УДК 622.52.03, 58.011

Т.Б.ИБАДУЛЛАЕВ
Московский государственный институт стали и сплавов

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО ВИХРЕВОГО ИНЖЕКТОРА

Изложен разработанный в институте способ дожигания горючих компонентов атмосферы промышленной печи с использованием устройства, названного вихревым радиационным инжектором. Способ заключается в следующем. Высокоскоростной, сильно закрученный поток кислорода под сверхкритическим давлением подается в цилиндрическую камеру, один торец которой закрыт, а другой заканчивается криволинейным ультрадиффузором того типа, который используется в плоскопламенных горелках. В результате сильной крутки и под действием высоких скоростей в камере происходит распад вихря и создается сильное разрежение в приосевой области, под действием которого печные газы, содержащие горючие компоненты, подтекают к инжектору. Часть из них поступает в камеру, где смешивается с кислородом и сгорает. Поступающие в зону дожигания газы подсасываются также в плоский настильный факел, образующийся в результате истечения закрученного потока из криволинейного диффузора, как это имеет место в плоскопламенных горелках.

Представлена разработанная на основе вычислительного комплекса PHOENICS математическая модель газодинамики и массообмена в рассматриваемом течении. Описаны некоторые особенности модели, связанные с чрезвычайной сложностью явления.

Developed in MISA the method of post-combustion of industrial furnace atmosphere combustible components using the device named vortical radiating injector is presented. The method is as follows. High-speed, strongly swirling oxygen flow moves, under supercritical pressure, in the cylindrical chamber. One end of this chamber is closed, and the other comes to curvilinear funnel of the type used in the flat flame burners. As a result of strong swirling and under the action of high velocity in the chamber a vortex breakdown takes place, and the strong depression near axis is created. Under the action of this depression the furnace gases, containing combustible components, flow to injector. One part of them comes into the chamber, where it mixes up with oxygen and burns down. The other part is being sucked in the flat flame formed by the discharge of a swirling flow from the funnel, as it takes place in flat flame burners.

The mathematical model of the gas flow and mass transfer based on the computer code PHOENICS has been developed. Some features of model resulting from the extreme complexity of the phenomenon are described.

Дожигание горючих газов, содержащихся в атмосфере технологического аппарата, представляет собой актуальную проблему для черной и цветной металлургии как с точки зрения энергосбережения, так и с точки зрения снижения вредных выбросов. По этим же соображениям во многих случаях оказывается целесообразным применение кислорода в качестве окислителя для дожигания указанных компонентов печной атмосферы.

С теплотехнической точки зрения, речь идет об организации сжигания низкоскоростного высокотемпературного потока весьма бедного (крайне низкокалорийного) топлива в большом объеме. С одной стороны, применение кислорода в качестве окислителя способствует рациональной организации этого процесса, с другой стороны, низкое содержание горючих компонентов требует вовлечения в поток кислорода большого количества печных газов, что усложняет решение этой задачи.

Достаточно простой и эффективный способ решения указанных проблем разработан в Московском институте стали и сплавов

в сотрудничестве с АО «Новолипецкий металлургический комбинат» и компанией «Air Products & Chemicals Inc.» (США). На основе этого способа разработано несколько устройств, предназначенных для различных технологических аппаратов.

Вихревой радиационный инжектор (см. рисунок) состоит из диффузора 4 и цилиндрической части 1, оснащенной двумя кислородоподающими трубами 2. Корпус диффузора изготовлен из огнеупорного материала типа корунда, муллитокорунда, либо из металла (в этом случае он должен быть водоохлаждаемым), его внутренняя поверхность футерована. Инжекторное устройство установлено внутри печного пространства и направлено к металлу. Кислородсодержащий газ подается в устройство через трубопроводы 2 и сопла 3 при помощи подающего аппарата. Кислородсодержащий газ опускается вниз, раскручивается, и центробежная сила в комбинации с действием эффекта «распада вихря» создают поток, стелящийся по внутренней поверхности, а в приосевой области диффузора создается разрежение.

За счет этого разрежения печная атмосфера вовлекается в закрученный поток кислородсодержащего газа. Горючие компоненты, например монооксид углерода и водород, смешиваются с кислородом, образуют горючую смесь и сгорают. Нагретая внутренняя поверхность создает благоприятные условия для дожигания монооксида углерода и водорода.

Эффективность данного метода дожигания горючих компонентов атмосферы в сталеплавильных агрегатах обусловлена,

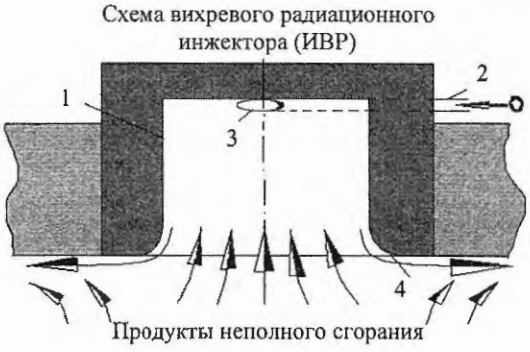


Схема вихревого радиационного инжектора

во-первых, тем, что интенсивное каталитическое сгорание монооксида углерода и водорода происходит на керамической поверхности диффузора, которая нагревается и интенсивно излучает тепло на металл. В этих условиях дискретный спектр излучения газа (диоксида углерода и молекул воды) преобразуется в непрерывный спектр излучения поверхности диффузора. Во-вторых, тангенциальная подача кислородной струи создает необходимый вакуум в приосевой области диффузора, за счет которого происходит интенсивный подсос горючих компонентов из атмосферы печи, их смешивание с потоком кислорода на внутренней поверхности диффузора и сгорание.

