

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

ЖУКОВ В.П., д-р техн. наук, БОРИСОВ А.А., асп., ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В., асп., КОРОТКОВ А.А., инж.

Предложен подход к оптимизации теплофикационных установок (ТФУ) с точки зрения минимальной потери эксергии при теплопередаче, сформулированы и решены задачи оптимизации распределения нагрузки между теплообменниками теплофикационной установки, показана связь полученных оптимальных решений и оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами.

Ключевые слова: теплофикационные установки, распределение нагрузки, целевая функция, оптимизационная задача.

OPTIMIZATION OF MULTISTAGE DISTRICT HEATING PLANTS

A.A. BORISOV, Post-Graduate Student, V.P. GUKOV, Doctor of Engineering, G.V. LEDUKHOVSKIY, Post-Graduate Student, A.A. KOROTKOV, Engineer

The author proposes an approach to district heating plants optimization in terms of the minimal exergy loss when transferring heat. The problem of load distribution optimization between heat exchangers of the district heating plants is solved. The author demonstrates the connection of optimal solutions and optimal load distribution between turbo units.

Key words: district heating plants, load distribution, objective function, optimization problem.

В настоящее время в связи с реструктуризацией энергетики существенно изменились условия функционирования тепловых электрических станций. Определение условий эффективной работы энергетического оборудования в новых условиях является актуальной теоретической и практической задачей, стоящей перед энергетикой.

Ранее нами [1] сформулирована и решена задача распределения электрической и тепловой нагрузки между турбоагрегатами ТЭС. Однако оптимизация режима работы и структуры теплофикационной установки, обеспечивающей отпуск тепловой нагрузки, при этом не рассматривалась. Ниже предлагается подход к совместному анализу распределения нагрузки между турбоагрегатами ТЭС и распределения теплофикационной нагрузки между аппаратами теплофикационной установки (ТФУ).

Примерная структура ТФУ отпуска тепловой энергии с сетевой водой потребителю приведена на рис. 1.

Нагрев сетевой воды может осуществляться в различных теплообменных аппаратах различными теплоносителями. Очевидно, что разные варианты покрытия графика теплофикационной нагрузки имеют разную тепловую эффективность. Задача выбора наиболее эффективной схемы и режима установки относится к задачам режимно-структурной оптимизации, для решения которой предлагается следующий алгоритм.

На первом этапе решения задачи формируется набор схем, которые могут обеспечить заданную теплофикационную нагрузку. Для каждой схемы выполняется режимная оптимизация с учетом существующих технологических и технических ограничений работы оборудования. Найденные оптимальные режимы сравниваются для сформированного набора схем, после чего выбирается оптимальная схема с оптимальным режимом.

При выполнении режимной оптимизации сначала анализируется ряд простых схем, для которых возможно получение аналитических решений.

Задача 1. Наиболее простая теплофикационная установка, включающая один теплообменный аппарат, приводится на рис. 2,а. Считается, что пар подается в аппарат в состоянии насыще-

ния, поверхность теплообмена F и коэффициент теплопередачи k для аппарата известны. При расчете сетевых подогревателей температуры воды на входе (t_0) и на выходе (t) ТФУ определяются температурным графиком и считаются также известными. Тепловая мощность ТФУ Q обуславливается присоединенными тепловыми потребителями, что позволяет при известных температурах сетевой воды найти ее расход через подогреватель. На рис. 2 в выносках прямоугольной формы показаны известные параметры, а в фигурные выноски заключены параметры, которые необходимо определить при решении задачи.

