum_{l=1}^L \frac{\partial G(x^*, z^*)}{\partial x_l} (\hat{x}_l - x_l^*) + \frac{\partial G(x^*, z^*)}{\partial z_j} \Delta z_j, \quad (14)$$

где  $t_j^{\text{BX}}$ ,  $H_j^{\text{BX}}$ ,  $P_j^{\text{BX}}$  и  $G_j^{\text{BX}}$  — температура, энтальпия, давление и расход; надстрочным индексом «BX» обозначены параметры перед точкой подвода или отвода потока; через  $\hat{x}_l$  обозначена  $l$ -ая компонента параметра  $x$  в точке решения задачи ЛП (6)–(8) при значении потока  $\Delta z_j$ .

После подвода/отвода теплового потока  $\Delta z_j$  температура рабочего тела составит  $t_j^{\text{БХХ}}(\Delta z_j) = t_j^{\text{BX}}(\Delta z_j) + \Delta z_j / (G_j^{\text{BX}} \cdot c_j^{\text{BX}}(t_j^{\text{BX}}, P_j^{\text{BX}}))$ , а энтальпия рабочего тела после подвода теплового потока —  $H_j^{\text{БХХ}}(\Delta z_j) = H_j^{\text{BX}}(\Delta z_j) + \Delta z_j / G_j^{\text{BX}}$ . При отводе материального потока из точки его температура (или энтальпия) и давление будут равны этим параметрам в точке  $j$  до отвода тепла, т.е. равны  $t_j^{\text{BX}}$  и  $H_j^{\text{BX}}$ .

Следует отметить, что в качестве параметра, определяющего состояние рабочего тела, целесообразно использовать температуру для потоков газов (воздуха, продуктов сгорания, продуктов газификации и др.), поскольку температура вместе с давлением и составом газовой смеси однозначно определяют состояние таких рабочих тел. Для потоков воды, пароводяной смеси и водяного пара целесообразно использовать энтальпию, поскольку энтальпия вместе с давлением однозначно определяет состояние данных рабочих тел.

В эффekte, получаемом при подводе материального потока, можно рассматривать две составляющих: подвод потока с теми же  $t(H)$  и  $P$ , что и у основного потока —  $t(x^*, z^*)$ ,  $H(x^*, z^*)$ ,  $P(x^*, z^*)$ , и подвод тепла, равного разности между суммарными энтальпиями потока при фактических параметрах и потока при  $t(x^*, z^*)$ ,  $H(x^*, z^*)$  и  $P(x^*, z^*)$ .

### Пример анализа технологической схемы

Использование предлагаемого метода анализа иллюстрируется на примере анализа технологической схемы угольного энергоблока мощностью 660 МВт, которая представлена на рис. 1. Она включает в себя прямоточный паровой котел с одним промежуточным

перегревом пара, паровую турбину электрической мощностью около 660 МВт, три регенеративных подогревателя высокого давления, деаэратор и четыре регенеративных подогревателя низкого давления.

Для решения задачи оптимизации параметров угольного энергоблока была построена математическая модель, включающая 997 информационно-входных и 895 информационно-выходных параметров, при этом для 23-х параметров требовалось задать начальное приближение. Построение модели энергоблока проводилось с помощью разработанного в ИСЭМ СО РАН программно-вычислительного комплекса «Система машинного построения программ» (СМП) [15], который на основе графически заданной технологической схемы установки и математических моделей ее элементов строит программу расчета установки и позволяет формировать задачи оптимизации ее параметров.

Для решения задачи (1)–(3) в качестве оптимизируемых было выбрано 90 параметров цикла и конструктивных параметров отдельных элементов: давление и температура острого пара и пара промперегрева, расход острого пара, давление пара в отборах на регенерацию и в конденсаторе турбины, энтальпия теплоносителя на входе в теплопринимающие поверхности нагрева, толщина и шаги труб этих поверхностей и др. При оптимизации учитывалось 144 ограничения-неравенства, включающих ограничения на температуру и механические напряжения металла труб теплообменников, температуру продуктов сгорания на выходе из топки котла, температуру росы для первой ступени воздухоподогревателя, концевые температурные напоры теплообменников, ограничение на влажность пара на выходе из последнего отсека турбины и др.

