УДК 662.61:621.18.018.54

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ДОНЕЦКОГО ДЛИННОПЛАМЕННОГО УГЛЯ В КОТЛЕ ТП-109 КУРАХОВСКОЙ ТЭС, ОСНАЩЕННОГО НИЗКОЭМИССИОННЫМИ ГОРЕЛКАМИ

Балакин В.В., Хохлов А.В., Кузнецов А.В., Иваненко В.В., Ткаченко А.А., Федотов П.Н.

ОАО «ЭнергоМашиностроительный Альянс» (ОАО «ЭМАльянс»), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье приводятся результаты численного моделирования топочного процесса котла ТП-109, оснащенного вихревыми низкоэмиссионными горелками. Целью моделирования являлось изучение особенностей смешения в таких горелках, изучение влияния этих особенностей на протекание топочного процесса в целом и на локальные характеристики среды вблизи экранов топочной камеры, создающие предпосылки к шлакованию. Рассмотрены различные схемы организации топочного процесса с перераспределением топлива по ярусам горелок и подачей газов рециркуляции в один из каналов горелок. Получены интегральные и локальные характеристики топочного процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Численное моделирование топочного процесса пылеугольных котлов позволяет решить ряд актуальных проблем, возникающих как при проектировании новых котлов, так и при реконструкции существующих. К наиболее значимым из них можно отнести проблему снижения выбросов вредных веществ в атмосферу (таких как оксиды азота и серы), а также проблему шлакования поверхностей нагрева. Поскольку нормативный метод [1] проектирования котлов разрабатывался на основании экспериментальных данных для котлов с традиционными схемами организации топочного процесса, его использование для котлов с нетрадиционными схемами сжигания (двух- и трехступенчатое сжигание, использование низкоэмиссионных горелок и т. д.) не дает достоверных данных о характеристиках топочного процесса. Применение численного моделирования позволяет оценить различные варианты организации топочного процесса и определить тепловые и экологические характеристики топочного процесса.

В настоящее время производится реконструкция котла ТП-109 Кураховской ТЭС, основной целью которой является повышение экономичности котла с уменьшением выбросов оксидов азота до 500 мг/м^3. Для оценки характеристик различных схем организации топочного процесса было проведено их численное моделирование, по результатам которого была проведена оценка целесообразности применения той или иной схемы на данном котле.

КОНСТРУКЦИЯ КОТЛА И ОПИСАНИЕ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА

Котел ТП-109 имеет Т-образную компоновку с двухсторонним отводом газов из топки. Топочная камера разделена двусветным экраном на две полутопки. Нижняя часть каждой полутопки выполнена в виде «холодных» воронок. Основным топливом для этого котла является донецкий длиннопламенный уголь с $Q_н^p = 21.12 МДж/кг (5045 ккал/кг)$, $W^p = 14\%$, $A^p = 27\%$, $V_Г = 40\%$, $N^p = 0.78\%$, $S^p = 1.30\%$.

В ходе реконструкции на котле будет установлено 16 новых низкоэмиссионных вихревых горелок, расположенных в два яруса на боковых стенах топки. Для дополнительного снижения выбросов оксидов азота до 500 мг/м^3, помимо низкоэмиссионных горелок, рассматривались схемы с двухступенчатым сжиганием, организованным за счет перераспределения топлива между ярусами горелок.

Каждая низкоэмиссионная горелка (рис.1) имеет два регулируемых канала вторичного воздуха (внешний 5 и внутренний 4) и канал газов рециркуляции 3, расположенный между внутренним каналом вторичного воздуха и каналом аэросмеси 2. Горелка также оснащена растопочной мазутной форсункой, воздух к которой подводится по центральному каналу 1.

Горелки нижнего яруса оснащены трубками для подвода природного газа, которые расположены внутри внутреннего канала вторичного воздуха.

Низкий выход оксидов азота на таких горелках достигается за счет следующих особенностей:

© Балакин В.В., Хохлов А.В., Кузнецов А.В., Иваненко В.В., Ткаченко А.А., Федотов П.Н.