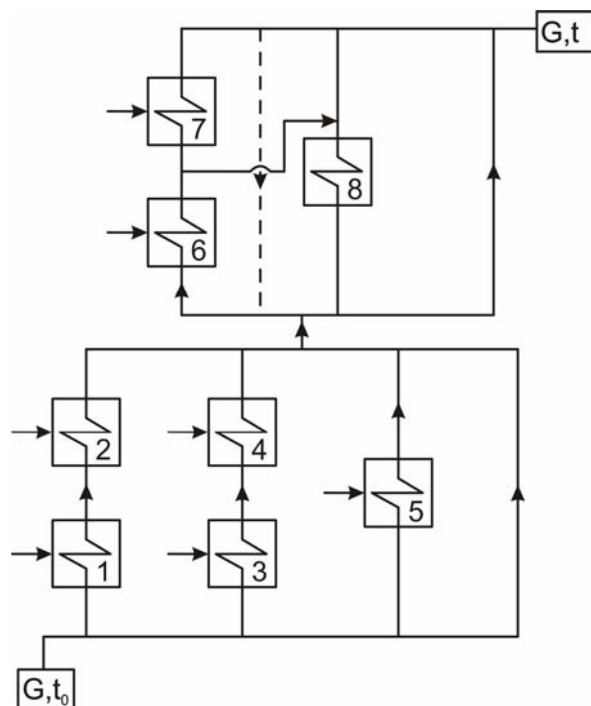


Рис. 1. Пример теплофикационной установки подогрева сетевой воды: 1, 3, 5, 6 – основные подогреватели сетевые (ОПС); 2, 4, 7 – пиковые подогреватели сетевые (ППС); 8 – пиковый водогрейный котел (ПВК)

