

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ МЕТАНА В ВИХРЕВОЙ ГОРЕЛКЕ

А.А. Аксенов¹⁾, В.И. Похилко²⁾, А.П. Тишин³⁾

- 1) Институт автоматизации проектирования РАН, Москва, Россия
2) Институт математического моделирования РАН, Москва, Россия
3) ЦНИИМАШ, г.Королев, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассмотрено численное моделирование горения метана с низкой эмиссией оксидов азота в факеле вихревой газовой горелки и моделирование сжигание метана в водогрейном котле при работе группы горелок. Изучено образование зоны возвратного течения на оси вихревой горелки. Обнаружено изменение зоны в зависимости от наличия и отсутствия горения топлива. Исследовано влияние совместной работы горелок в котле на эмиссию оксидов азота. Получено увеличение эмиссии оксидов азота от каждой горелки при увеличении количества работающих горелок в котле. Расчеты выполнены с помощью программного комплекса *FlowVision*.

1. ВВЕДЕНИЕ

При сжигании метана в котлах тепловых электростанций образуются оксиды азота двух типов – так называемые "быстрые" и термические. Термические оксиды в значительных количествах образуются при окислении азота воздуха кислородом при высокой температуре (выше 1600К). Быстрые оксиды азота образуются в результате сложных многоступенчатых реакций на фронте пламени и их выработка в основном зависит от соотношения продуктов сгорания, метана и воздуха вблизи фронта пламени.

Основным механизмом образования оксидов азота является окисление азота при высокой температуре. Одним из наиболее эффективных способов снижения эмиссии оксидов азота, используемым на практике, является двухступенчатое сжигание (ДС) метана. ДС заключается в предварительном сжигании метана при недостатке кислорода (первая ступень процесса сжигания) и с последующим дожиганием метана во вторичном воздухе (вторая ступень).

Двухступенчатое сжигание метана реализуется на практике разнообразными способами, наиболее перспективным из которых является использование горелок, одновременно подающих в котел богатую топливную смесь и вторичный воздух (ДС-горелки). Задача ДС-горелок заключается в организации в котле распределения топливной смеси, сгорание которой происходит при наименьшей эмиссии оксидов азота.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования гидродинамических процессов в вихревой ДС-горелке. Рассмотрен процесс стабилизации пламени в горелке зоной

возвратного течения, возникающей на оси горелки. При численном моделировании обнаружен эффект вытеснения возвратной зоны из факела, который был затем подтвержден экспериментально.

Проведено численное моделирование сжигания метана в котле, снабженном ДС-горелками. Исследовано влияние совместной работы горелок в котле на эмиссию оксидов азота. Получено увеличение эмиссии оксидов азота от каждой горелки при увеличении количества работающих горелок в котле.

Численное моделирование выполнено с помощью программного комплекса *FlowVision* [1,2]. Используемая математическая модель горения метана описана в настоящей работе.

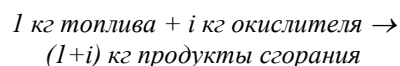
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Используемая в программном комплексе *FlowVision* математическая модель физико-химических процессов в горелке и котле включает в себя законы сохранения массы, энергии, импульса (уравнения Навье-Стокса), уравнение состояния идеального газа и модель турбулентности *k-ε*. Модель горения включает в себя расчет ряда скалярных величин, описанных ниже. Общее уравнение для этих величин имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho\xi)}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{V}\xi) = \nabla(\mu + \mu_t)\nabla\xi + Q_\xi \quad (1)$$

Для энтальпии ($\xi = h$) источник, описывающий радиационные потери, равен $Q_h = -C_\epsilon\sigma_0T^4$.

Используется брутто-модель горения метана в воздухе:



в которой функция Зельдовича z и массовая концентрация топлива f удовлетворяют уравнению (1) с источником $Q_z = 0$ и $Q_f = -W$, где W - осредненная скорость химической реакции.

