

## Этюд 7. Подарок теплотехников химикам-водникам

Ведя расчеты паротурбинных циклов в предыдущих этюдах, мы не учитывали примеси, которые могут находиться в воде и в водяном паре. Концентрация этих примесей очень мала и не может существенно влиять на теплофизические параметры рабочего тела. Но они могут существенно влиять на технологические показатели работы энергоблоков.

На тепловых и атомных электростанциях исходную природную воду готовят (обессоливают и т. д.), для того чтобы не было отложений в паротурбинном контуре. Примеси могут переходить из котловой воды в пар, а затем откладываться в проточной части турбины, что ухудшает ее КПД, увеличивает нагрузку на осевые подшипники<sup>1</sup>, а также чревато "поднакипной" коррозией. Основные источники примесей в котловой воде такие:

- добавочная вода, которую, правда, тщательно готовят, и примеси с ней могут попасть в котел только по недосмотру персонала химического цеха электростанции, обслуживающего водоподготовительные установки;
- протечки в конденсаторе турбины, с которыми в "чистый" конденсат, а затем в котел и паровую турбину может попасть "грязная" вода из градирни, пруда-охладителя (оборотные системы технического водоснабжения) или из реки (проточные системы);
- коррозионные процессы в паротурбинных контурах, "обогащающие" воду и пар окислами железа, меди и других металлов, входящих в конструкционные материалы (сплавы) теплосилового оборудования.

Для снижения накопления примесей в котловой воде, отложения их в котле и выноса в паровую турбину проводят различные мероприятия: очищают контурную воду на блочных обессоливающих установках (БОУ), дозируют в котел различные противонакипные добавки (фосфаты, например) и пр. Тут химикам, обслуживающим БОУ и готовящим реагенты для дозирования в котел, приходят на помощь теплотехники — см. название этюда. В чем суть этого "подарка"?

Примеси, поступающие с питательной водой в *барабанный* котел, в нем концентрируются и выводятся из котла с *продувкой*, составляющей 1–3% расхода пара. Но небольшая часть примесей переходит в пар, что приводит к вышеописанным осложнениям. Отношение концентрации примеси в паре к концентрации примеси в котловой воде условно называют *суммарным коэффициентом выноса*: он суммирует два различных процесса — унос примесей в насыщенный пар с каплями влаги и

<sup>1</sup> Вплоть до того, что подшипники не выдерживают такие сверхлимитные нагрузки и разваливаются. В старину (а сейчас так уже можно говорить об эре начала "большой" энергетики) обходчик в машинном зале электростанции стетоскопом прослушивал подшипники и другие "критические" части турбин, насосов, вентиляторов. Сейчас такой "врачебно-профилактический" контроль автоматизирован.

растворимость примеси в паре. Но воду из котла можно не просто продувать, а делать это *ступенчато*, т. е. реализовывать "подарок теплотехников плохим<sup>2</sup> химикам".

Как известно, дареному коню в зубы не смотрят, но мы не просто примем "подарок теплотехников", а попробуем "посмотреть ему в зубы", оптимизировать его. На рис. 7.1 показан интернет-сайт, зайдя на который можно не только смоделировать, но и оптимизировать процесс трехступенчатого испарения воды в барабанном котле: вода из первого (чистого) отсека частично испаряется, а частично продувается во второй ("грязный", солевой) отсек, а из него в свою очередь опять же частично испаряется, а частично продувается в третий отсек, который, как правило, конструктивно оформляют в виде выносного циклона-сепаратора<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Плохим не в смысле нехорошим, а в том смысле, что химики-энергетики в какой-то момент не могут по независящим от них причинам обеспечить приемлемое качество питательной воды котла и качество острого пара.

<sup>3</sup> Барабан котла оборудован не только перегородками, разделяющими зеркало испарения на отсеки, но и другими внутрикотловыми устройствами (паропромывные щиты, сепараторы влаги и др.), которые не показаны на рис. 7.1.

