

На правах рукописи

Раков Юрий Яковлевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАТРУБНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ**

05.14.14 – тепловые электрические станции, их энергетические
системы и агрегаты

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2007

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Кузьмин А.В.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Карауш С.А.
кандидат технических наук, доцент Привалихин Г.К.

Ведущая организация – НП «Региональный центр управления энергосбережением» (г. Томск).

Защита диссертации состоится «25» мая 2007 г. в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета К 212.269.04 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корп. 4, ауд. 406.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «24» апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

А.С. Заворин



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. исходит из сохранения доминирующей роли тепловых электрических станций (ТЭС), причем при всех сценариях реформирования и модернизации теплоэнергетики угольным технологиям отводится ключевая роль в обеспечении энергетической безопасности и социально-экономического развития страны и регионов. Особое значение в настоящий период и в долгосрочной перспективе придается решению задач эффективного энергетического использования колоссальных по запасам топлива угольных месторождений Западной и Центральной Сибири – Канско-Ачинского и Кузнецкого бассейнов. Использование низкосортных твердых топлив при их сжигании в паровых котлах ТЭС сопряжено с высокой склонностью золы к загрязнению поверхности нагрева. Золовые натрубные отложения приводят к снижению эффективности энергооборудования из-за увеличения термического сопротивления со стороны дымовых газов, значения которого зависят от толщины и коэффициента теплопроводности (КТ) отложений. Для повышения точности тепловых расчетов поверхностей нагрева на стадии проектирования, обеспечивающего надежность и эффективность работы котлов в течении всего назначенного срока их службы, для создания основ и разработки адекватных моделей динамики развития натрубных отложений крайне необходима информационная база для оценки значений КТ. Поэтому исследования, направленные на решение этих технических проблем, являются весьма актуальными.

Работа выполнялась в соответствии с основными направлениями научной деятельности Томского политехнического университета (“Разработка методов и средств повышения надёжности и эффективности эксплуатации энергетических объектов”), в русле критических технологий РФ (“Технологии производства топлив и энергии из органического сырья”) и в продолжение исследований, выполняемых ранее в ТПУ в соответствии с научно-техническими программами “Исследование и освоение сжигания канско-ачинских углей на электростанциях КАТЭКА”, “Сибирь”.

Цель работы:

- разработка научно-методологических основ экспериментального определения КТ натрубных золошлаковых отложений;
- выявление и обобщение закономерностей изменения КТ и удельной теплоемкости натрубных золошлаковых отложений от температуры с учетом особенностей их состава и механизма образования на поверхностях нагрева котлов разных типов, сжигающих канско-ачинские угли.

Научная новизна:

- разработаны научно-методические основы экспериментального определения КТ натрубных золошлаковых отложений неразрушающим методом для образцов в форме прямоугольного параллелепипеда и ограниченного цилиндра с использованием решения многомерных задач теплопроводности;

- разработан комплекс программ численного решения нелинейных многомерных стационарных задач теплопроводности (прямых и обратных);
- получены новые данные по КТ и теплоемкости натрубных золошлаковых отложений, образующихся при сжигании канско-ачинских углей;
- впервые получена закономерность изменения отношения КТ к теплоемкости золошлаковых отложений в интервале температур $50 \div 400^\circ\text{C}$;
- предложена новая методика инженерного расчета КТ натрубных золошлаковых отложений в зависимости от содержания SO_3 ;
- впервые КТ золошлаковых натрубных отложений охарактеризован как классификационный признак.

Практическая значимость работы состоит в разработке метода измерения КТ для тел в форме прямоугольного параллелепипеда и ограниченного цилиндра, не требующего измерения температуры на поверхностях или внутри тела и обеспечения одномерности теплового потока. Предложена расчетная методика определения КТ натрубных золовых отложений по результатам неполного химического анализа.

Результаты экспериментальных исследований используются в расчётной практике Барнаульским отделом ЗАО «СибКОТЭС», а вместе с их теоретическим обоснованием в учебном процессе в Томском политехническом университете в дисциплинах для студентов специальностей «Тепловые электрические станции», «Промышленная теплоэнергетика». С использованием результатов диссертационной работы издано учебное пособие.

Достоверность результатов обеспечивается применением апробированных методик экспериментальных исследований, проведением калибровочных опытов на измерителях КТ и удельной теплоемкости, анализом погрешности измерений, воспроизводимостью результатов, а также сравнением с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов.

На защиту выносятся:

- научно-методические основы нового стационарного метода измерения КТ в широком температурном интервале;
- результаты экспериментального определения КТ и удельной теплоемкости натуральных натрубных золошлаковых отложений с поверхностей нагрева котлов разного типа при сжигании канско-ачинских углей;
- зависимости КТ и удельной теплоемкости натрубных отложений от химического состава и температуры, а также обобщающая зависимость КТ от содержания SO_3 , характеризующего структурные разновидности отложений.

Личный вклад автора. Постановка задач, выбор методов исследования и результаты, вынесенные на защиту, представлены автором самостоятельно. Консультации по определению проблемы и задач исследования оказывали доценты к.т.н. Заворин А.С. и к.т.н. Кузьмин А.В., которые участвовали в обсуждении и осмыслении полученных результатов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на IV Всесоюзной конференции «Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы паровых котлов» (Таллин, 1986 г.); Всесоюзной научно-технической конференции «Методы и средства теплофизических измерений» (Севастополь, 1987г.); VIII Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ (Новосибирск, 1988 г.); I и II Всесоюзной конференции «Теплообмен в парогенераторах» (Новосибирск, 1988, 1990 гг.); Всероссийской научно-практической конференции, «Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях» (Красноярск, 2000 г.); II и IV семинарах вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике (Томск, 2002; Владивосток, 2005); международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2004 г.); научных семинарах кафедр парогенераторостроения и парогенераторных установок, теплофизики и гидромеханики, теоретической и промышленной теплотехники Томского политехнического университета (2001–2007 г.г.).

Публикации. Основные положения и результаты исследований, представленных в диссертации, опубликованы в 17-ти работах, среди которых 1 учебное пособие, 5 статей в рецензируемых изданиях, а также материалы докладов на конференциях разного уровня.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, приложения и списка используемой литературы, включающего 76 наименований, содержит 76 рисунков, 56 таблиц, 135 страниц основного текста и 61 страницу приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, показана новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер и состоит из двух частей.

