

На правах рукописи

Чернов Владимир Викторович



**Исследование и разработка способов интенсификации
лучистого теплообмена в металлургических печах за
счет повышения степени черноты поверхностей
теплообмена.**

**Специальность № 05.16.02 - «Металлургия черных, цветных и
редких металлов»**

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва, 2004 г.

Диссертационная работа выполнена в Московском государственном
вечернем металлургическом институте

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Селезнев Н.П.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Глинков Г.М.

кандидат технических наук, Селезнев Г.П.

Ведущее предприятие: ОАО Московский металлургический завод «Серп и
Молот»

Защита состоится «29» июня 2004 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного
совета Д.212.127.01 при Московском государственном вечернем металлур-
гическом институте по адресу: 111250, Москва, Лефортовский вал, д.26,
тел.(095) 3611480, факс (095) 3611619,

Е - mail: mgymi-mail@mtu-net.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государ-
ственного вечернего металлургического института.

Автореферат разослан «27» мая 2004 г.

Справки по телефону: (095) 3611480

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

 Т.И.Башкирова

Общая характеристика работы.

Актуальность работы. Рациональное использование топливно — энергетических ресурсов - одна из важнейших проблем, стоящих перед промышленностью нашей страны в настоящее время и в ближайшем будущем. Учитывая важность этой проблемы, необходимо постоянно искать способы повышения к.п.д. тепловых агрегатов, что приведет к повышению производительности или снижению потребления органического топлива промышленными тепловыми агрегатами, крупнейшими из которых являются металлургические нагревательные и термические печи. С более эффективным использованием топлива тесно связана задача снижения валовых выбросов вредных веществ, входящих в состав продуктов сгорания.

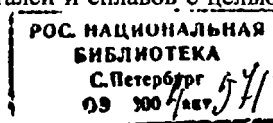
Цель работы. Разработка и практическая реализация метода интенсификации теплообмена излучением в промышленных теплообменниках (металлических радиационных рекуператорах, трубчатых печах, котельных агрегатах) за счет нанесения покрытий с высокой степенью черноты на поверхности теплообмена.

Научная новизна работы:

- впервые аналитически, за счет разделения теплового потока от кладки собственным излучением на составляющие по длинам волн полос поглощения и окон прозрачности продуктов горения, удалось количественно оценить влияние степени черноты кладки на величину теплового потока к металлу;

- теоретически обоснован и экспериментально проверен на лабораторной установке и огневом стенде метод интенсификации радиационного теплообмена путем нанесения на тепловоспринимающие поверхности покрытий с высокой степенью черноты в ближней ИК — области спектра;

- в результате подробного анализа существующих методов нанесения покрытий разработаны составы покрытий с высокой степенью черноты для использования на нескольких типах сталей и сплавов с целью по-



вышения излучательной способности конструкций тепловых агрегатов при высоких температурах;

- получены экспериментальные данные по радиационным, теплофизическим и эксплуатационным характеристикам разработанных покрытий.

Практическая значимость.

1. Получены зависимости, позволяющие количественно оценить влияние степени черноты кладки на тепловой поток к металлу и уточнить методики расчета теплообмена излучением в системе газ - кладка - металл с учетом селективности радиационных свойств продуктов горения топлива.

2. Предложено интенсифицировать теплообмен в промышленных теплообменных агрегатах путем нанесения покрытий с высокой степенью черноты на тепловоспринимающие элементы конструкций, изготовленные из металлов. Разработаны покрытия для конкретных сталей, из которых изготавливаются элементы конструкций промышленных теплообменников, изучены основные свойства покрытий.

3. Опробована работа покрытий в процессе исследований на экспериментальных стендах (физических моделях).

4. Проведены вычислительные эксперименты для определения эффективности применения покрытий с целью интенсификации радиационного теплообмена при определенных режимах работы металлических радиационных рекуператоров металлургических печей.

Непосредственное внедрение получили следующие результаты диссертационной работы:

1. Одно из разработанных покрытий было применено на рабочих поверхностях парогенератора СПГ - 28 Крымской солнечной электростанции (СЭС - 5) и обеспечило положительный технический эффект.

2. Программы расчетов параметров радиационных рекуператоров металлургических печей, разработанные в процессе выполнения диссертации

ции, используются в учебном процессе Московского государственного вечернего металлургического института.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечена: использованием современных методов измерений и приборов; экспериментальной проверкой теоретических и расчетных выводов в условиях лабораторного и полупромышленного оборудования.

Личный вклад автора заключается в непосредственном формировании общих концепций настоящей работы, постановке, личном участии в проведении расчетно - теоретических и экспериментальных исследований, в разработке, создании и внедрении конструктивных и технологических мероприятий по улучшению тепловой работы теплообменников металлургических печей, позволяющей снизить потребление топлива или повысить производительность.

Автор защищает:

- методику расчета влияния степени черноты кладки на тепловой поток к металлу с учетом разделения теплового потока от кладки собственным излучением на составляющие по длинам волн полос поглощения и окон прозрачности продуктов горения;
- метод интенсификации лучистого теплообмена в тепловых агрегатах;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований и разработанные на их основе рекомендации для промышленной реализации;
- составы покрытий для повышения излучательной способности некоторых сталей и сплавов, применяемых для изготовления теплообменников.

Апробация работы. Результаты работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах:

Республиканской конференции «Теория и практика тепловой работы металлургических печей» (г. Днепропетровск, 1988 г.);

Научно - технической конференции «Молодежь и научно - технический прогресс» (г. Липецк, 1990 г.);

Семинаре «Улучшение экологических показателей тепловых агрегатов в металлургии и машиностроении» (г. Пенза, 1991 г.);

Второй Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 1998 г.);

Международной научно - технической конференции «Проблемы энергосбережения. Теплообмен в электротермических и факельных печах и топках» (г. Тверь, 2001 г.).

Публикации. Основное содержание выполненных исследований, научных, теоретических, экспериментальных и практических разработок опубликовано в 14 статьях и материалах научно - технических конференций и семинаров, описании к авторскому свидетельству. Результаты исследований освещены в 4 отчетах по НИР МГВМИ за 1989 - 2000 г.г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 - х глав, выводов, библиографического списка и приложений. Работа содержит 136 страниц машинописного текста, 37 рисунков, 7 таблиц. Библиографический список состоит из 90 наименований.

Содержание работы.

1. Анализ влияния степени черноты поверхностей на лучистый теплообмен в тепловых агрегатах

В большинстве тепловых агрегатов - плавильных, нагревательных и термических печах, котлах, топках и др., основной составляющей теплообмена является излучение. За исключением продуктов горения лучистая энергия в основном отдается и воспринимается поверхностями объектов.

