

На правах рукописи

Коновалов Игорь Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ
РАБОТЫ ШАХТНЫХ МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена на кафедре «Металлургия тяжелых цветных металлов»
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель: член-корр. РАН, заслуженный деятель
науки и техники РФ, профессор
Набойченко Станислав Степанович

Официальные оппоненты: Скопов Геннадий Вениаминович,
доктор технических наук,
заместитель технического директора
ОАО «УГМК – Холдинг»

Смирнов Борис Николаевич,
кандидат технических наук,
технический директор ОАО «Уралгипромез»

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский научно-
исследовательский институт металлургической
теплотехники»

Защита диссертации состоится «19» октября 2012 года в 15:00 на заседании
диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. I. Тел. (343) 375-41-04.
Факс: (343) 374-38-84

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Автореферат разослан «18» сентября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
профессор, доктор техн. наук

Карелов С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение эффективности пирометаллургического производства меди и объемов выпускаемой продукции наряду с внедрением новых плавильных агрегатов возможно и за счет оптимизации работы существующей шахтной плавки.

Несмотря на многообразие способов совершенствования технологии шахтной плавки и высокий уровень их теоретической проработки, показатели работы печей остаются низкими, в том числе и из-за отсутствия практических рекомендаций по оптимизации тепловых и газодинамических режимов плавки, конструкций печей.

В этой связи, рассмотренные в представленной работе вопросы выбора рациональных параметров реализации шахтной плавки и разработка эффективного способа интенсификации тепломассообменных процессов в условиях реального производства, способствующие повышению технико-экономических показателей шахтной печи, являются актуальными.

Целью исследований является совершенствование тепловой и газодинамической работы шахтных печей за счет оптимизации их конструктивных и режимных параметров, выбора и реализации эффективных способов интенсификации процесса на основании данных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований.

Задачами исследований являются:

- экспериментальное исследование неравномерности распределения температурных полей в шахтных медеплавильных печах;
- совершенствование конструктивных параметров работы шахтных печей;
- аналитическое исследование процесса теплогенерации с использованием твердого и газообразного видов топлива;
- создание рациональных условий развития тепловых процессов в плотном слое за счет улучшения подготовки сырья методом брикетирования, выбор вяжущих компонентов, обеспечивающих максимальную упрочняющую способность;
- использование энергии акустического поля для интенсификации тепло- и массообменных процессов в плотном слое, установление

оптимальных параметров работы излучателей для его формирования непосредственно в рабочем пространстве шахтных печей;

- оценка эффективности предлагаемых мероприятий по совершенствованию показателей тепловой и газодинамической работы шахтных медеплавильных печей.

Научная новизна.

- установлены закономерности формирования температурных и концентрационных полей газа в шахтных печах;

- уточнены особенности процесса теплогенерации в шахтных медеплавильных печах при сжигании твердого и газообразного видов топлива непосредственно в плотном слое шихты;

- обоснована эффективность воздействия акустического поля на слой кусковых материалов, установлены условия его озвучивания с максимальным увеличением амплитуды колебаний частиц, сформулированы требования к конструкции акустических излучателей, определены виды и степень изменения газодинамического сопротивления слоя, коэффициента теплоотдачи между газом и материалами в различных условиях.

Практическая значимость. Предложена методика формирования с последующей корректировки высоты коксовой насадки. Разработаны мероприятия по совершенствованию конструктивных элементов системы воздухоподачи, выбор ее оптимальных параметров.

Разработан альтернативный вид связующего взамен технических лигносульфонатов при брикетировании тонкодисперсных материалов.

Оценена эффективность использования энергии внешних периодических колебаний для интенсификации тепломассообменных процессов непосредственно в рабочем пространстве шахтных медеплавильных печей, с снижением неравномерности газораспределения по сечению агрегата, удельного расхода кокса и величины химического недожога топлива, общего уровня перепада давлений (уменьшению величины гидравлического сопротивления слоя), увеличением производительности (за счет более глубокого разделения продуктов плавки), а также разрушением настывей и сокращением эксплуатационных затрат.

Реализация работы.

- определены рациональные конструктивные параметры системы воздухоподачи в шахтных печах. Внедрение их в условиях ООО «Медногорский медно-серный комбинат» (ММСК) показали возможность существенного снижения неравномерности распределения газов в объеме рабочего пространства, увеличения производительности шахтной печи на 10-12%, уменьшения удельного расхода кокса на 10-11%, уменьшения выноса пыли до 40%;

- обоснованы экспериментально изменения высоты нижней коксовой насадки для обеспечения наилучших условий тепловыделений в слое при различных размерах кусков кокса в условиях фильтрации газовой среды;

- рекомендована добавка жидкой связки «Термопласт ТЗ» и «ЗСВ» в количестве 6-8%, позволяющая улучшить металлургические свойства используемых окискованных компонентов;

- показана возможность, в условиях филиала «ППМ» ОАО «Уралэлектромедь», за счет использования энергии акустического поля, улучшить газораспределение в рабочем пространстве шахтных печей, что привело к увеличению производительности плавильного агрегата на 2-3%, снижению расхода кокса на 5-6%, пылевывоса из печи на 20-30% и уменьшению эксплуатационных затрат по разрушению настывлей в рабочем пространстве (без остановки агрегата).

Методы исследований. В основу решения поставленных задач положены теории и методы: системного анализа, математического планирования эксперимента (композиционные и ротатабельные планы), теории подобия, оптимизации и управления, идентификации, принятия технических решений, теплообмена и аэродинамики.

Для анализа химического состава отходящих газов использовали газоанализатор типа ГХП-3, температуру материалов – оптическим пирометром «Термоскоп-100НТ». Коэффициент теплоотдачи в слое определяли термоанемометром специальной конструкции, в основе метода использовались закономерности охлаждения за фиксированное время предварительно перегретого спая термопары импульсом тока. Исследования изменения сопротивления слоя сводились к определению зависимости потерь

напора от скорости газа. Использовали измеритель шума и вибрации ВШВ-003, цифровой манометр типа ДМЦ-001 и др.

