

Предложен метод расчета тепловых схем. Метод основан на построении модельных теплообменников. Расчет тепловой схемы состоит в итеративной процедуре. Основной операцией на итерации является решение системы линейных уравнений. Результаты решения системы уравнений используются для корректировки параметров модельных теплообменников. Алгоритм использован при разработке программного обеспечения задач оптимального проектирования паровых котлов.

© Н.Г. Журбенко, Ю.П. Лаптин,
2006

УДК 519.8

Н.Г. ЖУРБЕНКО, Ю.П. ЛАПТИН

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ СХЕМ

Введение. Основой для выполнения многочисленных расчетов, выполняемых при проектировании энергетических паровых котлов, является расчет тепловой схемы парового котла [1, 2]. Существующие методики такого расчета достаточно трудоемки и ориентированы на разовые вычисления, или на выполнение сравнительно небольшого числа вариантов расчетов. При оптимизации конструкций такие расчеты необходимо делать на каждой итерации оптимизационного алгоритма, а число итераций может достигать нескольких тысяч [3–5]. В связи с этим возникает необходимость разработки быстрых методов расчета тепловых схем.

Постановка задачи. Для отражения сути предлагаемого метода расчета, тепловая схема теплоэнергетического объекта (например, парового котла) будет представляться в следующем упрощенном виде.

Имеются две среды. Одна из них – активная, вторая – пассивная. В теплоэнергетическом устройстве происходит передача тепловой энергии от активной среды пассивной. Для содержательной интерпретации будем считать, что активная среда – это газ (продукты сгорания в топке парового котла), пассивная среда – водяной пар парового тракта котла. Газ движется в газоходе котла (газовый тракт парового котла). Водяной пар циркулирует в трубопроводе (паровой тракт котла). Для простоты изложения будем считать, что тепловая схема содержит один газовый тракт и один паровой тракт.

Основной элемент тепловой схемы – теплообменник, специальное техническое устройство, в котором происходит передача теп-

ловой энергии водяному пару. Теплообменник помещается в газовый тракт котла, который будем представлять в виде некоторого преобразователя («черный ящик»), имеющего два входа и два выхода. Один из входов (один из выходов) определяется физическими параметрами потока газа, второй – пара.

Важнейшие физические параметры теплотехнических расчетов – энтальпия, температура, давление, массовый расход (масса газа и пара, проходящая через сечение тракта за единицу времени). Будем считать, что все параметры, кроме энтальпии и температуры заданы. Заметим, что тогда температура однозначно определяется энтальпией и наоборот. Поэтому для определенности будем вести изложение в терминах температуры.

T_1^g, T_2^g (T_1^s, T_2^s) – температуры газа (пара) на входе и выходе теплообменника соответственно (нижний индекс g – характеристика газа, нижний индекс s – пара). Пусть входные параметры T_1^g, T_1^s теплообменника заданы. Тогда расчет выходных температур T_2^g, T_2^s – достаточно сложная задача математической физики (задача решения нелинейных дифференциальных уравнений). В теплотехнике для такого расчета разработаны специальные методики приближенного решения этой задачи [1]. Как правило, алгоритм такого расчета сводится к решению системы нелинейных уравнений с небольшим числом переменных. Разумеется, при расчете конкретного теплообменника используются как вышеуказанные входные физические параметры входов теплообменника, так и множество его конструктивных параметров (геометрические параметры газозода; материал, толщина и диаметр трубопровода и др.). Такой упрощенный алгоритм приближенного решения задачи теплотехнического расчета оказывается достаточно трудоемким для расчета выходных параметров для тепловой схемы в целом, которая содержит не один, а десятки теплообменников. Причем в первую позицию газозода (для которого входная температура задана) помещается не первый теплообменник парового тракта (для которого входная температура также считается известной), а некоторый теплообменник, для которого вход является выходом теплообменника, помещенного в некоторую более далекую позицию газозода. Поэтому тепловой расчет тепловой схемы сводится к решению системы нелинейных уравнений, содержащей несколько десятков переменных. Ситуация существенно усложняется при решении задач оптимизации тепловой схемы, когда в соответствии с некоторым критерием требуется определить конструктивные параметры теплообменников. В таких задачах необходимо производить многократный расчет тепловой схемы (даже при относительно небольшом числе оптимизируемых параметров требуется десятки тысяч раз производить расчет схемы). В данной работе предлагается алгоритм расчета тепловой схемы, основанный на идее введения модельного теплообменника.