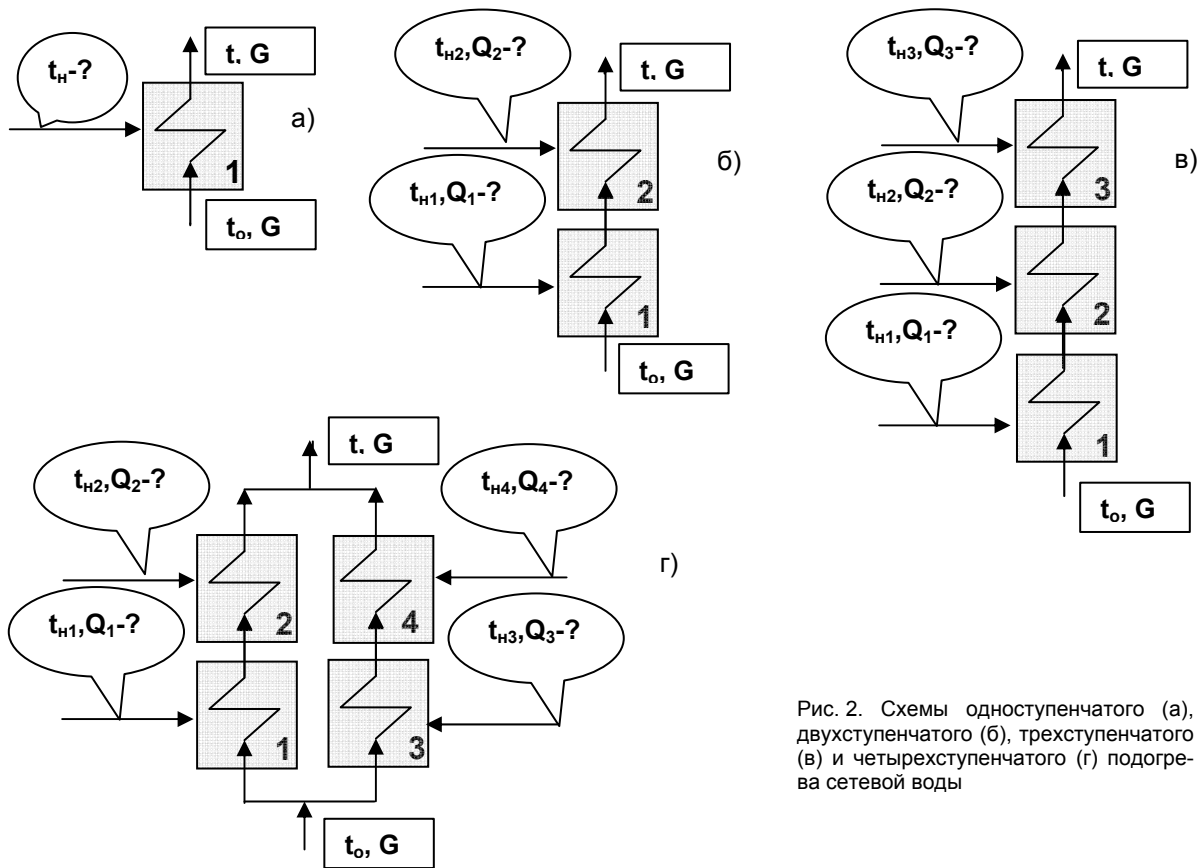


Рис. 2. Схемы одноступенчатого (а), двухступенчатого (б), трехступенчатого (в) и четырехступенчатого (г) подогрева сетевой воды

В качестве целевой функции для оценки эффективности используется потеря эксэргии теплоносителей [2]. При протекании в системе обратимых процессов эксэргия системы не меняет своего значения. Любые необратимые процессы в системе приводят к потере эксэргии. Известно [2, 3], что минимальные потери эксэргии при теплообмене определяются минимальным температурным напором, а следовательно, при заданных температурах сетевой воды (t_0, t) – значением температуры насыщения пара в подогревателе t_n . Таким образом, минимальное значение температуры насыщения соответствует минимальной потере эксэргии при теплопередаче.

Известный [4] вид дифференциального уравнения, описывающего изменение температуры воды вдоль поверхности нагрева, позволяет найти из его решения минимальное значение температуры насыщения, при которой обеспечивается требуемая тепловая нагрузка

$$t_n = \frac{Q}{W(1 - \exp(-aF))} + t_0, \quad (1)$$

где $W = cG$ – водяной эквивалент; c – удельная теплоемкость; G – расход теплоносителя; F – площадь поверхности теплообмена; $a = k/W$, k – коэффициент теплопередачи.

Полученная формула показывает, что температура насыщения линейно возрастает с увеличением нагрузки.

Задача 2. В следующей задаче рассматривается распределение теплофикационной нагрузки между двумя подогревателями, схема включения которых приведена на рис. 2,б. При последовательном включении по воде расход теплоноси-

теля через подогреватели будет одинаковым, а температуры насыщения пара в каждом подогревателе выбираются таким образом, чтобы суммарные потери эксэргии были минимальными. С учетом сказанного предлагается следующая целевая функция:

$$F_z = t_{n1} \frac{Q_1}{Q} + t_{n2} \frac{Q_2}{Q}, \quad (2)$$

где F_z – целевая функция оптимизации; индексы 1 и 2 относятся к первому и второму подогревателю, соответственно (нумерация подогревателей показана на рис. 2,б).

С учетом (1) и баланса энергии по ступеням $Q = Q_1 + Q_2$ целевая функция оптимизации записывается в виде

$$F_z = \frac{1}{Q} [(A_1 - A_3)Q_1^2 + A_2(Q - Q_1)^2 + A_3QQ_1 + t_{20}Q], \quad (3)$$

где $A_1 = \frac{1}{W_1 y_1}$; $A_2 = \frac{1}{W_2 y_2}$; $A_3 = \frac{1}{W}$;

$y_i = 1 - \exp(-a_i F_i)$, $i = 1, 2$.

Дифференцирование функции (3) по Q_1 и приравнивание производной к нулю позволяет определить оптимальное значение тепловой нагрузки в первом подогревателе:

$$Q_1 = \frac{2A_2 - A_3}{2(A_1 + A_2 - A_3)} Q. \quad (4)$$

Оптимальное значение тепловой нагрузки второго подогревателя находится из баланса энергии:

$$Q_2 = Q - Q_1. \quad (5)$$

Задача 3. В следующем примере рассматривается распределение теплофикационной нагрузки уже между тремя последовательно включенными подогревателями (рис. 2,в). По аналогии с задачей 2, целевая функция записывается в виде

$$F_z = t_{н1} \frac{Q_1}{Q} + t_{н2} \frac{Q_2}{Q} + t_{н3} \frac{Q_3}{Q}, \quad (6)$$

где индексы 1, 2, 3 относятся к первому, второму и третьему подогревателям, соответственно (нумерация подогревателей показана на рис. 2,в).

