

УДК 519.63

ЗОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА В ПРОМЫШЛЕННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Т. Х. Нгуен

Хошиминский университет сельского хозяйства и лесоводства, Хошимин, Вьетнам, nt.hao@hcmuaf.edu.vn

Для прогнозирования выхода оксидов азота в промышленной камере сгорания, работающей на сжиженном природном газе, предложена новая зонная модель, представляющая камеру сгорания как систему химических реакторов. Граничные условия и значения рабочих параметров, использованные в модели, соответствуют типичным условиям работы промышленной камеры. Общий механизм разработан в рамках программы GRI-Mech 3.0 в UW-коде. Проведено сравнение расчетов с данными экспериментальных исследований. Модель дает достаточно точное предсказание выхода оксидов азота.

Ключевые слова: промышленная камера сгорания, сжиженный природный газ, зонная модель, оксиды азота.

DOI 10.15372/FGV20170404

ВВЕДЕНИЕ

Контроль эмиссии загрязняющих веществ представляет собой одну из наиболее важных задач при разработке промышленных камер сгорания. Решение этой проблемы требует знания механизма образования оксидов азота (NO_x). Известно, что небольшие изменения граничных условий системы могут значительно увеличить выход NO_x . Поэтому моделирование процесса горения становится неотъемлемой частью разработки промышленных камер сгорания.

Концепция моделирования камеры сгорания как химического реактора, например реактора идеального смешения, реактора идеального вытеснения или системы из них, была выдвинута С. Л. Браггом. Улучшение модели предложено в работе [1] — зонное моделирование горения с использованием корреляционных параметров на основе экспериментальных данных. Суть модели заключается в том, что объем камеры сгорания делят на зоны, представляющие собой идеальные элементы — реакторы. В [2, 3] зонная модель была применена для исследования эмиссии NO_x при горении в камере сгорания газовой турбины. Моделирование методом химических реакторов в камерах сгорания необязательно требует большого количества химических реакторов. В работах [4–8] разработана методика моделирова-

ния эмиссии вредных веществ в экспериментальном реакторе вытеснения, основанная на простой идеальной схеме из двух или трех реакторов. В [9] для камер сгорания предложена гибридная модель, соединяющая в себе метод вычислительной гидродинамики и зонную модель реакторов. Развитие зонной модели было продолжено в [10], где авторы моделировали известные экспериментальные результаты, используя зонную схему реакторов, в которой основная зона горения была разбита на два потока для учета неидеального предварительного перемешивания топлива и воздуха. В [11] зонная модель была применена для предсказания эмиссии в камерах сгорания газовых турбин с предварительным смешением, работающих в обедненном режиме. В целом моделирование химическими реакторами оказалось полезным инструментом для оценки образования загрязняющих веществ.

В литературе представлены различные методы моделирования турбулентного горения. Однако не существует компьютерных моделей, включающих в себя полный набор кинетических химических реакций в сочетании с моделированием турбулентного потока. Для моделирования сложных процессов горения были разработаны упрощенные кинетические механизмы. Однако даже использование упрощенной кинетики в сочетании с методами вычислительной гидродинамики может занять много времени при конструировании камеры сгорания. Правильно разработанная зонная модель

может дать ответы по количественному выходу NO_x в промышленной камере сгорания. В настоящей работе такой подход был применен к оценке выхода NO_x и проведено сравнение с экспериментальными данными. Исследовано влияние отношения топливо/воздух, угла закрутки потока и доли топлива в предварительном впрыске на выход NO_x .

АНАЛИЗ МЕТОДОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

На рис. 1 приведена схема экспериментальной модели промышленной камеры сгорания. Система оснащена направляющей камеры сгорания, инжектором в зоне предварительного смешения и устройством предварительного впрыска. Воздух для охлаждения направляющей камеры сгорания подавали через специальное отверстие. Для измерения эмиссии применяли газоанализатор Testo 360. Температуру измеряли термопарой типа R (Pt-Pt/Rh(13)), установленной на выходе камеры сгорания на расстоянии $R/2$ от оси. Температура предварительно нагретого воздуха составляла 650 К, давление 1 атм. Коэффициент избытка топлива варьировали в диапазоне $\phi = 0.5 \div 0.7$. Использовали три угла закрутки потока — 30° , 45° и 60° . Долю топлива в его смеси с воздухом в предварительном впрыске изменяли от 0 до 10 % от расхода в инжекторе, причем обогащенный состав предварительного впрыска соответствовал меньшему значению ϕ в зоне предварительного смешения.