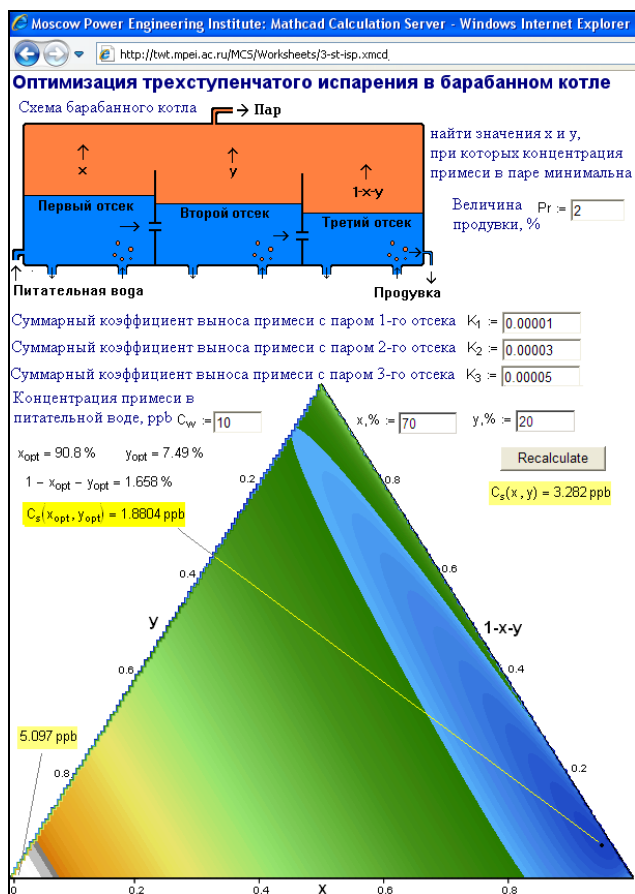


Рис. 7.1. Сайт по расчету ступенчатого испарения в барабанном котле

На сайте, показанном на рис. 7.1, можно скорректировать исходные данные, нажать на кнопку **Recalculate** и получить ответ — концентрацию примеси в паре при заданных значениях долей пара, генерируемых в первом (чистом) отсеке (переменная оптимизации  $x$ ) и во втором ("грязном") отсеке ( $y$ ), и значения оптимума, но при которых концентрация примеси в паре будет минимальна.

Это классическая оптимизационная задача, включающая в себя три элемента:

- *целевая функция* — концентрация примеси в паре, которую нужно минимизировать; на рис. 7.2 показан фрагмент Mathcad-документа, где с помощью символ-

ного оператора `solve` решаются алгебраические уравнения баланса примесей в каждом из трех отсеков и формируется целевая функция двух аргументов  $C_s$ ; при этом формируются промежуточные функции  $C$  с индексами  $w1, w2, w3$  (котловая вода в трех отсеках) и  $s1, s2, s3$  (пар, генерируемый в трех отсеках);

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l} \text{Поступает с питательной водой} \\ C_w \cdot (1 + Pr) \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{Уходит с паром} \\ C_{w1} \cdot K_1 \cdot x \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} \text{Продувка во 2-й отсек} \\ C_{w1} \cdot (1 + Pr - x) \end{array} \right\} \text{solve, } C_{w1} \\
 \\
 C_{w1}(x) := \frac{C_w \cdot (1 + Pr)}{K_1 \cdot x + 1 + Pr - x} \quad C_{s1}(x) := K_1 \cdot C_{w1}(x) \\
 \\
 \left. \begin{array}{l} \text{Поступает из 1-го отсека} \\ C_{w1}(x) \cdot (1 + Pr - x) \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{Уходит с паром} \\ C_{w2} \cdot K_2 \cdot y \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} \text{Продувка в 3-й отсек} \\ C_{w2} \cdot (1 + Pr - x - y) \end{array} \right\} \text{solve, } C_{w2} \\
 \\
 C_{w2}(x, y) := \frac{C_w \cdot (1 + Pr) \cdot (x - 1 - Pr)}{(K_1 \cdot x + 1 + Pr - x) \cdot (-K_2 \cdot y - 1 - Pr + x + y)} \quad C_{s2}(x, y) := K_2 \cdot C_{w2}(x, y) \\
 \\
 \left. \begin{array}{l} \text{Поступает из 2-го отсека} \\ C_{w2}(x, y) \cdot (1 + Pr - x - y) \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{Уходит с паром} \\ C_{w3} \cdot K_3 \cdot (1 - x - y) \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} \text{Уходит с продувкой} \\ C_{w3} \cdot Pr \end{array} \right\} \text{solve, } C_{w3} \\
 \\
 C_{w3}(x, y) := \frac{C_w \cdot (1 + Pr) \cdot (-1 - Pr + x) \cdot (x + y - 1 - Pr)}{(K_1 \cdot x + 1 + Pr - x) \cdot (-K_2 \cdot y - 1 - Pr + x + y) \cdot (-K_3 + K_3 \cdot x + K_3 \cdot y - Pr)} \quad C_{s3}(x, y) := K_3 \cdot C_{w3}(x, y) \\
 \\
 C_s(x, y) := \left. \begin{array}{l} \text{Уходит из 1-го отсека} \\ x \cdot C_{s1}(x) \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} \text{Уходит из 2-го отсека} \\ y \cdot C_{s2}(x, y) \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} \text{Уходит из 3-го отсека} \\ (1 - x - y) \cdot C_{s3}(x, y) \end{array} \right\}
 \end{array}$$