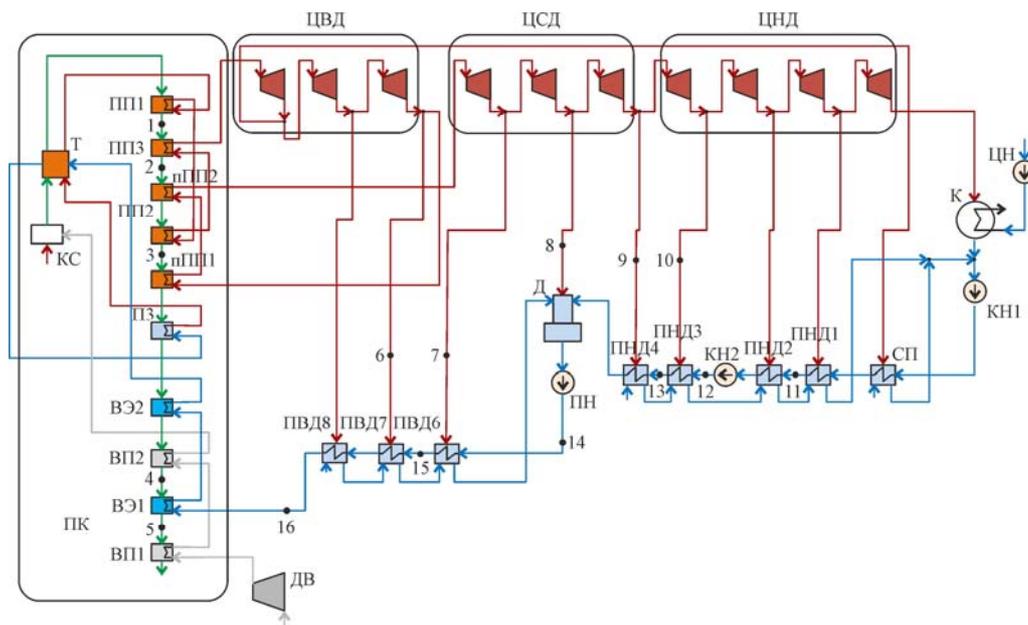


Рис. 1. Расчетная технологическая схема пылеугольного паротурбинного энергоблока мощностью 660 МВт.

ДВ — дутьевой вентилятор, ПК — прямоточный паровой котел, КС — камера сгорания парового котла, Т — топка парового котла, ПП1–ПП3 — конвективные пароперегреватели, пПП1, пПП2 — промежуточные пароперегреватели, ПЗ — переходная зона, ВЭ1–ВЭ2 — водяные экономайзеры, ВП1, ВП2 — воздухоподогреватели, ЦВД — группа отсеков цилиндра высокого давления, ЦСД — группа отсеков цилиндра среднего давления, ЦНД — группа отсеков цилиндра низкого давления, К — конденсатор паровой турбины, ЦН — циркуляционный насос, КН1, КН2 — конденсатные насосы, СП — сальниковый подогреватель, ПНД1–ПНД4 — подогреватели низкого давления, Д — деаэратор, ПН — питательный насос, ПВД6–ПВД8 — подогреватели высокого давления.

В качестве целевой функции была принята цена электроэнергии при заданном значении внутренней нормы возврата капиталовложений. Для анализа эффекта подвода (отвода) теплоты в схеме было назначено 16 точек, изображенных на рис. 1. Для каждой из точек определялось минимально и максимально возможное количество отводимого и подводимого тепла. Затем полученные диапазоны разбивались на  $n$  единичных интервалов (единица теплового потока принималась равной 1000 ккал/с или 4186 кДж/с) и для каждого значения теплового потока в результате решения вспомогательной задачи ЛП (6)–(8) определялись значение целевой функции и температура рабочего тела. В табл. 1 для каждой точки показаны приросты цены электроэнергии при подводе и отводе единичного теплового потока, а также начальное значение температуры рабочего тела или теплоносителя и значение его температуры после подвода и отвода единичного теплового потока. В качестве примера на рис. 2 приведены графики изменения значений целевой функции и температуры рабочего тела в зависимости от величины подводимого или отводимого теплового потока, построенные для шести точек схемы.

Анализ табл. 1 и указанных выше графиков показал, что эффективнее всего отбирать тепло из точки 5 и подводить его в точки 13 или 15. Это связано с тем, что при отводе единичного теплового потока из точки 5 целевая функция возрастает (ухудшается) всего на 0,003 цент./кВт·ч, а при подводе единичного теплового потока в точку 15 целевая функция уменьшается (улучшается) на 0,014 цент./кВт·ч и в точку 13 — на 0,009 цент./кВт·ч.

