

В.М. Соболев¹, А.Ю. Снегирёв², С.В. Лупуляк², Ю.К. Шиндер²

ЗАО «Экотоп», Санкт-Петербург, Россия (1)

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия (2)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ДИФфуЗИОННОГО ФАКЕЛА ПРЯМОТОЧНО-ВИХРЕВОЙ ГОРЕЛКИ

АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена численному моделированию турбулентного диффузионного факела метано-воздушного пламени в прямоточно-вихревой горелке фирмы «Экотоп» (Санкт-Петербург). Для расчёта факела использован компьютерный код CFX (ANSYS Inc.) и многопроцессорный вычислительный комплекс Лаборатории прикладной математики и механики СПбГПУ. Выполнены расчёты стационарного факела в неограниченном пространстве при нескольких значениях коэффициента избытка воздуха, подаваемого в горелку. Результаты расчётов содержат поля скорости, средней температуры, средних концентраций основных компонентов и оксидов азота, распределения мощности тепловыделения и объёмной эмиссии теплового излучения в пространстве.

1. ВВЕДЕНИЕ

Наряду с натурными испытаниями, математическое моделирование представляет перспективный путь для оптимизации конструкции промышленного энергетического оборудования, количественной оценки его надёжности и экологической безопасности. Мощным инструментом математического моделирования являются современные компьютерные коды, предназначенные для расчета турбулентных реагирующих течений в областях сложной геометрии, допускающие возможность эффективного применения на многопроцессорных системах. Использование современного программного обеспечения, построенного с учетом эффективных моделей турбулентного горения и теплообмена, и высокопроизводительных компьютеров стало обязательным компонентом инженерной и конструкторской практики.

Одной из задач при проектировании мощных энергетических установок является снижение выхода оксидов азота (NO_x) при горении. Применение математической модели позволит понять механизмы образования оксидов азота и указать пути управления ими через конструктивные (конструкция и расположение горелок, форма и размеры топочного пространства, возврат продуктов сгорания для их «дожигания») и режимные (расходы горючего и окислителя, степень их предварительного подогрева) параметры системы. В то же время, адекватный расчёт концентраций оксидов азота возможен только в том случае, когда расчёт полей всех основных характеристик системы (поля скорости, температуры и концентраций) выполнен достаточно точно.

Цель данной работы – продемонстрировать применение современного коммерческого программного обеспечения и многопроцессорных систем для численного моделирования турбулентного горения природного газа в прямоточно-вихревой горелке большой мощности. Рассматривается горелка, спроектированная ЗАО «Экотоп» (Санкт-Петербург) для применения в агрегатах отечественных ГРЭС. Целью расчётов является анализ расходов горючего и окислителя на образование оксидов азота в пламени.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1. Конструкция горелки

Конструкция горелки (рис. 1) представляет собой цилиндрический корпус, внутри которого расположены завихрители воздуха (крыльчатка) и каналы для подачи горючего (газораспределительные трубки).

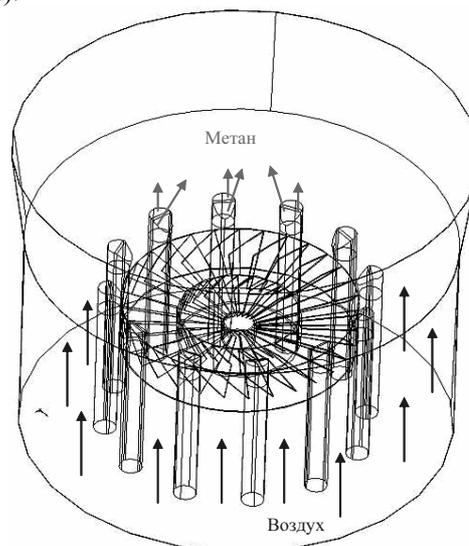


Рис. 1. Прямоточно-вихревая горелка ЗАО «Экотоп»

Поступающий в горелку воздух распределяется между завихрителями, расположенными в центре, и периферийной частью канала. Завихритель состоит из двух частей – внутренней и внешней. Каналы для подачи горючего располагаются по окружности, разделяющей внутреннюю (закрученную) и периферийную (незакрученную) части потока воздуха. Срезы каналов представлены двумя плоскостями, в которых располагаются сопла. Одна из плоскостей перпендикулярна оси канала, другая наклонена так, что внешняя нормаль обращена к оси горелки. На каждой плоскости расположены по три круглых

сопла. Рассматривались три различных случая, когда диаметр сопловых отверстий равен 11, 12 и 13 мм. Цилиндрический корпус горелки соединён с коническим диффузором.