На защиту выносятся:

- результаты экспериментальных исследований температурных полей на действующих шахтных печах медной плавки;
- рекомендации по снижению неравномерности газораспределения по сечению печей, применение конструкционных способов интенсификации процесса и результаты испытаний;
- результаты исследований по выбору и улучшению условий производства брикетов;
- условия повышения протяженности окислительной зоны и теплогенерации в пределах области горения твердого топлива, а также эффективность применения дополнительного источника тепла при слоевом способе сжигания газообразной горючей смеси;
- результаты лабораторных и промышленных испытаний по интенсификации тепломассообменных процессов в плотном слое кусковых материалов с использованием энергии акустического поля.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: III-ей Молодёжной научно-практической конференции «Инновационный потенциал молодежи – вклад в развитие ОАО «Уралэлектромедь» – Верхняя Пышма, 2010; международных конференциях: «Проблемы экологии и рационального природопользования стран АТЭС и пути их решения» – Москва: МИСиС, 2010; «Актуальные вопросы металлургии цветных металлов» - Красноярск: СФУ, 2011; «Система управления экологической безопасностью» – Екатеринбург: УрФУ, 2011; научно-технической конференции, посвященной 310-летию уральской металлургии и созданию технико-внедренческого центра металлургии и тяжелого машиностроения «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» – Екатеринбург: УРО РАН, 2011; «Теплотехника и энергетика в металлургии» – Днепропетровск: НМетАУ, 2011; «Повышение качества образования и научных исследований» в рамках X Сатпаевских чтений: г. Экибастуз: Экибастузский инженерно-технический институт им.

академика К.И. Сатпаева, 2011; «Перспективы и пути создания эффективного производства УГМК» - Екатеринбург, 2011, 2012.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 16 работах, включая 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 1 заявку на изобретение с положительным решением о выдаче патента.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 51 рисунок, 35 таблиц и 6 приложений; список использованной литературы включает 145 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ основных задач, тенденции развития мирового производства меди и его современное состояние; рассмотрены основные технологии переработки медьсодержащего сырья: плавка во взвешенном состоянии, ПВ, «Норанда», «Аусмелт» и их разновидности, особенности и недостатки технологий переработки медьсодержащего сырья указанными способами.

В медеплавильном производстве находится существенный парк шахтных печей, обладающих преимуществами в организации тепломассообменных процессов, и не предъявляющих жестких требований к качеству перерабатываемых материалов.

Основываясь на научных разработках отечественных ученых В.И.Смирнова, Б.С.Фиалкова, Б.И.Китаева, Ю.Г.Ярошенко, М.А.Гольдштика, Б.В.Соколовского, Р.Л.Зенкова и др. были разработаны теоретические и экспериментальные основы оптимизации условий движения газовых потоков в агрегатах с плотным слоем. Несмотря на многообразие работ и глубину проработки вопросов остаются нерешенными задачи, связанные с организацией рациональной газодинамической работы шахтной печи вследствие отсутствия методик их применения в условиях действующего производства.

Для обеспечения высоких технико-экономических показателей шахтной плавки с учетом современных представлений о процессах слоевого горения топлива, особенностей движения материалов и газов в рабочем пространстве шахтной печи и существующих способах интенсификации тепломассообмена в плотном слое были сформулированы основные задачи диссертационной работы. Отмечено, что перспективным направлением интенсификации

теплообменных процессов в слое при его термической обработке является способ воздействия на процесс энергии акустического поля с достижением физического эффекта за счет образования пульсаций газа в высокоскоростной газовой струе с помощью газоструйных излучателей.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований работы шахтных медеплавильных печей.

Специфика организации работы шахтных печей в значительной степени определяется их конструкцией.

Для анализа теплового состояния шахтной печи были проведены исследования равномерности распределения температуры слоя на уровне засыпи. Наиболее характерная зависимость изменения температурного поля из многочисленных измерений в виде изотерм для условий «ППМ» ОАО «Уралэлектромедь» представлены на рис.1.

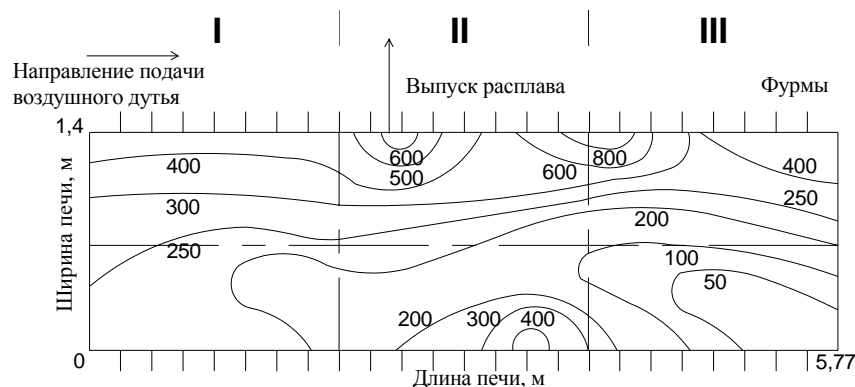


Рисунок 1. Изменение средней температуры слоя шихты в шахтной печи на уровне засыпи (цифры у кривых, °C)

Приведенные данные свидетельствуют о том, что поле температур на уровне засыпи характеризуется значительной неравномерностью, которая обусловлена существенными различиями в соотношениях теплоемкостей потоков газа и шихты. Нормальная работа шахтных печей обеспечивается при условии превышения теплоемкости потока газа (W_{Γ}) по отношению к теплоемкости потока шихты ($W_{\text{ш}}$):

$$W_{\Gamma} = V_{\Gamma} c_{\Gamma} > W_{\text{ш}} = G_{\text{ш}} c_{\text{ш}} \quad (1)$$

где V_{Γ} и $G_{\text{ш}}$ – соответственно, характеризуют расходы газа и шихты, м³/с, кг/с; c_{Γ} – теплоемкость газа, Дж/м³·К; а $c_{\text{ш}}$ – кажущуюся теплоемкость шихты с учетом тепловых эффектов физико-химических процессов, Дж/кг·К.