В первой части проведен анализ возможностей существующих установок в области измерения КТ натрубных золовых отложений с поверхностей нагрева пылеугольных котлов и методик его определения. Показано, что для измерения КТ используются в основном классические стационарные методы цилиндра и пластины, а также их модификации. Главными преимуществами этих методов являются простые рабочие формулы для расчета КТ, полученные путем решения одномерных стационарных задач теплопроводности для тел классической формы. К недостаткам этих методов следует отнести трудность создания одномерного теплового потока в исследуемом образце. В одних случаях одномерность теплового потока достигается путем выбора определенного соотношения между геометрическими размерами образца, что не всегда можно обеспечить для проб золовых натрубных отложений, взятых с поверхностей нагрева. В других случаях применяются охранные нагреватели, которые усложняют конструкцию и эксплуатацию прибора. Большие трудности

возникают при измерении температур контактными термопреобразователями внутри или на поверхности отложений из-за специфики их структуры.

В связи с этим во второй части обзора проведен анализ существующих стационарных методов измерения КТ с использованием решений многомерных стационарных задач теплопроводности с целью разработки на их основе нового метода, свободного от выше отмеченных недостатков.

Во **второй главе** рассматривается общая физическая и математическая постановка многомерной стационарной квазиобратной коэффициентной задачи теплопроводности для твердых тел. Представлены конкретные постановки задач для образцов в форме прямоугольного параллелепипеда и ограниченного цилиндра, подвергаемых лучистому нагреву с одной из сторон и при наличии потерь тепла со всех поверхностей. Приводится методика решения этих задач и результаты численных расчетов.

Общая математическая постановка квазиобратной коэффициентной многомерной стационарной задачи теплопроводности имеет вид:

$$\nabla(\lambda(T)\nabla T(M)) = 0, \quad (1)$$

$$A(T)q_F(M1) = -\lambda(T)\nabla T(M1) + \varepsilon(T)\sigma_0(T^4(M1) - T_{oc}^4) + \alpha(M1)(T(M1) - T_{oc}), \quad (2)$$

$$-\lambda(T)\nabla T(M2) = \varepsilon(T)\sigma_0(T^4(M2) - T_{oc}^4) + \alpha(M2)(T(M2) - T_{oc}), \quad (3)$$

$$\left| Q_F(M3) - \int_F (\varepsilon(T)\sigma_0(T^4(M3, \lambda(T)) - T_{oc}^4) + \alpha(M3)(T(M3, \lambda(T)) - T_{oc})) dF \right| \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $T(M)$ – температура во внутренних точках области с координатами M ; $T(M1), T(M2), T(M3)$ – температуры на поверхности области с координатами $M1, M2, M3$; T_{oc} – температура окружающей среды; $\lambda(T)$ – КТ; $\varepsilon(T)$ – интегральная степень черноты; $A(T)$ – коэффициент поглощения; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; $q_F(M1)$ – плотность теплового потока; $Q_F(M3)$ – интегральный поток; $\alpha(M1), \alpha(M2), \alpha(M3)$ – коэффициенты теплоотдачи на соответствующих поверхностях; F – площадь поверхности с координатами $M3$.

Решение уравнения теплопроводности (1) с граничными условиями (2)–

(3) и с привлечением экстремального условия (4) позволяет однозначно определить КТ вещества, если заранее известны геометрические размеры области, радиационные характеристики, температура окружающей среды, коэффициенты теплоотдачи и экспериментально определены плотность падающего теплового потока $q_F(M1)$ и интегральный тепловой поток $Q_F(M3)$, уходящий с какой-либо части поверхности образца площадью F .

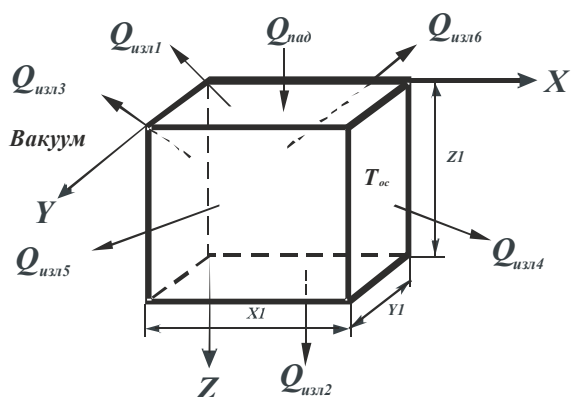


Рис. 1. Схема распределения тепловых потоков при нагреве и охлаждении параллелепипеда

Для образца в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами $Z1 \times X1 \times Y1$ вдоль соответствующих осей координат, который нагревается лучистым потоком с одной из его граней и свободно излучает со всех сторон в среду с постоянной температурой (рис.1), математическая постановка квазиобратной коэффициентной многомерной стационарной задачи теплопроводности имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial Y} \right] + \frac{\partial}{\partial Z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial Z} \right] = 0; \\ & q_F(X, Y) \cdot A = -\lambda(T) \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right)_{Z=0} + \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Z=0}^4 - T_{oc}^4); \\ & -\lambda(T) \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right)_{Z=Z1} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Z1}^4 - T_{oc}^4); \quad \lambda(T) \left(\frac{\partial T}{\partial X} \right)_{X=0} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{X=0}^4 - T_{oc}^4); \\ & -\lambda(T) \left(\frac{\partial T}{\partial X} \right)_{X=X1} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{X1}^4 - T_{oc}^4); \quad \lambda(T) \left(\frac{\partial T}{\partial Y} \right)_{Y=0} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Y=0}^4 - T_{oc}^4); \\ & -\lambda(T) \left(\frac{\partial T}{\partial Y} \right)_{Y=Y1} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Y1}^4 - T_{oc}^4); \\ & \left| Q_{Z1} - \varepsilon \cdot \sigma_0 \int_F [T^4(z = z1, \lambda(T)) - T_{oc}^4] dF \right| \rightarrow \min, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $T(X, Y, Z)$ – температура тела; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; X, Y, Z – декартовы координаты; $q_F(X, Y)$ – плотность падающего теплового потока; Q_{Z1} – интегральный тепловой поток, уходящий с нижней грани образца.

Из математической постановки обратной задачи (5) следует, что КТ может быть вычислен, если экспериментально определены плотность падающего теплового потока q_F , суммарный поток Q_{z1} , теряемый с нижней грани, и температура окружающей среды T_{oc} , при известных размерах и радиационных характеристиках образца.

