

На правах рукописи



Чугуев Данил Николаевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
АНАЛОГИИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАТРУБНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
И ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2008

Работа выполнена на кафедре атомных и тепловых электрических станций ГОУ-ВПО «Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Кузнецов Гений Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Иванов Владлен Васильевич

доктор физико-математических наук,
профессор
Борzych Владимир Эрнестович

Ведущая организация: Томский государственный университет

Защита состоится 5 июня 2008 года в 14 часов 30 минут на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ауд. 228 (10 корпус ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 30 апреля 2008 года.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций,
кандидат физико-математических наук,
доцент



О.Ю. Долматов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В соответствии с основными направлениями стратегии энергетической безопасности Российской Федерации на ближайшие два десятилетия запланирован перевод большей части тепловых электрических станций, работающих на мазуте и газе, на использование натурального твердого топлива – угля. В ряду крупных научно-технических проблем, без решения которых такой переход невозможен, стоит проблема формирования натрубных отложений. Первые публикации по этой тематике появились в научной печати более пятидесяти лет назад но, нет никаких оснований утверждать, что эта проблема полностью решена. Используемые на практике способы борьбы с натрубными отложениями представляют собой только технические решения, разработанные на основании анализа и обобщения информации, полученной при испытаниях котельного оборудования с использованием конкретных углей и ряда аэродинамических схем их сжигания.

Золыстые отложения уменьшают тепловосприятие поверхностей нагрева и повышают температуру продуктов горения, что может привести к нарушению нормального гидравлического режима работы котла. Это происходит за счет комплекса взаимосвязанных процессов: роста толщины слоя отложения, увеличения температуры их нагреваемой поверхности за счет повышения термического сопротивления слоя, снижения интенсивности теплоотвода в водяные экономайзеры, пароперегреватели, воздухоподогреватели и последующее ухудшение условий работы всех систем парогенерирования в целом.

Современное состояние проблемы характеризуется, с одной стороны, довольно глубоким проникновением в существо происходящих явлений и пониманием механизма в целом, с другой стороны, утверждением представлений о многообразии факторов, влияющих на загрязнение поверхностей нагрева, а в итоге - о большой сложности процессов. Но до настоящего времени не опубликовано результатов математического моделирования температурных полей натрубных отложений с учетом динамики осаждения твердых продуктов сгорания натурального минерального топлива.

Создание компактной, опирающейся на минимальное количество эмпирических постоянных, модели может существенно сократить затраты на разработку технологий сжигания углей и очистки трубных поверхностей. Так, например теоретическое варьирование параметров, характеризующих аэродинамику и тепломассоперенос топочного процесса, может позволить спрогнозировать последствия трансформации минеральной части в зависимости от изменения геометрических и гидродинамических характеристик топочного пространства.

Учет реального теплового состояния твердых продуктов сгорания углей и процесса взаимодействия частиц летучей золы с поверхностью отложений может обеспечить получение достоверной информации о температурном поле и толщине слоя шлака. В результате возможно прогнозирование процессов

шлакообразования не только в некоторых, отработанных на специальных стендах режимах, но и в широком диапазоне изменения основных эксплуатационных параметров. Создание комплексной модели, учитывающей весь комплекс физико-химических превращений минеральной части от горения до «спекания» в слое отложений, является весьма сложной задачей. Решение её пока в полной постановке невозможно из-за отсутствия необходимых эмпирических постоянных для её реализации. Но и решение задачи о температурном поле слоя отложений с учётом динамики осаждения частиц золы является важным этапом построения общей теории формирования натрубных отложений. Математическое моделирование рассматриваемых в данной работе процессов создаёт реальные предпосылки для перехода на модели, опирающиеся на минимальное число достаточно просто определяемых эмпирических характеристик и постоянных.

Процессы, аналогичные описанным, протекают и при реализации другого очень важного технологического процесса. Это процесс нанесения упрочняющих и защитных порошковых покрытий на поверхности деталей машин и аппаратов, работающих в условиях интенсивных тепловых, механических, газодинамических и термохимических воздействий. Поэтому разрабатываемая в диссертации теория тепловых режимов натрубных отложений при осаждении частиц летучей золы была использована также и для описания процессов теплопереноса в системе «частица – подложка» при плазменном нанесении порошковых покрытий.

Цель диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является создание математической модели, описывающей температурные поля шлаковых отложений при осаждении одиночных частиц летучей золы на трубных поверхностях и процессы теплопереноса в системе «частица – подложка» при плазменном нанесении порошковых покрытий.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи.

1. Разработка математической модели теплопереноса в слое натрубных отложений с учетом динамики осаждения частиц летучей золы на нагреваемых поверхностях.
2. Разработка метода решения задачи о температурном поле натрубных отложений в условиях нестационарного осаждения частиц летучей золы.
3. Численное моделирование процесса нестационарной одномерной теплопроводности в слое натрубных отложений при осаждении частиц летучей золы на нагреваемой поверхности.
4. Создание математической модели теплопереноса в системе «частица летучей золы – слой натрубных отложений» в условиях внедрения частицы.
5. Разработка метода решения задачи о температурном поле системы «частица летучей золы – слой отложений».

6. Численное моделирование процесса нестационарной двумерной теплопроводности в системе «частица золы – слой отложений» в условиях внедрения частицы.
7. Создание математической модели теплопереноса в системе «частица металла – подложка» в условиях высокотемпературного нанесения порошковых покрытий на поверхность деталей.
8. Численное моделирование процесса нестационарной двумерной теплопроводности в системе «частица расплавленного металла в оболочке из закристаллизовавшегося материала – подложка» в условиях внедрения частицы в плавящуюся подложку.

Научная новизна работы.

Сформулирован новый подход к анализу температурных полей натрубных отложений. Впервые решена задача о температурном поле натрубных отложений с учётом динамики осаждения частиц летучей золы на поверхность слоя шлака. Задача решена для трёх возможных сценариев осаждения: большие частицы, остающиеся на поверхности; малые по размерам частицы, остающиеся на поверхности; малые по размерам частицы, внедряющиеся в слой шлака на некоторую глубину.

