

На правах рукописи

Ибадуллаев Тимур Бахтиярович

РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ДОЖИГАНИЯ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ НА ОСНОВЕ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ
ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ И ЭНЕРГОЗАТРАТ

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА - 2007

Диссертация выполнена на кафедре «Теплофизика и экология металлургического производства» Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Левицкий Игорь Анисимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Глинков Герман Маркович

кандидат технических наук
Иванов Андрей Валерьевич

Ведущая организация: ООО «Институт Стальпроект»

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 2007 г. в _____ часов на заседании Специализированного совета № Д.212.132.02 при Московском государственном институте стали и сплавов (технологическом университете) по адресу: 119049, Москва, Ленинский просп., д. 6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

Автореферат разослан " ____ " _____ 2007 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

доктор технических наук, профессор



А.Е. Семин

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Задача дожигания горючих компонентов атмосферы металлургических печей актуальна для многих плавильных, нагревательных и термических печей со стадийным сжиганием топлива, технологических аппаратов для подготовки металлургического сырья по очевидным причинам: во-первых, эти газы представляют собой угрозу для экологии, во-вторых, теплота сгорания горючих компонентов не используется в технологическом процессе.

Дожигание горючих газов, содержащихся в атмосфере технологического аппарата, в каких-либо специальных устройствах представляется неэффективным, поскольку требует серьезных затрат и не позволяет использовать теплоту дожигания непосредственно в тех печных агрегатах, где образуются эти компоненты и где нужны дополнительные источники энергии. Технология, включающая в себя дожигание горючих компонентов непосредственно в рабочем пространстве металлургических печей и как можно более полную передачу выделившегося тепла обрабатываемому материалу, является рациональной как с позиций энергосбережения, так и снижения вредных выбросов.

С теплотехнической точки зрения речь идет об организации сжигания низкоскоростного высокотемпературного потока весьма бедного (крайне низкокалорийного) топлива в большом объеме. В качестве окислителя для сжигания такого топлива рационально использовать кислород, что позволяет исключить расход тепла на нагрев содержащегося в воздухе балластного азота, составляющий, например, для нагревательных печей величину того же порядка, что и расход тепла на нагрев металла. Применение кислорода в качестве окислителя, кроме того, способствует рациональной организации процесса дожигания в связи с высоким располагаемым давлением.

С другой стороны, низкое содержание горючих компонентов требует вовлечения в поток кислорода большого количества печных газов (при объемной концентрации горючих компонентов 10% с 1 нм³ кислорода необходимо смешать 20 нм³ печных газов), что осложняет решение этой задачи.

Указанные проблемы могут быть достаточно просто и эффективно решены при помощи разработанных в Московском институте стали и сплавов способа и устройства, названного вихревым радиационным инжектором (ИВР). Принцип действия устройства описан ниже.

Экспериментальные работы по изучению этой новой технологии связаны с большими трудностями и требуют весьма значительных финансовых затрат. Поэтому актуальной задачей является разработка численной модели процессов, происходящих в дожигательном устройстве и рабочем пространстве печей. Сложность этих процессов делает целесообразным использование имеющихся программно-вычислительных комплексов (ПВК).

Целью работы является совершенствование новой технологии дожигания продуктов неполного сгорания с использованием ИВР, разработка технологии дожигания применительно к дуговой сталеплавильной печи постоянного тока с использованием кольцевого ИВР, а также разработка и апробация предназначенных для решения этих задач математических моделей, учитывающих все основные происходящие при этом процессы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: а) провести анализ методов дожигания горючих компонентов печной атмосферы в плавильных и нагревательных печных агрегатах; б) провести тестирование какого-либо программно-вычислительного комплекса (ПВК) с точки зрения возможности его применения для решения реальных задач металлургической теплотехники на примере задачи расчета газодинамики и сложного сопряженного теплообмена в какой-либо нагревательной печи, для которой имеются данные экспериментальных исследований; в) разработать

математическую модель рабочего процесса вихревого радиационного инжектора (ИВР), установленного на плоском своде печи непрерывного действия, с учетом всех основных процессов: турбулентного движения газов, сложного теплообмена и горения топлива; г) разработать математическую модель процесса дожигания с использованием кольцевого ИВР в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) постоянного тока; д) провести количественные оценки основных параметров работы кольцевого ИВР, установленного на ДСП постоянного тока путем вариантных расчетов. Выдать рекомендации по рациональным режимам работы и конструкции ИВР.

Методом решения поставленных задач явилось математическое моделирование с численной реализацией моделей на персональном компьютере при помощи ПК. При разработке моделей использовались последние достижения в области теории турбулентности, диффузионного горения и радиационного теплообмена. Использовались детерминированные математические модели в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных. Проверка адекватности численных моделей осуществлялась путем сопоставления результатов расчета с опубликованными данными натуральных экспериментов.

Научная новизна результатов исследования состоит в том, что:

1. Впервые получены количественные данные по полям скорости, давления, концентраций топлива, окислителя и продуктов сгорания, характеристик турбулентности, температуры, энтальпии, плотности газа и др. в печи с установленным в ней ИВР и в камере ИВР, а также по эжекционной способности радиационного вихревого инжектора и создаваемого им плоского настильного факела.

2. Установлено, что увеличение диаметра ИВР приводит к повышению эжекционной способности ИВР, тогда как увеличение расхода эжектирующей среды (окислителя) ведет к снижению этого показателя.