Модельный теплообменник вводится следующим образом. Для широкого класса (насколько нам известно, для всех) теплообменников, используемых в теплоэнергетических устройствах, выполняются такие условия: $T_2^g \in [T_1^g, T_1^s]$,

$T_2^s \in [T_1^g, T_1^s]$ (здесь предполагается, что $T_1^g \geq T_1^s$). В ситуации передачи тепловой энергии без использования преобразования в другие виды энергии, выполнение этих соотношений очевидно из термодинамических соображений. Указанные условия эквивалентны соотношениям:

$$T_2^g = \lambda^g T_1^g + (1 - \lambda^g) T_1^s, \quad (1)$$

$$T_2^s = (1 - \lambda^s) T_1^g + \lambda^s T_1^s, \quad (2)$$

где

$$0 \leq \lambda^g \leq 1, 0 \leq \lambda^s \leq 1. \quad (3)$$

Константы λ^g, λ^s определяются следующим образом. Для заданных входных температур $\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s, \tilde{T}_1^g \neq \tilde{T}_1^s$, применяя используемый в теплотехнике алгоритм, вычисляем выходные температуры $\tilde{T}_2^g, \tilde{T}_2^s$. Тогда константы λ^g, λ^s элементарно определяются из линейных уравнений (1, 2), с использованием величин $\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s, \tilde{T}_2^g, \tilde{T}_2^s$. (Если $T_1^g = T_1^s$, то полагаем $\lambda^g = 1, \lambda^s = 1$.)

Под ориентируемым на входные температуры $\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s$ модельным теплообменником понимается теплообменник, для которого расчет выходных температур осуществляется согласно элементарным линейным соотношениям (1, 2). Таким образом, модельный теплообменник является линейным преобразователем. Модельный теплообменник определяется двумя скалярными параметрами λ^g, λ^s . Из определения параметров λ^g, λ^s , очевидно, что для входных температур $\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s$, выходные температуры модельного теплообменника в точности соответствуют их значениям теплотехнического расчета. Разумеется, при других значениях входных температур такого соответствия уже не будет: модельный теплообменник будет давать некоторую погрешность. Однако, численное исследование величины этой погрешности показало, что модельный теплообменник (ориентированный на некоторые типичные входные температуры) обеспечивает относительную погрешность не более 10 % для достаточно широкого диапазона значений входных температур.

Введенному модельному теплообменнику можно дать следующую более теплофизическую интерпретацию. В какой-то степени эта интерпретация поясняет, почему элементарный линейный преобразователь неплохо аппроксимирует достаточно сложное техническое устройство. Пусть заданы входные температуры $\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s$. Тогда для любого типа теплообменника, из термодинамических соображений можно определить максимально возможную величину тепловой энергии, передаваемой пассивной среде от активной среды (идеальный теплообменник). Например, для прямоточного теплообменника, в котором направление движения пара совпадает с направлением движения газа, идеальный теплообменник определяется условием: $\tilde{T}_2^g = \tilde{T}_2^s$. Обозначим эту величину

$Q^*(\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s)$. Пусть $\tilde{Q}(\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s)$ – рассчитанное значение этой энергии для реального теплообменника. Величину $q(\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s) = \tilde{Q}(\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s) / Q^*(\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s) < 1$ естественно назвать коэффициентом эффективности теплообменника. Этот коэффициент, вообще говоря, зависит от входных температур $\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s$. Игнорируем эту зависимость, для любых входных температур определим величину обменной тепловой энергии формулой $Q(T_1^g, T_1^s) = q(\tilde{T}_1^g, \tilde{T}_1^s) \times Q^*(T_1^g, T_1^s)$. Тогда оказывается (при обычно выполняемых условиях), что вводимый таким образом модельный теплообменник эквивалентен введенному ранее модельному теплообменнику (1, 2). Таким образом, модельный теплообменник хорошо аппроксимирует реальный, если коэффициент эффективности теплообменника слабо зависит от величин входных температур T_1^g, T_1^s (в диапазоне их типичном значений).