В лучистом теплообмене поверхности, которые являются источниками тепла (радиационные трубы в печах с защитной атмосферой, электрические нагреватели и др.) или воспринимают тепло (металл, трубы с нагреваемым теплоносителем и др.), выполняют в теплообмене активную роль. Поверхность кладки, свода, перегородок, пережимов являются переизлучателями, преобразователями лучистой энергии, экранами, отражателями.

Они не являются ни источниками тепла, ни теплоприемниками, но также участвуют в теплообмене. Их роль в лучистом теплообмене можно определить как пассивную.

Интенсифицировать лучистый теплообмен можно за счет изменения значений радиационных характеристик поверхностей, таких как поглощательная или отражательная способность.

Для излучающих поверхностей, активно участвующих в лучистом теплообмене, повышение степени черноты однозначно сказывается на увеличении результирующего теплового потока и может дать следующий эффект:

1. Интенсифицировать теплообмен за счет увеличения теплового потока от нагревателя прямо пропорционально увеличению степени черноты при постоянной температуре нагревателя и неизменной его поверхности.

2. Увеличить срок службы нагревателя или использовать менее жаростойкий и жаропрочный материал за счет снижения рабочей температуры нагревателя при неизменной его тепловой мощности и габаритах (излучающей поверхности - F).

3. Снизить расход дорогостоящего материала на изготовление нагревателя (уменьшение F) при постоянной тепловой мощности и неизменной рабочей температуре нагревателя.

Для тепловоспринимающей поверхности нагреваемого металла (труб с теплоносителем и т.п.) плотность результирующего теплового потока $q_{\text{рез}}^*$ прямо пропорциональна степени черноты нагреваемой поверхности ($\epsilon_{\text{ж}}$) и повышение значения $\epsilon_{\text{ж}}$ позволит увеличить результирующий тепловой поток на поверхности. Одним из способов изменения степени черноты поверхности является нанесение на эту поверхность покрытия с необходимым значением степени черноты.

Влияние степени черноты поверхностей - переизлучателей (кладки), выполняющих пассивную роль, на теплообмен излучением, согласно литературным данным, однозначно не определено.

Если в системе газ-кладка-металл использовать серое приближение (радиационные характеристики поверхностей теплообмена не зависят от длины волны излучения) в описании радиационных свойств тел, участвующих в теплообмене, то интенсивность теплообмена не зависит от степени черноты адиабатной кладки. Излучение продуктов сгорания топлива является селективным и использование серого приближения вносит ошибки в расчеты радиационного теплообмена.

Оценим, как меняется плотность теплового потока от кладки к металлу при наличии ослабляющего газового слоя с изменением степени черноты кладки. Источником тепла являются продукты горения, от которых тепловой поток падает как на металл (q_{nz}^M), так и на кладку (q_{nz}^K).

Если считать кладку адиабатной, то падающий на нее от продуктов горения тепловой поток частично отражается (прямо пропорционально величине $(1-\varepsilon_K)$), а частично, поглощаясь, излучается собственным излучением (прямо пропорционально степени черноты кладки - ε_K), то есть

$$q_{omp} = q_{nz}^K \cdot (1 - \varepsilon_K) \quad (1.1)$$

$$q_{sob} = q_{nz}^K \cdot \varepsilon_K \quad (1.2)$$

Отраженный кладкой тепловой поток приходится на длины волн полос поглощения (и излучения) продуктов горения. Поэтому этот тепловой поток будет ослабляться газовым слоем и до металла дойдет доля, пропорциональная $(1 - \varepsilon_z)$, то есть тепловой поток за вычетом поглощенной части

$$q_{omp}^M = q_{omp} \cdot (1 - \varepsilon_z) = q_{nz}^K \cdot (1 - \varepsilon_K)(1 - \varepsilon_z) \quad (1.3)$$

Собственно излучаемый тепловой поток от кладки распределяется по всему диапазону длин волн, которые приходятся на длины волн полос поглощения и окон прозрачности. Часть этого теплового потока, которая приходится на окна прозрачности, дойдет до металла, не ослабляясь. Вторая часть, которая приходится на длины волн полос поглощения, будет ослабляться и до металла дойдет часть, пропорциональная $(1 - \varepsilon_z)$.

Примем долю собственного излучения от кладки, которая приходится на длины волн полос поглощения газа, как прямо пропорциональную степени черноты газа, а долю, приходящуюся на длины волн окон прозрачности как прямо пропорциональную $(1-\varepsilon_2)$, то есть

$$q_{\text{соб}} = q_{\text{соб}} \cdot \varepsilon_2 + q_{\text{соб}} \cdot (1 - \varepsilon_2) = q_{n_2}^k \cdot \varepsilon_k \cdot \varepsilon_2 + q_{n_2}^k \cdot \varepsilon_k \cdot (1 - \varepsilon_2) \quad (1.4)$$

Продукты горения топлива излучают и поглощают энергию в определенных областях спектра, то есть имеют селективный характер излучения. В состав продуктов горения газообразного органического топлива входят, как правило, CO_2 и H_2O . Для продуктов горения поток излучения в пределах излучающе - поглощающих диапазонов длин волн

$$q_{n_2} = \sum_{i=1}^{i=n} \int_{\Delta\lambda_i} J_{\lambda} d\lambda \quad (1.5)$$

Следовательно, интегральная степень черноты продуктов горения

равна

$$\varepsilon_2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \int_{\Delta\lambda_i} J_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} J_{0,\lambda} d\lambda} = \frac{q_{n_2}}{q_0} \quad (1.6)$$

Графически интеграл $\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} J_{0,\lambda} d\lambda$ представляет собой всю площадь под

кривой 1 (рис 1.), а сумма интегралов $\sum_{i=1}^{i=n} \int_{\Delta\lambda_i} J_{\lambda} d\lambda$ - площадь, приходящуюся на длины волн полос поглощения. При этом суммарная площадь полос доходит до пунктирной кривой 2, характеризующей газ как серое излучение. Поэтому интегральная степень черноты продуктов горения в данном случае является предельной, когда произведение парциального давления на длину пути луча стремится к бесконечности. В действительности это произведение имеет конечное значение, что отражается на графике (рис.1) заштрихованной частью 3, не доходящей до верхней кривой для серого газа. Следовательно, действительная степень черноты газов меньше ее предельного значения, а лучистый поток от кладки собственным излучением мо-

жет частично проходить в пределах полос поглощения, как через окна прозрачности, не ослабляясь. Реальная интегральная степень черноты газа учитывает это обстоятельство.