3. Расчетным путем установлен факт наличия весьма высоких значений кинетической энергии турбулентности и уровня пульсаций скорости в камере ИВР. Этим, в основном, и объясняется эффективность ИВР как реактора, осуществляющего высокоинтенсивный процесс дожигания.

4. Впервые реализована математическая модель сложного сопряженного теплообмена в камере печи периодического действия с учетом основных происходящих в агрегате процессов: турбулентного движения газов, радиационного, конвективного и кондуктивного теплообмена. При этом постановка задачи включает в себя систему осредненных уравнений Навье–Стокса, неразрывности, кинетической энергии турбулентности, энергии.

5. Разработана математическая модель процесса дожигания с использованием кольцевого ИВР в дуговой сталеплавильной печи постоянного тока. С помощью этой математической модели выработаны рекомендации по рациональным режимам работы кольцевого ИВР.

Достоверность полученных выводов и обоснованность рекомендаций обусловлена использованием современных методов и средств математического моделирования, основанных на фундаментальных уравнениях сохранения и переноса физических свойств и субстанций, использованием последних достижений вычислительной теплофизики, а также удовлетворительным согласованием расчетных результатов с экспериментальными данными.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты позволяют обоснованно определять конструктивные и режимные параметры дожигательных аппаратов типа ИВР при проектировании, а разработанный комплекс математических моделей дает возможность проводить качественную и количественную оценку влияния различных параметров на работу печей, оборудованных подобными устройствами, обоснованно разрабатывать системы автоматизированного управления процессом дожигания.

По результатам работы выданы рекомендации, касающиеся технологии дожигания применительно к дуговым сталеплавильным печам постоянного тока. Указанные рекомендации использованы при проектировании дуговой печи постоянного тока для выплавки стали ДПС-12 ОАО «ВКМ-Сталь» (г. Саранск).

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации докладывались и получили положительную оценку на международных научно-практических конференциях «Рациональное использование природного газа в металлургии» (Москва, МИСиС, 2003), «Металлургическая теплотехника. История. Современное состояние. Будущее» (Москва, МИСиС, 2006), заседаниях кафедры «Теплофизика и экология металлургического производства» МИСиС.

По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ в центральных научных журналах и сборниках.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений, изложена на 170 стр. машинописного текста, содержит рисунки и таблицы. Библиографический список использованной литературы содержит 190 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели, задачи и методика намеченных исследований.

В первой главе изложены вопросы, касающиеся методов дожигания продуктов неполного сгорания в атмосфере промышленных печей и методов исследования происходящих при этом процессов. Глава носит обзорный характер. Показано, что на данный момент существует две принципиально отличающиеся технологии дожигания горючих компонентов, содержащихся в атмосфере печных агрегатов: с помощью струйной подачи окислителя и по-

дачи окислителя в виде закрученного потока в вихревую камеру. Последний способ разработан в Московском институте стали и сплавов. На основании метода предложено устройство, названное вихревым радиационным инжектором (ИВР) и схематически изображенное на рис. 1. Принцип действия устройства заключается в следующем: сильно закрученный в результате тангенциального подвода поток окислителя под сверхкритическим давлением пода-

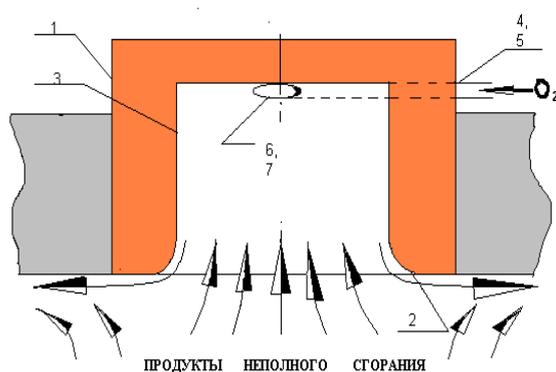


Рис. 1 Схема ИВР

ется через патрубки 4, 5 и сопла 6, 7 в вихревой радиационный инжектор 1, состоящий из цилиндрической части 3 и криволинейного диффузора 2. В результате сильной крутки и под действием высоких скоростей в камере происходит распад вихря, и создается сильное разрежение в приосевой об-

ласти. Под действием этого разрежения печные газы, содержащие горючие компоненты, подтекают к дожигательному устройству 1. Часть из них поступает в камеру, где смешивается с кислородом и сгорает. Другая часть газов подсасывается в плоский настильный факел, образующийся в результате истечения закрученного потока из криволинейного диффузора 2, как это имеет место в плоскопламенных горелках. Данный способ обладает рядом преимуществ перед струйным дожиганием: во-первых, имеет место высокоинтенсивное излучение твердой поверхности, осуществляющееся в непрерывном спектре, во-вторых, исключается контакт струи окислителя с металлом, наконец, ИВР организует направленное движение газов, подлежащих дожиганию, в сторону дожигательного устройства.