Сопоставление средних температур трех условно выделенных зон позволило установить, что наилучшим условиям плавки удовлетворяет

первая зона с усредненными условиями подачи воздуха (см. рис 1). Для этой области характерно равенство теплоемкостей потоков газа и шихты в рассматриваемой области и печи в целом. Для второй зоны (область высокой активности газов), высокий уровень температурного поля объясняется повышенным значением соотношения теплоемкостей потоков $W_{\text{г}}/W_{\text{ш}}$, которое превышает среднее в 1,34 раза, что обусловлено присутствием разрыхляющей области сбора расплава. Превышение компенсируется снижением величины $W_{\text{г}}/W_{\text{ш}}$ по отношению к средней до 0,66 в третьей зоне (слабопродуваемой).

Установлено, что в зонах печи, испытывающих недостаток окислителя вследствие высокого сопротивления системы воздухообеспечения и одностороннего подвода, наблюдаются повышенные концентрация монооксида углерода, неравномерность газораспределения по содержанию кислорода и диоксида углерода, вследствие низкой интенсивности горения топлива, сопровождающейся значительным эндотермическим эффектом.

В третьей главе приведены конструктивные и технологические способы рационализации тепловой и газодинамической работы печей. Обоснован выбор предложенных способов, проанализированы величины возникающих при этом эффектов.

Было показано, что наиболее рациональным способом обеспечения равномерности распределения газов по горизонтальному сечению вертикальной шахты медеплавильных печей является использование фурм диаметром 100-130 мм установленных под углом 17-25°. Установлено, что при этом площадь поперечного сечения распределительного коллектора должна превышать суммарную площадь фурм как минимум в три раза, а ввод в него дутья осуществлять с двух сторон (по длинной стороне печи). Наиболее полно такое решение было реализовано на плавильных агрегатах предприятия ООО «ММСК». Сравнительные исследования показали, что после реконструкции (диаметр фурм 120 мм угол наклона 12°, двухсторонняя подача дутья, увеличенная площадь сечения газохода до 1,425 м²) существенно уменьшилась неравномерность распределения газов в объеме печи. Средняя температура отходящих газов снизилась с 157 до 31°C при уменьшении степени ее неравномерности по сечению агрегата более чем в два раза. Количество выпускаемого штейна увеличилось на 23,11%, его выход на 7,89%, количество шлака на 15,29% при уменьшении среднего

выноса пыли на 47,47%. Производительность агрегата по расплаву увеличилась на 12,16% при уменьшении удельного расхода твердого топлива на 10,08%.

Шахтная плавка в значительной степени зависит от эффективности процесса теплогенерации. Несоответствие высоты топливной насадки условиям формирования окислительной зоны и максимальному тепловыделению может привести к образованию вторичной восстановительной зоны, растягиванию процесса горения по высоте слоя, снижению уровня температуры перегрева расплава, производительности агрегата и повышению объема вредных выбросов в атмосферу.

В соответствие с механизмом канального горения твердого топлива, количество прореагировавшего с углеродом кислорода определяется по разности его начальной O_2^o и остаточной концентраций $O_2(z)$

$$\Delta O_2(z) = O_2^o - O_2(z).$$

Решая уравнение теплового баланса области горения твердого топлива, можно установить температуру газа $T(z)$ в кислородной и восстановительной зонах. С учетом охлаждающего эффекта поступающего в слой воздуха и обеспечения постоянства температурного напора между газом и материалами в окислительной зоне необходимо иметь условия $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$. Для реальных условий тепловой работы холостой колоши рекомендованы значения в интервале: порозности слоя $\varepsilon=0,4-0,6$; $Re=1000-10000$ при среднем диаметре куска кокса $D_k=0,05-0,1$ м.

По данным расчета (рис.2) увеличение порозности слоя кокса в пределах высоты топливной насадки способствует расширению окислительной зоны, обеспечивая улучшение условий перегрева получаемого расплава. Установлено, что реализация такого мероприятия потребует увеличения общей высоты холостой колоши в среднем на 30 мм при изменении среднего диаметра куска топлива дополнительно на 10 мм. Протяженность окислительной зоны увеличивается в среднем на 30 мм на каждые дополнительные изменения значений Re в 1000 ед.

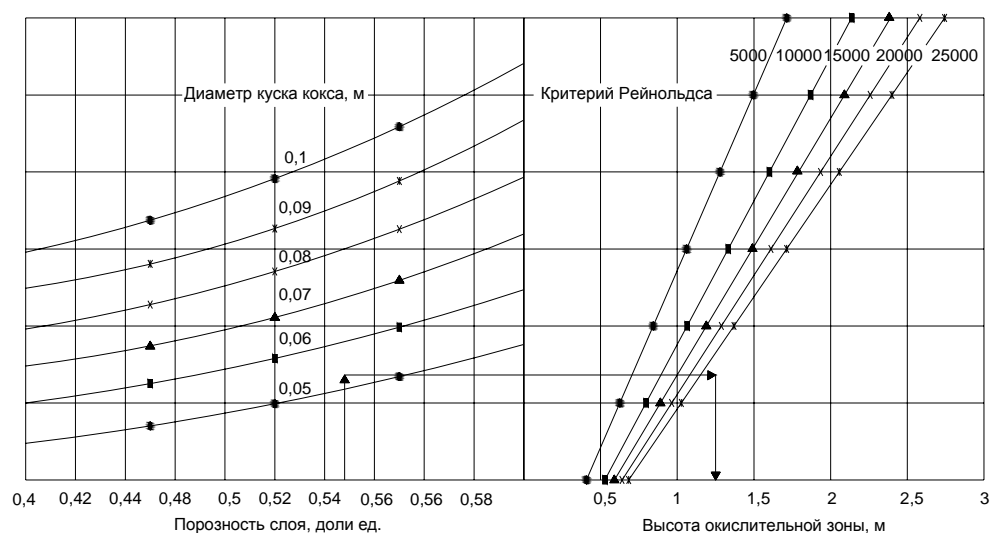


Рисунок 2. Зависимость изменения высоты окислительной зоны в слое кокса от его порозности, диаметра куска и критерия Рейнольдса