Впервые решена задача о температурном поле натрубных отложений типичных элементов конструкции котельного оборудования – пароперегревателя и экономайзера с учётом динамики осаждения частиц летучей золы.

Решена задача о температурном поле системы «частица – подложка» в условиях внедрения частицы в плавящуюся подложку.

Практическая значимость работы.

Разработанные модели и методики расчета можно использовать при уточнении регламента удаления натрубных отложений. Расчет температурного поля шлака и тепловых потоков через поверхность нагрева воды (в экономайзере) или пара (в пароперегревателе) позволяет оптимизировать время от одной очистки трубных поверхностей до другой. В настоящее время это делается без расчета тепловых потоков и температурных полей. Расчет температур шлакового слоя в динамике создаёт предпосылки для оценки вероятности и возможности протекания тех или иных физических и химических процессов, которые многие авторы просто интерпретируют как «спекание», не детализируя этот термин.

Защищаемые положения:

1. Новый подход к моделированию температурных полей слоя натрубных отложений.
2. Математическая модель теплопереноса в слое шлаковых отложений с учётом динамики осаждения одиночных частиц летучей золы на поверхность слоя отложений с учетом ряда особенностей – структуры частицы.
3. Результаты численного моделирования задачи о температурном поле натрубных отложений типичных элементов конструкции котельного

оборудования – пароперегревателя и экономайзера с учётом динамики осаждения частиц летучей золы.

4. Математическая модель теплопереноса в системе «частица золы – слой отложений» при внедрении частицы в шлак.
5. Результаты численного моделирования температурных полей в системе «частица летучей золы – слой золых отложений» для типичных режимов взаимодействия дымовых газов с конвективными поверхностями.
6. Результаты численного моделирования температурного поля системы «частица – подложка» при внедрении частицы в плавящуюся за счет энергии последней подложку.
7. Результаты экспериментального исследования процесса внедрения нагретой до высоких температур частицы в подложку, нагретую до близких к температуре плавления металла, из которого она изготовлена, температур.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность подтверждается системой внутренних проверок. Все расчеты проводились при таких сеточных параметрах, изменение которых в дальнейшем не влияло на результаты вычислений.

Необходимо отметить, что провести экспериментальные исследования рассматриваемого процесса для реальных размеров частиц и характерных времен взаимодействия практически невозможно. Поэтому оценка достоверности результатов численных исследований проводилась из анализа выполнения закона сохранения энергии для исследуемого процесса. Но косвенным обоснованием достоверности является и характер распределений основных искомым функций (температур в пространстве и во времени). Соответствие этих распределений физике изучаемого процесса является очевидным.

Обоснованность реализации исследуемого в диссертации механизма процесса внедрения нагретой до высоких температур частицы в плавящуюся подложку подтверждена специальными экспериментальными исследованиями.

Личный вклад автора.

Все работы по теме диссертации осуществлены автором или при его основном участии: постановка задачи, разработка метода и алгоритма её решения, проведение численного анализа исследовавшихся процессов, обработка и обобщение результатов теоретических исследований, постановка и планирование экспериментальных исследований, проведение эксперимента, анализ и обобщение полученных результатов, формулировка выводов и заключения по диссертации.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на II-ом Международном научно-техническом семинаре “Нетрадиционные технологии в строительстве”. (Томск, 2001); Международной конференции “Сопряженные задачи механики, информатики и экологии”. (Томск, 2002); 3-й всероссийской научной конференции “Фундаментальные и прикладные

проблемы современной механики”. (Томск, 2002); 3-й Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2002); 5-ом Минском Международном форуме по теплообмену. (Минск – 72, 2004); 4-ой всероссийской научной конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики”. (Томск, 2004); XV Школа-семинар молодых ученых и специалистов “Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках”. (Калуга, 2005); 12-ой всероссийской научно-технической конференции “Энергетика: экология, надежность, безопасность”. (Томск, 2006); 10-ой Международной конференции “Газоразрядная плазма и ее применение в технологиях”. (Томск, 2007); 5-ом Семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока “Проблемы теплофизики и теплоэнергетики”. (Иркутск, 2007).

Публикации.

Основные результаты, полученные при выполнении диссертации, опубликованы в 13 работах. Шесть в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований. Также опубликованы материалы семи Всероссийских и Международных конференций. Полный список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы. Материал изложен на 137 страницах, включая 68 рисунков, 1 таблицу, 6 приложений. Список используемой литературы состоит из 46 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** проведен анализ современного состояния процессов, протекающих при формировании натрубных отложений.

Во **второй главе** представлены математические модели температурных полей натрубных отложений с учетом динамики осаждения частиц летучей золы на поверхность слоя шлака. Рассмотрены три возможных сценария осаждения: большие частицы, остающиеся на поверхности; малые по размерам частицы, остающиеся на поверхности; малые по размерам частицы, внедряющиеся в слой шлака на некоторую глубину.

Первая из решенных в диссертации задач представляет собой задачу теплопроводности для двухслойной пластины «корпус стальной трубы – слой золовых отложений». На рис.1 представлена общая схема исследуемого процесса.

В начальный момент времени толщина золового слоя составляет 0.03 мм. В дальнейшем на его поверхность выпадают частицы золы через определенный промежуток времени. В момент выпадения частиц на слой отложений температура поверхности становится равной температуре дымовых

газов. Задача решается в декартовой системе координат, исходя из предположения, что диаметр трубы достаточно велик по сравнению с размером частиц.

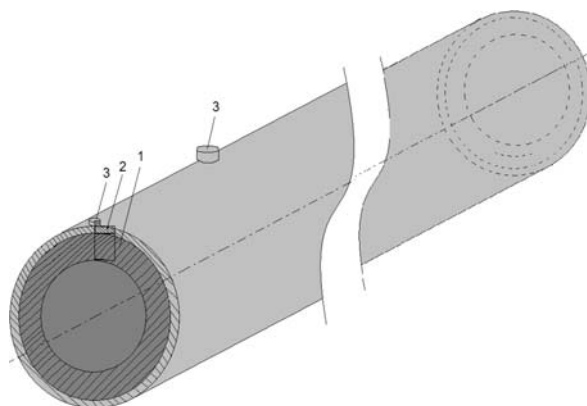


Рис. 1. Общая схема исследуемого процесса. 1 - труба; 2 - слой натрубных отложений; 3 - частица летучей золы.