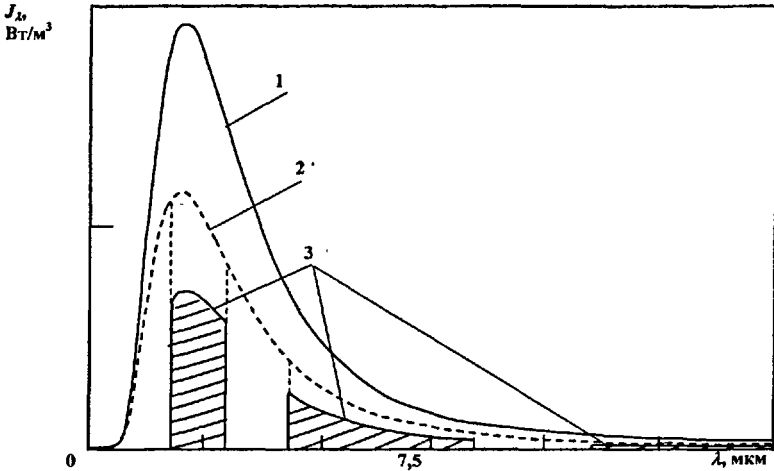


Рис. 1. Интегральная плотность потока излучения: 1 - абсолютно черного тела; 2 - серого тела; 3 - продуктов горения топлива с конечной толщиной слоя.

Поэтому логично разделить лучистый поток собственного излучения кладки на доли прямо пропорциональные ε_2 и $(1 - \varepsilon_2)$.

До металла доля собственного излучения кладки, приходящаяся на окна прозрачности, дойдет без ослабления, то есть

$$q_{\text{соб}}^{\text{ок-м}} = q_{\text{соб}} \cdot (1 - \varepsilon_2) = q_{\text{нз}}^{\text{к}} \cdot \varepsilon_{\text{к}} \cdot (1 - \varepsilon_2) \quad (1.7)$$

Доля собственного излучения кладки, приходящаяся на полосы поглощения, ослабляется в $(1 - \varepsilon_2)$ раз и будет равна

$$q_{\text{соб}}^{\text{пол-м}} = q_{\text{нз}}^{\text{к}} \cdot \varepsilon_{\text{к}} \cdot \varepsilon_2 \cdot (1 - \varepsilon_2) \quad (1.8)$$

Суммарный тепловой поток собственного излучения кладки, дошедший до поверхности металла после взаимодействия с продуктами горения составит:

$$q_k^M = q_{отр}^M + q_{собр}^{ок-M} + q_{собр}^{пог-M} = q_{nz}^k (1 - \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_k) \quad (1.9)$$

После преобразования можно определить долю лучистого теплового потока продуктов горения, достигающую поверхности металла после взаимодействия с внутренней поверхностью адиабатной кладки без учета углового коэффициента с кладки на металл:

$$\frac{q_k^M}{q_{nz}^k} = (1 - \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_k) \quad (1.10)$$

Расчеты по этой формуле показывают, что увеличение доли лучистого теплового потока от продуктов горения, достигающей поверхности металла после взаимодействия с футеровкой, при изменении ε_k с 0,5 до 0,9, составит: 7,3 % ($\varepsilon_2 = 0,2$); 8,9 % ($\varepsilon_2 = 0,25$); 10,4 % ($\varepsilon_2 = 0,3$); 11,9 % ($\varepsilon_2 = 0,35$). Также, с увеличением ε_2 уменьшаются значения q_k^M / q_{nz}^k и количество тепла, падающего с кладки на поверхность металла.

Общий тепловой поток к металлу с учетом теплового потока не только от кладки, но и от продуктов горения, а также геометрии системы ($\varphi_{к-м}$ и $\varphi_{г-м}$), будет равен:

$$q_M^{об} = q_k^M \cdot \varphi_{к-м} + q_{nz}^M \cdot \varphi_{г-м} = q_{nz}^k \cdot \varphi_{к-м} \cdot [(1 - \varepsilon_2) \cdot (1 + \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_M)] + q_{nz}^M \cdot \varphi_{г-м} \quad (1.11)$$

где $\varphi_{к-м} = F_M / F_k$ - угловой коэффициент кладка - металл;

$\varphi_{г-м}$ - угловой коэффициент газ - металл (принимая $\varphi_{г-м} = 1$).

При равномерно распределенном режиме теплообмена $\left(\frac{q_{nz}^k}{q_{nz}^M} \right) = 1$

$$q_M^{об} = q_{nz}^k \cdot [\varphi_{к-м} \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot (1 + \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_M) + \varphi_{г-м}] \quad (1.12)$$

Отношение общего лучистого теплового потока, падающего на металл от кладки и продуктов горения топлива, к теплому потоку от продуктов горения к кладке (назовем его относительным тепловым потоком к металлу), составит

$$\frac{q_M^{об}}{q_{nz}^к} = \varphi_{к-м} \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot (1 + \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_M) + \varphi_{2-м} \quad (1.13)$$

Увеличение относительного теплового потока, падающего на поверхность нагреваемого металла, при изменении значений $\varepsilon_к$ с 0,5 до 0,9 составит: 1,7 % ($\varepsilon_2 = 0,2$); 1,95 % ($\varepsilon_2 = 0,25$); 2,21 % ($\varepsilon_2 = 0,3$); 2,39 % ($\varepsilon_2 = 0,35$).

Повышение степени черноты внутренней поверхности кладки позволяет увеличить тепловой поток, падающий на поверхность металла только от кладки, но это увеличение может составить, без учета лучистого потока тепла от газов на металл, 11,9 % (изменение $\varepsilon_к$ с 0,5 до 0,9 при $\varphi_{к-м} = \varphi_{2-м} = 1$ и $\varepsilon_2 = 0,35$). Увеличение относительного теплового потока, падающего на металл ($\varphi_{к-м} = 0,3$ и $\varphi_{2-м} = 1$), при росте $\varepsilon_к$ с 0,5 до 0,9 и $\varepsilon_2 = 0,35$, составит только 2,39 %.

При косвенном направленном радиационном режиме роль кладки в теплообмене возрастает, так как $\frac{q_{nz}^к}{q_{nz}^м} > 1$. Как следствие этого увеличивается и влияние повышения степени черноты кладки на относительный тепловой поток к металлу. Например, при $\frac{q_{nz}^к}{q_{nz}^м} = 2$ (по формуле 1.13) значение относительного теплового потока к металлу $\left(\frac{q_M^{об}}{q_{nz}^к} \right)$ с изменением $\varepsilon_к$ с 0,5 до 0,9 возрастет на 4 % ($\varepsilon_2 = 0,35$, $\varphi_{к-м} = 0,3$ и $\varphi_{2-м} = 1$) вместо 2,39 % при равномерно распределенном режиме.