Из-за нелинейности поставленных задач для их решения был выбран метод конечных разностей. При составлении конечно-разностных уравнений использовались: метод элементарных балансов (метод Ваничева) и метод, основанный на разложении искомой функции в ряд Тейлора в окрестности узловых точек. Решение полученных нелинейных систем конечно-разностных уравнений с целью выбора наиболее эффективного, осуществлялось несколькими итерационными методами: методом одновременных смещений (метод простой итерации), методом последовательных смещений (метод Либмана), методом последовательной верхней релаксации (ускоренный метод Либмана). Для решения обратной задачи по определению КТ дополнительно использовались методы оптимизации: метод дихотомии и метод покоординатного спуска. При реализации вышеуказанных итерационных

методов нелинейные уравнения были преобразованы с использованием формулы Ньютона–Рафсона относительно искомых температур.

Для уменьшения количества итераций при решении системы конечно-разностных уравнений в программе реализован так называемый “физический” обход. Сначала рассчитывались значения всех температур в узловых точках, лежащих на поверхности образца со стороны падающего теплового потока. Затем вычислялись все температуры в плоскости, лежащей на расстоянии сеточного шага от поверхности образца, и так далее. Такой подход позволяет не проводить локальные итерации с целью уменьшения невязок для узловых точек, температуры в которых описываются нелинейными конечно-разностными уравнениями теплового баланса, а дает возможность выполнять глобальную итерацию сразу для всех точек. Кроме того, при реализации ускоренного метода параметр релаксации ω использовался как при расчете температур внутри образца, так и на его поверхностях.

Все расчеты значений температур в узловых точках проводились до тех пор, пока разность температур для каждой точки не оставалась меньше 0,01 К и относительная разность интегральных тепловых потоков, поступающих в образец и выходящих из него, не превышала 0,1%. Для вычисления интегральных тепловых потоков, излучаемых сторонами прямоугольного параллелепипеда, использовалась квадратурная формула прямоугольника. Проведены численные эксперименты по определению рационального итерационного метода решения поставленной задачи в зависимости от значений шагов сеточной области при различных геометрических и физических параметрах тела с использованием различных способов построения разностных схем.

При использовании в расчетах метода последовательной верхней релаксации предварительно определялось оптимальное значение ω_{opt} .

Результаты определения количества итераций, необходимых для решения задачи в зависимости от параметра релаксации ω и числа узлов N сеточной области показали, что ω_{opt} лежит в пределах 1,75÷1,95, увеличиваясь в большую сторону при увеличении числа узлов. Поэтому при расчете температур методом последовательной верхней релаксации при числе узлов сеточной области $N=5$, $N=9$ и $N=17$ соответствующие значения параметра релаксации ω_{opt} были приняты равными соответственно $\omega_{opt}=1,75$, $\omega_{opt}=1,85$ и $\omega_{opt}=1,95$.

При использовании в программе конечно-разностных уравнений, полученных путем разложения искомой функции в ряд Тейлора в окрестности узловых точек, вычислительный эксперимент по определению оптимального значения коэффициента релаксации также проводился при различных значениях КТ образца.

Количество итераций, необходимое для решения нелинейной многомерной задачи теплопроводности (5), в случае использования метода последовательной верхней релаксации (при известном значении ω_{opt}) в 17 раз меньше, чем для метода одновременных смещений, и в 8,5 раза меньше, чем

для метода последовательных смещений. Таким образом, значительно сокращается машинное время счета на ЭВМ при использовании в расчетах метода последовательной верхней релаксации.

Вычислительный эксперимент по выявлению зависимости оптимального параметра релаксации от величины КТ при различном числе узлов сеточной области показал, что с увеличением значения КТ и числа узлов разбиения увеличивается и оптимальное значение ω

В дальнейшем результаты вычислительного эксперимента, полученные при решении прямой задачи, использовались при разработке алгоритма и составлении программы решения обратной задачи по определению КТ.

В случае численного решения обратной задачи теплопроводности прямая задача решается многократно при различных значениях КТ в заданном диапазоне его изменения с целью удовлетворения его экстремальному условию. Для эффективного сужения диапазона изменения КТ в данной работе использовался один из методов одномерной оптимизации - метод дихотомии.

В третьей главе описана методика и приведены результаты имитационного моделирования, проведенного с целью тестирования созданного программного продукта и оценки пределов применимости предлагаемой методики определения КТ. Задачами имитационного моделирования являлись: верификация программы решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности; оценка влияния погрешностей измерения первичных величин (исходных данных) на значение КТ; оценка погрешности расчета КТ при разных способах нагрева образца; определение температуры отнесения при зависимости КТ от температуры; оценка погрешности определения КТ при использовании метода покоординатного спуска для решения обратной задачи теплопроводности.

В качестве основы для проведения имитационного моделирования использовались результаты численного решения прямой задачи теплопроводности.

Для рассматриваемой обратной задачи исходными данными являются: размеры образца, интегральная степень черноты, коэффициент поглощения, плотность падающего теплового потока (или температура печи), температура окружающей среды и суммарный тепловой поток с нижней поверхности образца. Из всех перечисленных параметров величина суммарного теплового потока с нижней поверхности образца определяется из решения прямой задачи теплопроводности при заданном значении КТ.

С целью отладки программы решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности прямая задача теплопроводности была решена при четырех различных значениях КТ для трех разных по размерам образцов в форме прямоугольного параллелепипеда. При расчетах степень черноты и коэффициент поглощения образца принимались одинаковыми и равными 0,75, плотность падающего теплового потока $q_F = 2 \cdot 10^5$ Вт/м² и температура окружающей среды $T_{oc} = 300$ К. В результате решения прямой задачи были

найденны значения суммарного теплового потока с нижней поверхности образца.