В качестве примеров рассматривались два объекта котельного оборудования, на которых формируются отложения – водяной экономайзер и пароперегреватель. Интенсивность теплообмена на внутренней поверхности различна для каждого из этих рассматриваемых элементов котельного оборудования. Определение коэффициентов теплообмена и температуры воды или пара в общем случае является существенно менее сложной по сравнению с исследуемой задачей. Поэтому предполагалось, что параметры теплообмена на границах «пар-металл» и «пар-вода» заданы.

На рис. 2 представлена область решения задачи.

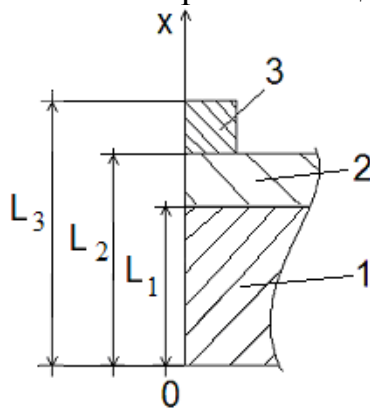


Рис. 2. Область решения задачи. 1 – стенка металла трубы; 2 - слой натрубных отложений; 3 - частица летучей золы.

Математическая постановка задачи в моменты времени (рис. 2), когда частица золы не выпадает на поверхность натрубных отложений имеет вид.

Уравнение теплопроводности для металла с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$t > 0, 0 < x < L_1: c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$t = 0: T_1 = T(x); \quad (2)$$

$$x = 0: \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \alpha_1 (T_1 - T_{na}); \quad (3)$$

$$x = L_1: \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \quad T_1 = T_2. \quad (4)$$

Уравнение теплопроводности для слоя натрубных отложений с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$t > 0, L_1 < x < L_2: c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}; \quad (5)$$

$$t = 0: T_2 = T_0; \quad (6)$$

$$x = L_1: \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \quad T_1 = T_2; \quad (7)$$

$$x = L_2: \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \alpha_2 (T_{\partial z} - T_2) + \varepsilon \sigma (T_{\partial z}^4 - T_2^4) + q_x, \quad (8)$$

где $q_x = W_x \cdot Q_x$.

Математическая постановка задачи в момент (рис. 2) выпадения частицы летучей золы на слой натрубных отложений имеет вид.

Уравнение теплопроводности для металла с соответствующими начальными и граничными условиями адекватны (1) - (4).

Уравнение теплопроводности для слоя натрубных отложений с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$t > 0, L_1 < x < L_3: c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}; \quad (9)$$

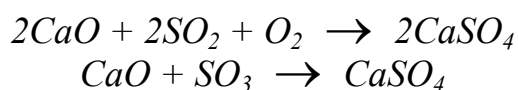
$$t = t_6: T_2 = T(x); \quad (10)$$

$$x = L_1: \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}; \quad T_1 = T_2; \quad (11)$$

$$x = L_3: T_2 = T_{\partial z}. \quad (12)$$

Здесь индекс 1 соответствует стенке металла трубы, индекс 2 – слою натрубных отложений без частицы, 3 – слою натрубных отложений с частицей;

Численные исследования проведены для условий работы достаточно типичного барабанного котла Е-420-140 (БКЗ-420-140). Этот котел предназначен для выработки перегретого пара на тепловых электростанциях с теплофикационными турбинами при сжигании Ирша-Бородинского или Назаровского углей Канско-Ачинского бассейна. Почти все угли этого бассейна относятся к бурым и в органической массе их содержатся активные группы, склонные к катионному обмену. Доминирующим (химическим) процессом приводящим к образованию и упрочнению отложений, является взаимодействие оксида кальция, содержащегося в золе с оксидами серы дымовых газов.



В дальнейшем анализе учитывались эти две реакции.

При определении скорости роста золовых отложений использовалась зависимость относительного количества золы, оседающей на зондах, от температуры дымовых газов.

Сформулированная задача решена методом конечных разностей. Разностные аналоги исходных дифференциальных уравнений решены методом итераций с применением метода прогонки на каждой итерации. Использовалась нерегулярная разностная сетка, число узлов которой увеличивалось на один в момент осаждения частиц летучей золы.

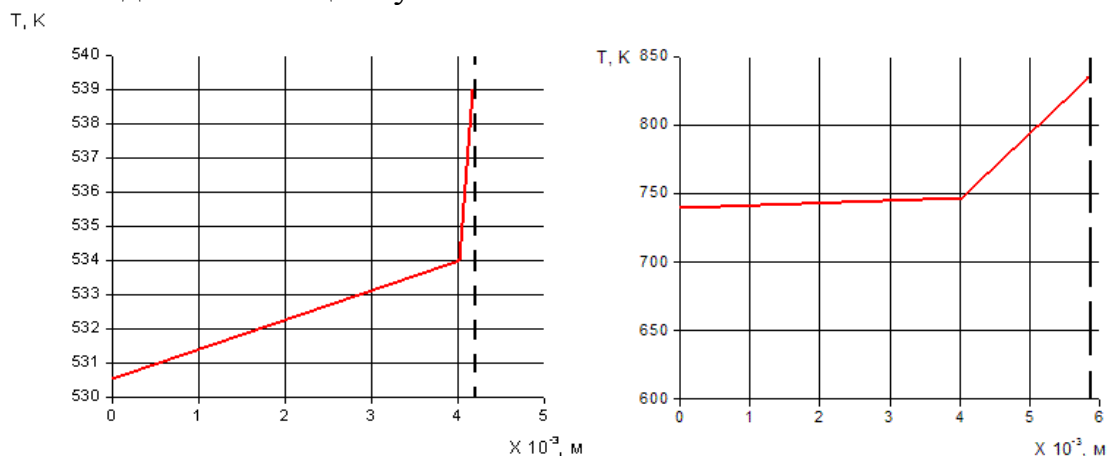


Рис. 3. Распределение температуры по толщине двухслойной стенки («металл + слой шлака») экономайзера (слева) и пароперегревателя (справа), $t = 1692$ с; - - - - внешняя граница слоя отложений.