Для улучшения технико-экономических показателей шахтной плавки предложена частичная замена твердого топлива газообразным при сжигании природного газа непосредственно в слое. Отличительной особенностью слоевого способа сжигания газообразного топлива является возможность завершения процесса теплогенерации в плотном слое материалов практически любого химического состава. Фурменная подача холодной газовой смеси с коэффициентом расхода воздуха более 2,5-3,0 в разогретую холостую колошу шахтных печей (800-1050°C), приводит к формированию в слое вокруг носика горелки высокотемпературной зоны протяженностью не менее 20-50мм. Основная масса воздушного дутья, проходя через зону горения, подогревается до температуры 250-300°C и поступает в область горения кокса, формируя окислительную зону повышенной протяженности. Появление дополнительного источника тепла в слое позволяет увеличить уровень температуры в зоне высоких температур на 180-230°C, что обеспечивает возможность снижения расхода топлива на процесс до 30-35%. Применительно к условиям работы шахтных печей определены параметры процесса и установлены прогнозируемые последствия его внедрения. Предложена конструкция устройства для реализации этого процесса непосредственно на действующем агрегате.

Одним из основных требований реализации шахтной плавки рудных компонентов является использование гранулированного сырья. Анализ

технологических особенностей существующей технологии производства брикетов на предприятиях УГМК указывает на ряд недостатков, которые приводят к пониженным технико-экономическим показателям шахтной плавки.

В работе изучены особенности использования при производстве брикетов различных видов жидкого связующего (более 15 наименований). С использованием древесных смол, обладающих невысокой стоимостью, получены брикеты с прочностью при динамической нагрузке в 6,19 МПа. Разработан вид модифицированного связующего на основе растворов серной кислоты и древесной смолы.

Поскольку исходная шихта брикетирования содержит значительное количество пыли конвертеров и шахтных печей, включающей в себя оксиды металлов, то увеличение прочностных характеристик сформованных материалов частично происходит за счет образования сульфатных цементов и кристаллогидратов. Выделяющееся тепло реакции сульфатизации способствует снижению вязкости основного связующего (древесной смолы), что приводит к его равномерному распределению в объеме брикета, ускорению процессов окомкования и более плотной упаковке дисперсных частиц. Максимальная прочность брикетов при раздавливании составила 5,5 МПа (рис. 3).

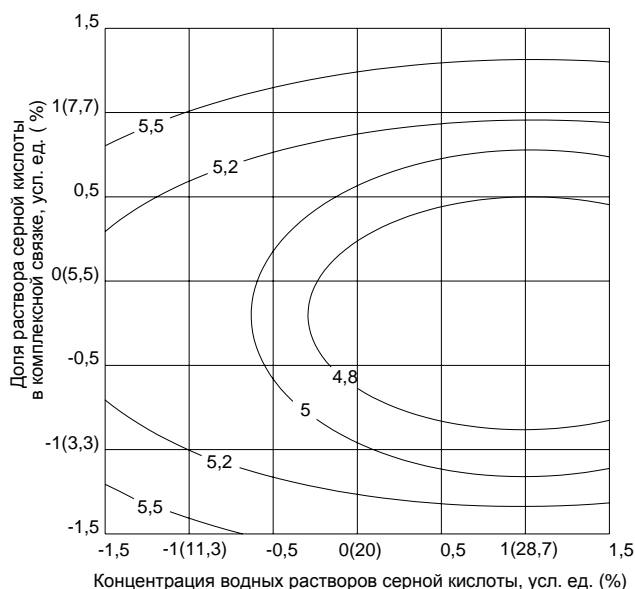


Рисунок 3. Изменения предельной прочности брикетов на раздавливание (цифры у кривых, МПа) от значений уровней варьирования факторов (значения основной шкалы – относительные величины, в скобках у осей – натуральные, %)

В качестве вяжущих компонентов для брикетирования по схеме «ввод связующего – сушка – формование» дополнительно опробованы вяжущие компоненты на основе полиметиленафталинсульфо- и метиленбисульфокислот с различными добавками («Термопласт»). Установлено, что при замене лигносульфоната добавкой «Термопласт» серий «ЗСВ» и «ТЗ» механическая прочность брикетов при статической нагрузке составили 7,7 и 8,4 кПа соответственно, против 4,75 кПа – при использовании лигносульфонатов.

В четвертой главе приведены результаты лабораторных исследований импульсно-энергетического воздействия на развитие тепломассообменных процессов в плотном дисперсном слое.

Если учесть, что кусковые материалы в шахтных печах представляют собой систему из отдельных твердых элементов, имеющих различную частоту собственных колебаний, то для интенсификации тепломассообменных процессов с наибольшим поглощением внешней энергии необходимо использовать источник периодических колебаний с широким спектром образующихся частот. Поэтому для формирования и использования акустического поля непосредственно в слое дисперсных материалов были выбраны газоструйные излучатели. Возникающие при акустической интенсификации вынужденные колебания давления и скорости газовых потоков в слое определяют их устойчивость и структуру стационарного движения.

Впервые в производственной практике обработки материалов слоевых установок для оценки особенностей энергетического взаимодействия внешнего поля звуковых колебаний с элементами слоя были изучены закономерности изменения коэффициента поглощения при низких (16Гц), средних (125Гц) и высоких (2000Гц) частотах. Для этого использовали экспериментальную установку в виде вертикальной шахты с возможностью измерения по высоте слоя (кусковых материалов) звукового давления. Исследования проводили в соответствии с ротатбельной методикой планирования эксперимента. После обработки полученных данных были сформулированы уравнения регрессии, которые со степенью вероятности 99% адекватно описывают изменение коэффициента поглощения звука в плотном слое кусковых материалов класса 25 – 40 мм со средним диаметром 32,5мм. Переменными параметрами были выбраны следующие факторы:

расстояние от среза сопла до среза резонатора (x_1) от 4 до 30мм, расстояние от среза сопла до дна резонатора (x_2) от 6 до 86мм, диаметр сопла (x_3) от 2 до 10мм и давление компрессорного воздуха (x_4) подаваемого в сопло в пределах от 0,1 до 0,5 МПа.