Расчет тепловой схемы. Для краткости изложения, по-прежнему, будем считать, что тепловая схема содержит только два тракта: газовый и паровой. Пусть схема содержит m теплообменников парового тракта, помещаемых в некоторые позиции газового тракта. Пусть для определенности заданы входные температуры первой позиции газового тракта и первого теплообменника парового тракта: $T_1^g(0), T_1^s(0)$. Задача состоит в определении остальных входных и выходных температур теплообменников. Таким образом, задача содержит $2m - 2$ неизвестных. Если теплообменники располагаются последовательно по позициям газового тракта (первый теплообменник размещен в первой позиции газового тракта, второй – во второй позиции и т. д.), то задача тривиальна и сводится к последовательному применению теплофизического расчета для m теплообменников. Однако, как правило, это не так. $j^s(j^s)$ – номер позиции газового тракта, в которую помещен теплообменник j^s . Пусть для первой итерации алгоритма определены начальные ориентировочные значения входных температур теплообменников j^s . $\tilde{T}_1^g(j^s, 1), \tilde{T}_1^s(j^s, 1)$. Отметим, что ориентировочные значения этих температур проектировщику тепловой схемы известны. Опишем k -ю итерацию предлагаемого алгоритма расчета тепловой схемы, $k = 1, 2, 3, \dots$

Пусть $\tilde{T}_1^g(j^s, k), \tilde{T}_1^s(j^s, k)$ – ориентировочные значения входных температур теплообменников j^s на итерации k (для первой итерации эти значения уже определены).

Генерируем ориентируемые на эти температуры модельные теплообменники, т.е. вычисляем параметры $\lambda^g(j^s, k), \lambda^s(j^s, k), j^s = 1, 2, \dots, m$. Тогда расчет тепловой схемы с модельными теплообменниками сводится к решению следующей системы линейных уравнений:

$$T_2^g(j^s) = \lambda^g(j^s, k) T_1^g(j^s) + (1 - \lambda^g(j^s, k)) T_1^s(j^s), \quad j^s = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

$$T_2^s(j^s) = \lambda^s(j^s, k)T_1^g(j^s) + (1 - \lambda^s(j^s, k))T_1^s(j^s), \quad j^s = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

$$T_1^g(j^s(j^s + 1)) = T_2^g(j^s(j^s + 1)), \quad T_1^s(j^s + 1) = T_2^s(j^s), \quad j^s = 1, 2, \dots, m - 1, \quad (6)$$

$$T_1^s(1) = T_1^s(0), \quad T_1^g(j^g(1)) = T_1^g(0). \quad (7)$$

Здесь: уравнения (6) соответствуют схеме размещения теплообменников в позициях газового тракта; уравнения (7) соответствуют «граничным» условиям: значения входных температур парового и газового трактов фиксированы.

Пусть $T_1^g(j^s, k)$, $T_2^g(j^s, k)$, $T_1^s(j^s, k)$, $T_2^s(j^s, k)$ – решение (4–7). Определим значения $\tilde{T}_1^g(j^s, k + 1)$, $\tilde{T}_1^s(j^s, k + 1)$ – ориентировочные значения входных температур теплообменников j^s на итерации $k + 1$:

$$\tilde{T}_1^g(j^s, k + 1) = (T_1^g(j^s, k) + \tilde{T}_1^g(j^s, k)) / 2; \quad (8)$$

$$\tilde{T}_1^s(j^s, k + 1) = (T_1^s(j^s, k) + \tilde{T}_1^s(j^s, k)) / 2. \quad (9)$$