Рис. 7.2. Создание функций пользователя с помощью символьной математики Mathcad

- *переменные оптимизации*  $x$  и  $y$  — доли пара, генерируемые в первом и во втором отсеках барабана котла; на рис. 7.1 показано, что посетитель сайта может менять значения в одноименных текстовых полях и видеть, что возвращает целевая функция  $C_s$ ; при  $x := 1$  и  $y = 0$  мы имеем бесступенчатое испарение; при  $x + y = 1$  мы имеем двухступенчатое испарение ( $x < 1$ ), а при  $x + y < 1$  — трехступенчатое; посетитель сайта может "поиграть" значениями  $x$  и  $y$  и понаблюдать, как изменяется значение  $C_s$ , приближаясь или удаляясь от своего минимального значения;
- *ограничения*; об одном из них мы уже упомянули — это  $x + y < 1$ ; два других ограничения такие:  $x \geq 0$  и  $y \geq 0$ ; эти ограничения приводят к тому, что область визуализации целевой функции имеет вид равностороннего треугольника (см. рис. 7.1).

Равносторонний треугольник — это основа визуализации *трехкомпонентных смесей* (сплавов): поверхность над таким треугольником отображает какой-либо параметр (плотность сплава, к примеру, или температуру его плавления), а стороны треугольника — это процентное содержание каждого из трех компонентов. Углы треугольника — один из трех чистых металлов, стороны — двухкомпонентный сплав, а "нутро" треугольника — трехкомпонентный сплав. Очень часто здесь, как

в драке, третий оказывается лишним. Так, например, припой для пайки — это сплав свинца с оловом в оптимальном отношении, имеющий минимальную (опять оптимизация) температуру плавления. Добавление в припой какого-нибудь третьего металла (кадмия или висмута, например) только ухудшает этот основной его технологический показатель или, наоборот, улучшает его, делая припой более тугоплавким. В нашем случае третья ступень испарения дает очень незначительный эффект снижения концентрации примеси в паре.

Значения  $x$  и  $y$ , задаваемые посетителями сайта, показанного на рис. 7.1, служат первым приближением при численном поиске оптимальных значений  $x$  и  $y$ , минимизирующих целевую функцию  $C_s$  (рис. 7.3<sup>4</sup>).

Целевая функция	Точность поиска максимума
$\eta(x, y) = \frac{C_s(1, 0) - C_s(x, y)}{C_s(1, 0)}$	STOL := $10^{-17}$ TOL := $10^{-17}$
Given	Ограничения
$0 < x < 1$	$0 < y < 1$
$x + y < 1$	$\begin{pmatrix} x_{opt} \\ y_{opt} \end{pmatrix} := \text{Maximize}(\eta, x, y) = \begin{pmatrix} 90.848 \\ 7.494 \end{pmatrix} \%$

Рис. 7.3. Численный поиск оптимума

Естественно, машинист реального котла не может в широком диапазоне произвольно менять доли пара, генерируемые в отсеках котла. Оптимальные значения  $x$  и  $y$ <sup>5</sup>, которые сильно зависят от величины продувки  $P_r$ , закладываются при проектировании котла. Но машинист котла имеет возможность слегка корректировать значения  $x$  и  $y$ . Дело в том, что опускные и подъемные трубы котла первой и второй ступеней испарения могут "обслуживаться" разными горелками. Подавая разное количество топлива на эти горелки, можно менять значения  $x$  и  $y$ , уменьшая тем самым количество примесей в паре — "делая подарок плохим химикам" и не просто "даря коня", а "оптимизируя", "смотря ему в зубы".