Коэффициент поглощения звука для гармоники 16Гц:

$$Y = -63,68 - 3,59x_1 + 0,86x_2 + 9,72x_3 - 1,08x_4 + 21,3x_1^2 + 45,34x_2^2 + 41,58x_3^2 + 43,10x_4^2 + 20,21x_1x_2 - 6,76x_1x_3 - 18,35x_1x_4 + 9,46x_2x_3 + 13,53x_2x_4 - 26,52x_3x_4, \quad (2)$$

Для гармоники 125Гц:

$$Y = -144,05 - 3,25x_1 + 8,38x_2 - 15,62x_3 - 7,78x_4 + 10,49x_1^2 + 52,57x_2^2 + 56,53x_3^2 + 49,9x_4^2 + 23,72x_1x_2 - 8,4x_1x_3 - 8,39x_1x_4 + 15,07x_2x_3 + 16,25x_2x_4 - 16,09x_3x_4, \quad (3)$$

Для гармоники 2000Гц:

$$Y = -287,21 + 9,82x_1 + 14,89x_2 - 16,32x_3 - 15,62x_4 + 31,64x_1^2 + 80,66x_2^2 + 81,16x_3^2 + 81,06x_4^2 + 29,53x_1x_2 - 24,53x_1x_3 - 21,95x_1x_4 + 21,1x_2x_3 + 26x_2x_4 - 25,31x_3x_4, \quad (4)$$

Анализ полученных уравнений регрессии на существование глобальных экстремумов показал возможность достижение их минимальных значений в пределах интервала варьирования исходных факторов (рис.4).

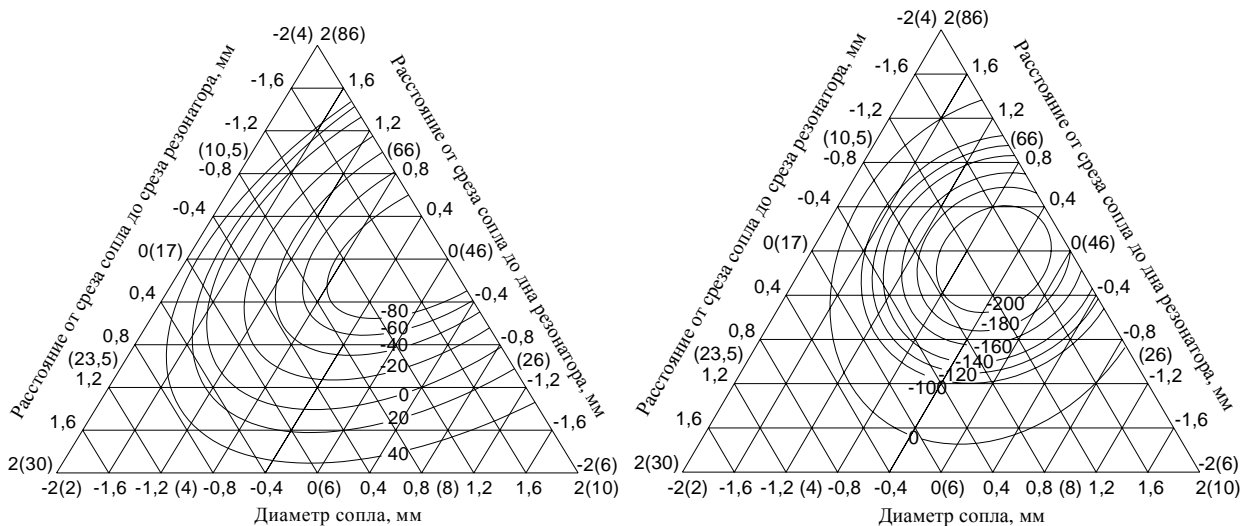


Рисунок 4. Зависимость коэффициента поглощения уровня звука (цифры у кривых) от геометрических характеристик акустического излучателя (значения основной шкалы – относительные величины, в скобках у осей – натуральные) при 125 Гц (левый) и 2000 Гц (правый)

В результате взаимодействия внешнего акустического поля с плотным слоем наблюдается возникновение его дополнительного звукового излучения

во всем исследованном диапазоне колебаний. Установлено, что возрастание уровня звукового поля при наличии значительной вибрации элементов обрабатываемой системы в максимальной степени проявлялось при средних и высоких частотах колебаний с давлением компрессорного воздуха 0,3 МПа.

Область поверхности отклика с максимальным по модулю значением коэффициента поглощения звука во всем диапазоне частот существовало при повышенных размерах сопла и соответствует интервалу $x_3=2-7$ мм, при $x_1=4-20$ мм и $x_2=40-50$ мм, $x_4=0,3$ МПа.

Исследования особенностей взаимодействия акустического поля с материалами монофракционного состава (крупностью 3, 7, 15 и 32,5 мм) при различных частотах показали, что эффект озвучивания слоя в максимальной степени проявлялся при значительных размерах кусковых материалов, за счет наличия больших объемов свободного межкускового пространства.

В разреженных средах запыленных потоков под действием акустических колебаний могут возникнуть крупномасштабные контуры циркуляции групп частиц с изменением направления их движения. При полидисперсной структуре слоя кусковых материалов колебания его частиц вызывает формирование вокруг них локальных зон с отличным от внешней окружающей среды давлением. Чем больше размер обрабатываемых кусков, тем эта разница значительней. Поэтому в озвучиваемом слое мелкие частицы перемещаются ближе к крупным, формируя вокруг них зону повышенных концентраций пылевых элементов. Это обеспечивает возможность удержания мелких фракций в структуре слоя под действием акустического поля.

Было показано, что эффект «озвучивания» слоя дисперсных материалов может являться причиной уменьшения его гидравлического сопротивления при просасывании или продуве газами.