Если при постановке обратной задачи соблюдены все те же граничные условия, что и в прямой задаче, и кроме того известна величина суммарного теплового потока с нижней поверхности образца, то в результате ее решения численное значение КТ должно соответствовать его значению, принятому при решении прямой задачи. В табл. 1 приведены результаты решения обратной задачи для образца с размерами ребер $10 \times 10 \times 10$ мм и показано, что значения вычислительных погрешностей при расчете КТ носят случайный характер и не превышают 0,28%. Следовательно, созданные программные продукты позволяют с достаточной точностью проводить расчет КТ золотых отложений в диапазоне от 0,5 до 5 Вт/(м·К) для образцов с длиной ребер от 5 до 15 мм, если нет погрешностей в исходных данных.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента для образца с длиной ребер $10 \times 10 \times 10$ мм

Параметры	Значение КТ, заданное в прямой задаче, Вт/(м К)			
	0,5	1,5	3	5
Параметр релаксации, $\omega_{\text{опт}}$	1,6976	1,7826	1,8345	1,8638
Интервал поиска КТ, Вт/(м·К)	0,1÷5	0,5÷5	0,1÷10	0,1÷10
Расчетное значение КТ, Вт/(м·К)	0,5002	1,5011	2,9987	5,0002
Отн. ошибка определения КТ, %.	0,28	0,087	0,036	0,044
Количество итераций NI.	52	75	120	169

Методика оценки влияния погрешностей исходных данных на расчет КТ, проведенная методом имитационного моделирования, состояла в следующем. В программу решения обратной задачи вводились искаженные (завышенные или заниженные) исходные данные с заранее известными по величине погрешностями. После решения обратной задачи полученное значение КТ сравнивалось с его значением, полученным в расчетах без наличия погрешностей в исходных данных. Относительная разность полученных значений КТ являлась оценкой влияния погрешностей в исходных данных на его определение.

Исследования проводились, как и в предыдущих этапах с образцами разных размеров и различными значениями КТ. Значения относительной погрешности измерения вышеупомянутых величин задавались в интервале от 1 до 5%, с завышением и занижением исходных данных, использованных в прямой задаче. Оценка влияния погрешностей на расчет значения КТ с использованием решения обратной задачи проводилась, как при изменении только одного параметра, так и при совместном их изменении. Некоторые результаты моделирования приведены в табл. 2.

Из результатов имитационного моделирования можно заключить, что данный метод измерения наиболее приемлем для веществ с коэффициентами теплопроводности меньше 5 Вт/(м·К), т.е. для относительно плохих

проводников тепла. В этом случае для измерения КТ с погрешностью менее 5% необходимо проводить измерения первичных величин с относительной погрешностью $\leq 1\%$.

Таблица 2

Максимальная относительная погрешность определения КТ $|\Delta\lambda/\lambda|, \%$ в зависимости от совокупной погрешности в измерении степени черноты ε , плотности теплового потока q_F и потока $Q_{изм}$

Значение КТ λ , принятое при решении прямой задачи, Вт/(м·К)	Значение $ \Delta\lambda/\lambda , \%$ при совместной относительной систематической погрешности измерения степени черноты ε , плотности теплового потока q_F и потока $Q_{изм}$, %				
	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5
0,5	0,1/1,7	0,1/1,7	0,1/1,7	0,3/1,7	0,3/2,7
1,5	1,4/1,6	2,8/3,2	4,1/5,0	5,3/7,0	6,4/9,3
3,0	3,2/10,9	6,2/16,1	9,1/22,1	11,7/29,0	14,1/33,2
5,0	5,6/12,2	11,1/18,7	15,7/29,1	19,7/43,7	23,3/59,9

Оценка погрешности определения КТ в зависимости от способа нагрева образца проводилась методом вычислительного эксперимента в два этапа. На первом этапе решались две прямые задачи теплопроводности, отличающиеся разными граничными условиями на верхней грани образца из-за различия в способах его нагрева. В первом случае нагрев осуществлялся воздействием на поверхность образца постоянного теплового потока, а во втором случае вблизи поверхности образца находился изотермичный высокотемпературный нагреватель (печь).

В результате расчета для каждого случая определяли суммарный тепловой поток, уходящий с нижней поверхности образца. Далее полагали, что относительные погрешности измерения плотности теплового потока, теплового потока с нижней поверхности образца и температуры печи составляют 2%. С учетом абсолютной погрешности вычисляли новые значения плотности теплового потока, теплового потока с нижней грани и температуру печи.

На втором этапе решались две обратные задачи при наличии погрешности в численных значениях плотности теплового потока, падающего на верхнюю грань, теплового потока уходящего с нижней грани и температуры печи. Полученные в результате решения значения КТ сравнивались с его значением, принятым при решении прямой задачи теплопроводности. Из сравнения результатов следует, что если в опыте с одинаковой относительной погрешностью определяются входные параметры, то с целью повышения точности измерений КТ предпочтительнее использовать источник постоянного лучистого потока для нагрева образца (лазер, оптическую печь и др).

Если КТ зависит от температуры, то при использовании вышеописанной методики его расчета, необходимо определиться с температурой, которой он соответствует (температура отнесения). В частности, в качестве характерных температур отнесения могут быть выбраны: среднеобъемная температура $-\bar{T}_{ia}$;

средняя температура верхней поверхности $-\bar{T}_a$; средняя температура нижней поверхности $-\bar{T}_i$; средняя температура боковой поверхности $-\bar{T}_a$; средняя температура между верхней и нижней поверхностями $-\bar{T}_{a-i}$ и др.

Для обоснования выбора температуры отнесения было проведено имитационное моделирование, которое показало, что наименьшая погрешность при обработке результатов измерений КТ будет иметь место, если его расчетное значение относить к среднеобъемной температуре образца.

Для оценки погрешности определения КТ при использовании метода покоординатного спуска при решении обратной задачи теплопроводности на первом этапе была численно решена прямая задача теплопроводности (5) при линейной зависимости КТ от температуры $\lambda(T) = \lambda_0 [1 + K_\lambda (T - T_0)]$ и разных численных значениях коэффициентов λ_0 и K_λ (в диапазоне изменения λ_0 от 0,1 до 0,5 Вт/(м К) и температурного коэффициента K_λ от 0,00008 до 0,0003 К⁻¹). Составлена карта значений относительной невязки по потоку (числитель) и абсолютных значений потока (знаменатель) в зависимости от величин λ_0 и K_λ (табл. 3). При этом были найдены значения относительной погрешности по потоку по формуле: $(Q_{i\dot{\epsilon}\zeta} - Q_\delta)/Q_{i\dot{\epsilon}\zeta}$, где $Q_{i\dot{\epsilon}\zeta}$ – заданное значение потока, излучаемого нижней поверхностью образца; Q_δ – расчетное значение потока, излучаемого нижней поверхностью образца, Вт.