Для получения профилей скорости потока, температуры и состава продуктов, а также для построения оптимальной системы хи-

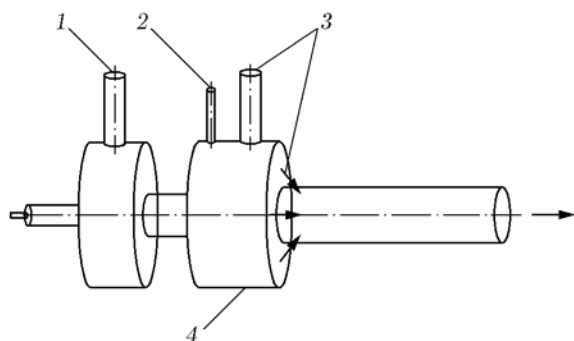
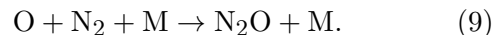
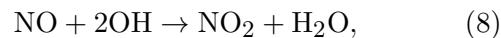
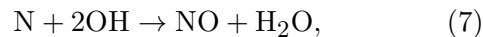
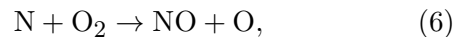
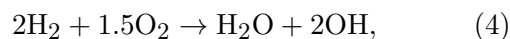
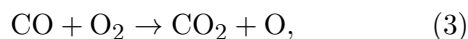


Рис. 1. Схема промышленной камеры сгорания:

1 — воздух для горения, 2 — топливо, 3 — воздух для охлаждения, 4 — завихритель

мических реакторов в работе использовали коммерческий программный комплекс STAR-CCM 4.02, основанный на методах вычислительной гидродинамики. Турбулентность моделировали с помощью k - ϵ -модели, обладающей хорошей сходимостью [7]. Реакции горения анализировали с помощью модели «обрыва вихря» (eddy break-up). Механизм горения сжиженного природного газа в воздухе включал в себя девять реакций:



Их выбор обусловлен количеством участвующих реагентов и продуктов. В программе STAR-CCM эти количества вводили для каждой стадии в стехиометрический коэффициент.

Результаты расчета для промышленной камеры сгорания с закруткой потока представлены на рис. 2. Используемая в расчетах модель камеры была получена путем упрощения экспериментальной камеры сгорания в целях сокращения времени расчета, учитываются основной поток и топливная форсунка предварительного впрыска. Программа STAR-CCM 4.02 включает в себя инструменты для создания объемной сетки, начиная с поверхности. В наших расчетах использовалась сетка из $5 \cdot 10^6$ ячеек и геометрия секторов с периодически граничными условиями. В качестве топлива в расчетах принимали сжиженный природный газ.

Анализ методом вычислительной гидродинамики также проводили для камеры сгорания с предварительным впрыском топлива. В этом случае угол закрутки потока равен нулю в месте основного входа топлива, поскольку завихритель не подсоединен. Расчет проводили при

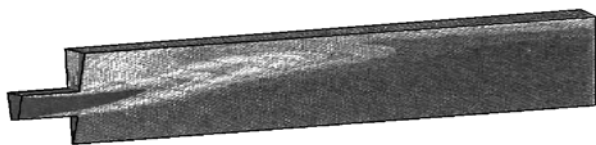


Рис. 2. Частично трехмерная модель промышленной камеры сгорания

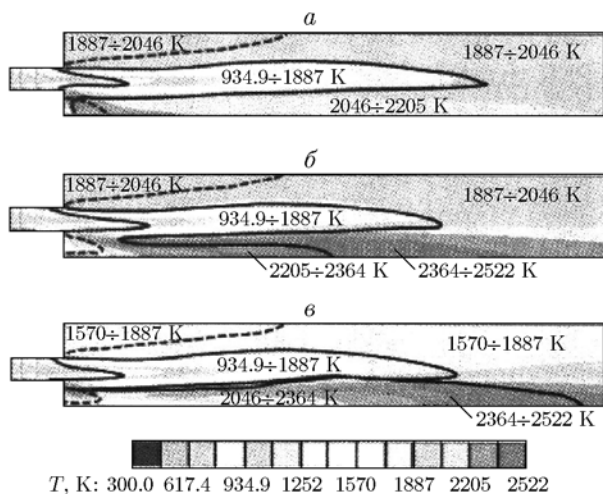


Рис. 3. Профили температуры, полученные по программе STAR-CCM 4.02, при доле топлива в предварительном впрыске 2 (а), 6 (б), 10 % (в)

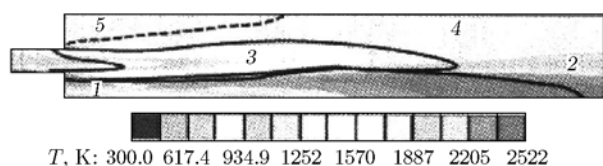


Рис. 4. Зоны пламени в системе химических реакторов:

1 — пилотное пламя, 2 — зона после пилотного пламени, 3 — основное пламя, 4 — зона после основного пламени, 5 — зона рециркуляции

количестве топлива в предварительном впрыске 2, 6 и 10 %. Установлено, что температура пилотного пламени возрастает при повышении доли топлива в предварительном впрыске (рис. 3). Хотя общее распределение температуры имеет во всех случаях сходный вид, размеры зоны пилотного пламени и зоны основной рециркуляции изменяются. Длина пилотного пламени резко возрастает при увеличении доли топлива в предварительном впрыске.