После обработки данных, в зависимости от конструктивных и технологических параметров акустического излучателя, было получено уравнение регрессии (5), которое с 95% вероятностью адекватно описывает изменение коэффициента гидравлического коэффициента ξ , характеризующего долю потерянной кинетической энергии движущегося потока (рис. 5).

$$\begin{aligned}\xi = & 2,295 + 0,016x_1 + 0,017x_2 + 1,417x_3 + 1,165x_4 + 0,008x_1^2 + 0,026x_2^2 + \\ & + 0,093x_3^2 + 0,194x_4^2 + 0,187x_1x_2 - 0,074x_1x_3 - 0,057x_1x_4 - 0,025x_2x_3 - \\ & - 0,074x_2x_4 + 0,614x_3x_4\end{aligned}\quad (5)$$

Уменьшение расстояния между срезом сопла и дном резонатора (x_2) способствовало возрастанию значений коэффициента гидравлического сопротивления слоя. В тоже время, изменение параметра x_2 не оказывало сильного влияния на изменения анализируемой характеристики при высоких давлениях компрессорного воздуха (рис. 5).

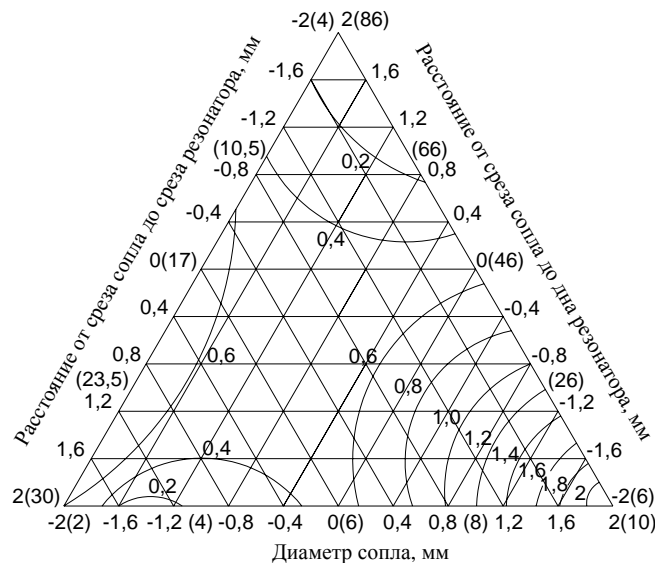


Рисунок 5. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления (цифры у кривых) от геометрических характеристик акустического излучателя (значения основной шкалы – относительные величины, в скобках у осей – натуральные) при $x_4=0,1$ МПа

В результате анализа экспериментальных данных показана возможность увеличения амплитуды вынужденных колебаний обрабатываемых материалов, поскольку одновременно со снижением сопротивления слоя (с минимальным значением 0,049), возрастал модуль отрицательных значений коэффициента поглощения. Это явление позволит создавать условия для разрушения настелей в рабочем пространстве.

Установлено, что эффект озвучивания слоя под действием внешнего акустического поля обеспечивает условия для снижения гидравлического сопротивления обрабатываемого слоя на величину до 30-50%. В результате обобщения экспериментальных данных была определена усредненная

зависимость изменения коэффициента гидравлического сопротивления с использованием энергии акустического поля:

$$\xi = 272,6 \cdot \text{Re}^{-0,804}, \quad (6)$$

Использование этих выражений для определения коэффициентов гидравлического сопротивления слоя описывает реальные значения с ошибкой не более 1,5%.

Энергетическое воздействие газов на слой приводит также к изменению условий теплообмена между ними. В соответствие с теорией, влияние упругих колебаний на динамическую вязкость потоков позволяет изменять условия течения и перемешивания газов, обеспечивая увеличение значений коэффициентов диффузии. В условиях существенной нестационарности распространения звуковых колебаний происходит разрушение теплового пограничного слоя вдоль твердых поверхностей, что способствует усилению интенсивности внешней теплопередачи. Сравнительная оценка экспериментальных и теоретических значений коэффициента теплоотдачи показала возможность его установления с ошибкой не более 8%.

После обработки расчетных величин было установлено уравнение регрессии, которое со степенью вероятности 99% адекватно описывает изменение этого показателя в зависимости от значений варьируемых параметров

$$\begin{aligned} \alpha = & 28,878 + 0,002x_1 - 0,934x_2 - 1,142x_3 - 0,813x_4 + 0,149x_1^2 + \\ & + 0,211x_2^2 + 0,087x_3^2 + 0,13x_4^2 + 0,301x_1x_2 + 0,573x_1x_3 - 0,449x_1x_4 + \\ & + 0,464x_2x_3 + 0,044x_2x_4 + 0,001x_3x_4 \end{aligned} \quad (7)$$

Оценка его значений на существование глобального экстремума по всем факторам одновременно показала возможность достижения его минимального значения за пределами изменения исследованных факторов. Было также показано, что уменьшение среднего диаметра частиц слоя обрабатываемых материалов приводит к увеличению значений коэффициента теплоотдачи. Обработка экспериментальных данных в критериальном виде позволила установить общее выражение для условий конвективного теплообмена при использовании энергии акустического поля:

$$\text{Nu} = 0,7945 \cdot \text{Re}^{0,47}, \quad (8)$$

Их использование позволяет определять величину поверхностного коэффициента теплоотдачи с ошибкой не более 5%.

Результаты исследований позволили сформулировать требования к конструкции колебательной системы: диаметр сопла - 6 мм, расстояния от среза сопла до среза резонатора - 20 мм, от среза сопла до дна резонатора - 45 мм; оптимальное давление воздуха – 0,3 МПа.

В пятой главе приведены результаты опытно-промышленных испытаний по воздействию внешнего акустического поля на процесс шахтной плавки медьсодержащего сырья.

Установленные в результате лабораторных исследований положительные результаты по использованию энергии акустического поля были реализованы на шахтных агрегатах «ППМ» ОАО «Уралэлектромедь» при установке газоструйных излучателей непосредственно на фурмах. Газоструйные излучатели располагали исходя из условий обеспечения равномерности распределения воздушного дутья по фурмам с учетом воздействия акустического поля на зоны с повышенным гидравлическим сопротивлением (рис. 6). Указанные излучатели позволяли генерировать колебания с несущей частотой 150-250 Гц и мощностью 150-500 кВт. Работа печи с использованием энергии акустического поля продолжалась в течении длительного времени (более года).