Таблица 3

Значения относительной невязки по потоку (числитель) и абсолютные значения потока (знаменатель) в зависимости от λ_0 и K_λ

λ_0 , Вт/(м К)	Температурный коэффициент K_λ, K^{-1}				
	0,00008	0,00009	0,0001	0,0002	0,0003
0,1	0,2387/3,1364	0,2373/3,1420	0,2360/3,1476	0,2230/3,2011	0,2111/3,2517
0,2	0,0727/3,8202	0,0718/3,8202	0,0707/3,8285	0,0611/3,8682	0,0522/3,9048
0,3	0,0015/4,1139	0,0008/4,1167	0,0000/4,1200	0,0071/4,1759	0,0135/4,1759
0,4	0,0363/4,2695	0,0368/4,2717	0,0374/4,2741	0,0427/4,2961	0,0475/4,3159
0,5	0,0585/4,3611	0,0589/4,3628	0,0594/4,3648	0,0633/4,3810	0,0669/4,3959

Расчет проводился при значениях параметров: число узлов сеточной области $N_x=N_y=N_z=15$, размеры образца $X1 \times Y1 \times Z1 = 15 \times 15 \times 1$ мм, $Q_{низ} = 4,12$ Вт (данный поток найден при $\lambda_0 = 0,3$ Вт/(м·К) и $K_\lambda = 0,0001$ К⁻¹).

После составления карты была решена обратная задача теплопроводности (5) при тех же параметрах и в тех же диапазонах предполагаемого изменения λ_0 и температурного коэффициента K_λ , в результате получены оптимальные значения λ_0 и температурного коэффициента: $\lambda_{онм} = 0,311$ Вт/(м К) и $K_{\lambda_{онм}} = 0,000091$ К⁻¹.

Сравнение расчетных и заданных значений показало, что относительные погрешности определения λ_0 и температурного коэффициента составляют 1,1% и 9%, соответственно.

В четвертой главе приводятся методика и результаты экспериментального определения КТ и удельной теплоемкости натрубных золовых отложений поверхностей нагрева пылеугольных котлов.

Измерения проводились в интервале температур 50–400°C методом монотонного режима на серийных измерителях ИТ - λ - 400 и ИТ - С - 400.

В качестве объекта исследования взяты образцы золовых отложений, отобранные с действующих котлов БКЗ-420-140-9 НТВ и ТПЕ-427 при сжигании канско-ачинских углей. Эти котлы являются главными экспериментальными образцами, представляющими два направления в развитии топочной техники для сжигания низкосортных углей. Химический состав золовых отложений изменялся в пределах: SiO_2 – 8,59...47,20%; Al_2O_3 – 5,13...11,96%; Fe_2O_3 – 8,20...62,47%; CaO – 8,99...35,74%; MgO – следы...6,04%; SO_3 – 1,17...34,84%.

Результаты измерений и полученные аппроксимации КТ отложений из котла БКЗ-420-140 9 НТВ представлены на рис.2, для котла ТПЕ-427 – на рис.3, а по удельной теплоёмкости на рис. 4.

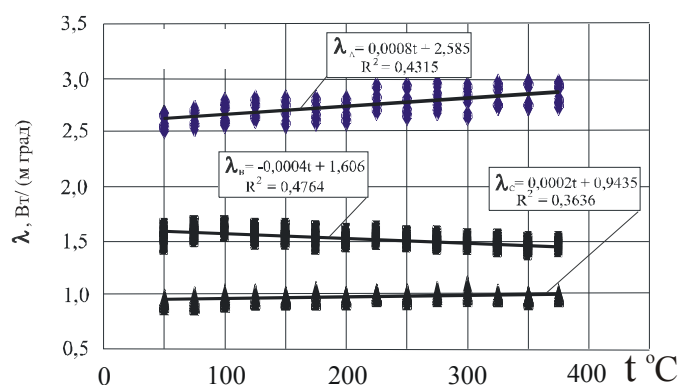


Рис.2. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности отложений (котел БКЗ-420-140 9 НТВ)

В соответствии со своей однозначной принадлежностью к разным механизмам образования отложения из котла БКЗ-420-140-9 НТВ резко различаются по величине КТ. Наименьшим значением КТ (менее 1,0 Вт/(м·К)) обладают сульфатно-связанные отложения. Это позволяет утверждать, что процесс сульфатизации золовых отложений, в ходе которого

растет содержание CaSO_4 , не только сам по себе является упрочняющим фактором, но и способствует упрочнению отложений за счет интенсифицирующего влияния на спекание и диффузионные явления. Низкая теплопроводность сульфатносвязанных отложений дает основание для вывода о том, что активная сульфатизация золового слоя в случае достаточно высокой для сохранения расплавленных частиц температуры потока дымовых газов в газоходе поверхности нагрева может рассматриваться как предпосылка к ускорению роста золовых отложений за счет ошлакования.

Шлаковые отложения с высокой степенью окристаллизованности оказались наиболее теплопроводны (около 3,0 Вт/(м·К)). Промежуточное положение занимают железистые отложения (1,4÷1,5 Вт/(м·К)).

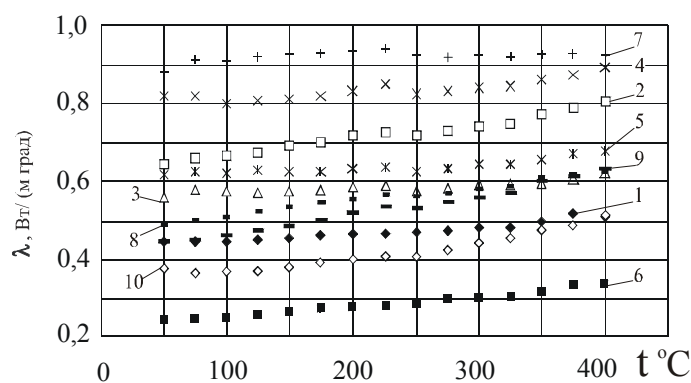


Рис.3. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности отложений (котёл ТПЕ-427)

отложения имеют значения $\lambda = 0,5 \div 0,8$ Вт/(м·К). Шлаковые отложения на основе силикатных соединений имеют значения $\lambda = 0,5 \div 0,9$ Вт/(м·К). Следует отметить, что полученные диапазоны изменения КТ имеют более низкие значения, чем для соответствующих разновидностей отложений, отобранных из котла БКЗ-420-140 НТВ. Характер зависимости КТ для всех исследованных отложений в интервале температур от $50 \div 400^\circ\text{C}$ практически