В результате проведенных численных исследований были получены температурные поля стенок пароперегревателя и экономайзера при наличии золовых отложений (рис. 3).

Из рисунка 3 следует, как и можно было предположить, что перепад температур в слое металла намного меньше, чем перепад температур в слое золы. Это объясняется малым значением коэффициента теплопроводности золы.

Также определялась величина теплового потока, подводимого к нагреваемому теплоносителю (рис. 4).

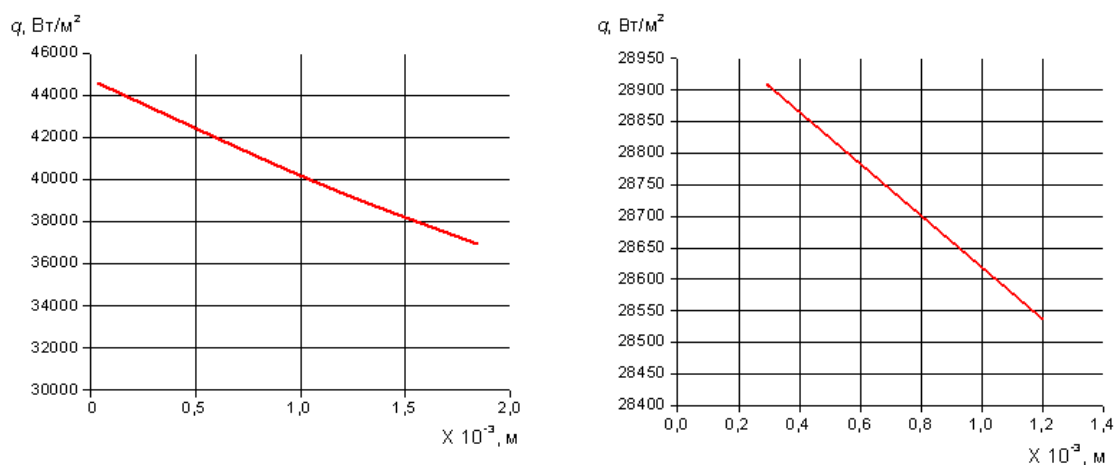


Рис.4. Изменение величины теплового потока с ростом толщины слоя шлака экономайзера (слева) и пароперегревателя (справа), $t = 1692$ с.

Из рисунка 4 видно, что имеет место снижение величины теплового потока. Для экономайзера величина теплового потока при толщине золовых отложений в 0.1 мм уменьшается на 1.3 % к рассматриваемому моменту времени.

Из зависимости теплового потока от толщины слоя золы (рис. 4) следует, что в пароперегревателе при слое золы в 1.8 мм величина теплового потока уменьшается на 17.2 % через 9 часов работы.

Из зависимости температуры поверхности золовых отложений от времени следует, что выпадение частиц золы приводит к постепенному росту температуры поверхности (рис. 5).

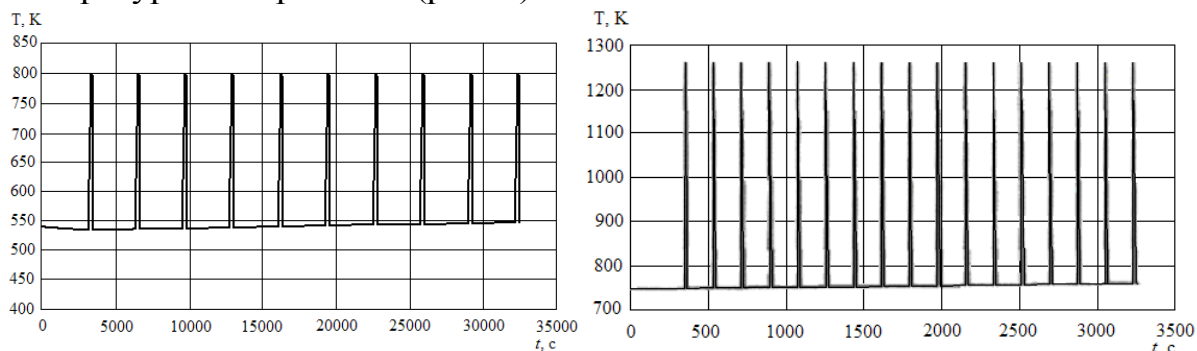


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности натрубных отложений экономайзера (слева) и пароперегревателя (справа) от времени.

На нагреваемой поверхности экономайзера за 9 часов температура увеличивается на 3.6 °С. Температура стенки металла при этом (со стороны нагреваемого теплоносителя) практически не меняется.

В пароперегревателе температура нагреваемой поверхности увеличивается на 10.5 °С за 0.9 часа. За 9 часов работы пароперегревателя температура поверхности натрубных отложений увеличивается на 88 °С. За этот же промежуток времени температура стенки металла со стороны пара уменьшается на 1.9 °С.

Из решения задачи о температурном поле шлаковых отложений с учетом динамики образования слоя отложений следует, что масштабы перепадов температур по толщине слоя шлака и абсолютные значения температур, достигаемые в процессе осаждения частиц летучей золы достаточно значимы. Установленные закономерности могут быть использованы при моделировании образования процессов натрубных отложений.

Аналогичная задача рассмотрена в существенно более сложной двумерной постановке. Рассматривалась частица в форме диска малой высоты, выпадающая на поверхность натрубных отложений. На рис. 6 представлена общая схема процесса в двумерной постановке при осаждении частицы летучей золы на поверхность натрубных отложений.