Для определения максимально допустимого улучшения значения целевой функции, величины передаваемого при этом теплового потока и разности температур рабочих тел в точках строятся графики изменения целевой функции и разности температур между точками в зависимости от величины теплового потока. Сопоставляя такие графики для разных пар точек, можно с учетом располагаемого температурного напора определить наиболее перспективную пару. На рис. 3 представлены указанные графики для пар точек 5 и 15, 5 и 13. Как видно, для первой пары максимальное снижение целевой функции достигается при тепловом потоке 5000 ккал/с и составляет 0,035 цент./кВт·ч. При этом температурный напор составляет 36 °С, что является вполне допустимым. Для второй пары максимальное снижение целевой функции достигается при передаче 4000 ккал/с

**Таблица 1**  
**Отклонение целевой функции при отводе и подводе единичного теплового потока в различных точках схемы**

Точка	Прирост целевой функции		Температура, °С		
	Отвод тепла	Подвод тепла	Начальное значение	Отвод тепла	Подвод тепла
1	0,017	-0,015	854	850	858
2	0,019	-0,020	802	797	807
3	0,015	-0,012	608	603	612
4	0,005	-0,008	315	306	324
5	0,003	-0,003	303	294	312
6	0,011	-0,010	462	422	503
7	0,012	-0,014	535	432	637
8	0,009	-0,009	442	373	516
9	0,008	-0,009	311	230	391
10	0,005	-0,009	192	119	311
11	0,002	-0,002	56	54	58
12	0,004	-0,004	85	82	87
13	0,007	-0,009	113	111	116
14	0,011	-0,007	196	194	198
15	0,012	-0,014	222	220	223
16	0,010	-0,011	269	267	270