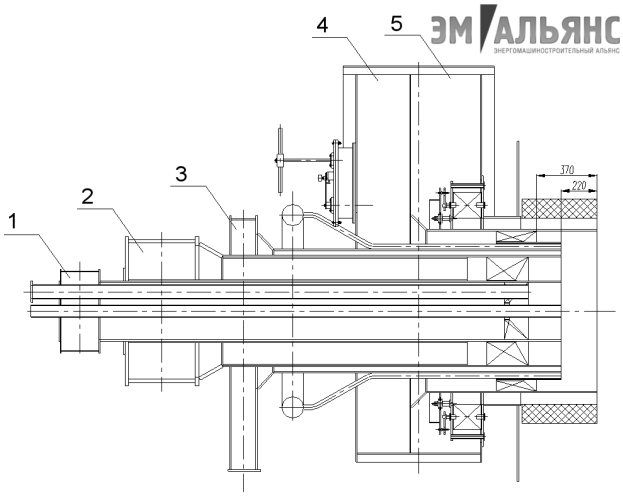

Рис.1 Низкоэмиссионная горелка

1. Параметры крутки в каналах вторичного воздуха и аэросмеси выбраны так, чтобы обеспечить подсос высокотемпературных продуктов сгорания к устью горелки для разогрева и воспламенения мелких фракций пыли, находящихся на внутренней границе пылевоздушной струи, до начала смешения аэросмеси с вторичным воздухом.

2. За счет подачи прямотоком низкотемпературных газов рециркуляции между вторичным воздухом и аэросмесью организуется задержка подмешивания вторичного воздуха к аэросмеси на начальном участке факела.

3. За счет разделения вторичного воздуха на два канала и равенства количества движения обоих потоков обеспечивается ступенчатое подмешивание вторичного воздуха к воспламенившейся пыли.

В результате, за счет подачи в горелку газов рециркуляции и некоторого затягивания горения на горизонтальном участке обеспечивается снижение температурного уровня в ядре горения.

Впервые подобная горелка с «экранным» вводом инертного газа была установлена в единственном экземпляре на котле ТП-81 Новосибирской ТЭЦ-4 [2]. При сжигании топлива 2СС и подаче 10% газов рециркуляции выбросы оксидов азота в зоне горелок были снижены на 17%. В дальнейшем подобными горелками были оснащены котлы к блокам 300 и 800МВт на ТЭС «ИН-КОУ» и «Суйчжун».

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ДОНЕЦКОГО ДЛИННОПЛАМЕННОГО УГЛЯ

Известно, что донецкий уголь склонен к шлакованию топки и, как следствие, это может привести к локальной коррозии экранов. В связи с этим фактом, на стадии проектирования был проведен подробный численный анализ топочного процесса с использованием математических моделей газодинамических и физических процессов, протекающих в горелках и в топке.

При проведении численного моделирования топочного процесса котла ТП-109 были поставлены следующие цели:

1. Подробное изучение начального участка факела, начиная с устья горелки внутри амбразуры.
2. Определение интегральных параметров топочного процесса по высоте топки и в ее объеме для различных схем сжигания топлива.
3. Изучение состояния среды вблизи экранов топки.

Для выполнения поставленных целей была разработана методика расчета газодинамических и физических процессов, протекающих при сжигании угля в топочной камере. Методика реализуется в пакете прикладных программ ANSYS Fluent, который обеспечивает всю необходимую для такого расчета функциональность.

Для уменьшения размерности, данная задача была разделена на две части. Сначала рассчитывалось течение газа внутри горелок с присоединенным внешним объёмом, достаточным для разрешения течения в зоне обратных токов, выхода и горения летучих и воспламенения кокса. На рис.2 приведена характерная картина течения в горелке и поле температур. Всего было рассчитано по 3 варианта горелок верхнего и нижнего яруса, чтобы учесть конструктивные и режимные отличия.

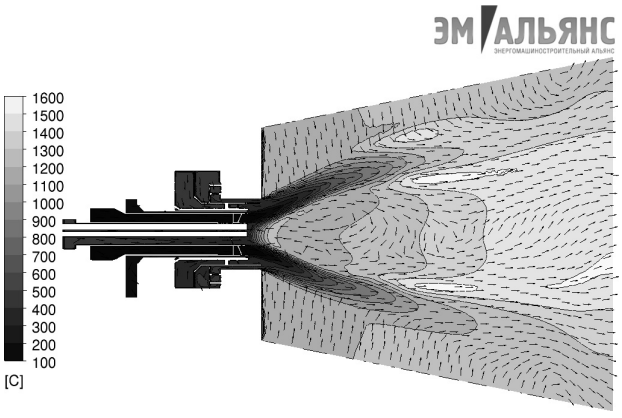

Рис.2 Поле температур в горелке

По результатам расчетов горелок были получены профили скоростей, температур и концентраций, необходимые для моделирования топочной камеры. Характерный профиль скорости на выходе из горелки представлен на рис.3.