Таким образом, значения ориентировочных температур выбирается как среднее арифметическое значений предыдущих ориентировочных температур и температуры, полученной на основе расчета тепловой схемы с модельными теплообменниками. В качестве условия останова алгоритма используем условие выполнения следующих соотношений:

$$|T_1^g(j^s, k) - \tilde{T}_1^g(j^s, k)| \leq \gamma \tilde{T}_1^g(j^s, k);$$

$$|T_1^s(j^s, k) - \tilde{T}_1^s(j^s, k)| \leq \gamma \tilde{T}_1^s(j^s, k),$$

где γ – определяющий относительную точность решения задачи параметр алгоритма, $0 < \gamma < 1$.

На основе описанного алгоритма разработано программное обеспечение задачи расчета достаточно сложных тепловых схем паровых котлов [6, 7]. Применение алгоритма к решению практических задач показало его достаточно высокую эффективность: для обеспечения относительной точности решения $\gamma \approx 0.01$ требуется ≈ 10 итераций алгоритма.

Заключение. На основе использования модельных теплообменников разработаны алгоритм расчета тепловых схем паровых котлов и алгоритм вычисления производных для выходных температур теплообменников по различным его конструктивным параметрам. Это позволило создать достаточно эффективный алгоритм решения отдельных задач оптимального проектирования паровых котлов. Также отметим, что описанный алгоритм в идейном плане имеет много общего с методом последовательных приближений решения уравнений со сжимающим оператором. Можно сказать, что свойству сжатия оператора в описанном алгоритме соответствует всегда выполняющееся в реальных условиях следующее соотношение (следствие (3)): $|T_2^g - T_2^s| \leq \mu |T_1^g - T_1^s|$, где $0 < \mu < 1$.

М.Г. Журбенко, Ю.П. Лаптин

ПРО ОДИН МЕТОД РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ СХЕМ

Запропоновано метод розрахунку теплових схем. Метод ґрунтується на формуванні модельних теплообмінників. Розрахунок теплової схеми є ітеративною процедурою. Основна операція на ітерації – розв’язання системи лінійних рівнянь. Розв’язок системи рівнянь використовується для корекції параметрів модельних теплообмінників. Алгоритм використаний при розробці програмного забезпечення задач оптимального проектування парових котлів.

N.G. Zhurbenko, Yu.P. Laptin

ON A METHOD OF CALCULATION OF THERMAL SCHEMES

A method of calculation of thermal schemes is proposed. The method is based on a construction of heat exchange unit model. The method consists in the iterated procedure. Basic operation on iteration is the solution of a linear equations system. The results of solution of a set of equations are used for adjustment of parameters of model of heat exchange unit. The algorithm is used for software for optimum design of steam boilers.

1. *Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод).* – М.: Энергия, 1973. – 295 с.
2. *Паришин А.А., Митор В.В., Безгрешнов А.Н. и др. Тепловые схемы котлов.* – М.: Машиностроение, 1987. – 222 с.
3. *Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок.* – М.: Энергия, 1978. – 248 с.
4. *Андрющенко А.И., Змачинский А.В., Понятов В.А. Оптимизация тепловых циклов и процессов ТЭС.* – М.: Высшая школа, 1974. – 280 с.
5. *Шлейфер Б.М., Литвак Д.Б. Оптимальные решения при проектировании промперегревателей.* – Энергомашиностроение, N 2, 1978, с.4 – 6.
6. *Система Крокус – автоматизированное проектирование, комплексные расчеты, оптимизация котельных установок / Левин М.М., Волковицкая П.И., Лаптин Ю.П., Журбенко Н.Г. и др. // Энергетика и электрификация.* – 2001. – № 7. – С. 45 – 48.
7. *Левин М.М., Волковицкая П.И., Лаптин Ю.П., Журбенко Н.Г. Использование средств оптимизации в системе автоматизированного проектирования энергетических котлоагрегатов КРОКУС // Энергетика и электрификация.* – 2003. – № 7. – С. 41 – 51.

Получено 17.03.2006