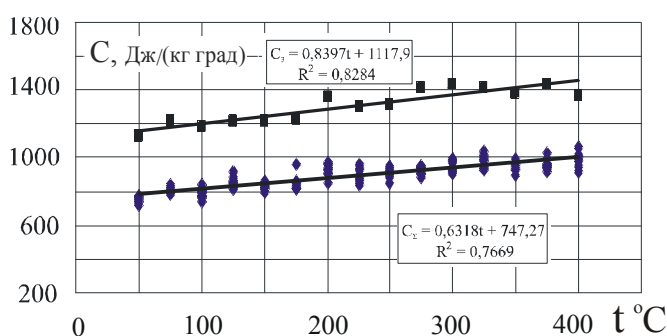


Рис. 4. Обобщенная температурная зависимость удельной теплоемкости образцов (котёл ТПЕ-427)

линейный, что подтверждается высоким значением коэффициента детерминации R^2 . Удельная теплоемкость натрубных отложений (рис.4) имеет монотонный и практически линейный характер увеличения с возрастанием температуры. Более того, изменение удельной теплоемкости от температуры для всех образцов можно представить единой линейной зависимостью, несмотря на их различный химический состав. Установлено, что значение отношения КТ к удельной теплоемкости λ/c для каждого из образцов, приведенное на рис.5, практически не зависит от температуры и его можно принять постоянной величиной. Линейная связь КТ с удельной теплоемкостью $\lambda = Bc$, следует из теории Дебая для аморфных тел. Дебай получил следующее уравнение для теплопроводности λ твердых тел, которое можно применить как к кристаллическим, так и аморфным неметаллическим веществам:

$$\lambda = 0,25cu\bar{l}, \quad (6)$$

где c – удельная теплоемкость; u – скорость звука; $\bar{l}$ – средняя длина свободного пробега фононов.

Из приведенных результатов для образцов из котла ТПЕ-427 (рис.3) видны менее существенные различия по КТ между разновидностями связанных отложений. Так, сульфатно-связанные отложения характеризуются значениями $\lambda = 0,4 \div 1,5$ Вт/(м·К), но на отдельных поверхностях КТ может быть ниже (до $0,2$ Вт/(м·К)). Железистые

линейный, что подтверждается высоким значением коэффициента детерминации R^2 .

Удельная теплоемкость натрубных отложений (рис.4) имеет монотонный и практически линейный характер увеличения с возрастанием температуры. Более того, изменение удельной теплоемкости от температуры для всех образцов можно представить единой линейной зависимостью, несмотря на их различный

Для кристаллических тел величина $\bar{\lambda}$ в уравнении (6) существенно уменьшается с ростом температуры, тогда как у аморфных тел она практически не зависит от температуры. Кроме того, так как скорость звука u зависит от температуры значительно слабее, чем теплоемкость, то в соответствии с уравнением (6) теплопроводность аморфных тел должна увеличиваться с ростом температуры, а теплопроводность кристаллических тел уменьшаться, если у последних $\bar{\lambda}$ более явно зависит от температуры, чем c . Тогда из теоретического уравнения Дебая следует, что теплопроводность стекол, а, следовательно, и натрубных отложений, поскольку в них велика доля аморфной составляющей, должна увеличиваться с ростом температуры, причем так же, как и удельная теплоемкость. Таким образом, результаты наших опытов по измерению КТ и удельной теплоемкости натрубных отложений согласуются с этими теоретическими представлениями о механизмах переноса тепла.

Константа $B = \lambda/c$ для каждого аморфного вещества имеет свое значение и в нашем случае для натрубных отложений может быть определена согласно рис.5-а. Выявлена зависимость константы B при увеличении среднего значения КТ натрубных отложений (рис.5-б). Уравнение связи константы B со средним значением КТ в исследуемом температурном интервале имеет вид:

$$B = 4,2745 \cdot \bar{\lambda} - 0,1896. \quad (7)$$

Данная закономерность позволяет проводить расчет температурной зависимости удельной теплоемкости золовых отложений, не прибегая к специальному эксперименту, если известна или экспериментально определена температурная зависимость КТ исследуемого образца. Для этого достаточно найти среднее значение КТ в исследованном температурном интервале и по графику (рис.5-б) или по уравнению связи (7) определить величину константы B . Далее с использованием формулы $\lambda = Bc_v$ и известной температурной зависимости КТ проводится расчет температурной зависимости удельной теплоемкости.

Регрессионное уравнение, связывающее константу B с химическим составом исследованных образцов, без учёта образцов 6 и 10, имеет вид

$$B_{\text{дан}} = -0,214 + 0,004 \cdot \text{SiO}_2 - 0,092 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,141 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \\ + 0,112 \cdot \text{CaO} + 0,605 \cdot \text{MgO} - 0,004 \cdot \text{SO}_3. \quad (8)$$

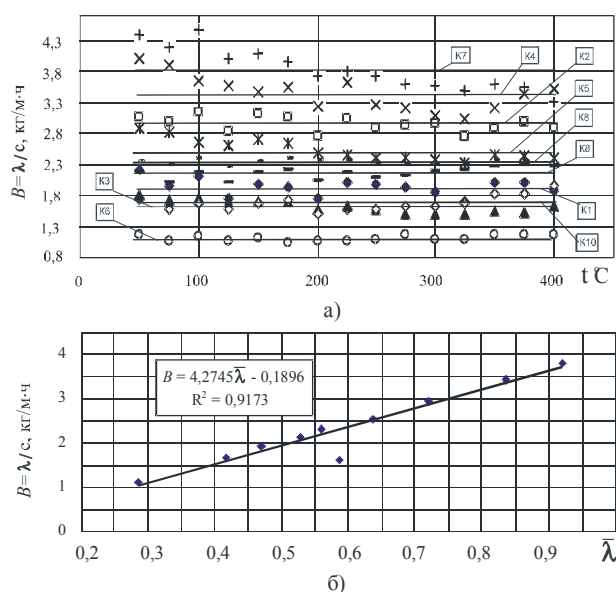


Рис.5. Зависимость отношения B от температуры (а) и среднего коэффициента теплопроводности образцов (б)

Анализ результатов расчета по формуле (8) свидетельствует о её безусловной пригодности для практического использования. Средняя квадратическая погрешность аппроксимации данных составляет 1,5 %.