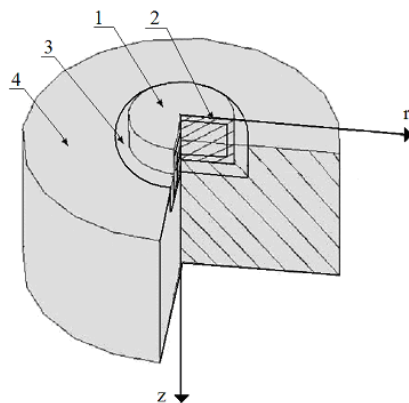


Рис. 6. Общая схема исследуемого процесса в двумерной постановке. r, z - поперечная и продольная координаты; 1 - частица летучей золы; 2 - пленка закристаллизовавшегося расплава; 3 - расплавленный слой шлака; 4 - слой шлака в твердом состоянии.

Частица представляет собой расплав минеральной части угля, закристаллизованный по внешнему контуру. После осаждения на поверхность, температура которой существенно (на несколько сотен градусов) ниже температуры частицы, расплав кристаллизуется и выделяется теплота кристаллизации. В результате нагрева шлака отложений происходит его оплавление в малой окрестности частицы летучей золы. Интенсивность тепловыделения зависит как от температуры, так и от размеров частицы. Образующийся расплав шлака вытесняется частицей, которая внедряется в шлак. После завершения процесса кристаллизации образуется спеченная система «частица летучей золы - шлак». Глубина внедрения определяется скоростью продвижения изотермы $T=T_{пл}$.

На рис.7 представлена область решения задачи.

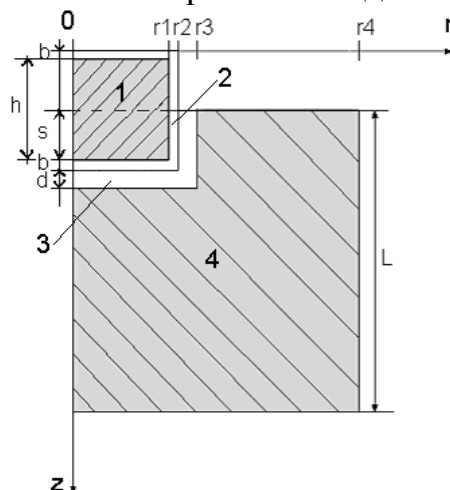


Рис. 7. Область решения задачи. 1 - частица летучей золы; 2 - пленка закристаллизовавшегося расплава; 3 - расплавленный слой шлака; 4 - слой шлака в твердом состоянии; r, z - цилиндрические координаты.

Система нестационарных двумерных дифференциальных нелинейных уравнений теплопроводности для исследуемой задачи (рис. 7) в рамках рассматриваемой модели имеет следующий вид:

$$0 < t < t_{\max}, 0 < r < r_1, b < z < b + h: c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + \frac{Q_1 W_1}{h}; \quad (13)$$

$$0 < t < t_{\max}, 0 < r < r_2, 0 < z < 2b + h: c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}; \quad (14)$$

$$0 < t < t_{\max}, 0 < r < r_3, 2b + h < z < 2b + h + d: c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2}; \quad (15)$$

$$0 < t < t_{\max}, 0 < r < r_4, b + h - s < z < L + 2b + h - s:$$

$$c_4 \rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} + \frac{Q_4 W_4}{h}. \quad (16)$$

Выражение для массовой скорости кристаллизации и плавления имеет вид:

$$W_i = \rho_i V_i, \text{ где } i = 1, 4. \quad (17)$$

$$V_i(r, z, t) = \frac{\zeta(r, z, t + \Delta t) - \zeta(r, z, t)}{\Delta t}. \quad (18)$$

Граничные и начальные условия для системы (19) – (24) записываются в виде:

$$1) r = 0, 0 < z < L + 2b + h - s: -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = 0, \text{ где } i = 1, 2, 3, 4; \quad (19)$$

$$2) z = 0, 0 < r < r_2: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \alpha_1 (T_{\partial z} - T_2) + \sigma \varepsilon_{np} (T_{\partial z}^4 - T_2^4) + q_x; \quad (20)$$

$$3) z = b, 0 < r < r_1: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, T_1 = T_2; \quad (21)$$

$$4) r = r_1, b < z < b + h - s: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, T_1 = T_2; \quad (22)$$

$$5) r = r_2, 0 < z < b + h - s: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_1 (T_{\partial z} - T_2) + \sigma \varepsilon_{np} (T_{\partial z}^4 - T_2^4) + q_x; \quad (23)$$

$$6) z = b + h - s, r_2 < r < r_4: -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \alpha_1 (T_{\partial z} - T_i) + \sigma \varepsilon_{np} (T_{\partial z}^4 - T_i^4) + q_x, \quad (24)$$

где $i = 3, 4$;

$$7) r = r_1, b + h - s < z < b + h: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, T_1 = T_2; \quad (25)$$

$$8) r = r_2, b + h - s < z < h + 2b: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}, T_2 = T_3; \quad (26)$$

$$9) r = r_3, b + h - s < z < h + 2b + d: -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r}, T_3 = T_4; \quad (27)$$

$$10) z = b + h, 0 < r < r_1: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, T_1 = T_2; \quad (28)$$

$$11) z = h + 2b, 0 < r < r_2: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}, T_2 = T_3; \quad (29)$$

$$12) z = h + 2b + d, 0 < r < r_3: -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z}, T_3 = T_4; \quad (30)$$

$$13) r = r_4, b + h - s < z < L + 2b + h - s: -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} = 0; \quad (31)$$

$$14) z = L + 2b + h - s, 0 < r < r_4: -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} = 0. \quad (32)$$

Начальные условия для системы (19) – (24) выглядят следующим образом:

$$\text{при } t = 0: T_1(r, z) = T_r, T_2(r, z) = T_{\text{оз}}, T_4(r, z) = T_n, s = 0. \quad (33)$$

Приведенная степень черноты ε_{np} системы тел, между которыми происходит процесс лучистого теплообмена, вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1}{\varepsilon_n} - 1}. \quad (34)$$

Теплота химической реакции учитывалась следующим образом:

$$q_x = W_x \cdot Q_x. \quad (35)$$

Здесь индексы 1, 2, 3, 4 соответствуют частице летучей золы, пленке закристаллизовавшегося расплава, расплавленному слою шлака, слою отложений в твердом состоянии.