Далее, с использованием полученных входных профилей параметров потока производились расчеты половины топочной камеры (полутопки), ограниченной двусветным экраном, для различных схем организации топочного процесса. Для каждого расчета топки использовались профили

параметров потока, полученные из расчетов горелок верхнего и нижнего ярусов. Необходимое направление закрутки потоков в топке задавалось с помощью геометрических преобразований профилей. Каждый пространственный профиль включал в себя набор из 5 интерфейсов для каждой из 8 горелок и имел около 8000 точек.

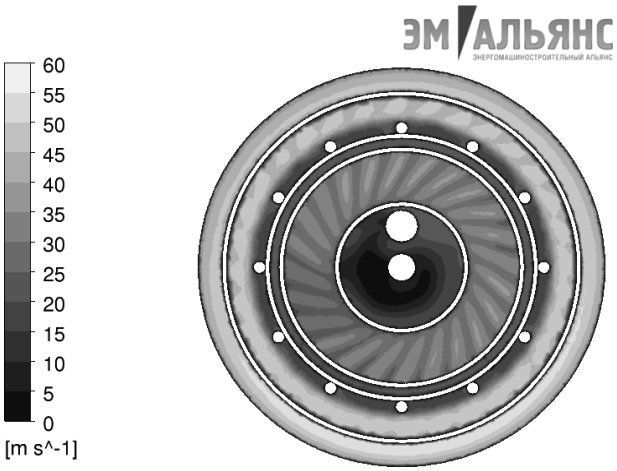

Рис.3 Профиль скорости на выходе из горелки

Для расчета каждого варианта использовался набор из трех одинаковых расчетных сеток: для горелок верхнего и нижнего яруса и для топки. Число ячеек каждой из сеток составляло около 8.5 млн.

Для моделирования частиц угля применялся метод Лагранжа. Из каждой точки соответствующего интерфейса горелки выпускалось 10 классов частиц в соответствии с распределением Розина-Раммлера в диапазоне 1..1000 мкм.

Механизм горения угля включал в себя 3 гетерогенных реакции, протекающие на поверхности коксовой частицы, и 3 газофазные реакции. Данный механизм определял термический эффект горения.

На основании имеющихся экспериментальных данных [3] была произведена настройка данного механизма. Для этого был выполнен ряд вспомогательных расчетов, по результатам которых были определены кинетические константы для всех реакций, входящих в используемый механизм. Основным критерием при оценке правильности настройки механизма являлось соответствие длительности различных стадий горения коксовой частицы. Всего было выделено 4 стадии: прогрев частицы, горение летучих, прогрев коксового остатка и горения коксового остатка. На рис.4 приведен график зависимости длительности каждой стадии от диаметра частицы, полученный в результате численного моделирования, а также имеющиеся экспериментальные данные.

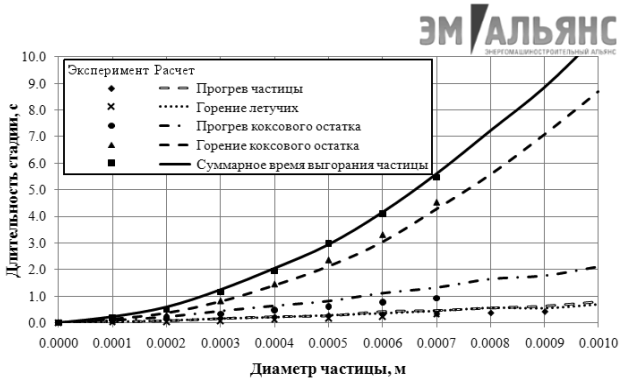

Рис.4 Длительность стадий горения частицы

Помимо приведенного выше механизма горения угля, для расчета оксидов азота и серы использовались два дополнительных многостадийных механизма, не вносящих существенного вклада в энергетический баланс системы в силу малости концентраций реагентов. Механизм образования оксидов азота включал в себя термический, быстрый и топливный пути образования, а упрощенный механизм образования оксидов серы состоял из восьми реакций, дополненных моделью частичного равновесия, и учитывал конверсию серы как из летучих, так и из частиц угля [4].