В ДС-горелке имеется топливная смесь с различной степенью смешения горючего и окислителя, что создает трудности для определения осредненной скорости химической реакции W . В настоящее время наиболее исследовано турбулентное горение без предварительной перемешанности горючего и окислителя. В [3] предложено вычислять W через кинетическую скорость горения

перемешанной смеси W_{kin} и предельную скорость, определяемую процессом перемешивания W_{mix} :

$$\frac{1}{W} = \frac{1-\gamma}{W_{kin}} + \frac{\gamma}{W_{mix}}, \quad 0 \leq \gamma \leq 1$$

В [3] коэффициент γ определяется градиентом температуры

$$\gamma = \tanh(C_\gamma |\nabla T| \frac{l_T}{T})$$

Для произвольной степени смешения топлива и окислителя авторами настоящей работы предлагается определять γ через относительные пульсации функции Зельдовича:

$$\gamma = \min(1, \sqrt{g} / z)$$

Средний квадрат пульсаций $g = \langle z'^2 \rangle$ удовлетворяет уравнению (1) с источником

$$Q_g = C_{g1} \mu_t \nabla^2 z - C_{g2} \rho \varepsilon g / k$$

Величины W_{kin} и W_{mix} берутся из работ [4], [5]

$$W_{kin} = 10^{10} \exp\left(-\frac{18400}{T}\right) \rho^2 f \cdot o$$

$$W_{mix} = 23.6 \left(\frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2}\right)^{\frac{1}{4}} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min(f, o / i)$$

Как известно, основной вклад в образование оксидов азота NO вносят так называемые термические оксиды азота. Их учет осуществляется путем решения уравнения (1) с источником $Q_\xi = \rho Q_{NO}$

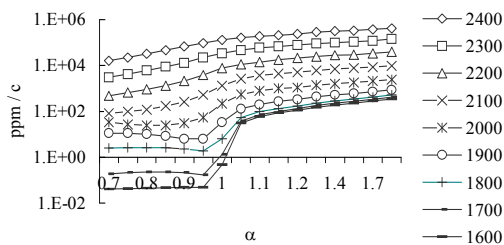


Рис.1 Зависимость скорости образования NO от температуры ($^{\circ}K$) и коэффициента избытка окислителя α

Приведенные на рис.1 зависимости $Q_{NO}(\alpha, T)$ были получены из решения системы ОДУ, описывающей полный механизм образования оксидов азота [6].

3. МЕТОД РАСЧЕТА

В программном комплексе **FlowVision** используется конечно-объемный метод расчета гидродинамических уравнений. Расчет течений производится на прямоугольной неравномерной сетке, адаптируемой под особенности решения и геометрии. Использование такой сетки позволило описать как общую структуру течения, так и существенные детали, в том числе фронт пламени, возвратную зону и т.п. Расчет одного варианта на ПК

PII-266 MHz (96 Mb) при общем числе узлов порядка $2 \div 4 \cdot 10^5$ занимал 50÷100 часов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Ниже приведены некоторые результаты моделирования горения метана в факеле проектируемой ДС-горелки. С точки зрения предсказательной силы численного моделирования, существенно, что все эти расчеты были выполнены до воплощения ДС-горелки в "металле" и ее экспериментальной проверки. По сути, программный комплекс **FlowVision** явился виртуальной экспериментальной лабораторией, в которой проводились испытания горелки.

4.1 Моделирование работы ДС- горелки

В горелке, реализующей принцип двухступенчатого сжигания метана в котле, топливная смесь подается в котел через амбразуру по двум концентрическим каналам. Во внутреннем канале создается сильно закрученное течение предварительно перемешанной обогащенной топливной смеси с коэффициентом крутки около 1. Во внешнем канале создается прямоточный поток чистого воздуха. Ключевым элементом горелки такого рода является выбор конструктивных параметров, обеспечивающих наличие зоны возвратного течения, предназначенной для удержания (стабилизации) пламени.

Результаты расчетов приведены на рис.2,3. В отсутствие горения (холодное течение) на оси горелки образуется возвратная зона значительной протяженности (порядка 2-3 диаметров горелки D), рис.2а.