В связи с тем, что экспериментальные методы исследования являются весьма дорогостоящими, эффективным средством получения информации о характере движения газов, процессах теплообмена и горения в тепло-

вых агрегатах является метод математического моделирования. Причем для разработки детерминированной математической модели весьма сложной газодинамической структуры, характерной для ИВР, и не менее сложных процессов горения и теплообмена, протекающих при использовании этого устройства для дожигания горючих компонентов атмосферы в камере печи, рационально использовать программно-вычислительные комплексы (ПВК). Одним из таких комплексов является разработанный под руководством профессора Д.Б. Сполдинга ПВК PHOENICS. Поскольку PHOENICS, с одной стороны, хорошо зарекомендовал себя при решении многих достаточно разнообразных задач, а с другой — никогда не использовался для полностью детерминированного описания сопряженной задачи газодинамики и теплообмена в металлургических печах, в данной работе было решено применить именно этот ПВК, однако предварительно протестировать его на такого типа задаче.

Этому посвящена вторая глава. Тестирование комплекса проводили на примере задачи расчета газодинамики и сложного сопряженного теплообмена в термической печи с выкатным подом для нагрева роликов МНЛЗ. Печь установлена в кузнечно-прессовом отделении ООО «ССМ Тяжмаш» (г. Череповец).

При разработке модели были приняты следующие допущения: а) из сожигательного устройства истекает газовая смесь, процесс горения в которой завершен (в камере печи горение отсутствует), что обусловлено особенностью работы скоростных горелок; б) все тела, участвующие в радиационном теплообмене, являются серыми; в) футеровка печи является однослойной, что оправдано близостью теплофизических свойств керамоволокнистых материалов, применяемых в печи.

Постановка задачи включает в себя нестационарные уравнения Рейнольдса для трех компонент вектора скорости, а также уравнения неразрыв-

ности и энергии. Для замыкания системы использована полуэмпирическая k - l -модель турбулентности. Радиационный перенос учитывается с помощью введения источникового члена в уравнение энергии, для вычисления которого использовалось модифицированное P_1 -приближение Immersol. Отличие модели Immersol от известного и широко используемого в инженерных приложениях P_1 -приближения заключается в наличии дополнительного коэффициента ослабления в результате влияния геометрии рабочего пространства на радиационный теплообмен (РТО). Для определения указанного коэффициента используется дифференциальное уравнение. Основное уравнение модели РТО аналогично уравнению теплопроводности относительно некоторой «радиационной температуры», для твердых тел имеющей смысл температуры тела, а для газовой фазы – температуры, фиксируемой термопарой, установленной в данной точке рабочего пространства печи. Процедура, связанная с решением одностепенных уравнений как для распределения температуры в потоке продуктов сгорания, так и для поля температуры внутри твердых тел, существенно упрощает моделирование сопряженного теплообмена в печи.

В общем виде система вышеуказанных дифференциальных уравнений задачи, выражающих законы сохранения импульса (уравнения Навье-Стокса), массы (уравнение неразрывности), энергии (уравнение энергии), характеристик турбулентности, химической компоненты (уравнение конвективной диффузии) могут быть записаны в одной стандартной форме, в декартовой системе координат имеющей вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \operatorname{div}(\rho \cdot \vec{W} \cdot \Phi) = \operatorname{div}(\Gamma_{\Phi} \operatorname{grad}\Phi) + S_{\Phi}, \quad (1)$$

где ρ — плотность среды, кг/м³; \vec{W} — осредненный вектор скорости, м/с; Γ_{Φ} — коэффициент «диффузионного» переноса переменной Φ ; S_{Φ} — источниковый член для переменной Φ .

Зависимая переменная Φ обозначает температуру, составляющую вектора скорости, кинетическую энергию турбулентных пульсаций и др. Коэф-

коэффициенту переноса G_ϕ и источниковому члену S_ϕ следует придать соответствующий каждой из этих переменных смысл.

Решение поставленной задачи производили методом «контрольного объема» Сполдинга–Патанкара на адаптивной сетке.

Сопоставление результатов расчетных и экспериментальных данных (см. рис. 2) показывает их удовлетворительное совпадение. Относительная разница даже на стадии технологической выдержки не превышает 8,5%. Завышенные измеренные значения температур в период выдержки объясняется недостаточной герметичностью рабочего пространства печи во время эксперимента, вследствие чего имел место неконтролируемый подсос холодного воздуха. Поскольку в математической модели подсос холодного воздуха не учитывался, перерасход топлива в эксперименте привел к завышенным значениям температур в рабочем пространстве и контрольных точках садки.

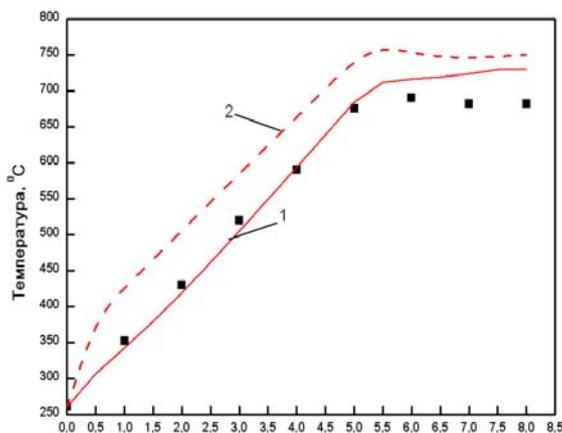


Рис. 2 Изменение температуры газовой фазы во времени: 1 — «радиационная» температура, 2 — расчетная температура газовой фазы, ■ — температура спая печной термопары в эксперименте

измерений используется, например, аспирационная термопара.