Задача решена методом конечных разностей. Двумерная нестационарная задача решена методом расщепления. Разностные аналоги системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных решены методом итераций с применением метода прогонки на каждой итерации. Использовалась неравномерная и нерегулярная разностная сетка с целью обеспечения необходимого уровня дискретизации в зонах высоких градиентов температур и снижения объема вычислений в зонах малых перепадов температур.

На рис. 8 приведены типичные положения характерных изотерм области решения для моментов времени начала внедрения и завершения процесса кристаллизации.

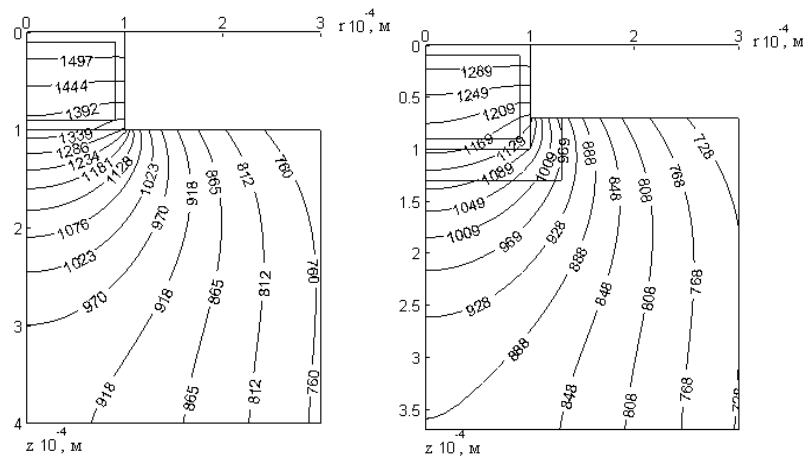


Рис. 8. Положение характерных изотерм при частичном внедрении частицы летучей золы в слой шлака, $t = 0.2 \cdot 10^{-3}$ с (слева) и $t = 3.1 \cdot 10^{-3}$ с (справа).

Сравнение результатов, представленных на рис. 8 показывает, что рассматриваемый процесс является быстропротекающим. Так как частица летучей золы мала по размерам, то она достаточно быстро остывает. При этом прогревается за счет теплоты, аккумулированной в частице во время её движения в потоке дымовых газов, и теплоты кристаллизации только очень малая область в непосредственной окрестности частицы. Теплопроводность и теплоемкость шлаковых отложений достаточно велики для того, чтобы отводить теплоту из зоны внедрения. Поэтому интервал времен, в течение которого возможны реакции «спекания» очень мал и составляет не более десятых долей секунды. После этого температура в зоне контакта частицы с материалом отложений быстро падает и несущественно отличаются температуры основного массива в приповерхностном слое.

На рис. 9 приведены пространственные распределения температур для характерных моментов времени начало внедрения и завершения кристаллизации.

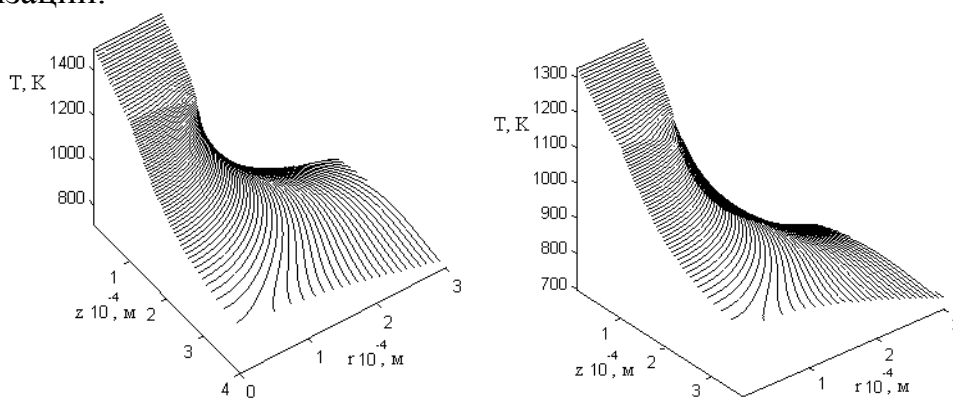


Рис. 9. Пространственное положение характерных изотерм при частичном внедрении частицы летучей золы в слой шлака, $t = 0.2 \cdot 10^{-3}$ с (слева) и $t = 3.1 \cdot 10^{-3}$ с (справа).

Скорости роста натрубных отложений, как показывают результаты исследований, растут по мере увеличения толщины слоя отложений с связи с изменением условий теплоотвода от поверхности взаимодействия частиц с отложением. Чем больше толщина этого слоя, тем выше температура поверхности взаимодействия и, соответственно, скорости реакций «спекания» (или «сцепления» частиц с поверхностью). Эти результаты, полученные теоретическим путем, хорошо качественно соответствуют известным данным о закономерностях формирования натрубных отложений, что обосновывает достоверность разработанных физических и математических моделей.

В третьей главе представлены математическая модель, метод и результаты численного исследования процессов взаимодействия частиц металла, покрытых пленкой кристаллита, с подложкой упрочняемого элемента оборудования. Метод решения применялся адекватный изложенному выше. Рассмотрены различные системы «частица – подложка». В качестве иллюстраций (рис. 10) приведен пример осаждения металлических частиц на поверхность детали из металла.