Более всего в исследованных образцах меняется процентное содержание серного ангидрида SO_3 . Это связано с тем, что процессы сульфатизации, приводящие к его изменению, имеют место в самом широком диапазоне изменения условий для образования натрубных отложений при сжигании. Они встречаются и как единственно определяющие трансформирование отложений, и как сопутствующие другим, более интенсивным упрочняющим процессам.

Результаты измерений КТ при температуре образцов 400°C в зависимости от содержания в отложениях серного ангидрида представлены графиком на рис.6. и описываются уравнением

$$\lambda = \frac{0,3486}{p^2} + \frac{2,1656}{p} - 0,4915 + 0,041p, \quad (9)$$

где p —процентное содержание серного ангидрида в отложениях.

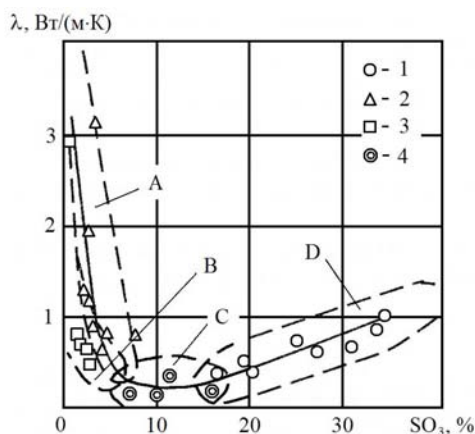


Рис.6. Зависимость КТ натрубных отложений при температуре 400°C от содержания серного ангидрида:

1—сульфатно-связанные отложения; 2—железистые отложения; 3—шлаковые отложения; 4—сыпучие отложения; А—область железистых отложений; В—область шлаковых отложений; С—область сыпучих отложений; D—область сульфатно-связанных отложений

На графике выделены области, характерные для теплопроводности отложений разного типа. Одной из них является область сыпучих отложений (область С), которая по содержанию SO_3 лежит в диапазоне от 3÷4 до 15÷16%. КТ в этой области имеет наименьшие значения: от 0,1 до 0,25 Вт/(м·К). В начальных стадиях образования сыпучего слоя на низкотемпературных поверхностях нагрева значения КТ составляют величину менее 0,1 Вт/(м·К). По мере уплотнения сыпучих отложений, что в первую очередь наблюдается на тыльной поверхности труб «холодной» ступени КПП и водяного экономайзера второй ступени вне зоны очистки, и иногда с образованием спекшейся корочки, значения КТ могут быть несколько повышенными (по данным СибВТИ до 0,3÷0,5 Вт/(м·К)). Установленный в образцах диапазон изменения значений SO_3 в области С является следствием разной степени сульфатизации летучей золы еще до попадания частиц на поверхности нагрева. Этим же объясняется и частичное совмещение областей С и D.

Область сульфатно-связанных отложений (область D) находится в диапазоне значений SO_3 от 10÷13 до 40% . В этой области наблюдается возрастание КТ от 0,5 до 1,2 Вт/(м·К), практически прямо пропорциональное

увеличению содержания SO_3 . Это объясняется уплотнением отложений в рассматриваемой области вследствие сульфатизации.

При уменьшении степени сульфатизации в отложениях ($\text{SO}_3 < 5\%$) значения КТ резко возрастают. Это вызвано участием в формировании натрубных отложений большого количества частично и полностью расплавленных частиц. В этот диапазон значений SO_3 попадают два типа натрубных отложений: шлаковые (область В) и железистые (область А).

Измеренные КТ для шлаковых отложений сгруппированы в основном в нижней части области В в пределах от 0,5 до 0,8 Вт/(м·К). По мере уменьшения SO_3 в этом диапазоне значения КТ возрастают вследствие увеличения в образцах отложений доли стекловидного вещества. Для шлаковых отложений, представленных стекловидным монолитом, на основании справочных данных, значения КТ повышаются до 0,9–1,0 Вт/(м·К). С увеличением SO_3 в шлаковом отложении оно переходит в связанно-шлаковое, у которого значение КТ приближается к сульфатно-связанному.

В шлаковых отложениях при развитии кристаллизации КТ резко возрастает. Это подтверждает полученное значение КТ = 2,92 Вт/(м·К) для образца, который был почти полностью окристаллизованным (образец А из котла БКЗ-420-140-9 НТВ) и не имел серного ангидрида. Данный факт позволяет предполагать, что такое состояние является близким к предельному для процесса преобразования шлаковых отложений. Оно представлено на рис.6 в верхней части области В узкой полосой вдоль оси ординат.

К области шлаковых отложений на графике справа примыкает и частично накладывается на неё область железистых отложений (область А). Здесь измеренные значения КТ в диапазоне от 0,6 до 2 Вт/(м·К) весьма четко коррелируют с содержанием серного ангидрида. Наряду с этим этот тип отложений отличается от других наибольшим разбросом значений КТ, что связано как с общим содержанием железа, так с возможным влиянием форм связи железа в отложениях.

Полученная графическая зависимость КТ золовых отложений от содержания SO_3 подтверждает принятую классификацию натрубных отложений, в основу которой положен преобладающий процесс их образования. При этом следует иметь в виду, что в диапазоне малых значений SO_3 (менее 10%) эта зависимость не настолько очевидно отражает физическую связь между теплопроводностью и механизмом уплотнений отложений и требует дальнейшего изучения.

Содержание серного ангидрида в золовых отложениях при сжигании канско-ачинских углей является одним из показателей уплотненности структуры и изменения минералогического состава, который при величине более 10% пригоден в качестве обобщающего параметра для оценки усредненного КТ натрубных отложений.

Выводы

1. В работе получены новые экспериментальные данные по КТ и удельной теплоемкости натрубных золошлаковых отложений в интервале температур от 50 до 400°C с учетом особенностей их состава и механизма образования на поверхностях нагрева котлов разных типов, сжигающих канско-ачинские угли.

2. Впервые получена зависимость КТ натрубных отложений от содержания в них серного ангидрида:

- для сыпучих отложений ($3 \div 16\% \text{ SO}_3$) – $\lambda = 0,1 \div 0,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- для сульфатно-связанных отложений ($10 \div 40\% \text{ SO}_3$) – $\lambda = 0,5 \div 1,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- для шлаковых и железистых ($\text{SO}_3 < 5\%$) – $\lambda = 0,9 \div 2,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Предложена обобщающая зависимость КТ от содержания серного ангидрида, которая при содержании $\text{SO}_3 > 10\%$ пригодна в качестве параметра для оценки усредненного КТ натрубных отложений и может быть использована в инженерно-расчетной практике для уточнения прогнозируемой тепловой эффективности поверхностей нагрева котлов при минимальных объемах диагностирования отложений.