Рисунок 6. Установка акустического излучателя на фурмах шахтных печей

При интенсификации процессов в высокотемпературных областях печи ускорялись процессы плавления и увеличивалась скорость движения материалов. Это явление сопровождалось разрыхлением слоя (увеличением его порозности), благодаря чему уменьшалось газодинамическое сопротивление. Как правило, при этом появлялась возможность увеличения расхода воздуха, напрямую приводящее к росту производительности печи.

При использовании акустических излучателей, в определенной мере, снижению газодинамического сопротивления слоя способствует разрушение настелей, образующихся в печи как в районе фурм, так и на уровне засыпи шихтовых материалов. Статистические данные по работе шахтных печей показали, что сокращение количество взрывных работ за месяц составило 37,14% (с 15,51 и без них до 9,75 шт.). На способ разрушения настелей в рабочем пространстве шахтной печи существует заявка на изобретение с положительным решением о выдаче патента (№2010149207).

Основные показатели в базовый период работы шахтной печи и при использовании воздействий акустического поля представлены в табл.1.

Таблица 1. Показатели работы печи в базовом и исследованном периодах

Показатели	Базовый период	С использованием акустического поля	Изменения, %
Выход меди, %	8,67	9,59	+10,61
Выход шлака, %	45,13	49,19	+9,0
Вынос пыли, кг/час	580	528	-9,0
Сопротивление слоя после завалки, кПа	375	322	-14,1
Приход тепла, Мдж/т меди	13,15	14,75	+12,2
Тепловой КПД печи, %	25,9	29,0	+12,0

Воздействие акустических полей оказывает положительное воздействие на процессы пылеподавления. Наблюдалось сокращение пылевыноса из рабочего пространства на величину до 0,9-1,0 т за сутки (или 6,46 % при среднем проплаве около 600 т шихты). Их сравнение указывает на улучшение работы по главным показателям – выходу черновой меди, выносу пыли, завершенности процессов окисления компонентов шихты и топлива, протекающих с выделением тепла. Эти изменения хорошо согласуются с представлениями о влиянии акустических колебаний на развитие физико-химических процессов медной плавки.

Экспериментальные данные позволили установить, что при акустическом воздействии на слой шихты в шахтной печи снижается температура отходящих газов в среднем на 20 °С (7 %). Способ интенсификации приводит к выравниванию значений неравномерности распределения дутья к центру и по периметру в наиболее удаленной от места его ввода и смещению в область меньших величин его давления.

Согласно анализу отобранных газовых проб область максимального содержания диоксида углерода сместилась к центральной части печи. Показано, что одновременное снижение неравномерностей распределения CO_2 по периметру, снижение концентраций монооксида углерода и кислорода по всему сечению приводят к выравниванию условий горения кокса и способствуют повышению температуры расплава (действительная температура горения 1081 °С). Удельный расход топлива на тонну меди снижается в среднем на 14,75 кг в расчете на каждую дополнительную единицу (0,1 МПа) давления воздуха, подаваемого на излучатель.

Из анализа изменений температурного поля в работе печи с использованием акустических излучателей четко просматриваются изменения активности зон в тепловой работе печи. Из сопоставления этих соотношения с аналогичными для базового периода следует, что наибольшая активность в развитии тепло и массообменных процессов проявилась в первой зоне, отличающаяся стабильно высоким расходом воздуха, поступающего через фурмы. В этой зоне величина соотношения теплоемкостей потоков шихты и газа увеличилась до 1,43 по отношению к базовому варианту.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Шахтная плавка сохраняет свое значение в металлургии меди и имеет резервы в оптимизации технологических параметров, повышении производительности, качества получаемой продукции и снижения энергетических затрат, что определяет актуальность дальнейшего совершенствования технологии.

2. С учетом распределения газов и температур со стороны подачи воздушного дутья, по сечению печи условно определены 3 зоны. В первой и третьей зонах (соответственно избыток и недостаток окислителя)

распределение температур определяется условиями подачи дутья, во второй – преимущественно от сбора и продвижения полученных продуктов плавки.

3. Изменение конструктивных параметров фурменных устройств (снижен диаметр фурм с 200 до 120 мм, увеличены угол наклона фурм с 4 до 12° и их количество до 42 шт.) и воздушного коллектора (двухсторонняя подача дутья, увеличена площадь сечения воздушного коллектора до 1,425 м²) привело к существенному повышению равномерности газораспределения, повышению эффективности сжигания твердого топлива, что обеспечивает снижение расхода топлива на 10,8% и повышение производительности печи по расплаву на 17,5 %, снижению пылевыноса на 47,47%.

4. Основным направлением повышения эффективности шахтной плавки является рационализация процессов теплообразования, их форсирование за счет повышения количества дутья, оптимизации высоты коксовой постели, крупности топлива и использование природного газа в качестве замены части дорогостоящего твердого топлива.

Наиболее эффективным является слоевой режим сжигания газообразного топлива, позволяющий увеличить производительность шахтных печей на 30-45% и повысить экономичность процесса. При микрофакельном механизме горения горючей смеси, температура поверхности материалов должна превышать температуру воспламенения исходной горючей смеси (800-1050 °С), коэффициент расхода воздуха $\alpha_v \geq 3$; снижение крупности кусков шихты приводит к увеличению протяженности зоны горения.

5. Предложенные новые вяжущие компоненты (древесные смолы, модифицированные с добавлением растворов кислот, реагентов «Термопласт» серии «ТЗ», «ЗСВ», с сульфатом алюминия), позволят заменить дефицитные лигносульфонаты и повысить в 1,6 – 1,8 раза механическую прочность (на сжатие и ударная прочность) брикетов.

6. Наложение акустического поля на слой кусковых материалов позволил снизить гидравлическое сопротивление стоба шихты, интенсифицировать развитие тепломассообменных процессов, скоагулировать дисперсные фракции материала, обеспечить более эффективное горение топлива.

Предложенные выражения взаимосвязи критериев подобия, характеризующих конвективный теплообмен (Нуссельта, Рейнольдса) и

коэффициента гидравлического сопротивления слоя от условий воздействия акустического поля, так и без его использования, позволяют оценить тепловую работу печи.