Следовательно, для интенсификации теплообмена излучением в высокотемпературных теплообменных агрегатах, в том числе и в металлургических печах, можно применять покрытия поверхностей теплообмена. При этом нужно учитывать, что использование покрытий для повышения степени черноты поверхностей - переизлучателей (кладки) дает незначительное увеличение теплового потока, падающего на поверхность нагре-

ваемого тела (металла, труб с теплоносителем и т.п.).

Повышение степени черноты тепловоспринимающих поверхностей теплообменников, изготовленных из металлов, позволяет увеличить результирующий тепловой поток $q_{рез}^*$ на поверхности прямо пропорционально увеличению степени черноты и, следовательно, количество тепла, передаваемое через металлическую поверхность теплоносителю (нагреваемой среде).

2. Разработка покрытий для интенсификации теплообмена излучением

Излучательная способность зависит не только от правильного выбора наносимого материала, но и от способа его переработки в покрытие. Уже сам по себе выбранный для покрытия материал предъявляет определенные требования к технологии его нанесения; кроме того, необходимо учитывать физические свойства подложки, а также размеры и конфигурацию покрываемого объекта. При решении всех этих сложных задач необходимо рассматривать покрытие и покрываемый материал как единую композицию, т. е. учитывать специфику взаимодействия в системе покрытие - основа.

При оценке метода нанесения покрытия определяются: температурный предел использования покрытия, адгезия, и технологичность. Для нанесения покрытий на поверхности металлических конструкций, работающих при высоких температурах (табл. 1), наиболее пригодны следующие способы: эмалирование, газопламенное и плазменное напыление. Газопламенный и плазменный способы нанесения покрытий требуют для своей реализации сложного оборудования. Хорошие результаты по адгезии к поверхности металлов показывают кремнийорганические эмали, но их применение ограничивается рабочей температурой, которая не превышает 700 °С. В связи с этим, при разработке терморadiационных покрытий на стальные поверхности использовались неорганические ($t \leq 1000$ °С) и кремнийорганические ($t \leq 700$ °С) эмали.

Измерения отражательной способности покрытий проводились на экспериментальной установке (рис.2). В качестве приемника излучения использовался спектрометр ИКС-21 с оптической приставкой ИПО-12.

Таблица 1.
Способы нанесения на металлы высокотемпературных соединений

Способы нанесения на металлы высокотемпературных соединений								
	Электротрефирование	Эмалирование	Вакуумное напыление	На самотвердеющих связках			Пламенное напыление	
				Органические	Неорганические		Газопламенное	Плазменное
					Жидкие стекла	Фосфаты		
Температура применения, °С	1200	1300	1600	600	700	1400	1400	1600
Адгезия к подложке	Неудовлетворительная	Хорошая	Удовлетворительная	Хорошая	Удовлетворительная	Удовлетворительная	Хорошая	Хорошая
Недостатки	Насыщение подложки H_2 и охрупчивание металла	Трудоемкость эмалирования тугоплавких металлов	Хрупкость пленки покрытия	-	Хрупкость, пористость пленки покрытия	Отсутствие влагостойкости пленки покрытия	Пористость пленки покрытия	Изменение состава безкислородного соединения

Излучение от излучателя из карбида кремния 4, предварительно модулированное механическим прерывателем 5 с частотой 9 Гц, фокусируется на поверхность образца 3 под углом 5 - 85°. Отраженное излучение под этим же углом проектируется на входное отверстие спектрометра ИКС-21. В качестве диспергирующего элемента используется призма 10. Сканиро-

вание спектра осуществляется поворотом зеркала 11. Приемником излучения служит полупроводниковый висмутовый болометр 13, сигнал от которого после усиления в усилителе ЭПС - 241 записывается на автоматическом потенциометре КСП - 4 и одновременно регистрируется цифровым вольтметром Ф - 30.

Образцы нагревались стационарным радиационным методом с помощью отражательной оптической печи. Источником излучения служила дуговая ксеноновая лампа мощностью 10 кВт (ДКСШР - 10000), которая помещалась в первом фокусе эллиптического зеркального отражателя.

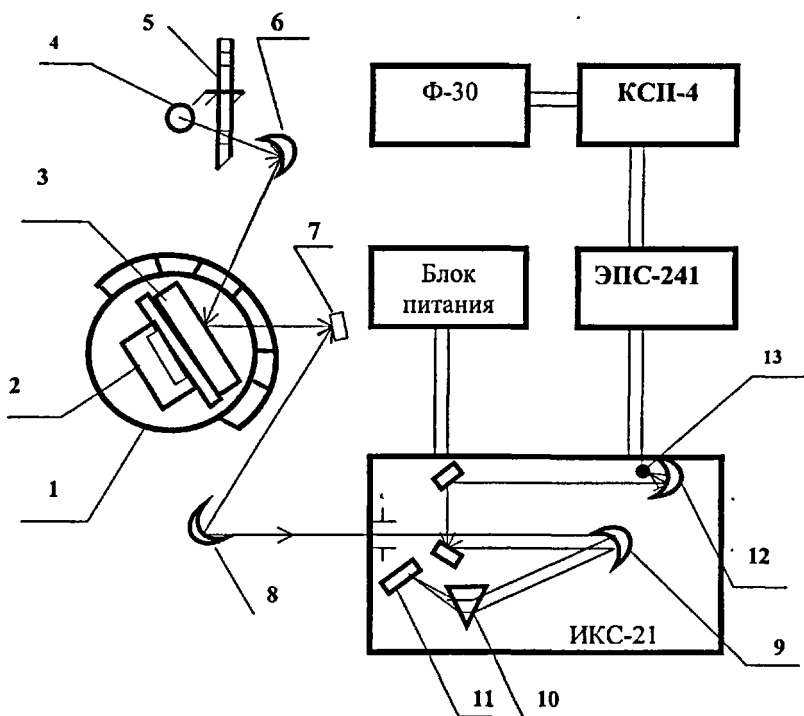


Рис.2. Схема измерительно-регистрирующей установки: 1- стол поворотный; 2- зажим; 3 - образец; 4 - излучатель карбидкремниевый; 5 - прерыватель механический; 6,8,9,12 - зеркало параболическое; 7,11- зеркало плоское; 10 - призма фокусирующая, 13 - болометр.