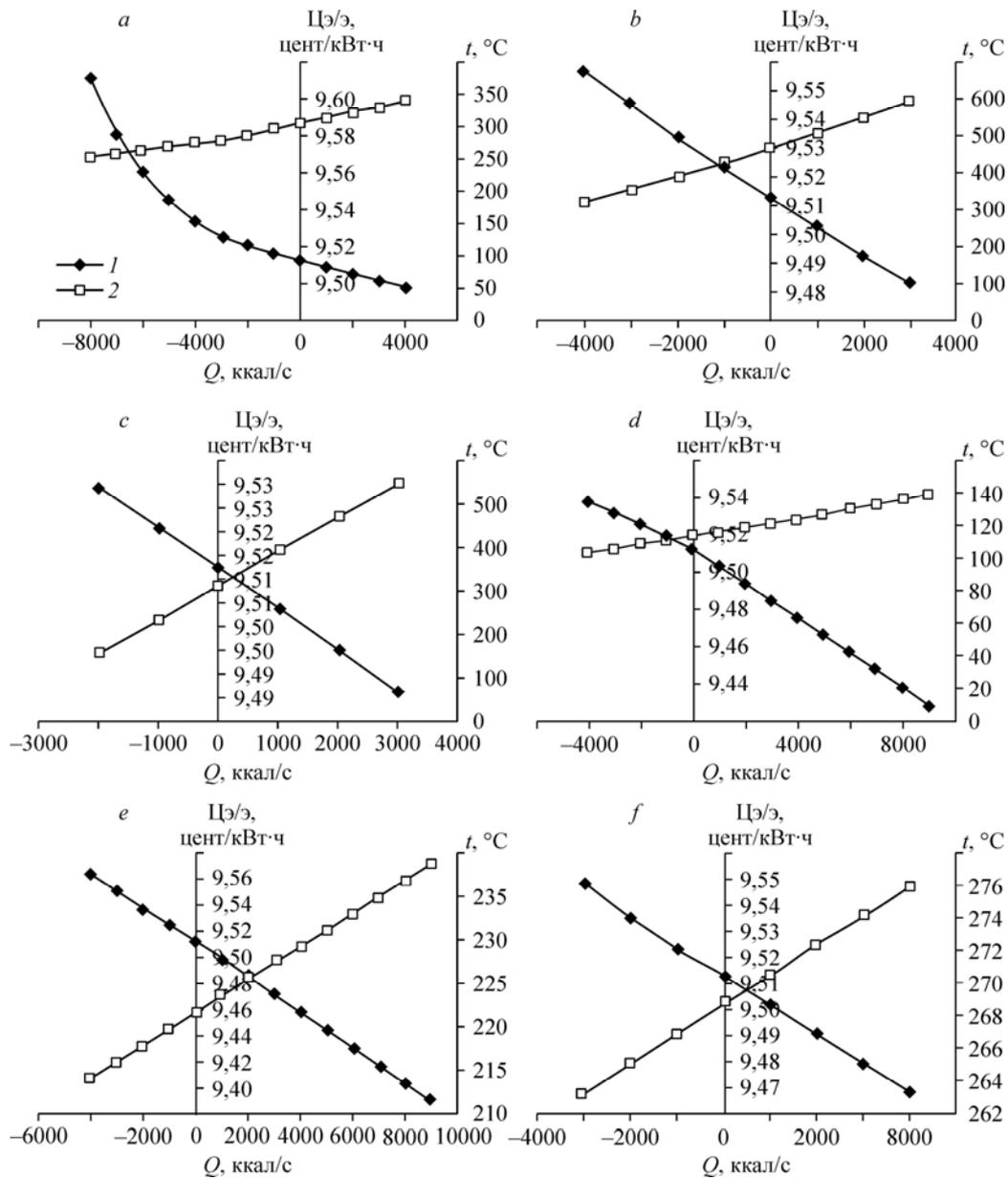


Рис. 2. Графики изменения целевой функции и температуры рабочего тела в зависимости от величины теплового потока.

Точки 5 (a), 6 (b), 9 (c), 13 (d), 15 (e), 16 (f); 1 — Цэ/э, 2 — температура.

и составляет 0,016 цент./кВт·ч. При этом температурный напор составляет 148 °С. Достаточно очевидно, что передача тепла между первой парой точек является более эффективной.

По результатам проведенных расчетов и инженерного анализа была изменена технологическая схема энергоблока мощностью 660 МВт путем добавления еще одного газодляного теплообменника (ГВ). На рис. 4 показан фрагмент технологической схемы, в котором проводились изменения. Часть питательной воды после регенеративного подогревателя высокого давления № 6 (ПВД6) направляется в газодляной теплообменник, расположенный между первой ступенью водяного экономайзера (ВЭ1) и первой ступенью

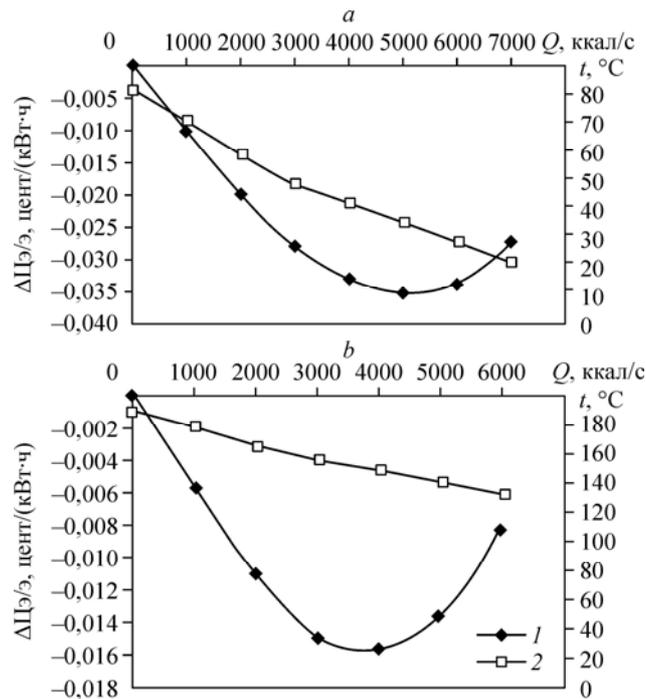


Рис. 3. Зависимость приростов цены электроэнергии и разности температур от теплового потока. Передача тепла из точки 5 в точку 15 (а) и из точки 5 в точку 13 (б); 1 — Цэ/э, 2 — температура.

воздухоподогревателя (ВП1) по ходу газа, где она нагревается. После ГВ нагретая вода смешивается с питательной водой, выходящей из регенеративного подогревателя высокого давления № 8 (ПВД8), и поступает в паровой котел. Как видно в новой схеме, тепло, отбираемое от продуктов сгорания в точке 5, передается в ГВ к питательной воде, отбираемой от точки 15.

Для новой схемы была построена математическая модель и проведены оптимизационные расчеты по критерию минимума цены электроэнергии. При этом в состав оптимизируемых параметров был включен расход воды через ГВ. Основные результаты расчетов схемы и капиталовложения в элементы представлены в табл. 2 и 3.