Считается, что при горении топлива возвратная зона сохраняется и фронт пламени держится на передней части возвратной зоны. При моделировании течения газа в факеле ДС-горелки был обнаружен эффект вытеснения зоны обратного течения из факела. При горении возвратная зона уменьшается и имеет протяженность примерно 0.1D и располагается перед фронтом пламени (рис. 2б).

Под вытеснением зоны следует понимать два процесса – разрушение зоны внутри факела и образование зоны возвратного течения перед ним в холодной области течения. Причина разрушения зоны заключается в следующем. При холодном истечении газа возвратная зона обусловлена понижением давления на оси горелки в результате действия центробежных сил в закрученном потоке газа. При горении, на фронте пламени, газ испытывает сильное расширение (плотность падает на порядок). Расширение приводит к повышению давления на оси горелки и к разрушению возвратной зоны.

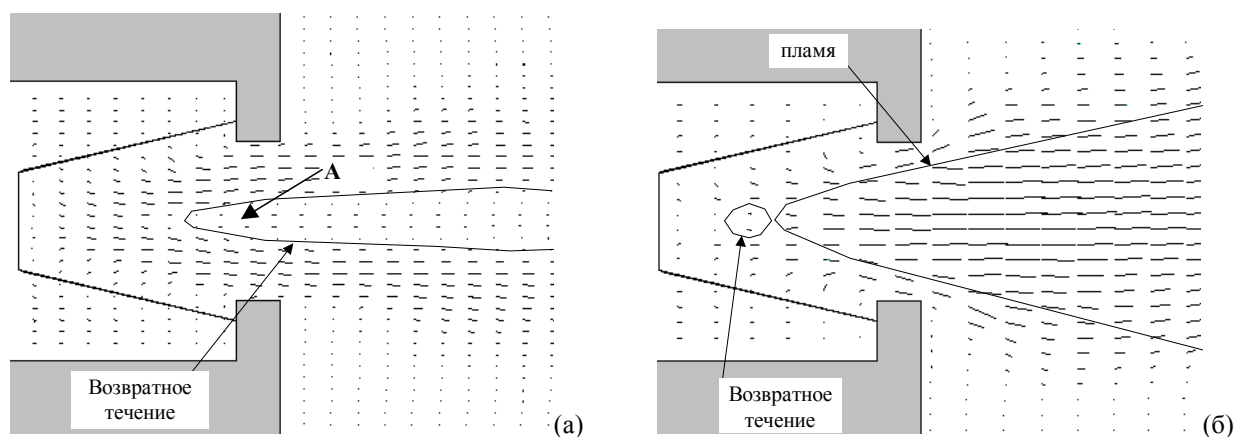


Рис. 2 Распределение скоростей в горелке и схема течения газа: (а) без горения, (б) при горении

Образование возвратной зоны перед фронтом пламени обусловлено взаимодействием двух процессов. Первый - это снос пламени вниз по потоку при разрушении возвратной зоны. Второй - образование возвратной зоны в области холодного течения. В горелке устанавливается динамическое равновесие этих двух процессов, результатом которого является небольшая возвратная зона перед фронтом пламени (рис.2б). Стабилизация пламени в этом случае обусловлена малой скоростью газа в конце зоны. Смещение начала возвратной зоны вглубь горелки (ср. рис.2а и б) обусловлено изменением структуры течения внутри горелки при горении метана.

Лабораторные огневые испытания горелки проводились на стенде ЦИАМ [7] (группа Б.И. Минеева). Экспериментальные измерения скорости на оси горелки (в точке А на рис 2а) показали, что при холодном течении на оси горелки скорость равна $-1,3$ м/с (обратное течение в А), при горении скорость равна $+20,8$ м/с, т.е зона возвратного течения разрушена.

На рис. 3 показано рассчитанное распределение температуры в плоскости, проходящей через ось горелки. Видно, что факел начинается внутри горелки, расходится конусом до области догорания

горючего в потоке вторичного воздуха. В области догорания факел сильно расширяется. Натурные испытания, проведенные на котле ПТВМ-100 ТЭЦ-21 АО МОСЭНЕРГО подтвердили такую картину течения газа (рис.4). На фотографии хорошо видна область вторичного догорания топливной смеси.