Отражательная способность определялась относительным методом для различных (фиксированных) длин волн

$$r_{\lambda}^{обр} = (I^{обр} / I^{этал}) \cdot r_{\lambda}^{этал}, \quad (2.1)$$

где $I^{обр}$ и $I^{этал}$ - интенсивности отраженного излучения от образца и эталона; $r_{\lambda}^{этал}$ - отражательная способность эталона. В качестве эталона использовались материалы, обладающие отражательной способностью, близкой к диффузной, для ближней ПК- области — это MgO , а для средней ИК-области — $NaCl$.

Спектральная степень черноты рассчитывалась с учетом закона Кирхгофа, то есть:

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - r_{\lambda}^{обр}. \quad (2.2)$$

При разработке покрытий с высокой степенью черноты на поверхность сталей за основу выбирались подходящие по эксплуатационным характеристикам и методам нанесения готовые покрытия или связующие, в которые добавлялись компоненты с высокой степенью черноты. В соответствии с этой методикой, разрабатывались покрытия двух типов: на основе кремнийорганической эмали КО-818 и неорганической высокотемпературной (тугоплавкой) эмали ЭВТ-24.

По результатам исследований радиационных характеристик на экспериментальной установке, в качестве компонентов покрытий были выбраны Co_2O_3 , SiC и B_4Si , имеющие высокие значения степени черноты в видимой и ближней области ИК-спектра. Подложкой для покрытий служили образцы из углеродистых сталей и сталей марок **40X13**, **X23H18**, **12X18H10T**, **12X18H9**.

Порядок нанесения покрытия на основе кремнийорганической эмали на образцы включал в себя очистку и обезжиривание поверхности, нанесение покрытия и выдержку 2 часа при $t = 200^{\circ}C$.

Нанесение покрытия на основе высокотемпературной тугоплавкой эмали ЭВТ-24 на стальные образцы проводилось по шликерно-обжиговой технологии. В данной работе процесс приготовления шликера был упро-

щен - применена сухая смесь для изготовления высокотемпературной эмали ЭВТ-24 на образцах из вышеупомянутых сталей. В порошок эмали добавляли различные компоненты с целью изменения радиационных и адгезионных свойств. Сухое покрытие разводили водой и полученную гидро-суспензию применяли для нанесения покрытия на предварительно подготовленную (зачистка и обезжиривание) поверхность стальных образцов. После сушки образцы с покрытиями обжигали в электрической печи. Температура и время обжига: $T = 1173 \text{ К}$ и $\tau = 20 - 30$ мин.

На экспериментальной установке измерены значения спектральной степени черноты покрытий в диапазоне длин волн $\lambda = 0,75 - 9,0$ мкм при комнатной температуре. По результатам измерений выбраны составы покрытий, имеющие наибольшие значения ϵ_λ в ближней ИК-области спектра. Это связано с тем, что при рабочих температурах металлургических печей основная часть энергии излучения твердых тел попадает на диапазон длин волн приблизительно от 1,0 мкм до 5,0 мкм. Затем у выбранных покрытий измерялась степень черноты в процессе нагрева при отдельных (фиксированных) длинах волн. Цель этих исследований - убедиться, что при рабочих температурах ϵ_λ покрытий не снижается. Анализ температурных зависимостей $\epsilon_\lambda(t)$ покрытий всех видов при некоторых (фиксированных) длинах волн показал, что увеличение температуры не оказывает заметного влияния на значения степени черноты разработанных покрытий.

Основные критерии оценки качества покрытий - термостойкость и термическая усталость, выявляемые в условиях высоких температур. Испытания на термостойкость и термическую усталость проводились по специально разработанной методике создателей используемой в работе эмали ЭВТ. Для проведения исследований покрытий на термостойкость и термическую усталость использовались те же образцы, у которых измерялись радиационные характеристики: 1) 50 % ЭВТ-24+50 % B_4Si ; 2) 50 % ЭВТ-24+50 % Co_2O_3 .

При испытаниях на термостойкость образцы покрытий на подложках из сталей 40X13, 20X23H18, 12X18H10T и 12X18H9 нагревали в электрической печи сопротивления до рабочей температуры покрытия и охлаждали до 293 К на воздухе в течение 20 минут.

Испытания на термическую усталость включали нагрев образцов до рабочей температуры, выдержку при этой температуре 10 минут и последующее охлаждение на воздухе - 20 минут. Эти операции повторялись многократно.

В результате проведенных исследований выявлено, что перепад температур, не вызывающий разрушения поверхности покрытий на подложке из всех вышеназванных сталей, составляет 1250 К (~ 980 °С). При определении термической усталости все образцы выдержали 20 циклов нагрева до рабочей температуры с охлаждением на воздухе. Дефектов на поверхности всех образцов при визуальном осмотре не обнаружено.

Измерения коэффициента теплопроводности покрытий проводились на промышленном измерителе теплопроводности ИТ-λ-400. Измерения проводились в диапазоне температур 25 - 400 °С с шагом $\Delta t = 25$ °С. Покрытие на основе **B₄Si (50 % ЭВТ + 50 % B₄Si)** имеет значения коэффициента теплопроводности от 0,8 Вт/(мК) до 1,35 Вт/(м-К) при температурах от 25 °С до 400 °С. Коэффициент теплопроводности покрытия на основе оксида кобальта (**50 % ЭВТ + 50 % Co₂O₃**) изменяется в среднем от 0,14 Вт/(мК) до 0,30 Вт/(м-К) при нагреве 25 -400 °С. Более низкие значения коэффициента теплопроводности у покрытий на основе **Co₂O₃** объясняются образованием большого количества пор внутри образца покрытия. Это явление происходит из-за выделения кислорода при нагреве выше 800 °С и образованием CoO. Результаты исследований теплопроводности разработанных покрытий говорят о том, что использование их на поверхности металлов может увеличить их тепловое сопротивление. Этот факт необходимо учитывать в расчетах теплообмена.