Полученная математическая модель использовалась для исследования влияния схемы расположения горелочных устройств. Выяснено, что переход

Из рис. 2 видно, что расчетная «радиационная» температура (1), соответствующая температуре спая термопары, ниже значения расчетной температуры газовой фазы (2), найденной путем решения уравнения энергии. Указанный факт давно известен как источник методической ошибки при измерении температуры газа с помощью контактных датчиков температуры и может быть устранен, если для

к расположению горелок в шахматном порядке на противоположных стенах печи не только по ее длине, но и по высоте, не оказывает существенного влияния на температуры металла и газовой фазы.

Выполненное во второй главе тестирование ПБК PHOENICS подтвердило высокое качество этого программного продукта и возможность разработки на его основе детерминированных математических моделей, предназначенных для численного исследования весьма сложных процессов движения газов и теплообмена в металлургических печах в трехмерной постановке.

На основе протестированного ПБК в третьей главе разрабатывалась численная модель процессов, происходящих в ИВР и в прилегающей к нему части рабочего пространства печи, в постановке, соответствующей реальным условиям работы печи, что требует учета взаимодействия процессов турбулентного движения газов, сложного теплообмена и горения топлива.

Для проведения расчета выбрана цилиндрическая область рабочего пространства нагревательной печи, включающая в себя часть плоского свода и установленный на нем вихревой инжектор. В печи реализуется технология двухстадийного сжигания топлива. На первой стадии топливо сжигается с недостатком окислителя, а продукты неполного сгорания дожигаются в подсводовом пространстве с помощью ИВР.

На рис. 3 показан поперечный разрез и горизонтальное сечение области рабочего пространства печи, оборудованной ИВР. Здесь же цифрами отмечены границы объекта моделирования, характеризующиеся соответствующими граничными условиями.

Поверхность 1 является границей цилиндрической части рабочего пространства печи, примыкающей к участку свода с установленным на нем ИВР. Она свободна для прохода через нее газов, причем как внутрь области (поступающее топливо), так и наружу (уходящие продукты сгорания). Поверхность 2 — прямоугольная щель высотой 30 мм и шириной 1 мм, через кото-

рую тангенциально подается поток окислителя. Поверхность 3 заблокирована для прохода газов; она включает в себя боковую поверхность и торец цилиндрической камеры ИВР, криволинейный ультрадиффузор, а также поверхность плоского свода печи. Поверхность 4 — это поверхность металла, имеющая заданную температуру.

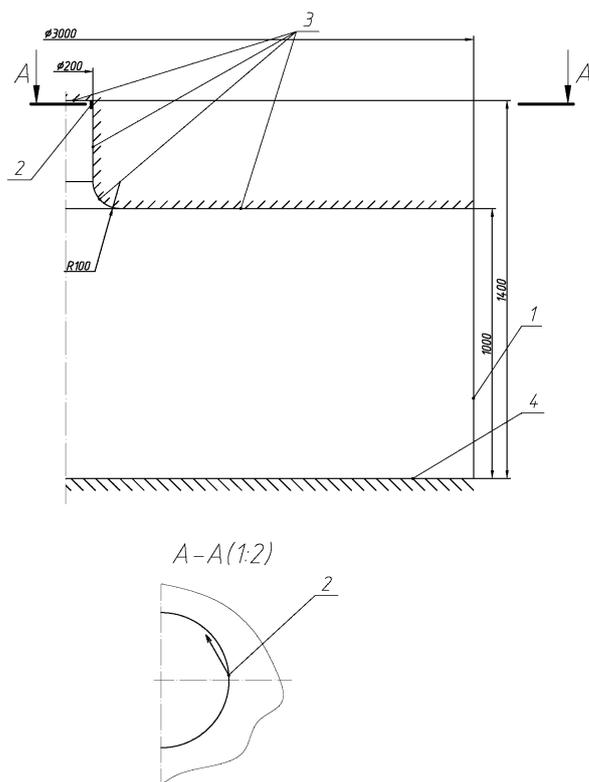


Рис. 3 Схема расчетной области

При разработке модели были приняты следующие допущения: а) суммарный коэффициент диффузии один и тот же для топлива, окислителя и продуктов сгорания, поскольку речь идет о турбулентном течении; б) химическая реакция проходит в одну стадию без учета диссоциации продуктов сгорания, что является достаточно распространенным допущением при моделировании диффузионного горения; в) все тела, участвующие в теплообмене, являются серыми.

Постановка задачи включает в себя осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, неразрывности и энергии. Для замыкания системы уравнений Рейнольдса использовали двухпараметрическую k - ε -модель турбулентности. Радиационный перенос учитывали с помощью описанной выше модели Immersol. Была применена модель диффузионного горения в турбулентном фронте пламени конечной толщины, включающая в себя решение двух дифференциальных уравнений в частных производных и некоторые дополнительные соотношения.

Система вышеуказанных дифференциальных уравнений задачи, выражающих законы сохранения импульса (уравнения Навье-Стокса), массы (уравнение неразрывности), энергии (уравнение энергии), характеристик турбулентности (k и ε), химической компоненты (уравнение конвективной диффузии) могут быть записаны в одной стандартной форме, в цилиндрической системе координат имеющей вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho u \Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \Phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + S_{\Phi}, \end{aligned} \quad (2)$$

где r , θ , z — радиальная, угловая и аксиальная координаты, соответственно (ось z направлена вниз); ρ — плотность газа, кг/м³; v , u , w — соответственно радиальная, тангенциальная и аксиальная компоненты скорости, м/с; Φ — зависящая переменная; Γ_{Φ} — коэффициент «диффузионного» переноса переменной Φ ; S_{Φ} — источниковое слагаемое для переменной Φ .