С учетом теплового баланса $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$ и формулы (1) выражение (6) преобразуется к виду

$$F_z = C_1 Q_1^2 + C_2 Q_2^2 + C_3 Q_1 Q_2 + C_4 (Q_1 + Q_2) + C_0. \quad (7)$$

Вычисление частных производных целевой функции по Q_1 и Q_2 и приравнение их к нулю сводит решение оптимизационной задачи функции двух переменных к решению системы двух линейных уравнений, которая в матричной записи имеет вид

$$\begin{pmatrix} 2C_1 & C_3 \\ C_3 & 2C_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} C_4 \\ C_4 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где

$$C_1 = B_1 + B_3 + B_4; \quad C_2 = B_2 + B_3 + B_4;$$

$$C_3 = 2 B_2 + 3 B_4; \quad C_0 = B_3 Q^2 + B_0 Q; \quad B_0 = \frac{t_{20}}{Q};$$

$$B_1 = \frac{1}{Q W y_1}; \quad B_2 = \frac{1}{Q W y_2}; \quad B_4 = \frac{1}{Q W};$$

$$B_3 = \frac{1}{Q W y_3}; \quad y_i = 1 - \exp(-a_i F_i), \quad i = 1, 2, 3.$$

Исследование функции (7) показывает, что найденному решению соответствует минимум целевой функции.

Задача 4. В следующей задаче оптимизируется распределение тепловой нагрузки между аппаратами более сложной ТФУ, включающей четыре подогревателя, схема включения которых приведена на рис. 2,г. В первую нитку включаются последовательно первый и второй подогреватели. Вторую нитку образуют третий и четвертый подогреватели. Первая и вторая нитка подогревателей включаются параллельно по сетевой воде. Общий расход сетевой воды через установку определяется суммой расходов по ниткам $G = G^I + G^{II}$. Римская цифра верхнего индекса здесь и далее соответствует номеру рассматриваемой нитки. Арабские цифры нижнего индекса показывают номер подогревателя согласно рис. 2,г. Установка при заданной суммарной тепловой нагрузке характеризуется пятью независимыми параметрами оптимизации: G^I, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 . Анализ схемы рис. 2,г показывает, что она может быть сведена к двум параллельно включенным схемам рис. 2,б задачи 2. Используя решение задачи 2 для каждой нитки, пятимерная оптимизационная задача сводится к одномерной задаче следующим образом. Задавая значение расхода воды по первой нитке $x = G^I$, определяется теплофикационная нагрузка на первую нитку $Q^I = G^I c (t - t_0) = Q_1 + Q_2$. В этом случае оптимальное распределение нагрузки между первым и вторым подогревателем, по аналогии с задачей 2, определяется согласно (4), (5).

Зная тепловую нагрузку и расход сетевой воды по второй нитке, аналогично определяются

оптимальные тепловые нагрузки на третий и четвертый подогреватели.

Целевая функция оптимизации для всей установки записывается как функция от одной переменной – расхода сетевой воды по первой нитке – в виде

$$F_z = t_{н1} \frac{Q_1}{Q} + t_{н2} \frac{Q_2}{Q} + t_{н3} \frac{Q_3}{Q} + t_{н4} \frac{Q_4}{Q}. \quad (9)$$

Решение сформулированной оптимизационной задачи проиллюстрировано на рис. 3 зависимостями температуры насыщения в четырех подогревателях (кривые 1–4) и целевой функции (кривая 5) от параметра оптимизации.