4.2 Моделирование работы группы горелок в котле ТЭЦ

Основной целью моделирования работы горелки в котле ТЭЦ является определение выбросов оксидов азота NO . Скорость образования NO сильно зависит от температуры (рис.1). В предлагаемой модели температура зависит от радиационных потерь, определяемых коэффициентом C_{ϵ} , который был подобран ранее из расчетов других котлов при работе других горелок.

В котле ПТВМ-100 ТЭЦ-21 АО МОСЭНЕРГО горелки располагаются горизонтально в два ряда по 6 в каждом напротив друг друга. Из-за наличия симметрии рассматривалась 1/12 или 1/4 (при работе 4 горелок) часть котла.

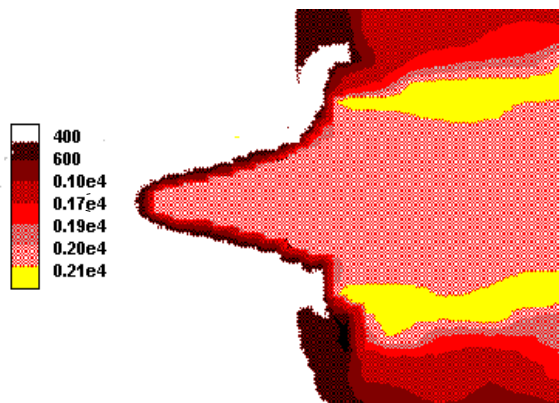


Рис. 3 Распределение температуры в факеле

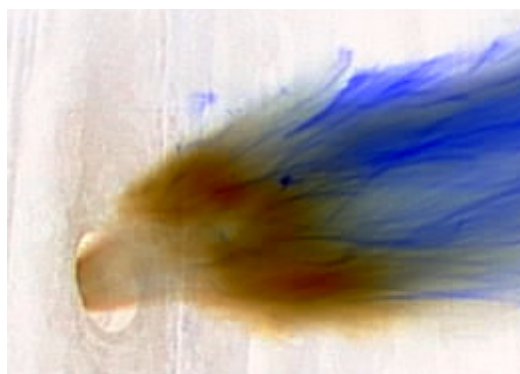


Рис. 4. Фотография факела горелки в котле.