Решение поставленной задачи производили методом «контрольного объема» Сполдинга–Патанкара на адаптивной сетке.

Поскольку опытные данные по исследованию структуры потока в ИВР отсутствуют, проверку адекватности модели проводили путем сравнения полученных с помощью математической модели результатов с опубликованными экспериментальными данными по течению закрученного потока в цилиндрической трубе. Показано, что математическая модель дает удовлетворительное качественное и количественное совпадение результатов с данными натурального эксперимента по компонентам средней скорости, расположению зоны обратных токов и значениям турбулентных пульсаций скорости.

В результате расчета с использованием математической модели получены данные по полям скоростей, давления, концентраций, характеристик турбулентности, температуры в области рабочего пространства печи. Также получены значения эжекционной способности ИВР и плоского настильного

факела. Из рис. 4 видно, что зависимость относительного присоединенного массового расхода для настильного факела (отношение текущего массового

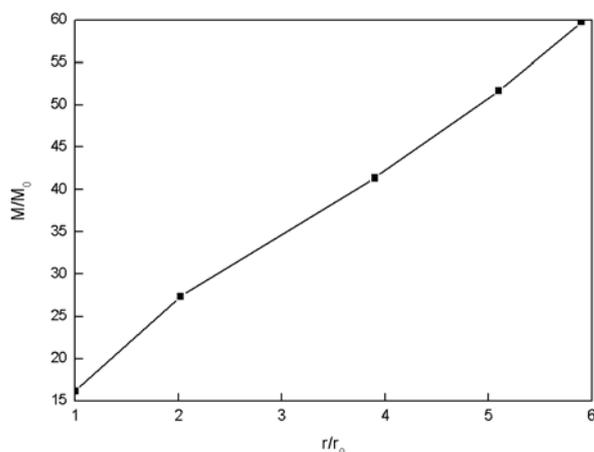


Рис. 4 Изменение относительного присоединенного массового расхода вдоль относительной радиальной координаты

расхода окружающей среды, вовлеченной в факел, к начальному расходу) от относительной радиальной координаты (отношение текущей радиальной координаты к радиусу ИВР) имеет практически линейный характер. На расстоянии всего одного радиуса ИВР имеет место более чем пятнадцатикратный подсос окружающей среды в настильный факел.

Показано, что в камере инжектора генерируется турбулентность, характеризующаяся чрезвычайно высокими значениями энергии и уровня пульсаций, что объясняется наличием весьма значительных градиентов скоростей и приводит к быстрому выравниванию полей концентраций и температур, а, следовательно, к значительному расширению зоны турбулентного диффузионного горения. Именно эти обстоятельства, а также интенсивный конвективный перенос, характерный для вихревых потоков, определяют высокую эффективность вихревых реакторов и, в частности, вихревого радиационного инжектора. В качестве примера на рис. 5, 6 показано поле температуры и конфигурация зоны горения в ИВР. Видно, что, во-первых, зона турбулентного диффузионного горения занимает практически весь ИВР и распространяется на плоский свод и в печное пространство, во-вторых, внутри ИВР распределение температур по радиальной координате на разных высотах близко к однородному.

Результаты математического моделирования позволили рекомендовать выкладывать высококачественными огнеупорами зону диаметром, равным двум-трем диаметрам ИВР. При установке нескольких инжекторов выдерживать расстояние между их осями не менее пяти радиусов инжектора, но не менее одного метра.

Исследование влияния различных факторов на эжекционную способность инжектора показало, что последняя линейно возрастает с ростом диаметра устройства и уменьшается при увеличении расхода окислителя.

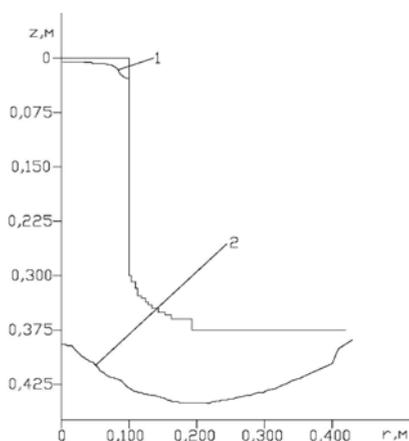


Рис.5 Контуры зоны горения:
1 – изолиния нулевого содержания топлива; 2 – изолиния нулевого содержания окислителя

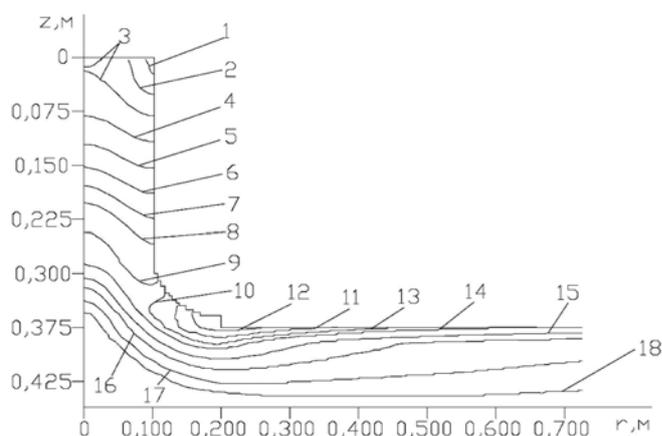


Рис.6 Изотермические поверхности: 1 – 441 К; 2 – 731 К; 3 – 876 К; 4 – 1021 К; 5 – 1166 К; 6 – 1311 К; 7 – 1456 К; 8 – 1601 К; 9 – 1891 К; 10 – 2036 К; 11 – 2181 К; 12 – 2327 К; 13 – 1891 К; 14 – 1601 К; 15 – 1456 К; 16 – 1311 К; 17 – 1021 К; 18 – 876 К

В рамках модели была проведена оценка концентраций и эмиссии оксидов азота на основе механизма Я.Б. Зельдовича. Наибольшая концентрация NO_x наблюдается в зоне горения, что и естественно, поскольку именно здесь имеет место наибольшая температура.