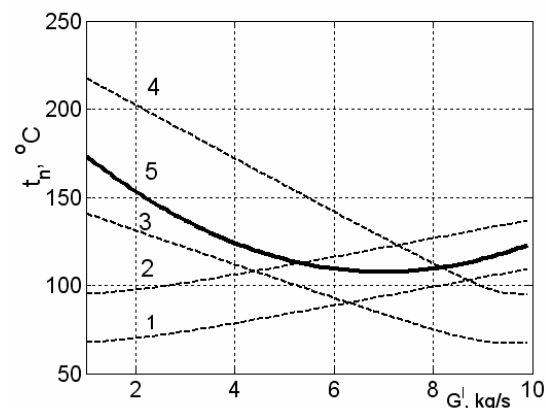


Рис. 3. Зависимость температуры насыщения в первом, втором, третьем, четвертом (кривые 1–4, соответственно) подогревателях и целевой функции (кривая 5) от параметра оптимизации

Для расчетного примера выбраны следующие исходные данные: $G=10$ кг/с; $c=4000$ Дж/(кг К); $F_1=10, F_2=20, F_3=5, F_4=4$ м²; $k_1=2000, k_2=1000, k_3=2000, k_4=2000$ Вт/(м² К); $t=95$ °С; $t_0=40$ °С. Минимальное значение целевой функции и соответствующее значение параметра оптимизации является решением оптимизационной задачи. Графики 1–4 позволяют найти оптимальные значения температур насыщения и, согласно (1), оптимальное распределение нагрева сетевой воды по подогревателям.

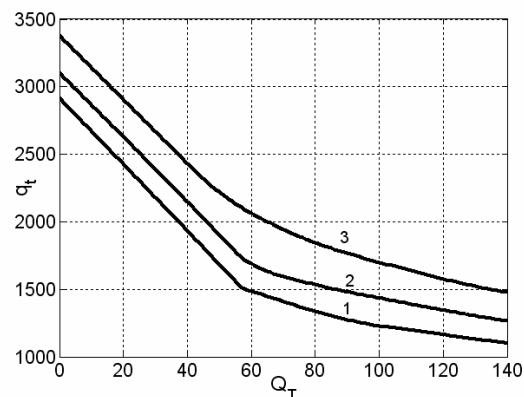


Рис. 4. Зависимость удельного расхода тепла «брутто» на выработку электроэнергии (q_t , ккал/(кВт ч)) турбоагрегатом Т-100 от тепловой нагрузки (Q_T , ккал/ч) при различном давлении пара в Т-отборе: 1 – 0,6 кгс/см²; 2 – 1,0 кгс/см²; 3 – 1,6 кгс/см² (при минимальной мощности)

Оптимальное решение задачи распределения нагрузки ТФУ может использоваться при оптимизации распределения нагрузки между турбинами в силу следующих причин. Целевая функция

(9) обеспечивает минимальное среднее значение температуры насыщения (или давления) пара в подогревателях. Уменьшение давления пара в теплофикационном отборе турбины при заданной тепловой нагрузке повышает эффективность работы турбины. Это подтверждается экспериментальными зависимостями удельного расхода тепла «брутто» на выработку электроэнергии турбоагрегатом Т-100 от тепловой нагрузки при различном давлении пара в Т-отборе (рис. 4). Сделанное замечание позволяет найденное оптимальное для ТФУ решение использовать при оптимизации распределения нагрузки между турбинами, что существенно уменьшает число независимых переменных при решении оптимизационной задачи.

Борисов

Жуков Владимир Павлович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-45,
mizonov@home.ivanovo.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры тепловых электрических станций,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Коротков Александр Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56,
admin@tes.ispu.ru

Список литературы

1. **Программный** комплекс «ТЭС-эксперт»: опыт оптимизации режимов работы оборудования ТЭЦ / Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 3–6.
2. **Коновалов В.И.** Техническая термодинамика. – Иваново, 2005.
3. **Кафаров В.В.**, Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. – М.: Энергоатомиздат.
4. **Обобщенная** модель каскадных теплообменных аппаратов с учетом фазовых переходов / Е.В. Барочкин и др. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47. – Вып. 3. – С. 67–69.