Если говорить о водоподготовке для котлов, то можно тут упомянуть, что автор разработал и поместил на сервере расчеты по данной технологии (см. [http://tw.mpei.ac.ru/ochkov/VPU\\_Book\\_New/mas/watertreatment.html](http://tw.mpei.ac.ru/ochkov/VPU_Book_New/mas/watertreatment.html)) и даже открыл специализированный сайт с коротким именем [www.vpu.ru](http://www.vpu.ru) (vpu — ВПУ, водоподготовительные установки). На этом сайте в частности есть расчеты по свойствам ионообменных смол, выпускаемых фирмой Dow Chemical ([www.dow.com](http://www.dow.com)). Информация о свойствах ионитов поступает к потребителям в двух видах: на компакт-дисках в виде "закрытых" программ расчета технологических схем водоподготовок (ROSA, IxCalc и др.) и "открытой" технической документацией на бумаге или на интернет-сайтах. Достоинства и недостатки данных способов публикации информации мы уже обсуждали. Первый способ (закрытые программы на дисках) назвать публикацией можно с большой натяжкой. После за-

<sup>4</sup> На рис. 7.3 показан численный (приближенный) поиск максимума функции  $\eta(x, y)$  — КПД процесса ступенчатого испарения.

<sup>5</sup> Эта задача интересна и тем, что у нее может быть любое число переменных оптимизации — от 1 до бесконечности. Но на практике, повторяем, ограничиваются 2–3 ступенями испарения. Эта задача перекликается с другой задачей, рассмотренной нами в *методе б*.

пуска программы, размещенной на диске или скачанной из Интернета, пользователю, как правило, дается возможность только ввести исходные данные и получить итоговый ответ: никакие промежуточные результаты, а тем более формулы, по которым данные ответы получены, не приводятся. Такая "закрывающаяся" информационная технология неудобна и для компании-производителя ионитов: если разработчик данной программы уйдет из фирмы, то становится очень трудно, а порой просто невозможно вносить в программу изменения и дополнения ("кошмар" унаследованного программного обеспечения). Нелишним будет также сказать и о том, что упомянутые программы очень сложны для освоения. Даже опытному специалисту, хорошо знающему водоподготовку и компьютеры, приходится тратить много сил и времени (несколько месяцев), чтобы научиться работать с программами типа ROSA, IxCalc и др. После такого "освоения" специалист часто "подсаживается" на эту программу и не может перейти на другие более современные расчетные средства. Слабость второй технологии публикации технической информации в том, что она "мертва" — по ней нельзя сразу посчитать, введя нужные исходные данные.

В Московском энергетическом институте ([www.mpei.ru](http://www.mpei.ru)) и фирмой "Триеру" ([www.trie.ru](http://www.trie.ru)) разработана технология публикаций технической информации с возможностью непосредственных расчетов по ней. Пользователю (посетителю сайтов <http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/1/Dow/index.html> и <http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/1/RH/index.html>) предоставляется возможность автоматического счета по таким важным технологическим параметрам ионообменных смол как значение проскока удаляемого иона и рабочей обменной емкости [3].

\* \* \*

**Маленький дивертимент после *эпюдов 6 и 7*.** Одно из хобби автора, непосредственно связанное с его основной работой, — это коллекционирование и анимация численных методов решения математических задач. Эта "коллекция", касающаяся оптимизации, размещена на сайте <http://communities.ptc.com/groups/optimisation-with-mathcad>. Особое место в "коллекции" занимают примеры с признаками "очевидности и невероятности". Один из таких примеров, адаптированный к тематике книги, таков. Имеются две шахты, где добывают уголь, и две ТЭЦ, где этот уголь сжигают "с колес", т. е. без складирования. Первая шахта "выдает на-гора" 50 тонн угля в сутки, а вторая — 70. Первая электростанция сжигает 40 тонн угля в сутки, а вторая — 80. Перевозка угля с первой шахты на первую электростанцию стоит 1200 руб. за тонну, с первой шахты на вторую электростанцию — 1600, со второй шахты на первую электростанцию — 800 и со второй шахты на вторую электростанцию — 1000. Нужно так организовать перевозку угля, чтобы ее стоимость была минимальна. На рис. 7.4. показаны условия этой транспортной задачи и ее "ручное" решение: самый дешевый маршрут (вторая шахта — первая ТЭЦ; 800 руб. за тонну перевезенного угля) нагружается полностью (см. первое слагаемое в выражении внизу рис. 7.4), а остатки угля "разбрасываются" по остальным маршрутам.