На рис. 4 показаны форма и расположение

основного и пилотного пламени.

СХЕМА ЗОННОЙ МОДЕЛИ

На рис. 5 приведена схема зонной модели, состоящей из восьми элементов. Схема разработана для промышленной камеры сгорания с предварительным впрыском топлива. Основную зону пламени, зону рециркуляции и зону непосредственно после основного пламени моделировали с использованием реакторов идеального смешения. При этом зону сразу за пламенем разделили на зону непосредственно после основного пламени и зону непосредственно после пилотного пламени из-за большой разницы температур в них. Распределение потоков между восьмью элементами выбрано на основе представленных на рис. 4 результатов расчета методом вычислительной гидродинамики для промышленной камеры сгорания. Рис. 5, б иллюстрирует приложение данной схемы к оценке эмиссии NO_x (с использованием программы CHEMKIN).

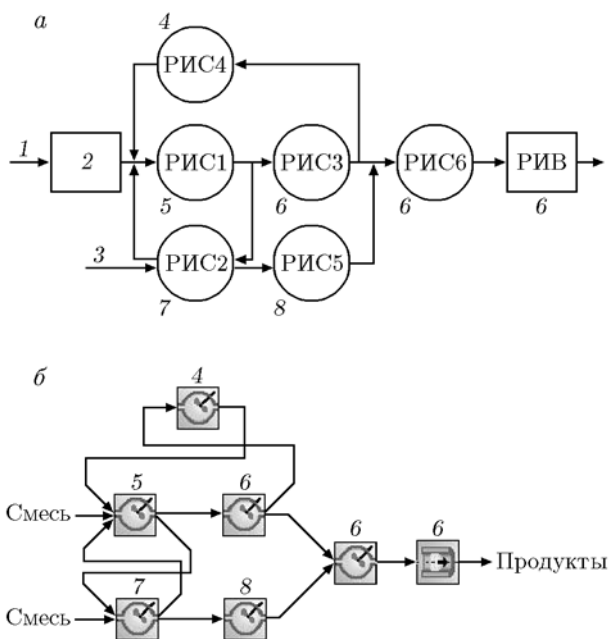


Рис. 5. Схема зонной модели промышленной камеры сгорания (а) и ее приложение для оценки эмиссии NO_x (б):

1 — СПГ и воздух, 2 — смеситель, 3 — СПГ, 4 — зона рециркуляции, 5 — основное пламя, 6 — зона после основного пламени, 7 — пилотное пламя, 8 — зона после пилотного пламени; РИС — реактор идеального смешения, РИВ — реактор идеального вытеснения

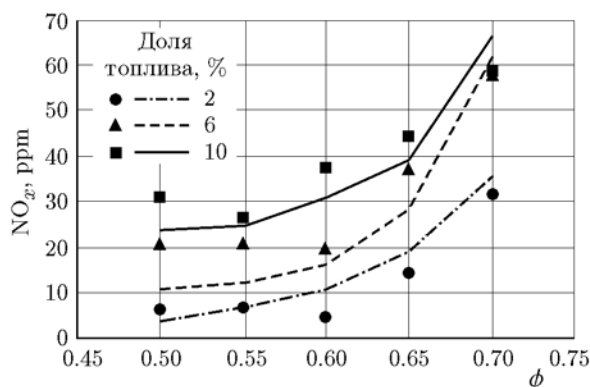


Рис. 6. Зависимость молярной доли эмиссии NO_x от коэффициента избытка топлива в режиме с предварительным впрыском топлива: точки — эксперимент, линии — расчет

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 приведены результаты прогноза эмиссии оксидов азота при $\phi = 0.5, 0.6$ и 0.7 и количестве топлива в предварительном впрыске 2, 6 и 10 %, без закрутки потока, полученные с использованием зонной модели, изображенной на рис. 5. Для сравнения на рис. 6 нанесены данные экспериментов. Результаты расчетов и экспериментов достаточно хорошо согласуются между собой (со средней ошибкой 3.57 %) и свидетельствуют о росте выхода NO_x при увеличении общего значения ϕ и доли топлива в предварительном впрыске.