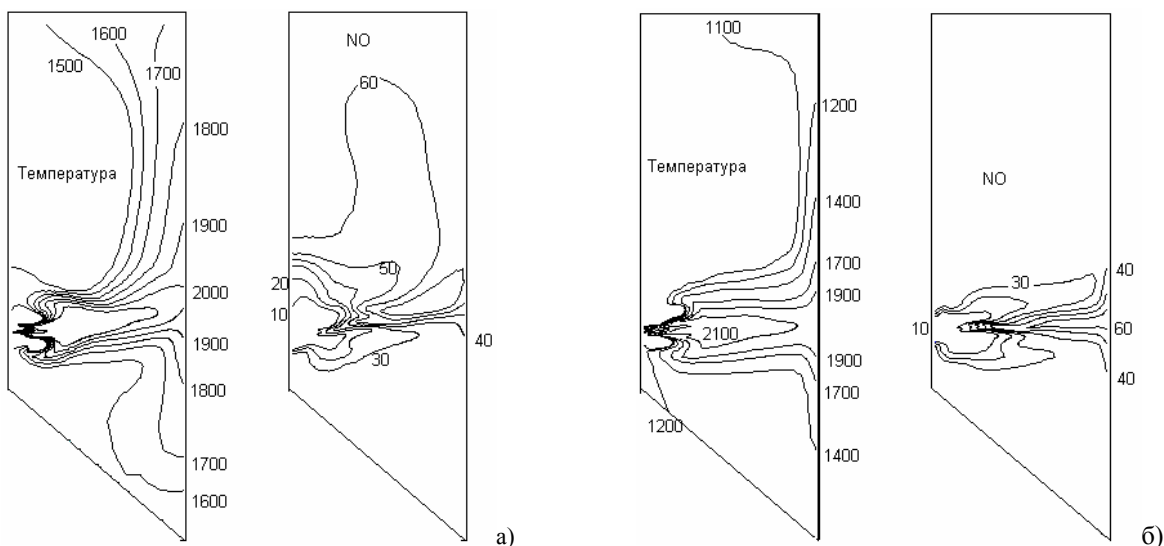


Рис.5 Распределение температуры ($^{\circ}\text{K}$) и оксидов азота NO (ppm) при работе в котле 12 горелок (а) и 4 горелок (б).

Результаты расчетов представлены на рис.5. Расчеты показывают, что при неполной нагрузке выбросы оксидов азота уменьшаются в 1.75 раза, что связано с уменьшением средней температуры котла. Полученные расчетные данные по основным параметрам хорошо согласуются с экспериментом. В частности, хорошо известно, что при работе котла ПТВМ-100 на полной нагрузке эмиссия оксидов азота в 1.5-2 раза выше, чем при работе с нагрузкой в 25% от номинальной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью программного комплекса *FlowVision* проведено численное моделирование горения метана с низкой эмиссией оксидов азота в факеле вихревой газовой горелки. Путем численного моделирования обнаружено вытеснение возвратной зоны на оси горелки факелом пламени. Исследовано влияние совместной работы горелок в котле на эмиссию оксидов азота. Получено увеличение эмиссии оксидов азота от каждой горелки при увеличении количества работающих горелок в котле. Результаты натурных испытаний горелки показали адекватность разработанной модели горения и численных методов ее решения.

Работа выполнена по заданию АО МОСЭНЕРГО и УТЭХ Московского правительства при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 98-01-00484)

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ρ – плотность смеси;
 \mathbf{V} – вектор скорости;
 h – энтальпия;
 T – температура;
 μ – молекулярная вязкость.
 $\mu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$ – турбулентная вязкость.
 l_T – масштаб турбулентности;

f – массовая концентрация топлива;
 o – массовая концентрация окислителя;
 z – функция Зельдовича;
 i – стехиометрический коэффициент;
 α – коэффициент избытка окислителя;
 $C_\varepsilon \approx 0.35$; $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}\cdot\text{м}^2/\text{K}^4$
 $C_{g1} = 2.8$; $C_{g2} = 2$; $C_\gamma = 1 \div 10$;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aksenov A.A., Dyadkin A.A., Gudzovsky A.V., Numerical Simulation of Car Tire Aquaplaning // Computational Fluid Dynamics '96, J.-A. Desideri, C.Hirsch, P.Le Tallec, M.Pandolfi, J.Periaux eds, John Wiley&Sons, 1996b, pp. 815-820.
2. Аксенов А.А., Гудзовский А.В., Дядькин А.А., Тишин А.П. Смешение газов при вдуве низконапорной струи в поперечный поток // Известия РАН. МЖТ, 1996, № 3, с. 67-74.
3. W. Polifke, K. Dobbeling, D. Winkler, T. Sattelmayer, A Computational Model for Lean-Premixed, Highly Turbulent Combustion // 21st CIMAC Congress - Switzerland -15/18 May 1995.
4. Волков Э.П., Кудрявцев Н.Ю. Моделирование образования окислов азота в турбулентном диффузионном факеле // ИФЖ, 1979, Т.56, N 6, с. 775-794.
5. Magnussen B.F., and Hjertager B.H. On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion // Sixteenth Symposium (International) on Combustion, 1976, pp. 719-729.
6. Тишин А.П., Худяков В.А., Артамонов А.К. Исследование возможностей уменьшения концентрации оксидов азота при сжигании топлив в теплоэнергоагрегатах. // Изд. ЦНИИМАШ, г.Калининград М.О., 1994, 60 с.
7. Белоконь А.А. и др., Отчет по результатам испытаний горелки ТПКС-1М // М., НИЦ ЭКОЛЭН, 1997.