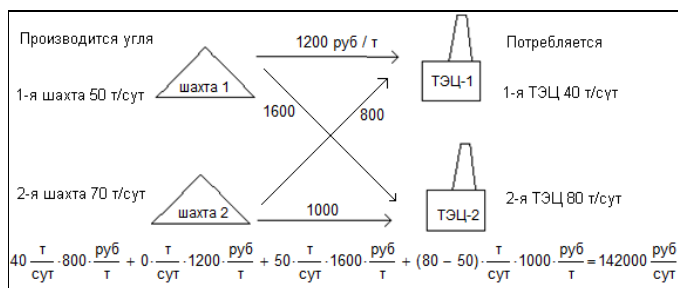


Рис. 7.4. Ошибочное ручное решение транспортной задачи

На рис. 7.5 показано решение данной оптимизационной задачи стандартными средствами Mathcad 15 — формируется целевая функция (СП — стоимость перевозки), дается первое приближение (мы взяли значения, найденные при ручном решении задачи, показанном на рис. 7.4), за ключевым словом *Given* формируются ограничения, а функция *Minimize* находит значения неизвестных, минимизирующих целевую функцию при выполнении ограничений. Автоматическое решение задачи оказалось парадоксальным — по самому дешевому маршруту ничего не нужно возить.

Целевая функция

$$\text{СП}(\omega_{1\tau 1}, \omega_{1\tau 2}, \omega_{2\tau 1}, \omega_{2\tau 2}) = 1200 \frac{\text{руб}}{\text{т}} \omega_{1\tau 1} + 1600 \frac{\text{руб}}{\text{т}} \omega_{1\tau 2} + \dots$$

$$\dots + 800 \frac{\text{руб}}{\text{т}} \omega_{2\tau 1} + 1000 \frac{\text{руб}}{\text{т}} \omega_{2\tau 2}$$

первое приближение

$$\omega_{2\tau 1} = 40 \frac{\text{т}}{\text{сут}} \quad \omega_{1\tau 1} = 0 \frac{\text{т}}{\text{сут}} \quad \omega_{1\tau 2} = 50 \frac{\text{т}}{\text{сут}} \quad \omega_{2\tau 2} = 30 \frac{\text{т}}{\text{сут}}$$

Given

$$\omega_{1\tau 1} + \omega_{1\tau 2} = 50 \frac{\text{т}}{\text{сут}} \quad \omega_{2\tau 2} + \omega_{2\tau 1} = 70 \frac{\text{т}}{\text{сут}}$$

$$\omega_{1\tau 1} + \omega_{2\tau 1} = 40 \frac{\text{т}}{\text{сут}} \quad \omega_{1\tau 2} + \omega_{2\tau 2} = 80 \frac{\text{т}}{\text{сут}}$$

$$\omega_{1\tau 1} \geq 0 \frac{\text{т}}{\text{сут}} \quad \omega_{1\tau 2} \geq 0 \frac{\text{т}}{\text{сут}} \quad \omega_{2\tau 1} \geq 0 \frac{\text{т}}{\text{сут}} \quad \omega_{2\tau 2} \geq 0 \frac{\text{т}}{\text{сут}}$$

$$\begin{pmatrix} \omega_{1\tau 1} \\ \omega_{1\tau 2} \\ \omega_{2\tau 1} \\ \omega_{2\tau 2} \end{pmatrix} = \text{Minimize}(\text{СП}, \omega_{1\tau 1}, \omega_{1\tau 2}, \omega_{2\tau 1}, \omega_{2\tau 2}) = \begin{pmatrix} 40 \\ 10 \\ 0 \\ 70 \end{pmatrix} \frac{\text{т}}{\text{сут}}$$

СП( $\omega_{1\tau 1}, \omega_{1\tau 2}, \omega_{2\tau 1}, \omega_{2\tau 2}$ ) = 134000  $\frac{\text{руб}}{\text{сут}}$

Рис. 7.5. Правильное компьютерное решение транспортной задачи

Задача о перевозке угля — наверно, единственная в книге, решение которой уместнее проводить в среде MS Excel, а не в среде Mathcad. Ведь это чисто бухгалтерская программа, где фигурируют деньги. А таблицы MS Excel создавались именно для экономических расчетов, что мы отметили *во введении*.

На рис. 7.6 показан расчет в среде MS Excel задачи о перевозке угля, повторяющий неоптимальный "ручной" расчет в среде Mathcad, представленный на рис. 7.4. Целевая функция (стоимость перевозки) хранится в ячейке **B15** и отображена в строке формул.