3. Впервые установлена линейная связь отношения КТ к удельной теплоемкости натрубных отложений (константа B) в зависимости от среднего значения КТ в интервале температур от 50 до 400°C. Эта зависимость позволяет для исследованных отложений по найденному среднему значению КТ найти постоянную B и определить расчетным путем температурную зависимость удельной теплоемкости.

Предложено также новое регрессионное уравнение для определения константы B в зависимости от химического состава отложений, имеющее среднеквадратическую погрешность около 1,5%.

4. Впервые сформулированы научно-методологические основы экспериментального стационарного метода определения КТ натрубных золовых отложений при температурах свыше 400°C, не требующего нарушения целостности и эксплуатационных характеристик образцов, измерения температур на поверхностях или внутри исследуемых образцов, учета контактных термических сопротивлений между образцом и нагревателем и установки охранных нагревателей для предотвращения утечек тепла с его поверхностей. Имитационным моделированием установлена целесообразность применения предлагаемого экспериментального метода для веществ с КТ менее 5 Вт/(м·К).

5. Разработан комплекс программ численного решения прямой и квазиобратной нелинейных многомерных стационарных задач теплопроводности для образцов в форме прямоугольного параллелепипеда и ограниченного цилиндра, который является научно-методологической базой нового экспериментального метода определения КТ в области высоких температур (свыше 400°C).

Основные результаты работы представлены в следующих публикациях:

1. Вычислительный эксперимент по определению коэффициента переноса в натрубных золовых отложениях / Заворин А.С., Раков Ю.Я., Боберь Е.Г., Шадрин Ю.А. // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы паровых котлов: Тезисы докладов IV Всесоюзной конф. – Таллин: Изд ТПИ, 1986. – Т.IV. – С. 98–101.
2. Раков Ю.Я., Боберь Е.Г., Кузьмин А.В. Использование трехмерных задач для измерения коэффициента теплопроводности // Методы и средства теплофизических измерений: Тезисы докладов Всесоюзной научно-техн. конф. – Севастополь, 1987. – Ч.1. – С.78–79.
3. Теплопроводность золошлаковых продуктов сжигания углей канско-ачинского бассейна / Ю.Я. Раков, А.С. Заворин, А.В. Кузьмин, Е.П. Теплухин, О.Я. Субботин // Теплообмен в парогенераторах: Тезисы докладов Всесоюзной конф. – Новосибирск: Изд. СО АН СССР, 1988. – С.104.
4. Определение коэффициента теплопроводности многомерных излучающих тел / Ю.Я. Раков, Е.Г. Боберь, А.С. Заворин, А.В. Кузьмин, Е.П. Теплухин // Теплофизические свойства веществ: Труды VIII Всесоюзной конф. – Новосибирск: Изд. ИТ СО АН СССР, 1988. – Ч.1. – С. 267–271.
5. Раков Ю.Я. Численное решение трехмерной нелинейной задачи теплопроводности // Теплофизика и гидродинамика технологических процессов: Межвузовский научно-техн. сборник. – Томск: Изд. ТПИ, 1989. – С.123–127.
6. Теплофизические свойства золошлаковых продуктов сжигания углей КАТЭК/Ю.Я. Раков, А.С. Заворин, А.В.Кузьмин, Е.П. Теплухин, С.С. Плотников // Тезисы докладов совещания «Комплексное использование зол углей СССР в народном хозяйстве». – Иркутск–1989. – С.13–14.
7. Заворин А.С., Раков Ю.Я., Теплухин Е.П. Разновидности натрубных золовых отложений по теплопроводности // Теплообмен в парогенераторах: Тезисы докладов II Всесоюзной конф. – Новосибирск: Изд. СО АН СССР, 1990. – С.45–46.
8. Заворин А.С., Кузьмин А.В., Раков Ю.Я. Теплопроводность и теплоемкость отложений на поверхностях нагрева котлов при сжигании канско-ачинских углей // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Сб. докладов Всероссийской научно-практ. конф. – Красноярск: Изд. СибВТИ, 2000. – С.372–374.
9. Заворин А.С., Раков Ю.Я. Теплопроводность натрубных отложений котлов при сжигании канско-ачинских углей // Теплоэнергетика. – 2000. – №12. – С.45–47.
10. Дорохов А.Р., Раков Ю.Я. Расчетные и экспериментальные методы определения теплофизических свойств веществ: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 92 с.
11. Численное моделирование влияния электрода на температурное поле теплоизлучающего диска / А.М. Антонова, А.В. Воробьев, А.В. Кузьмин, Ю.Я. Раков // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – т.305. – №2. – С.27–31.
12. Имитационное моделирование температурных полей в многомерных теплоизлучающих телах / А.В. Воробьев, А.С. Заворин, А.В. Кузьмин, Ю.Я. Раков // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – т.305. – №2. – С.25–27.
13. Mikhalev E.P., Rakov Yu. Ya. Error estimation of the heat conductivity coefficient determination when sample heated with the radiant flux //9 International scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scintists MTT'2003 – Tomsk, Russia, 7–11 April, 2003. – Tomsk, Russia : TPU, Russia, 2004. – С. 56–58.
14. Gabbasova R.R., Rakov Yu. Ya. Reference temperature selection when the heat conductivity coefficient measured //International scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scintists, MTT'2003. – Tomsk, Russia, 7-11 April, 2003. – Tomsk, Russia: TPU, 2004. – С. 59–61.
15. Заворин А.С., Раков Ю.Я. Численное моделирование процессов сжигания углей с учётом их минеральной части: состояние вопроса // Известия Томского университета. 2004. – Т. 307. – №1. – С.122–126.

16. Заворин А.С., Кузьмин А.В., Раков Ю.Я. Исследование тепловых свойств золошлаковых отложений // Доклады IV семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике.– Владивосток: Изд. ДВГТУ, 2005. – С. 61.
17. Заворин А.С., Раков Ю.Я. Феноменологические модели образования натрубных отложений в котлах //Известия Томского университета. 2005.–Т. 308. – №1. – С.144–150.

Подписано к печати .05.2007. Формат 60х84/16.

Бумага «Классика».

Печать RISO. Усл.печ.л. . Уч.-изд.л. .

Заказ . Тираж 100 экз

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.