Технология дожигания в закрученном потоке с использованием ИВР может быть применена и в печах для плавки стали.

Так, в четвертой главе представлены результаты численного модели-

рования газодинамики, тепломассообмена и горения в дуговой электростале-плавильной печи постоянного тока ДПС-12, которая проектировалась для ОАО «ВКМ-Сталь» (г. Саранск).

В отличие от трехфазных дуговых сталеплавильных печей переменного тока, ДПС-12 имеет один вертикально расположенный сводовый электрод, который закреплен в корпусе электрододержателя и через отверстие в центре свода введен в плавильное пространство электропечи.

Установка на данной печи вихревого радиационного инжектора с одной стороны, позволит обеспечить максимально полное дожигание горючих компонентов атмосферы печи, интенсивную передачу тепла металлу и экономии электроэнергии, а с другой стороны – рациональная организация процесса приведет к тому, что часть восстановительных газов будет поступать в зону дожигания вдоль поверхности электрода, защищая его тем самым от окисления.

На рис. 7 показана схема дуговой сталеплавильной печи постоянного тока ДПС-12, одновременно являющаяся схемой расчетной области. Газы, содержащие СО, поступают в расчетную область через условную поверхность 7. Для дожигания горючих компонентов печи на ее своде установлен кольцевой ИВР 3. Подача окислителя в ИВР производится тангенциально при помощи восьми равномерно расположенных по его окружности сопел. Во избежание заклинивания электрода сводовое отверстие для него имеет больший диаметр, т.е. вокруг электрода имеется зазор 9. Для эвакуации продуктов сгорания в печи имеется периферийный дымоотвод 8.

С целью упрощения численной модели были приняты следующие допущения: а) задача является квазистационарной; б) суммарный коэффициент диффузии один и тот же для топлива, окислителя и продуктов сгорания; в) химическая реакция проходит в одну стадию без учета диссоциации продуктов сгорания; г) теплообменом излучением можно пренебречь.

Первое предположение принято в связи с тем, что в период плавления стали, а именно он характеризуется выделением из ванны печи горючих компонентов, температурные и газодинамические граничные условия практически не изменяются во времени.

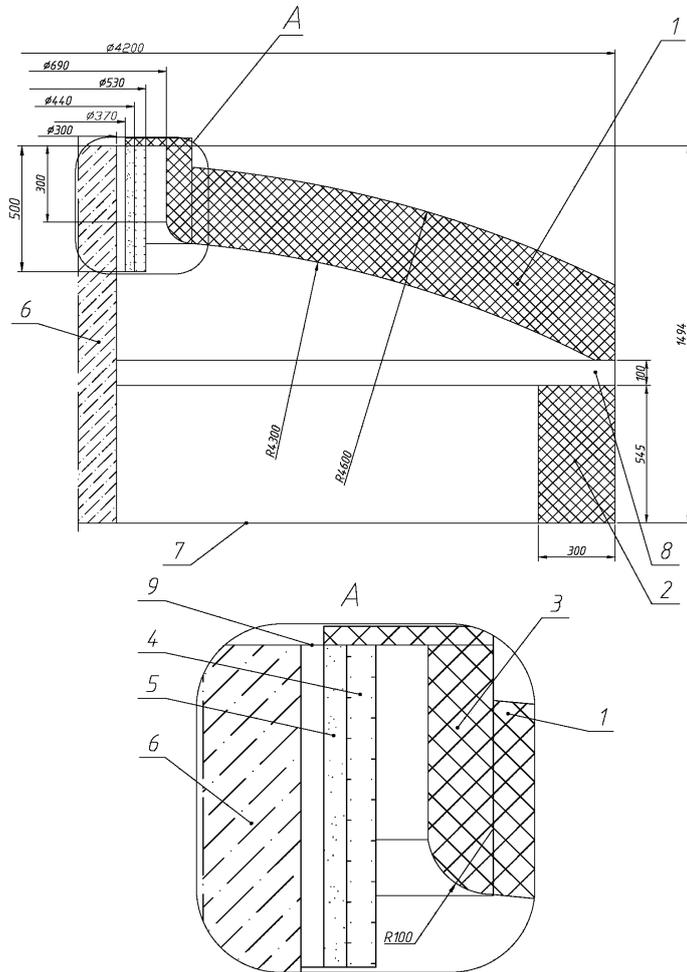


Рис. 7 Схема печи ДПС-12: 1. Свод печи; 2. Стена печи; 3. ИВР; 4. Электрододержатель; 5. Набивка; 6. Электрод; 7. Условная поверхность; 8. Периферийный дымоотвод; 9. Цилиндрическая щель между электродом и набивкой

Последнее допущение является достаточно грубым, но может быть принято в силу следующих обстоятельств: в задаче не рассчитывается тепловой поток на поверхность шлака (в задаче присутствует только условная поверхность, через которую в расчетную область поступает газ, содержащий горючие компоненты, см. рис. 6); целью исследования является, в первую очередь, картина движения газов в рабочем пространстве печи, на которую излучение, в связи с низкой степенью черноты газа, влияет незначительно.