	A	B
1	Выдает 1-я шахта, т/сут	50
2	Выдает 2-я шахта, т/сут	70
3	Сжигает ТЭЦ-1, т/сут	40
4	Сжигает ТЭЦ-2, т/сут	80
5	Стоимость перевозки, руб/т	
6	с шахты 1 на ТЭЦ-1	1200
7	с шахты 1 на ТЭЦ-2	1600
8	с шахты 2 на ТЭЦ-1	800
9	с шахты 2 на ТЭЦ-2	1000
10	План перевозки, т/сут	
11	с шахты 1 на ТЭЦ-1	0
12	с шахты 1 на ТЭЦ-2	50
13	с шахты 2 на ТЭЦ-1	40
14	с шахты 2 на ТЭЦ-2	30
15	Стоимость перевозки в сутки	142 000,00 р.

Рис. 7.6. Транспортная задача в среде MS Excel

Пользователь может менять план перевозок (ячейки **B11**, **B12**, **B13** и **B14**) так, чтобы выполнялись ограничения по вывозу угля с шахт и привозу его на теплоэлектростанции с минимизацией затрат на перевозки. Но эту работу можно пручить компьютеру, вызвав команду (диалоговое окно) **Поиск решения** с вкладки **Данные** (рис. 7.7). Эта команда становится доступной после подгрузки вычислительной надстройки **Поиск решения** (см. рис. 8.6 в *методе 8*).



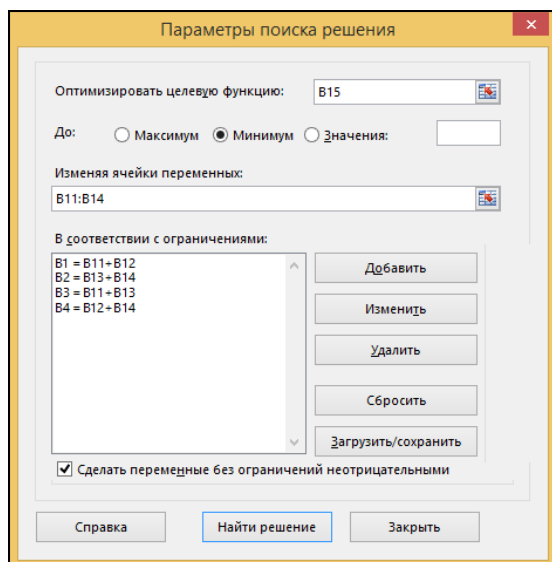


Рис. 7.7. Оптимизация транспортной задачи в среде MS Excel

После нажатия кнопки **Найти решение** в диалоговом окне **Параметры поиска решения** (см. рис. 7.7), таблицы MS Excel выдадут нам парадоксальное решение, показанное на рис. 7.5: по самому дешевому маршруту ничего возить не надо...

Одна из самых сложных задач оптимизации в электроэнергетике состоит в следующем. В зимнее темное утро в энергосети существует максимальное потребление электроэнергии. Затем, с рассветом потребность в электричестве падает. Диспетчер энергосистемы (человек или компьютер) должен дать команды различным электростанциям снизить нагрузку, руководствуясь некой целевой функцией — средним удельным расходом топлива на выработку электроэнергии. Тут можно либо отключать целые энергоблоки, либо снижать нагрузку на некоторых из них. А на каких? На наименее или наиболее экономичных? Может оказаться, что снижение нагрузки на самом неэкономичном блоке станет не самым оптимальным решением. Ведь перевозка угля по самому дешевому маршруту приводит к суммарному удорожанию транспорта угля (см. рис. 7.4)... Еще один небольшой парадокс этой задачи, связанный с числом переменных, отмечен в *эпистеме 17*.

**Добавлено примечание ([P1]):** Честно говоря, опасно делать ссылку на сноски. Сейчас книга разбита на файлы по главам, поэтому и сноски нумеруются в каждой главе с 1. Но в книге сноски будут пронумерованы либо все последовательно, либо на каждой странице новая нумерация (этот вариант даже скорее всего и будет).

## Литература

1. Мартынова О. И., Никитин А. В., Очков В. Ф. Водоподготовка: расчеты на персональном компьютере. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 216 с. URL: [http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/VPU\\_PC/index.htm](http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/VPU_PC/index.htm).
2. Очков В. Ф. Оптимизация "подарка теплотехников плохим химикам-водникам" // Водочистка, водоподготовка, водоснабжение. — 2009. — № 11 (23). — С. 52–54. URL: <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Boiler/index.html>.
3. Очков В. Ф., Макушин А. А., Чжо Ко Ко. "Живые" расчеты, функции и расчетные процедуры по свойствам ионитов // Водочистка, водоподготовка, водоснабжение. — 2010. — № 11. URL: <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Opt-Filtr/R-N.html>.