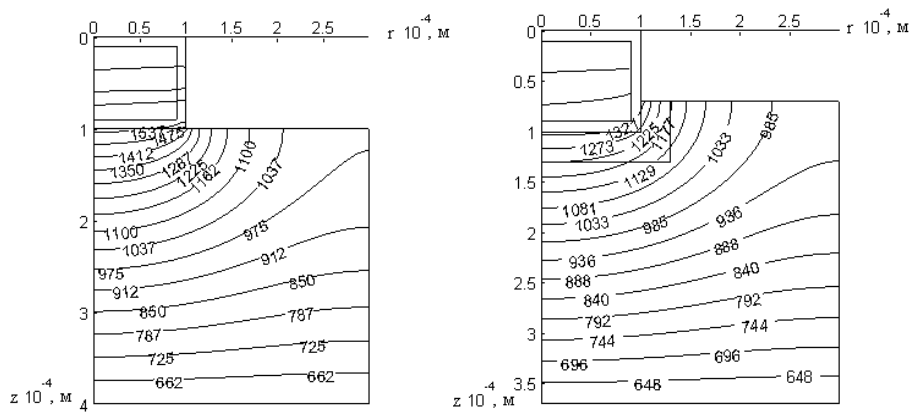


Рис. 10. Положение характерных изотерм при частичном внедрении никелевой частицы в подложку из стали справа ($t = 0.2 \cdot 10^{-3}$ с) и слева ($t = 2.8 \cdot 10^{-3}$ с).

Цель исследования – моделирование полей температур в системе «частица – подложка». Знание распределений температур во времени и по координатам необходимо для выбора технологических параметров процесса нанесения покрытий (упрочняющих и защитных).

На рис. 10 приведены типичные положения характерных изотерм для фиксированных моментов времени при внедрении частицы никеля в подложку из низкосортной стали. Анализ полученных результатов показывает, что область дополнительного прогрева подложки за счет тепла, аккумулированного в частице, а также выделяющегося при фазовом переходе достаточно мала (с одной стороны). Но, в тоже время, она составляет десятки микрон. Такой глубины внедрения определенно достаточно для закрепления частицы в приповерхностном слое металла после кристаллизации. Также можно отметить, что характерные времена исследуемого процесса составляют миллисекунды (или десятки миллисекунд), то есть процесс, является быстропротекающим. При этом частицы металла остывают намного быстрее частиц летучей золы, потому что теплопроводности металлов частицы и подложки много больше соответствующих теплопроводностей летучей золы и слоя натрубных отложений. В тоже время теплоемкости последних намного (более чем в два раза) меньше. Поэтому совместное влияние этих факторов приводит к достаточно сложным вариантам реализаций исследуемого процесса для двух рассмотренных приложений. Большая объемная теплоемкость металлов приводит к росту времени внедрения частицы при прочих адекватных условиях, но их высокая теплопроводность приводит к быстрому остыванию. Из анализа полученных результатов следует, что управляя температурой частиц при высокотемпературном нанесении покрытий можно управлять технологическим процессом. Так, например, капля металла при столкновении с поверхностью подложки не только растекается, но может разбрызгиваться даже при малых скоростях её осаждения на подложку. Создание же оболочки из закристаллизованного металла позволяет сконцентрировать массу металла, используемого для упрочнения или защиты поверхности, на малой площадке, соответствующей месту контакта частицы с подложкой.

На рис. 11 приведены типичные пространственные положения характерных изотерм для фиксированных моментов времени при внедрении частицы никеля в подложку из низкосортной стали.

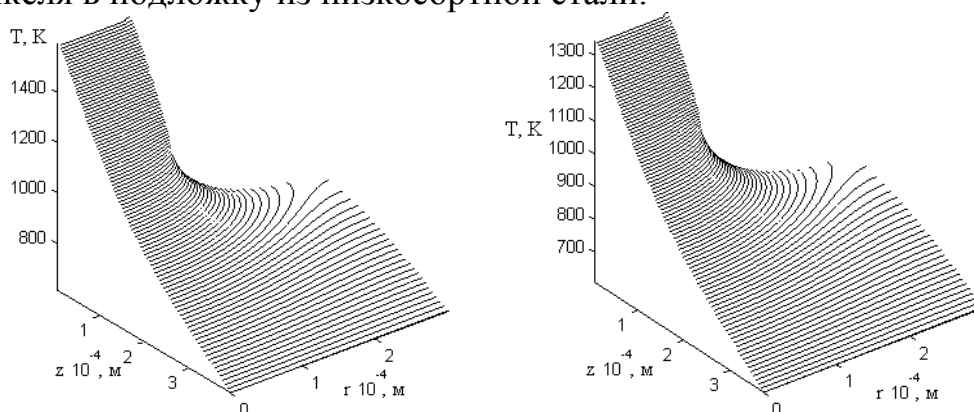


Рис. 11. Пространственное положение характерных изотерм при частичном внедрении частицы в подложку, $t = 0.2 \cdot 10^{-3}$ с (слева) и $t = 2.8 \cdot 10^{-3}$ с (справа).

Полученные в диссертации теоретические следствия позволяют объяснить известный механизм улучшения качества порошковых плазменных покрытий при подогреве подложки в процессе их нанесения. Подогрев приповерхностного слоя детали даже на 200-300 К существенно улучшает условия для образования пятна расплава под частицей, внедряющейся в подложку. В этом случае глубина процесса непосредственного внедрения заметно увеличивается. Соответственно растет прочность сцепления покрытия с подложкой.

Также в третьей главе приведены результаты специальных экспериментальных исследований процесса внедрения расплавленной частицы свинца в плавящуюся свинцовую подложку (пластину).

На рис. 12 показаны фотографии образцов после экспериментальных исследований при внедрении частицы свинца в свинцовую подложку при разной начальной температуре подложки T_n . Эти эксперименты показали реальность реализации механизма внедрения нагретой до высоких температур частицы в плавящуюся подложку. В связи с тем, что характерные времена исследуемого процесса составляют от 0,1 с до 0,003 с специально исследовался вопрос о возможности применения уравнения теплопроводности параболичес-