В остальном постановка задачи схожа с таковой для рассмотренной выше задачи по моделированию процесса дожигания в нагревательной печи.

Решение поставленной задачи производили методом «контрольного объема» Сполдинга–Патанкара на адаптивной сетке с помощью вычислительного комплекса PHOENICS.

Исследование показало, что при первоначальном варианте размера зазора (см. рис. 7), равного 35 мм, факел на выходе из ИВР раскрывается на своде. Вместе с тем, данный вариант не может считаться рациональным по следующим причинам: через зазор за счет создавшегося в результате работы ИВР разрежения в печь поступает воздух. Поступивший через зазор воздух движется вдоль электрода вниз к поверхности шлака, и тем самым создается локальное окислительное газовое кольцо вокруг электрода. Учитывая высокий уровень температур в печи, окислитель вероятнее всего вступит в химическую реакцию с углеродом электрода и, в конечном счете, это приведет к повышенному расходу электродов. Кроме того, поступающий через зазор воздух вызывает весьма существенное захлаживание печи.

Для устранения подсоса воздуха через зазор могут быть применены специальные уплотняющие устройства, называемые сводовыми уплотняющими кольцами. Наиболее распространенными являются две конструкции кольца, изображенные на рис. 8а и 8б (далее конструкции «а» и «б»).

Был проведен ряд вычислительных экспериментов с целью выяснения влияния конструкции сводового кольца и величины зазора между внутренней поверхностью кольца и электродом на характер движения газов и теплообмена в печном пространстве. Показано, что конструкция кольца и величина зазора оказывают достаточно сильное влияние как на количественную, так и на качественную картину движения газов и теплообмена. В частности, при зазоре 35 мм вне зависимости от конструкции кольца воздух, поступающий через зазор, распространяется вдоль электрода, что в результате приведет к повышенному расходу электродов. А при зазоре 7 мм с кольцом конструкции «б» имеет место противоположная картина — восстановитель-

ные газы из ванны поднимаются вверх вдоль электрода и тем самым защищают его от окисления. Таким образом, наиболее рациональной является конструкция «б» с минимально возможной величиной зазора.

Для всех рассчитанных вариантов были получены зависимости температуры и концентрации кислорода от радиальной координаты в разных сечениях по высоте печи при различных конструкциях кольца и зазора. Показано, что эжекционная способность снижается при уменьшении зазора, и при умеренных величинах зазора ($10 \div 15$ мм) находится в пределах $1,35 \div 1,5$. При зазоре 1 мм — не менее 1,25.



Рис. 8 Конструкция сводовых колец: охлаждающее (а); в бетонном блоке (б)

1. Электрод; 2. Сводовое кольцо; 3. Свод печи

Вместе с тем, даже при установленном на своде кольце с зазором 1 мм конструкции «б», в печь поступает чрезмерное количество окислителя, при этом средняя температура составляет всего 1500 К. Такого значения температуры недостаточно для процесса плавления. Слишком большое количество окислителя будет приводить и к значительному окислению металла.

Для выяснения влияния расхода подаваемого через сопла ИВР окислителя на характеристики работы печи производили расчет четырех вариантов (во всех вариантах использовалось кольцо конструкции «б»): а) при расходе окислителя $8 \text{ м}^3/\text{мин}$ и зазоре зазора 35 мм; б) при расходе окислителя $8 \text{ м}^3/\text{мин}$ и зазоре зазора 1 мм; в) при расходе окислителя $4,8 \text{ м}^3/\text{мин}$ и зазоре

зазора 35 мм; г) при расходе окислителя $4,8 \text{ нм}^3/\text{мин}$ и зазоре зазора 1 мм. При расходе $4,8 \text{ нм}^3/\text{мин}$ коэффициент расхода окислителя равен единице.

Расчеты показали, что средняя температура вблизи зеркала металла при зазоре $1 \div 7$ мм и расходе окислителя $8 \text{ нм}^3/\text{мин}$ составляет $1800 \div 1900 \text{ К}$, что близко к технологическому уровню. Однако при данном расходе окислителя в печи имеет место достаточно высокая (около 5%) концентрация кислорода. Уменьшение расхода окислителя, подаваемого в ИВР, до стехиометрического уровня повышает температуру и снижает концентрацию окислителя. С учетом того, что через зазор в печь поступает воздух, в период плавления может оказаться полезной подача природного газа в печь. Природный газ может быть подан, например, через зазор между электродом и кольцом. В этом случае желательно в систему автоматического управления включить контур регулирования расхода природного газа по датчику наличия кислорода на выходе из печи. В период нагрева, когда в атмосфере печи отсутствует СО, подача природного газа позволит снизить расход электроэнергии, т.е., по сути, ИВР в этот момент будет работать как горелочное устройство.

Было исследовано и влияние разрежения на выходе в периферийный дымоотвод на картину движения газов и тепломассообмен в печи. Оказалось, что изменение величины разрежения в пределах от 0 до 20 Па оказывает незначительное влияние на все параметры (изменение давления, температуры, концентраций компонентов, интегральных характеристик составляет менее 1%).