Использование предложенного метода и устройства позволяет увеличить эффективность дожигания горючих компонентов атмосферы в металлургических агрегатах на 30-40 %.

Чрезвычайно сложный характер течения в инжекторе, в особенности с учетом эффектов сжимаемости, обусловленных критическим характером истечения кислорода, делает невозможным получение не только точных, но и приближенных аналитических решений задачи расчета газодинамики. Разумеется, актуальной задачей является разработка численной модели.

Для описания процессов движения газов, массообмена, а также для описания модели турбулентности может быть использовано обобщенное дифференциальное уравнение, в котором зависимые переменные подчиняются обобщенному закону сохранения. Обозначив зависимую переменную Ф, получим обобщенное уравнение в виде

$$\frac{d}{dt}(\rho\Phi) + \mathrm{div}(\rho u\Phi) = \mathrm{div}(\Gamma_\Phi \,\mathrm{grad}\,\Phi) + S_\Phi, \quad (1)$$

где Γ_Φ – коэффициент переноса для переменной Ф; S_Φ – источниковое слагаемое.

Основные допущения, принятые в модели, следующие:

1. Задача является стационарной.

2. Движение среды происходит при отсутствии горения и в адиабатных условиях (последнее является довольно грубым допущением, приемлемым лишь на первом

этапе разработки математической модели). Таким образом,

$$pv^n = \text{const}, \qquad (2)$$

где n – показатель адиабаты.

3. Использована $k-\varepsilon$ модель турбулентности.

Учитывая, что задача является стационарной, уравнение (1) в цилиндрических координатах запишем в виде:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\rho r v \Phi)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}(\rho w \Phi)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \Phi)=$$

$$=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}\right)+$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}\right)+S_\Phi, \qquad (3)$$

где Φ – зависимая переменная (u, v, w, k, ε, C); u, v, w – составляющие скорости по координатам r, θ, x; r – радиальная координата; θ – угловая координата; x – аксиальная координата; k – кинетическая энергия пульсаций на единицу массы, м^2/с^2; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, м^2/с^3; C – концентрация примеси, кг/кг; ρ – плотность жидкости.

Для численного решения системы (2)-(3) воспользуемся программным комплексом PHOENICS. При этом необходимо задать геометрию объекта математического моделирования и соответствующие граничные условия.

Для численного решения рассматриваемой задачи применялся метод контрольного объема, так как он позволяет получить достаточно точное численное решение на весьма грубых сетках. Для реализации данного метода вся расчетная область разбивалась на конечное число элементарных объемов – ячеек.

На рисунке представлена описанная расчетная область поперечного разреза вихревого инжектора. Закрашенные области являются заблокированными. Это достигается заданием в заблокированной области пористости, равной нулю. Таким образом предотвращается течение жидкости через эту зону. На границе заблокированной области PHOENICS автоматически вводит нулевые значения скоростей, выполняя тем самым условия непроницаемости и прилипания на граничных ячейках.

Поскольку расчет данной математической модели проводился при помощи программного пакета PHOENICS, были активизированы стандартные граничные условия, запрограммированные в PHOENICS. Представление граничных условий в PHOENICS имеет ряд особенностей:

- PHOENICS всегда трактует граничные условия как своего рода источник рассматриваемого параметра (массы, импульса, энергии, химических компонент, турбулентной энергии и др.), т.е. он не вводит в расчет непосредственно граничные условия;
- поскольку источники вводятся в центрах контрольных объемов, «граничные условия» не рассматриваются непосредственно на границах.

Конечно, приграничные объемы могут быть сделаны достаточно малыми, чтобы смещение граничных условий от стенки было несущественным, но PHOENICS имеет другие эффективные пути для достижения этих целей.

Основой вычислительной процедуры системы дифференциальных уравнений (2) является неявная конечно-разностная схема, приводящая к консервативным системам алгебраических уравнений. Их получают при последовательном разбиении области течения на небольшие дискретные элементы путем создания конечно-разностной сетки в направлениях координатных осей и в результате интегрирования дифференциальных уравнений переноса по специально выделенным ячейкам сетки или контрольным объемам.

В программном пакете PHOENICS используется процедура SIMPLE. Как правило, определенные из решения конечно-разностного аналога уравнения сохранения импульса поля скоростей u^*, v^*, w^* не удовлетворяют уравнению неразрывности. Для их дополнительной коррекции используется уравнение поправки давления. Поправка давления получается именно из разностного аналога уравнения неразрывности, что явля-

ется основной отличительной чертой процедуры SIMPLE.

Алгоритм решения задачи гидродинамики, основанный на методе SIMPLE, состоит из следующих этапов:

1) ввод предположения о поле скорости;

2) расчет коэффициентов уравнения количества движения, расчет псевдоскоростей, определяющихся значениями скоростей в соседних близлежащих точках;

3) расчет поля давления;

4) расчет значений скоростей по полученному полю давления;

5) решение уравнения для поправки давления;

6) коррекция поля скорости;

7) решение дискретных аналогов для других Ф (в нашем случае концентрации вовлеченных в поток печных газов, а также характеристик турбулентности k и ε и коэффициентов переноса);

8) возврат к п.2 и повторение расчета до наступления сходимости.

Научные руководители: д.т.н. проф. *В.А.Арутюнов*, к.т.н. доц. *И.А.Левицкий*