На основании проведенных исследований разработаны покрытия с высокой степенью черноты в ближней области ИК-диапазона длин волн, которые можно использовать на стальных поверхностях теплообмена при рабочих температурах тепловых агрегатов с целью интенсификации теплообмена излучением. Составы покрытий: (в % по массе сухой смеси): 1) 70 % KO + 30 % B_4Si (для применения на поверхности углеродистых и легированных сталей при температурах не выше 600 °С), спектральная степень черноты (ϵ_λ) на участке длин волн 0,75 - 9,0 мкм принимает значения от 0,94 - 0,78; 2) 50 % ЭВТ + 50 % B_4Si (для сплавов 40X13 и ХН45Ю), ϵ_λ изменяется от 0,9 до 0,7 в том же спектральном диапазоне; 3) 50 % ЭВТ + 50 % Co_2O_3 (для сплавов 20X23H18, 12X18H10T, 12X18H9), при изменении $\lambda = 0,75 - 3,5$ мкм - $\epsilon_\lambda = 0,92 - 0,7$, при $\lambda = 3,5 - 9,0$ мкм $\epsilon_\lambda = 0,7 - 0,89$. Увеличение температуры от комнатной до $t = 900$ °С (для покрытия на основе кремнийорганической эмали - до $t = 700$ °С) не оказывает заметного влияния на значения степени черноты разработанных покрытий.

3. Исследование теплообмена при использовании покрытий на экспериментальных установках

Для исследования влияния покрытий с высокой степенью черноты на теплообмен в печах был разработан и смонтирован огневой стенд, представляющий собой модель радиационной камеры цилиндрической трубчатой печи.

Трубчатые печи предназначены для высокотемпературного нагрева нефти и нефтепродуктов в процессе их переработки. При необходимости в этих печах могут нагреваться углеводородные газы, вода, инертный газ и другие среды. Цилиндрическая печь состоит из камеры радиации с расположением труб змеевика вертикально по окружности, вдоль внутренней стены. Топливо сжигается в свободном вертикальном факеле, формируемом горелками, расположенными в нижней части печи. Схема лучистого теплообмена в радиационной камере трубчатой печи подобна теплообме-

ну в радиационных металлических рекуператорах и топках котельных агрегатов.

В качестве нагреваемой технологической жидкости использовалась вода. Размеры трубок для течения нагреваемой воды взяты с учетом равенства чисел Re печи и стенда. Моделирование теплового режима радиационной камеры выполняли, исходя из равенства удельной тепловой нагрузки на печи и на модели. Схема огневого стенда приведена на рис. 3. Воздух на горелку ГНП-1 подается с помощью вентилятора. Расход газа и воздуха контролируется с помощью двух мембранных дифференциальных манометров типа ДМ в комплекте с диафрагмами. Температура внутренней стенки по высоте модели и температура отходящих газов на выходе из радиационной камеры измеряется с помощью термопар. Внутри огневого стенда по окружности стен установлен трубчатый змеевик из углеродистой стали, состоящий из трех секций одинакового размера, вода в которые поступает сверху через коллектор. Выходит вода из каждой секции змеевика отдельно, на выходе установлены вентиль и ротаметр для регулирования и измерения расхода воды. Температура воды на входе и выходе измеряется термометрами.

Эффективность применения покрытий на основе эмали КО в радиационной камере трубчатой печи определяли следующим образом. Две секции змеевика были демонтированы, зачищены наждачной бумагой, обезжирены, окрашены покрытиями с помощью кисти и установлены обратно. Третья секция змеевика оставлена неокрашенной. При стационарном тепловом режиме в каждой секции змеевика была измерена температура воды на входе и выходе, а также ее расход. Затем было подсчитано количество теплоты, получаемой водой в каждой секции змеевика.

Змеевики, окрашенные покрытием на основе кремнийорганической эмали (70 % КО + 30 % B_4Si), получили $Q_1 = 12,4$ кВт, $Q_2 = 12,3$ кВт, неокрашенный - $Q_3 = 10,6$ кВт. Следовательно, окрашенные секции змеевика

поглощают тепла, соответственно, на 17 и 16 % больше, чем неокрашенная секция.

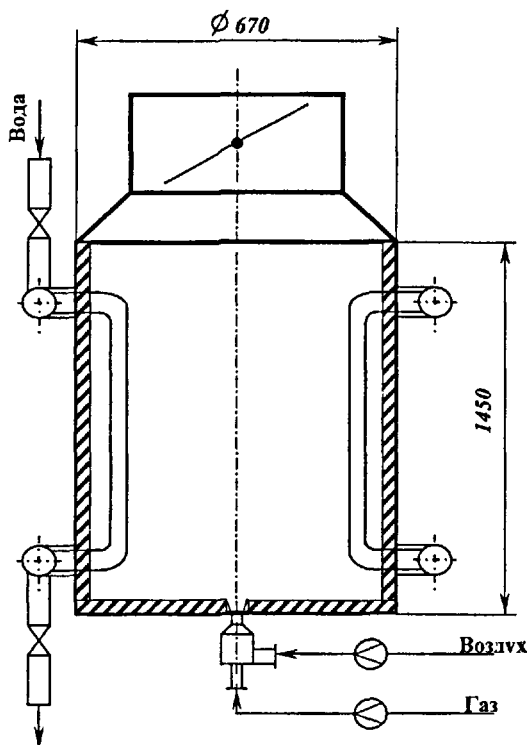


Рис. 3. Схема огневого стенда.

В результате проведения экспериментов на огневом стенде трубчатой печи установлено, что применение покрытий с высокой степенью черноты интенсифицирует лучистый теплообмен в рабочем пространстве огневого стенда. По расчетам, за счет интенсификации теплообмена с помощью покрытий, на стенде можно уменьшить расход природного газа на 10 - 15 % или увеличить производительность печи.

Эффективность разработанного покрытия с высокой степенью черноты на основе кремнийорганической эмали проверялась на экспериментальной лабораторной установке. Стальная трубка устанавливалась в ци-

линдрическую нагреваемую камеру электрической печи, расположенную по оси рабочего пространства. Требуемая температура в рабочем пространстве печи поддерживалась с помощью автоматического регулятора температуры. По трубке, с помощью вентилятора, продувался воздух, температура которого измерялась термометрами на входе и на выходе. Расход воздуха в трубке регулировался заслонкой, установленной на воздушной линии после вентилятора, и измерялся ротаметрами.

Порядок проведения экспериментов на установке следующий. При заданной стационарной температуре рабочего пространства печи и расходе воздуха измерялись температуры на входе и выходе из трубки без покрытия. Затем в печь устанавливалась идентичная по размерам трубка с нанесенным на ее поверхность покрытием (70 % КО + 30 % В₄Si) и проводились аналогичные измерения. Эксперименты проводились при двух установившихся температурах печи: 300 °С и 600 °С, так как покрытие на основе кремнийорганической эмали имеет рабочую температуру не выше 700 °С.