2.2. Граничные условия. Параметры реагентов

В работе полагали, что выходное сечение диффузора находится в одной плоскости с плоской стенкой, а формирование факела турбулентного диффузионного пламени происходит в открытом неограниченном пространстве. Расчётная область представляет собой цилиндрический корпус горелки, конический диффузор и параллелепипед, одна из граней которого является твёрдой непроницаемой поверхностью (стенка), а остальные открыты в окружающую среду, давление газа в которой равно атмосферному. Предполагалось, что окружающая среда является смесью продуктов сгорания при температуре 1200°C. Температура воздуха на входе в горелку составляла 322°C, температура горячего 20°C. Массовый расход воздуха \dot{m}_{air} принимали равным 20.1 кг/с. Расход горячего \dot{m}_{fuel} выбирали с учётом значений 1.13, 1.0 и 0.85 интегрального коэффициента избытка воздуха $\alpha = \dot{m}_{air} / (\dot{m}_{air})_{st}$, где $(\dot{m}_{air})_{st}$ – стехиометрический расход воздуха для данного расхода горячего. Таким образом, рассмотрено горение в условиях недостатка окислителя, стехиометрии и избытка окислителя (в предположении идеального смешения реагентов). При стехиометрическом соотношении горячего и воздуха тепловая мощность факела составляет 58.5 МВт.

2.3. Построение расчётной сетки

Построение расчётной сетки в области с существенно разномасштабными конструктивными элементами (рис. 2) выполнено средствами Ansys ICEM CFD 5.1.

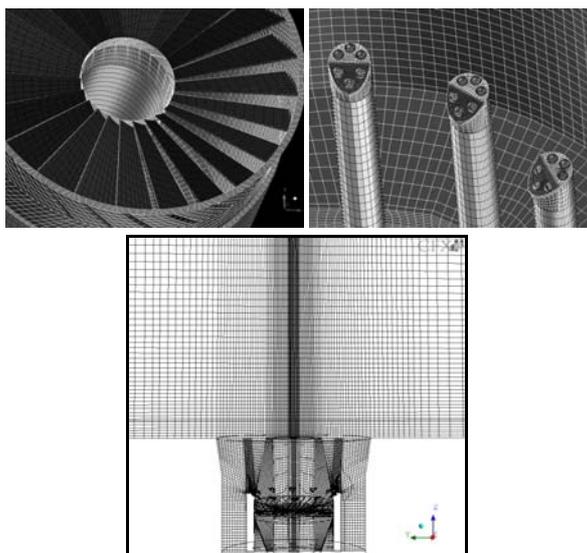


Рис. 2. Фрагменты расчётной сетки: внутренняя крыльчатка завихрителя, каналы для подачи горячего, осевое сечение горелки и прилегающей области

Рассматривается полная геометрическая модель горелки, включающая в себя крыльчатку завихрителя, газораспределяющие трубки и центральный прямой канал. В связи с большой сложностью геометрии расчётной области, для её триангуляции была использована технология композитных структурированных сеток. Данная технология заключается в том, что расчётная область разбивается на отдельные подобласти, которые триангулируются независимо друг от друга, а затем при расчёте данные передаются между подобластями при помощи интерполяции.

Были выполнены тестовые расчёты с использованием сеток с разной топологией и числом ячеек. Установлено, что сетка, использованная в данной работе (около 1 000 000 контрольных объёмов), обеспечивает приемлемо низкую чувствительность результатов к дальнейшему измельчению сетки.