Приведенные результаты оптимизационных расчетов показывают, что измененная схема обеспечивает меньшее значение цены электроэнергии по сравнению с исходной схемой — 9,51 и 9,48 цент./кВт·ч. Это достигается за счет снижения удельных капиталовложений (на 4,6 дол./кВт) практически при неизменном КПД. При этом снижение КПД блока в результате сокращения регенеративного подогрева питательной воды компенсируется повышением КПД котла, обусловленным дополнительным отводом тепла в ГП. В связи с уменьшением расхода пара на ПВД сокращается расход острого пара на турбину, что приводит к сокращению стоимости трубопроводов острого пара, ряда других элементов блока и, следовательно, общему снижению капиталоемкости. Следует отметить, что провести обоснование изменения схемы

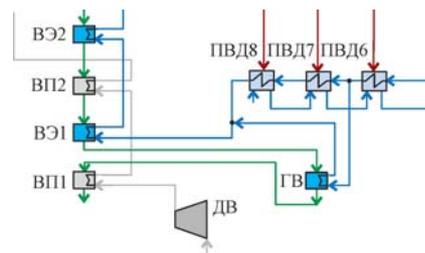


Рис. 4. Измененная технологическая схема пылеугольного паротурбинного энергоблока мощностью 660 МВт.

ГВ — газовойодяной теплообменник;  
ост. обозначения см. на рис. 3.

Таблица 2

Результаты оптимизации параметров энергоблока с исходной и измененной технологической схемой по критерию минимума цены электроэнергии

Наименование параметра	Исходный вариант	Измененный вариант
Расход острого пара, кг/с	470,7	458,2
Давление острого пара, МПа	15,9	16,2
Температура острого пара, °С	626	624
Температура питательной воды, °С	269	260
Удельный расход топлива, г у.т./кВт·ч	275	273
Давление пара промежуточного перегрева, МПа	5,2	5,8
Температура пара промежуточного перегрева, °С	660	677
Расход пара, кг/с:	–	–
– на ПВД8	0,8	2,9
– на ПВД7	43,2	32,6
– на ПВД6	18,1	14,6
– на деаэрактор	26,2	24,7
– на ПНД4	25,1	28,5
– на ПНД3	17,5	13,3
– на ПНД2	19,7	21,1
– на ПНД1	7,2	7,4
– в конденсаторе	309,5	309,5
Давление пара, МПа:	–	–
– на ПВД8	7,0	8,8
– на ПВД7	6,0	6,5
– на ПВД6	2,5	2,5
– на деаэрактор	1,4	1,4
– на ПНД4	0,54	0,54
– на ПНД3	0,19	0,16
– на ПНД2	0,072	0,084
– на ПНД1	0,020	0,020
– в конденсаторе	0,0037	0,0039
Энтальпия пара, кДж/кг:	–	–
– на ПВД8	3380,2	3436,5
– на ПВД7	3329,9	3329,1
– на ПВД6	3538,3	3528,4
– на деаэрактор	3347,0	3340,3
– на ПНД4	3083,6	3080,0
– на ПНД3	2852,4	2815,4
– на ПНД2	2685,9	2705,5
– на ПНД1	2507,8	2502,5
– в конденсаторе	2322,8	2323,7
Энтальпия воды, кДж/кг:	–	–
– после ПНД1	235,1	241,8
– после ПНД2	354,4	372,5
– после ПНД3	475,8	462,9
– после ПНД4	644,6	652,1
– после деаэратора	823,5	823,5
– после ПВД6	955,2	930,0
– после ПВД7	1170,5	1231,6
– после ПВД8	1174,3	1255,8
Температура газов на выходе из топки, °С	927	927
Температура уходящих газов, °С	135	128
Мощность паровой турбины, МВт	678,4	678,2
Полезная электрическая мощность установки, МВт	648,1	647,8
КПД котла, %	94,3	94,7