При нанесении на тепловоспринимающую поверхность трубки покрытия увеличивается температура подогрева воздуха, проходящего через трубку. При температуре печи 300 °С это увеличение составляет $\Delta t_1 = 21,8$ К (среднее для пяти различных расходов воздуха), а при $t_{печи} = 600$ °С - $\Delta t_2 = 25,6$ К. Следовательно, применение покрытия с высокой степенью черноты позволяет увеличить температуру подогрева воздуха в лабораторной установке минимум на 10 - 13 %. Если предположить, что воздух в рекуператоре подогревается до 400 °С, то применение покрытия позволит увеличить температуру его подогрева на 40 — 50 °С.

4. Определение эффективности использования покрытий с высокой степенью черноты на тепловоспринимающей поверхности промышленных теплообменников

Создание более эффективного теплообменного оборудования имеет своей целью уменьшение габаритов теплообменников, которые должны

обеспечивать передачу требуемого количества тепла, либо увеличение тепловой производительности существующих теплообменников. Существует много способов интенсификации теплообмена излучением в радиационных рекуператорах, но все они предполагают значительное усложнение их конструкции (установка дополнительных излучателей, организация двухходового движения продуктов горения и воздуха). Более простым способом интенсификации лучистого теплообмена в радиационных рекуператорах (как в щелевых так и трубчатых) является нанесение на тепловоспринимающие поверхности покрытий с высокой степенью черноты ($\varepsilon > 0,85$). То же покрытие, при необходимости, можно нанести и на поверхность излучателей. Использование покрытия с высокой степенью черноты, кроме интенсификации теплообмена, увеличит срок службы стальных конструкций за счет уменьшения окисления их поверхности при непосредственном соприкосновении с продуктами сгорания.

Определение количественных показателей по эффективности использования покрытий с высокой степенью черноты на трубчатых радиационных рекуператорах проводилось расчетным путем применительно к подогревательной печи сортопрокатного цеха металлургического завода «Серп и Молот». Температура продуктов сгорания на выходе из печи $t_{гз} = 900$ °С. При увеличении степени черноты труб рекуператора от 0,5 до 0,9 коэффициент теплоотдачи излучением от продуктов горения топлива ($\alpha_{луч}$) повышается на 57 %, коэффициент теплопередачи рекуператора возрастает на 30 %. За счет интенсификации теплообмена в рекуператоре можно уменьшить поверхность теплообмена. Сравнение тепловых балансов подогревательной печи при увеличении температуры нагрева воздуха в рекуператоре на 50 К (с 400 °С до 450 °С) показывает, что происходит снижение расхода топлива (природного газа) на 9 % (117 м³/ч). Если время работы печи составит 5000 часов в год, то экономия природного газа будет равна 585 тыс. м³/год.

Определение эффективности применения покрытия на струйных рекуператорах выполнялось по типовой методике расчета струйных рекуператоров Уральского политехнического университета. Расчеты выполнялись для рекуператора секционной печи: температура продуктов горения на выходе из рабочего пространства — 1450 °С; температура подогрева воздуха в рекуператоре, при степени черноты тепловоспринимающей стенки $\epsilon = 0,6$ равнялась 538 °С; сечение канала для движения продуктов горения топлива 0,4 x 0,8 м. Увеличение степени черноты тепловоспринимающей поверхности стенки до $\epsilon = 0,8$, при неизменности остальных параметров работы рекуператора, приводит к улучшению теплообмена в рекуператоре: коэффициент теплоотдачи излучением от продуктов сгорания к стенке рекуператора увеличивается на 24,5 %; тепловой поток от продуктов сгорания к нагреваемому воздуху увеличивается на 10,8%; температура подогрева воздуха в рекуператоре увеличивается на 46 К или на 8,6 %

В процессе выполнения хозяйственной научно — исследовательской работы, с целью интенсификации лучистого теплообмена, на поверхность солнечного парогенератора СПГ-28 солнечной электростанции (СЭС-5) было нанесено покрытие на основе кремнийорганической эмали, разработанное при выполнении данной диссертационной работы. Применение покрытия позволило увеличить степень черноты тепловоспринимающей поверхности парогенератора и получить экономический эффект, который по предварительным расчетам представителей СЭС - 5, составляет 11,5 тысяч рублей в год (по ценам 1988 г.)

Выводы по результатам работы:

1. Впервые аналитически, за счет разделения теплового потока от кладки собственным излучением на составляющие по длинам волн полос поглощения и окон прозрачности продуктов горения, удалось количественно оценить влияние степени черноты кладки на тепловой поток к металлу. При теплообмене между продуктами горения топлива (с учетом селективности их радиационных свойств) и поверхностью нагреваемого тела

с участием кладки, ограничивающей рабочее пространство теплового агрегата, повышение степени черноты внутренней поверхности кладки (ϵ_k) с 0,5 до 0,9 увеличивает долю лучистого теплового потока только от кладки, достигающую поверхности металла, с 7,3 % до 11,9 % (при угловых коэффициентах: кладка - нагреваемый материал $\varphi_{k-m} = 1$ и продукты горения - нагреваемый материал $\varphi_{g-m} = 1$). Увеличение относительного теплового потока к металлу при равномерно распределенном режиме теплообмена с учетом теплового потока и от газов ($\epsilon_g = 0,35$, $\varphi_{k-m} = 0,3$ и $\varphi_{g-m} = 1$) в зависимости от роста ϵ_k ($\epsilon_k = 0,5 - 0,9$), составит, соответственно, от 1,7 % до 2,39 %, т.е. гораздо меньше.

2. Предложен и теоретически обоснован метод интенсификации теплообмена излучением за счет нанесения покрытий с высокой степенью черноты на теплопоглощающие поверхности промышленных теплообменников (радиационные металлические рекуператоры, трубчатые печи, парогенераторы котельных агрегатов). При этом нужно учитывать, что использование покрытий для повышения степени черноты поверхностей - переизлучателей (кладки) дает незначительное увеличение теплового потока, падающего на поверхность нагреваемого тела (металла, труб с теплоносителем и т.п.).