2.4. Моделирование турбулентности, горения и теплового излучения

Система уравнений Навье—Стокса, описывающих течение газа, и уравнения переноса химических компонентов и энтальпии смеси решается в существенно дозвуковом приближении. С учётом целей данного этапа работы в численных расчётах использованы упрощённые модели турбулентности (k - ϵ - модель турбулентности) и горения (модель дробления вихрей). Полагали, что окисление горячего (чистый метан) протекает необратимо и в одну стадию с образованием водяного пара и углекислого газа. Перенос теплового излучения рассчитывали методом дискретного переноса с 8, 16 и 32 лучами. Для описания спектральных свойств продуктов сгорания использовали модель взвешенной суммы серых газов с тремя серыми и одним прозрачным «газом». Образование оксида азота моделировали с учётом теплового и быстрого механизмов [1, 2]. Расчёты выполнены с помощью CFX 5.7 [4] на 8-процессорном кластере (процессоры Intel Xeon 2.8 ГГц).

В работе анализируются стационарные поля осреднённых характеристик течения – скорости, температуры, концентраций основных компонентов и оксида азота.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

3.1. Поля температуры, скорости и концентраций основных компонентов

Внешний вид факела может быть представлен поверхностями уровня осреднённой температуры, как показано на рис. 3.

В численных расчётах удалось воспроизвести ярко выраженные зоны возвратного течения у оси факела вблизи горелки (так называемые рециркуляционные зоны), которые характерны для закрученных потоков и пламён (см., например, [3]). Существование рециркуляционной зоны даёт возможность резко увеличить время пребывания горячего и окислителя

в ограниченном пространстве вблизи горелки. Тем самым улучшаются условия для смешения реагентов и стабилизации факела, а также увеличивается теплонепрозрачность топочного объёма.

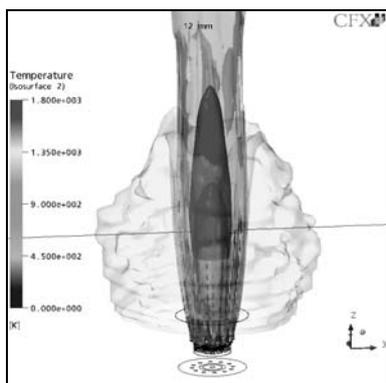


Рис. 3. Изоповерхности средней температуры 1400, 1600, 1800 К ($\alpha = 1.0$)

На рис. 4 приведено распределение температуры вдоль центральной оси горелки, а также в радиальном направлении вдоль линий, перпендикулярных оси горелки и проведённых на расстоянии 2, 3.4 и 5 м от среза горелки ($\alpha = 1.0$).

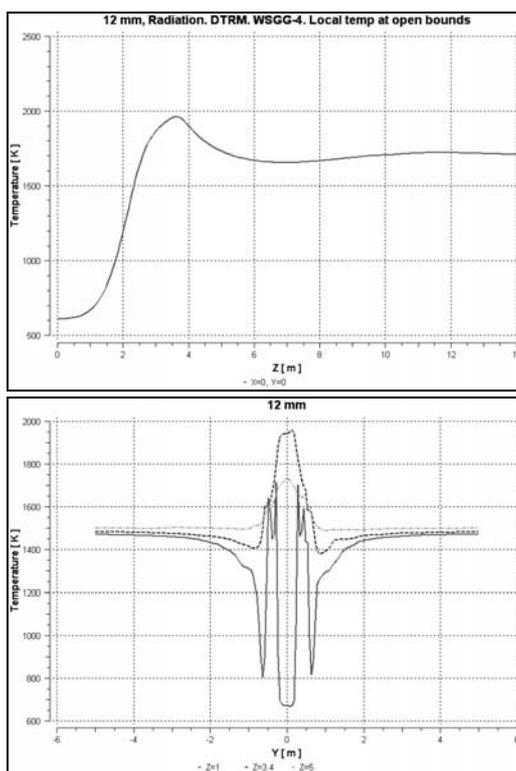


Рис. 4. Распределение средней температуры по центральной оси горелки (вверху) и на поперечных линиях, перпендикулярных оси факела (внизу: сплошная линия – 2 м от среза горелки, пунктирная – 3.4 м, штрихпунктирная – 5 м)

Расчёт показывает, что по мере увеличения расхода горючего, соответствующего снижению коэффициента избытка воздуха с 1.13 до 0.85, максимальная температура на оси факела увеличивается примерно на 100° (с 1900 К до 2000 К), причем максимум смещается ближе к горелке (расстояние от

среза горелки до максимума температуры снижается примерно с 4 до 3 м).