Для расчета радиационного переноса энергии в топочном объеме использовался метод дискретных ординат [4] совместно с моделью серого газа. При расчете топочной камеры излучающие свойства смеси продуктов сгорания определялись излучающими свойствами CO_2, H_2O, CO и частиц топлива [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для сравнительного анализа были рассмотрены следующие схемы организации топочного процесса:

1. Схема 1. Расходы и скорости потоков в обоих каналах вторичного воздуха горелки одинаковы. В канал газов рециркуляции подаются холодные дымовые газы в количестве 7%. Расходы пыли в горелки верхнего и нижнего ярусов одинаковы.
2. Схема 2 отличается от схемы №1 только перераспределением топлива между ярусами горелок: на нижний ярус подается 54% пыли, на верхний – 46% пыли.
3. Схема 3 отличается от схемы №2 другим перераспределением топлива между ярусами горелок: на нижний ярус подается 60% пыли, на верхний – 40% пыли.
4. Схема 4 отличается от схемы №1 только тем, что в канал газов рециркуляции вместо дымовых газов подается воздух.
5. Схема 5 отличается от схемы №1 только

тем, что в канал газов рециркуляции ничего не подается.

На рис.5 представлена зависимость изменения среднемассовой по сечению температуры в топке для всех схем сжигания. На рис.6 представлена зависимость изменения среднемассовой по сечению концентрации оксидов азота (в пересчете на стандартные условия).

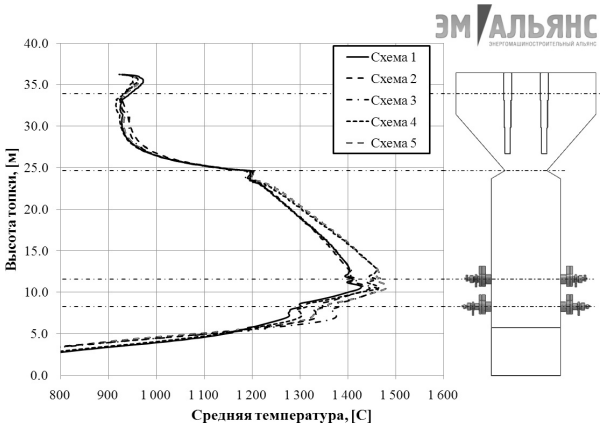

Рис.5 Изменение температуры по высоте топки

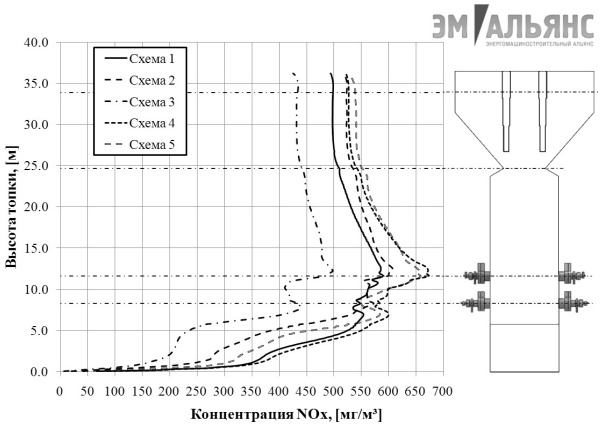

Рис.6 Изменение концентрации оксидов азота по высоте топки

При моделировании всех схем организации топочного процесса, в горизонтальном сечении горелок нижнего яруса отчетливо наблюдался подсос продуктов сгорания к устью канала аэросмеси с температурой, существенно превышающей температуру воспламенения пыли (>700ºС). В схемах 1, 2 и 3 (с подачей газов рециркуляции) тепловыделение на горизонтальном участке, по сравнению с со схемами 4 и 5, несколько растянуто, а уровень максимальных температур в ядре факела на 50..80ºС ниже, то есть наблюдаются факторы, способствующие уменьшению генерации оксидов азота: раннее воспламенение пыли, замедленное подмешивание вторичного воздуха и пониженный уровень максимальных температур в зоне горелок, где образуется основная часть оксидов азота. Концентрация оксидов азота в зоне активного горения для схемы 1 на 15% ниже, чем для схем 4 и 5, а на выходе из топки ниже на 5-7%. Тем не менее, абсолютное значение выбросов оксидов азота по результатам расчета превышает 500 мг/м^3.

Следует отметить, что во всех схемах, исследованных в расчетном анализе, для горелок было заложено оптимальное соотношение количеств движения потоков на выходе из обоих каналов вторичного воздуха, способствующее постепенному подмешиванию вторичного воздуха к аэросмеси. Таким образом, использованные во всех схемах горелки соответствовали комбинированным горелкам со стадийным сжиганием топлива [5]. Испытания, проведенные на одном из котлов ТП-109 Кураховской ТЭС с установленными на нем горелками с двумя каналами по вторичному воздуху, позволили за счет перераспределения вторичного воздуха по каналам снизить выход оксидов азота с 1000 мг/м^3 до 730..760 мг/м^3.