3. На основе известных кремнийорганических (КО - 818) и неорганической (ЭВТ - 24) высокотемпературной защитной эмали разработаны новые покрытия металлов, отличающиеся высокой степенью черноты в ближней инфракрасной области спектра излучения. Эти покрытия предназначены специально для повышения степени черноты металлических поверхностей теплообмена. Составы покрытий следующие (в % по массе сухой смеси): 1) 70 % КО + 30 % B_4Si (для применения на поверхности углеродистых и легированных сталей при температурах не выше 600 °С), спектральная степень черноты (ϵ_λ) на участке длин волн 0,75 - 9,0 мкм принимает значения от 0,94 - 0,78; 2) 50 % ЭВТ + 50 % B_4Si (для сплавов 40X13 и ХН45Ю), ϵ_λ изменяется от 0,9 до 0,7 в том же спектральном диапазоне;

3) 50 % ЭВТ + 50 % Co_2O_3 (для сплавов 20Х23Н18, 12Х18Н10Т, 12Х18Н9), при изменении $\lambda = 0,75 - 3,5$ мкм - $\varepsilon_\lambda = 0,92 - 0,7$, при $\lambda = 3,5 - 9,0$ мкм $\varepsilon_\lambda = 0,7 - 0,89$. Увеличение температуры от комнатной до $t = 900$ °С (для покрытия на основе кремнийорганической эмали - до $t = 700$ °С) не оказывает заметного влияния на значения степени черноты разработанных покрытий. Разработана технология нанесения перечисленных покрытий на поверхность металлоконструкций.

4. Для определения эффективности применения разработанных покрытий были проведены исследования на экспериментальной лабораторной установке, моделирующей теплообмен излучением в трубчатом радиационном рекуператоре, и на огневом стенде, представляющем собой модель трубчатой печи. На моделях испытывались покрытия на основе кремнийорганической эмали с добавлением 30 % B_4Si . Результаты исследований показали, что применение покрытия с высокой степенью черноты позволяет увеличить температуру подогрева воздуха в лабораторной установке на 10 — 13 %. На огневом стенде за счет нанесения покрытий поглощение тепла теплоносителем увеличилось на 16,5 %.

5. Определение целесообразности применения покрытий на тепловоспринимающей поверхности рекуператоров было проведено при помощи вычислительных экспериментов с применением типовых методик расчета рекуператоров. Получены следующие результаты: 1) при увеличении степени черноты тепловоспринимающей стенки струйного рекуператора с 0,6 до 0,8 коэффициент теплоотдачи излучением от продуктов сгорания к стенке рекуператора увеличивается на 24,5 %, температура подогрева воздуха в рекуператоре увеличивается на 46 К; 2) аналогичное изменение ε при расчетах трубчатого радиационного рекуператора ведет к повышению температуры нагреваемого воздуха на 31 К. Сравнение тепловых балансов подогревательной печи сортопрокатного цеха завода «Серп и Молот» при увеличении температуры нагрева воздуха в рекуператоре на

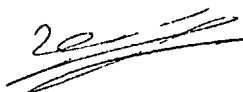
50 К (с 400 °С до 450 °С) показывает, что происходит снижение расхода природного газа на 9 % (117 м³/ч).

Основные положения диссертации изложены -
в следующих публикациях:

1. Ионочкин И.И., Лебедева И.М., Чернов В.В. Разработка покрытий элементов рабочего пространства нагревательных печей, обеспечивающих направленное изменение радиационных свойств // Теория и практика тепловой работы металлургических печей: Тез. докл. - Днепропетровск: ДМетИ. 1988. С. 147.
2. А.с. № 1467347. (СССР). Трубчатая вертикальная печь / Смирнов В.Г., Зеньковский А.Г., Чернов В.В. и др. // Опул. в БИ 1989. № 11.
3. Чернов В.В., Смирнов В.Г., Плужников А.И., Зеньковский А.Г. Интенсификация теплообмена в трубчатых печах // Газовая промышленность. 1990. № 10. С. 24-27.
4. Шепель Б.А., Фомин К.А., Чернов В.В. Степень черноты материалов для производства ожелезненной извести // Молодежь и научно - технический прогресс: Тез. докл. -Липецк. 1990. С. 23-25.
5. Чернов В.В., Ионочкин И.И., Запечников В.Н., Зеньковский А.Г. Исследование спектральных радиационных характеристик огнеупорных материалов - компонентов терморadiационных покрытий // Огнеупоры. 1991. № 7. С. 28 - 30.
6. Зеньковский А.Г., Ионочкин И.И., Чернов В.В. Разработка терморadiационных покрытий с улучшенными экологическими характеристиками // Изв. Вузов. Черная металлургия. 1997. № 2. С. 73 - 75.
7. Чернов В.В., Зеньковский А.Г. Разработка терморadiационных керамических покрытий и исследование их свойств // Огнеупоры и техническая керамика. 1998. № 6. С. 20 - 21.
8. Беляков В.А., Чернов В.В., Аксенов А.В., Зеньковский А.Г. Интенсификация теплообмена излучением и улучшение экологических показателей работы промышленных печей с помощью покрытий //

- Труды 2-ой национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Изд. МЭИ. 1998. С. 51-53.
9. Чернов В.В., Зеньковский А.Г. Разработка покрытий с высокой излучательной способностью и исследование их теплофизических параметров // Моделирование теплофизических процессов и вопросы энергосбережения в теплотехнологии: Межвуз. сб. научн. тр. / Ивановский госуд. энерг. ун-т. - Иваново. 2000. С. 60 - 65.
 10. Чернов В.В., Аксенов А.В. Интенсификация теплообмена в рекуператорах с помощью нанесения керамических покрытий // Огнеупоры и техническая керамика. 2001. № 9. С. 29 - 31.
 11. Зеньковский А.Г., Чернов В.В. Высокотемпературные покрытия элементов печей для интенсификации теплообмена // Сталь. 2001. № 11. С. 92-94.
 12. Аксенов А.В., Чернов В.В. Экономия топлива в нагревательных печах при использовании покрытий элементов рекуператоров // Проблемы энергосбережения. Теплообмен в электротермических и факельных печах и топках: Материалы международной научно - техн. конференции. Книга 1. Энергосбережение в электротехнических и факельных установках. - Тверь: Тверской госуд. технич. ун - т. 2001. С. 41-43.
 13. Чернов В.В. Использование высокотемпературных покрытий сталей для интенсификации теплообмена в печах // Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов давлением: Труды МГВМИ и Союза Кузнецов. Выпуск № 3 - М.: МГВМИ. Союз Кузнецов. 2003. С. 142 - 143.
 14. Селезнев Н.П., Чернов В.В. О влиянии степени черноты поверхностей - переизлучателей на лучистый теплообмен // Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов

давлением: Труды МГВМИ и Союза Кузнецов. Выпуск № 4 - М.:
МГВМИ. Союз Кузнецов. 2004. С. 172- 176.

A handwritten signature or scribble consisting of several overlapping, horizontal, wavy lines.

Сдано в печать 05.05.2004 Формат 60 х 90/16 Объем 1,75 п.л.

Тираж 100 экз. Зак. 9

Отпечатано в ООО «Эдэль-М»

105005 г.Москва, ул. Бауманская, 43/1

№ 14258