На рис. 5 показана концентрация метана в поперечных сечениях расчётной области, находящихся соответственно на расстоянии 10 и 25 сантиметров от сопел газораспределительных трубок ($\alpha = 1.0$). Анализ рис. 5 позволяет заключить, что закрутка потока играет существенную роль в процессе смешения горючего с воздухом.

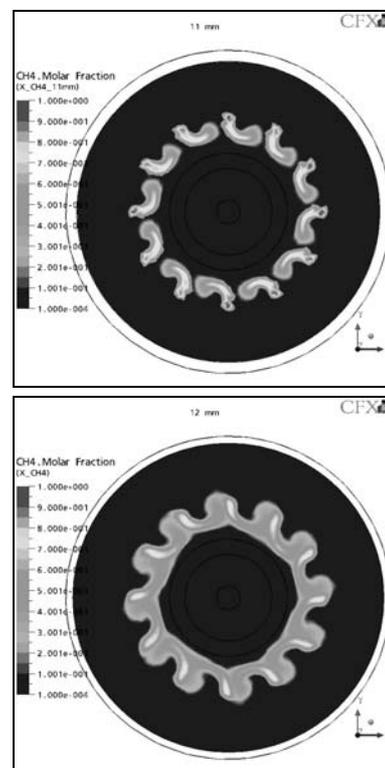


Рис. 5. Мольная доля CH_4 в поперечном сечении факела: вверху — 10 см от сопел, внизу — 25 см от сопел

Концентрация углекислого газа в продольном сечении приведена на рис. 6, который показывает сложную внутреннюю структуру факела.

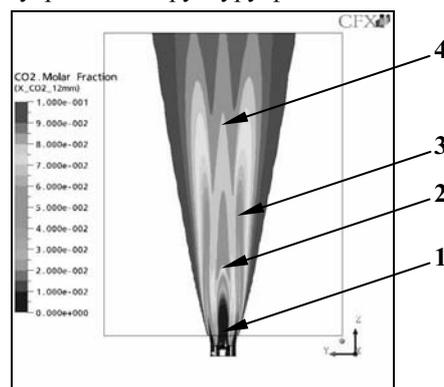


Рис. 6. Мольная доля CO_2 ($\alpha = 1.0$)

Анализ численных расчётов позволил выделить следующие зоны факела (обозначены на рис. 6).

1. Рециркуляционная зона вблизи горелки, в дальнейшем по потоку конце которой развивается максимальная температура.

2. Высокотемпературный купол, «накрывающий» рециркуляционную зону. Большая часть лучистой

энергии излучается в этой зоне, где осреднённое значение $\partial \bar{q}_j^r / \partial x_j$ достигает нескольких МВт/м³.

3. Слой смешения горючего и воздуха, окружающий зоны 1 и 2, характеризуется пониженным содержанием продуктов и повышенным содержанием реагентов.

4. Дальний след (затопленная струя горячих продуктов).

3.2. Образование оксидов азота

Основными продуктами сгорания, полученными в результате одностадийной реакции горения, являются углекислый газ и вода. Кроме того, побочным продуктом сгорания является оксид азота NO. Главными механизмами, на основании которых образование оксида азота моделируется в CFX, являются тепловой механизм Зельдовича и быстрое образование NO по механизму Фенимора [1, 2, 4]. Принято считать, что при высоких температурах (выше 1700-1800 К) большая часть оксидов азота образуется по «тепловому» механизму, в то время, как при более низких температурах приоритетным оказывается «быстрый» механизм. Примеры результатов расчёта концентраций оксидов азота в факеле приведены на рис. 7 ($\alpha = 1.0$).