Таким образом, установка двухпоточных по вторичному воздуху горелок с «экранным» вводом инертного газа может позволить снизить выбросы оксидов азота до 520..550 мг/м^3.

В качестве дополнительного мероприятия по снижению выбросов оксидов азота были рассмотрены схемы с перераспределением топлива между ярусами горелок (схемы 2 и 3). Как видно из рис. 5, при подаче 54% пыли в нижний ярус горелок (схема 2) наблюдается повышение средней и максимальной температуры в нижней части топки, что способствует образованию оксидов азота. Подача 54% пыли в нижний ярус должна была привести к образованию восстановительной зоны в нижней части топки с локальным избытком воздуха ниже стехиометрического. Однако из-за присосов воздуха в нижней части топки (топка не газоплотная), в области нижнего яруса горелок коэффициент избытка воздуха оказался выше стехиометрического, в результате чего генерация оксидов азота только усилилась, по сравнению со схемой 1 (см. рис.5). Дальнейшее перераспределение топлива по ярусам (схема 3) позволило достичь желаемого эффекта: не смотря на повышение средних и локальных температур в нижней части топки, концентрация кислорода оказалось недостаточной для активной генерации оксидов азота. В результате концентрация оксидов азота на выходе из топки составила 450 мг/м^3.

Учитывая, что данное топливо склонно к шлакованию, был проведен подробный анализ уровня температур и состава газа в районе экранов по всей высоте топки.

У боковых экранов, кроме межгорелочной зоны на уровне горелок II яруса на расстоянии 300 мм от экранов уровень температур составил 900..1200ºС. В межгорелочной зоне наблюдался более высокий уровень температур 1300..1350ºС. У фронтового,

заднего и двусветного экранов уровень максимальных температур составил 1350..1500ºС.

Окись углерода в районе боковых экранов практически отсутствует, а у фронтового, заднего и двусветного экранов в их центральной части концентрация окиси углерода по высоте топки изменяется от 2 до 6%.

Такая картина распределения температур и окиси углерода в пристенной зоне объясняется компоновкой горелок: большим расстоянием между горелками ($S_Г = 4.4м$) и близким расположением их от стен ($S_{СТ} = 2.4м$). При таком расположении горелок происходит наброс факела на фронтовые, задние и двусветные экраны топки. Для возможности минимизировать это явление в периферийных каналах горелок установлены поворотные тангенциальные лопаточные аппараты.

Опыт сжигания донецких каменных углей на существующих котлах показал, что ощутимое шлакование в виде сплошного шлакового покрытия толщиной до 100..150 мм появлялось при температуре в ядре факела $\vartheta_{макс} \geq 1550°C$ и при температуре вблизи стен $\vartheta \geq 1340°C$. Шлакование проявлялось в основном на уровне II яруса и несколько выше, причем периодически происходила самораспшлаковка. Экраны в районе нижнего яруса и ширмовые поверхности на выходе из топки не шлаковались. [6]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании расчетного анализа можно сделать вывод, что заложенные конструктивные и режимные мероприятия могут обеспечить выбросы оксидов азота на уровне 450 мг/м^3. При этом существенное шлакование экранов и тем более их коррозия не ожидается. После проведения реконструкции планируется проведение сравнения результатов расчетов с опытными данными с целью подтверждения результатов расчетов.

Опыт использования численного моделирования топочного процесса на нескольких котлах показал целесообразность его использования при проведении реконструкций и создании новых котлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под. ред. Н.В. Кузнецова и др., – М.: Энергия, 1973. – 296С.
2. Лисицин В.В., Пугач Л.И. и др. Промышленные исследования некоторых способов подавления оксидов азота при пылеугольном сжигании углей Сибири и Казахстана. Теплоэнергетика. – 1988. – №8.
3. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208С.
4. ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Theory Guide. – 2010.
5. Росляков П.В. Методы защиты окружающей среды: учебник для вузов / П.В. Росляков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 268 – 273.
6. Кацнельсон Б.Д., Шатиль А.А. и др. Опытное сжигание кузнецких углей в котле ТП-109 с плоскофакельными горелками. Теплоэнергетика. – 1981. – №11.