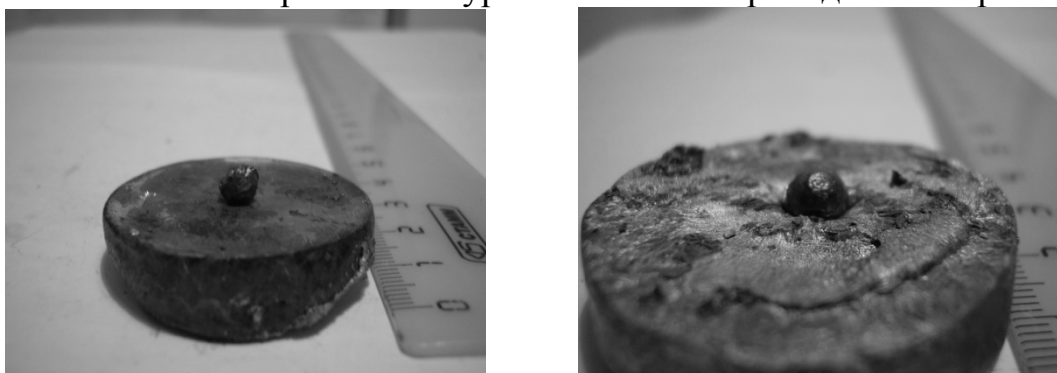


Рис. 12. Внедрение частицы свинца в свинцовую пластину при начальной температуре подложки $T_n = 396$ К (слева), $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м и при $T_n = 590$ К (справа), $h = 9 \cdot 10^{-3}$ м.

кого типа для рассматриваемого диапазона изменения t . Установлено, что до значений $t=10^{-5}$ с использование гиперболического уравнения теплопроводности не приводит к сколько-нибудь заметным отклонениям в значениях температур. Можно сделать вывод о применимости традиционного аппарата теории теплопроводности для моделирования таких быстропротекающих процессов.

ВЫВОДЫ

1. Впервые сформулирована математическая модель теплопереноса в слое шлаковых отложений с учётом динамики осаждения одиночных частиц на поверхность слоя отложений.
2. Впервые решена задача о температурном поле натрубных отложений типичных элементов конструкции котельного оборудования – пароперегревателя и экономайзера с учётом динамики осаждения частиц летучей золы.
3. Впервые получены распределения температур по толщине слоя отложения для типичных углей и условий сжигания в рамках одномерной модели с учётом процесса осаждения одиночной частицы.
4. Сформулирована физическая модель формирования слоя шлаковых отложений при частичном внедрении одиночной частицы золы в слой отложений.
5. Разработана математическая модель, описывающая температурное поле системы «частица золы – слой отложений» при внедрении частицы в шлак.
6. Решена задача о температурном поле системы «частица золы – слой шлаковых отложений» при внедрении частицы в шлак.
7. Сформулирована физическая модель процесса теплопереноса при внедрении частицы расплавленного металла в поверхностный слой упрочняемой детали.
8. Разработана математическая модель процесса теплопереноса в системе «частица металла – подложка» для условий плазменного нанесения порошковых упрочняющих покрытий.
9. Решена задача о температурном поле системы «частица металла – подложка» при плазменном нанесении упрочняющих покрытий в условиях внедрения частицы в подложку.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ПРЕДСТАВЛЕНЫ В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Чугуев Д.Н. Температурное поле частицы и прилегающих к ней слоев плавящегося материала подложки при движении частицы вглубь подложки // Нетрадиционные технологии в строительстве: Матер. 2-го междунар. науч. - техн. семинара. Томск. 2001. - Т., 2001. - С. 167 - 169.

2. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Чугуев Д.Н. Температурное поле системы «частица - подложка» при внедрении частицы в плавящуюся подложку // Тр. 3-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Москва. 2002. - М., 2002. - С. 239 - 240.
3. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Чугуев Д.Н. Численное моделирование температурных полей системы «частица - подложка» при внедрении частицы в плавящуюся подложку // Физика и химия обработки материалов. - 2003, - № 6, - С. 28 - 33.
4. Кузнецов Г.В., Чугуев Д.Н. Теплоперенос при внедрении частицы металла в плавящуюся подложку при нанесении порошковых покрытий // 5-й Минский Международный Форум по тепломассообмену. Минск-72. 2004. - М., 2004. - С. 88 - 90.
5. Чугуев Д.Н. Тепловая модель формирования порошковых покрытий при высокотемпературном напылении // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Док. 4-й всерос. науч. конф. Томск. 2004. - Т., 2004. - С. 415 - 416.
6. Чугуев Д.Н. Численное моделирование гидродинамических и тепловых процессов при внедрении частицы в подложку // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках. XV Школа-семинар молодых ученых и специалистов. Калуга. 2005. - К., 2005. - С. 17 - 18.
7. Кузнецов Г.В., Чугуев Д.Н. Математическое моделирование процесса формирования отложений летучей золы на поверхности элементов котельного оборудования // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. док. 12-ой всерос. науч. - техн. конф. Томск. 6 - 8 декабря 2006. - Т., 2006. - С. 212 - 214.
8. Кузнецов Г.В., Чугуев Д.Н. Численное моделирование теплофизических процессов формирования порошковых покрытий при реализации плазменных технологий // Газоразрядная плазма и ее применение в технологиях: 10-ая междунар. конф. Томск. 2007. - Т., 2007. - С. 12 - 14.
9. Кузнецов Г.В., Чугуев Д.Н. Теплофизические процессы при формировании упрочняющих и защитных покрытий в плазменных технологиях. Известия высших учебных заведений // Физика. - 2007. - Т. 50. - № 9/2. - С. 120 - 126.
10. Кузнецов Г.В., Петлина И.О., Чугуев Д.Н. Температурные поля натрубных отложений элементов котельного оборудования ТЭС. Известия высших учебных заведений // Физика. - 2007. - Т. 50. - № 9/2. - С. 96 - 102.
11. Кузнецов Г.В., Чугуев Д.Н. Теплофизика процесса формирования натрубных отложений. Известия высших учебных заведений // Физика. - 2007. - Т. 50. - № 9/2. - С. 113 - 119.
12. Чугуев Д.Н. HeatPro2D: программный модуль для расчета температурных полей // Журнал «Компьютерные учебные программы и инновации» - М.: ГОСКООРЦЕНТР. - 2007. - № 12. - С. 146 - 147.
13. Чугуев Д.Н. HeatProInto2D: программный модуль для расчета процесса внедрения частицы летучей золы в слой натрубных отложений // Журнал «Компьютерные учебные программы и инновации» - М.: ГОСКООРЦЕНТР. - 2008. - № 1. - С. 152.