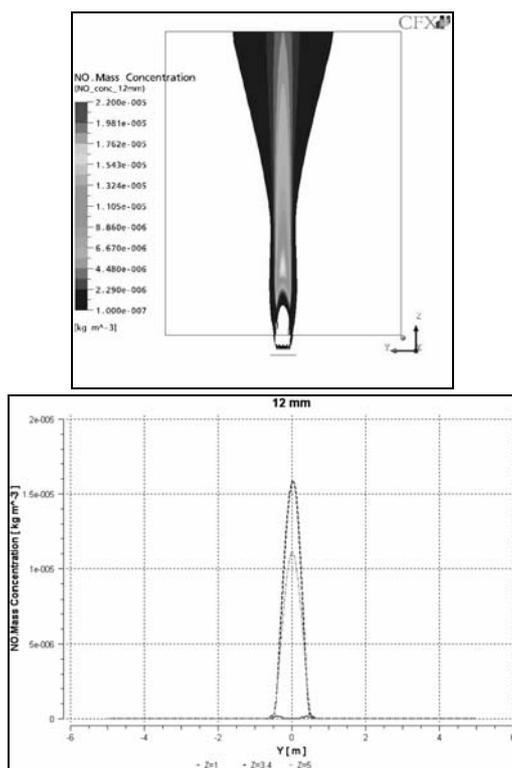


Рис. 7. Массовая концентрация NO (кг/м³) в центральном сечении факела (вверху) и на поперечных линиях, перпендикулярных оси факела (внизу: сплошная линия – 2 м от среза горелки, пунктирная – 3.4 м, штрих-пунктирная – 5 м)

Максимальная концентрация NO достигается в зоне с максимальной температурой и составляет величину порядка 15-20 мг/м³. Расчёты показали, что эта тенденция сохраняется при изменении расхода горючего, в результате чего максимальная

концентрация NO с ростом расхода горючего увеличивается. Как показано в нижней части рис. 7, концентрация NO мала (сплошная линия) на расстояниях от горелки, меньших длины рециркуляционной зоны.

В рассматриваемых условиях оказалось, что примерно две третьих общего количества NO образуется по тепловому механизму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрировано применение современного коммерческого программного обеспечения и многопроцессорных систем для численного моделирования турбулентного горения природного газа в прямоточно-вихревой горелке большой мощности (ЗАО «Экотоп», Санкт-Петербург), применяемой в агрегатах отечественных ГРЭС. Серия численных расчётов выполнена для трёх режимов работы горелки, соответствующих избыточному, стехиометрическому и недостаточному расходу воздуха (для полного окисления горючего). Для каждого из режимов получены расчётные поля средних скоростей, температур и концентраций компонентов. Определены структурные элементы факела (рециркуляционная зона, горячий «купол», слой смешения и дальний след). Установлено, что расчётные значения концентраций оксидов азота в пламени согласуются с литературными данными.

Дальнейшее совершенствование модели будет проводиться по следующим направлениям:

- 1) учёт влияния стенок топочной камеры, а также возможного взаимодействия струй разных горелок; учёт влияния силы тяжести;
- 2) учёт кинетики процессов горения и производства промежуточных продуктов (таких, как монооксид углерода) в рамках более детальной модели горения;
- 3) учёт возможного образования и последующего окисления сажи;
- 4) дальнейшая калибровка и обоснование выбора моделей турбулентности и теплового излучения;
- 5) анализ возможности локального погасания фрагментов турбулентного пламени;
- 6) нестационарные режимы горения и истечения продуктов сгорания.

По мере учёта перечисленных выше факторов следует провести численное моделирование работы горелки во всём диапазоне возможных расходов горючего и воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Turns S.R.** An Introduction to Combustion. McGraw Hill, 2000.
2. **Warnatz J., Maas U., Dibble R.W.** Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulations, Experiments, Pollutant Formation. Springer, 2001.
3. **Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N.** Swirl Flows. Abacus Press, 1984.
4. **CFX 5.7 User's Guide.** ANSYS Inc., 2004.