7. Использование энергии акустического поля, по данным испытаний в опытно-промышленном масштабе, позволило: повысить тепловой КПД на 2%; снизить расход топлива на 14,75 кг/т меди; повысить производительность агрегата на 6 %; снизить пылевынос на 6,46 %.

Установлена возможность снижения образования настывов и гарнисажа в рабочем пространстве.

Внедрение рекомендаций по использованию энергии акустического поля в промышленной практике, только в условиях филиала «ППМ» ОАО «Уралэлектромедь» позволит получить экономическую эффективность в 7,5 млн. руб.

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Коновалов И.С. Моделирование процессов взаимодействия частиц кусковых материалов при наложении акустического поля / И.С. Коновалов, В.И. Матюхин, О.В. Матюхин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011 – №2 – с.99-103.

2. Коновалов И.С. Совершенствование тепломассообменных процессов в дисперсном слое с применением акустической интенсификации / И.С. Коновалов, В.И. Матюхин, О.В. Матюхин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011 – №5 – с.185-189.

3. Коновалов И.С. Совершенствование прочностных свойств брикетов из медьсодержащего сырья / И.С. Коновалов, А.А. Кийк, В.И. Матюхин // Новые огнеупоры. – 2012 – №3 – с.65.

Прочие публикации:

1. Матюхин В.И. Совершенствование шахтной плавки медьсодержащих материалов с использованием энергии акустического поля / В.И. Матюхин, И.С. Коновалов, О.В. Матюхин // III – я Молодежная научно-практическая

конференция «Инновационный потенциал молодежи – вклад в развитие ОАО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, 2010 – с.27-30.

2. Матюхин В.И. Повышение эффективности пылеулавливания в шахтных печах цветной металлургии с использованием энергии акустического поля / В.И. Матюхин, И.С. Коновалов, О.В. Матюхин // Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Проблемы экологии и рационального природопользования стран АТЭС и пути их решения», Москва: МИСиС, 2010 – с.70-74.

3. Матюхин В.И. Выбор и обоснование технологических и конструктивных параметров шахтных агрегатов цветной металлургии / В.И. Матюхин, И.С. Коновалов, О.В. Матюхин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы металлургии цветных металлов» - Красноярск: СФУ, 2011 – с.50-53.

4. Матюхин В.И. Влияние акустического излучения на пылевынос в шахтных печах цветной металлургии / В.И. Матюхин, И.С. Коновалов, О.В. Матюхин // V-я заочная международная научно-практическая конференция «Система управления экологической безопасностью» - Екатеринбург: УрФУ, 2011 – с.52-59.

5. Матюхин В.И. Возможность использования энергии акустического поля в слоевых технологических агрегатах / В.И. Матюхин, И.С. Коновалов, О.В. Матюхин // Научно-практическая конференция «Перспективы и пути создания эффективного производства на предприятиях УГМК» - Екатеринбург: УрФУ, 2011 – с.9.

6. Матюхин В.И. Повышение эффективности работы шахтных печей цветной металлургии с использованием энергии акустического поля / В.И. Матюхин, И.С. Коновалов, О.В. Матюхин // Научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» - Екатеринбург: УРО РАН, 2011 – с.71-77.

7. Кашеев И.Д. К вопросу о технологической схеме брикетирования тонкодисперсных концентратов в условиях ОАО «ММСК» / И.Д. Кашеев, К.Г. Земляной, И.С. Коновалов // Научно-практическая конференция «Перспективы и пути создания эффективного производства на предприятиях УГМК» - Екатеринбург: УрФУ, 2011 – с.13-15.

8. Матюхин В.И. Использование энергии акустического поля для интенсификации тепломассообменных процессов в дисперсном слое / В.И. Матюхин, Ю.Г. Ярошенко, О.В. Матюхин, И.С. Коновалов // XVI международная конференция «Теплотехника и энергетика в металлургии» - Днепропетровск: НМетАУ, 2011 – с.145-147.

9. Матюхин В.И. Оценка эффективности взаимодействия акустического излучения на слоевые процессы / В.И. Матюхин, И.С. Коновалов, О.В. Матюхин // Международная научно-практическая конференция «Повышение качества образования и научных исследований в рамках X Сатпаевских чтений» - Экибастуз: Экибастузский инженерно-технический институт им. академика К.И.Сатпаева, 2011 – с.73-77.

10. Матюхин В.И. Совершенствование тепловой работы шахтных плавильных печей с использованием брикетированного сырья заданного качества / В.И. Матюхин, И.С. Коновалов, О.В. Матюхин // Международная интерактивная научно-практическая конференция «Инновация в материаловедении и металлургии» 2012 – с.115-117.

11. Матюхин В.И. Совершенствование конструкции шахтной печи для плавки рудных компонентов / В.И. Матюхин, Ю.Г. Ярошенко, О.В. Матюхин, И.С. Коновалов // Международная научно-практическая конференция «Перспективы и пути создания эффективного производства УГМК» - Екатеринбург: УрФУ, 2012 – с.2-13.

12. Коновалов И.С., Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Матюхин О.В. Использование энергии акустического поля для улучшения показателей работы шахтной печи / И.С. Коновалов, В.И. Матюхин, Ю.Г. Ярошенко, О.В. Матюхин // Международная научно-практическая конференция «Перспективы и пути создания эффективного производства УГМК» - Екатеринбург: УрФУ, 2012 – с.25-28.

13. Положительное решение о выдаче патента на изобретение от 21.03.2012. Способ разрушения шлаковых настывей в шахтных печах : заявка на изобретение Рос. Федерация : МПК⁵¹ C22B15/02 (2006.01) / В.И. Матюхин, О.В. Матюхин, А.А. Кийк, В.А. Ориничев, В.В. Федотов, О.Г. Берняев, А.Г. Журавлев, М.В. Лобацевич, С.Г. Швецов, В.В. Прохоров, И.С. Коновалов ; заявитель ОАО «Уралэлектромедь». – 2010149207 ; заявл. 30.11.2010 ; опубл. 10.06.2012