Проведенное в данной главе исследование позволило сформулировать следующие рекомендации: а) в рабочем пространстве печи за счет работы ИВР создается разрежение, поэтому при монтаже необходимо уделить особое внимание герметизации печи; б) в связи с тем, что при работе ИВР в печь через зазор вокруг электрода подсасывается холодный воздух, рационально установить сводовое кольцо конструкции «б» для минимизации подсосов; в) в

период плавления рекомендуется подавать природный газ с целью экономии электроэнергии (например, через зазор в сводовом кольце); г) в систему автоматического управления необходимо добавить контур регулирования расхода природного газа по датчику наличия кислорода на выходе из печи.

Основные результаты и выводы

1. Проведен анализ методов дожигания горючих компонентов в плавильных и нагревательных печных агрегатах, который показал, что: а) на данный момент существует две принципиально отличающиеся технологии дожигания горючих компонентов, содержащихся в атмосфере печных агрегатов: с помощью струйной подачи окислителя и путем подачи окислителя в виде сильно закрученного потока с образованием разомкнутого факела; б) разработка эффективной технологии дожигания горючих компонентов в рабочем пространстве промышленных печей требует учета теплообмена, особенностей процесса горения и характера движения газовых потоков, что возможно только методами математического моделирования.

2. Для разработки математической модели весьма сложной газодинамической структуры, характерной для радиационного вихревого инжектора, и не менее сложных процессов горения и теплообмена, протекающих при использовании этого устройства для дожигания горючих компонентов атмосферы в камере печи, рационально использовать современные программно-вычислительные комплексы (ПВК).

3. Тестирование ПВК PHOENICS на примере решения задачи сложного сопряженного теплообмена в камерной печи периодического действия позволило сделать вывод о возможности его использования для прикладных задач металлургической теплотехники.

4. Разработана и реализована модель рабочего процесса вихревого радиационного инжектора (ИВР), установленного на плоском своде печи не-

прерывного действия, с учетом процессов движения газов, структуры турбулентности, сложного теплообмена и горения топлива. Сравнение результатов математического моделирования и опубликованных экспериментальных данных по течению закрученного потока в цилиндрической трубе показывает их удовлетворительное совпадение.

5. Проведенное с помощью модели рабочего процесса ИВР исследование позволило: а) детально исследовать процесс смешения топлива и окислителя; получить поля скоростей, температуры, концентраций топлива, окислителя, продуктов сгорания, характеристик турбулентности, оценить эжекционную способность ИВР и настильного факела; решить внешнюю задачу теплообмена в печи с плоским сводом, с установленным на нем ИВР; б) определить, что в камере инжектора генерируется турбулентность, характеризующаяся чрезвычайно высокими значениями кинетической энергии и уровня пульсаций; в) оценить концентрации оксидов азота в расчетной области; г) определить диаметр зоны дожигания и минимальное расстояние между осями ИВР (при установке в печи нескольких устройств); д) исследовать влияние диаметра ИВР и расхода окислителя на его эжекционную способность.

6. Разработана математическая модель процесса дожигания с использованием ИВР в дуговой сталеплавильной печи постоянного тока ДПС-12, проектируемой для ОАО «ВКМ-Сталь» (г. Саранск). Путем вариантных расчетов с помощью вышеуказанной модели исследовано влияние различных параметров на качество сгорания, температуру и состав атмосферы печи. На основании проведенного численного исследования были сформулированы рекомендации по рациональным режимам работы печи ДПС-12 с установленным на ней инжектором.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Математическое моделирование газодинамики закрученного потока в рабочем пространстве печи, оснащенной вихревым инжектором / С.В.Лешинин, В.А. Арутюнов, И.А. Левицкий, Т.Б. Ибадуллаев // Рациональное использование природного газа в металлургии. Международная научно-практическая конференция. - М.: МИСиС, 2003. - С. 105-112.
2. Об одной области применения принципа вихревой камеры в металлургии / В.А. Арутюнов, И.А. Левицкий, С.В. Лешинин, Т.Б. Ибадуллаев // Изв. Вузов. Цветная металлургия. - 2005. - №5. - С. 70-75.
3. О применении принципа вихревой камеры в металлургии / В.А. Арутюнов, И.А. Левицкий, С.В. Лешинин, Т.Б. Ибадуллаев // Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со Дня Рождения М.А. Глинкова. 3-я международная научно-практическая конференция. - М.: МИСиС, 2006. - С. 131-136.
4. Ибадуллаев Т.Б., Арутюнов В.А., Левицкий И.А. О математическом моделировании сложного теплообмена в камерной печи периодического действия // Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со Дня Рождения М.А. Глинкова. 3-я международная научно-практическая конференция. - М.: МИСиС, 2006. - С. 297-302.
5. Математическая модель рабочего процесса радиационного вихревого инжектора, установленного в своде печи / Т.Б. Ибадуллаев, В.А. Арутюнов, И.А. Левицкий, С.В. Лешинин // Изв. Вузов. Цветная металлургия. - 2006. - № 3. - С. 68-75.
6. Ибадуллаев Т.Б., Арутюнов В.А., Левицкий И.А. Математическое моделирование сложного теплообмена в камерной печи периодического действия // Изв. Вузов. Черная металлургия. - 2006. - №7. - С. 49-52.