Таблица 3

## Экономические показатели энергоблока для исходной и измененной технологических схем

Наименование параметра	Исходный вариант	Измененный вариант
Цена электроэнергии, цент./кВт·ч	9,51	9,48
КПД нетто, %	44,8	45,0
Удельные (на единичный расход условного топлива) затраты в топливную систему, тыс. дол./(т/ч)	14,4	14,4
Постоянные затраты, не зависящие от стоимости оборудования, тыс. дол.	290000	290000
Удельная стоимость топлива, дол./т	0,1	0,1
Удельная стоимость систем, зависящих от расхода топлива, тыс. дол./(т/ч)	240	240
Удельная стоимость электротехнического оборудования, тыс. дол./кВт	0,192	0,192
Коэффициент, учитывающий непредвиденные затраты	1,03	1,03
Коэффициент, учитывающий прочие затраты	1,3	1,3
Коэффициент учета затрат на строймонтаж	1,6	1,6
коэффициент приведения цен на оборудование	1,65	1,65
Удельная стоимость электрогенератора паровой турбины, дол./кВт	60	60
Удельная стоимость электрических собственных нужд, дол./кВт	1000	1000
Внутренняя норма возврата капиталовложений	0,15	0,15
Мощность турбины, МВт	678,4	678,2
Мощность собственных нужд, МВт	30,3	30,4
Полезная мощность, МВт	648,1	647,8
Стоимость поверхностей нагрева, тыс. дол.	220574,2	218736,1
Стоимость турбомашин, тыс. дол.	161457,2	161467,4
Стоимость электрогенератора, тыс. дол.	158281,9	158220,1
Стоимость насосов, тыс. дол.	3098,4	3032,4
Затраты на собственные нужды, тыс. дол.	64876,2	63768,3
Коэффициент, учитывающий стоимость неучтенного оборудования	1,1	1,1
Стоимость основного оборудования, тыс. дол.	608288,8	605224,0
Стоимость каналов и трубопроводов систем технического водоснабжения, тыс. дол.	58051,2	58021,8
Стоимость охладителей систем технического водоснабжения, тыс. дол.	145,3	145,2
Капиталовложения в установку, тыс. дол.	1175600,0	1172060,0
Удельные капиталовложения на установленную мощность, дол./кВт	1813,8	1809,2
Годовой расход топлива, т	1244250,0	1238350,0
Топливные затраты, тыс. дол.	124425,0	123835

на основе лишь неформального, инженерного анализа представляется достаточно сложным, что подтверждает эффективность предлагаемого метода анализа технологических схем ТЭУ.

### Заключение

Разработан метод анализа технологических схем теплоэнергетических установок, основанный на оценке эффективности подвода или отвода различных величин тепла в различные точки технологической схемы. Представлен пример анализа схемы угольного энергоблока мощностью 660 МВт. На основе анализа выполнена синтезация схемы, что обеспечило более высокую экономическую эффективность.

### Список литературы

1. Клер А.М., Деканова Н.П., Щеголева Т.П. и др. Методы оптимизации сложных теплоэнергетических установок. Новосибирск: Наука, 1993. 116 с.
2. Клер А.М., Максимов А.С., Степанова Е.Л. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с использованием быстродействующих математических моделей теплофикационных паровых турбин // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 1. С. 159–167.
3. Клер А.М., Захаров Ю.Б. Оптимизация параметров цикла ГТУ и конструктивных параметров проточной части газовой турбины с охлаждаемыми сопловыми и рабочими лопатками // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 4. С. 449–459.
4. Клер А.М., Захаров Ю.Б., Потанина Ю.М. Согласованная оптимизация параметров охлаждаемой проточной части газовой турбины и параметров цикла ГТУ и ПГУ // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 3. С. 401–410.
5. Клер А.М. Оптимизация схем и параметров энергетических установок и электростанций // Системные исследования в энергетике. Ретроспектива научных направлений СЭИ – ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2010. С. 176–228.
6. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. 2-е изд. М.: Химия, 1975. 576 с.
7. Калафати Д.Д., Попалов В.В. Оптимизация тепл. обменников по эффективности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1986. 152 с.
8. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.Л. Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. М.: Энергоатомиздат, 1979. 320 с.
9. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.
10. Каневец Г.Е. Обобщенные методы расчета теплообменников. Киев: Наукова думка, 1979. 351 с.
11. Левенталь Г.Б., Попырин Л.С. Оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1970. 352 с.
12. Попырин Л.С., Наумов Ю.В. Оптимизация теплосиловой части АЭС с водоохлаждаемыми реакторами // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1972. № 2. С. 140–149.
13. Рубинштейн Я.М., Щепетильников М.И. Расчет влияния изменений в тепловой схеме на экономичность электростанций. М.: Энергия, 1969. 223 с.
14. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1978. 416 с.
15. Гольштейн Е.Г. Выпуклое программирование (элементы теории). М.: Наука, 1970. 68 с.
16. Клер А.М., Деканова Н.П., Тюрина Э.А. и др. Теплосиловые системы: Оптимизационные исследования. Новосибирск: Наука, 2005. 236 с.

*Статья поступила в редакцию 22 ноября 2016 г.,  
после доработки — 27 февраля 2017 г.*