На рис. 7 представлены молярные до-

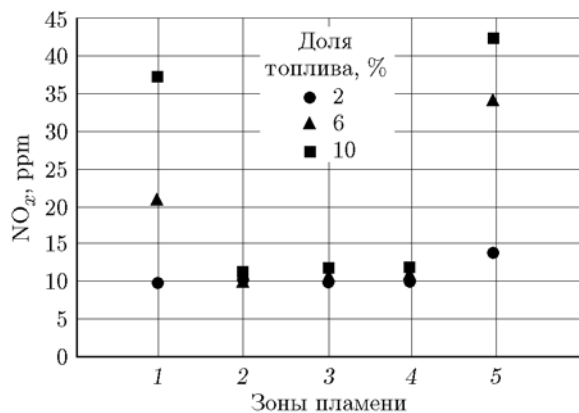


Рис. 7. Молярная доля NO_x в зоне каждого реактора в режиме с предварительным впрыском топлива:

зоны: 1 — пилотное пламя, 2 — основное пламя, 3 — зона после основного пламени, 4 — зона рециркуляции, 5 — зона после пилотного пламени

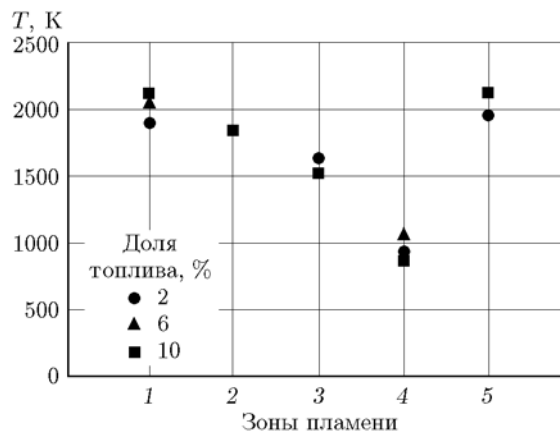


Рис. 8. Температура в зоне каждого реактора в режиме с предварительным впрыском топлива:

зоны: 1 — пилотное пламя, 2 — основное пламя, 3 — зона после основного пламени, 4 — зона рециркуляции, 5 — зона после пилотного пламени

ли NO_x в каждой зоне реакции (зона основного пламени, зона пилотного пламени, зона непосредственно после основного пламени, зона основной рециркуляции, зона непосредственно после пилотного пламени) при доле топлива в предварительном впрыске 2, 6 и 10 %. При малой доле топлива молярная доля NO_x в каждом из модельных реакторов практически одинакова, за исключением зоны после пилотного пламени. Однако при увеличении доли топлива в предварительном впрыске молярная доля NO_x в зоне пилотного пламени и в зоне после него возрастает больше, чем в других зонах, потому что температура в них растет до очень высоких значений — выше 2000 К (рис. 8). Выход NO_x в промышленной камере сгорания сильно связан с временем, которое продукты сгорания находятся при высокой температуре. Поэтому при конструировании промышленных камер сгорания зависимость температуры от скорости газового потока может ухудшать эффективность промышленных двигателей.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе показано, что использование метода вычислительной гидродинамики в сочетании с зонным методом реакторов позволяет достаточно точно предсказывать эмиссию NO_x в промышленных камерах сгорания. Моделирование рассмотренным методом показывает, что даже при равновесных в целом условиях локально существуют обогащен-

ные топливом участки в центре пламени (см. рис. 3).

В ходе исследований получены следующие результаты.

- Эмиссия NO_x , предсказанная по зонной модели, основанной на данных вычислительной гидродинамики, достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

- Эмиссия NO_x возрастает при увеличении доли топлива в предварительном впрыске ввиду роста температуры в пилотном пламени и в зоне после него.

- Зонная модель из восьми элементов продемонстрировала очень хорошую способность предсказывать эмиссию NO_x .

- Рассмотренную зонную модель удобно интегрировать в процесс конструирования камеры сгорания, так как она требует мало компьютерного времени.

- Модель применима для оценки усеченного и полного химических механизмов, используемых в вычислительной гидродинамике.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rubin P. M., Pratt D. T.** Zone combustion model development and use: Application to emissions control // ASME Paper. — 1991. — V. 91. — P. 25.
2. **Nicol D. G., Malte P. C., Steele R. C.** Simplified models for NO_x production rates in lean-premixed combustion // ASME Paper. — 1994. — V. 94. — P. 432.
3. **Nicol D. G., Steele R. C., Marinov N. M., Malte P. C.** The importance of the nitrous oxide pathway to NO_x in lean-premixed combustion // J. Eng. Gas Turbines Power. — 1995. — V. 117. — P. 100–111.
4. **Ruta T., Malte P. C., Kramlich J. C.** Investigation of NO_x and CO formation in lean premixed, methane-air, high-intensity, confined flames at elevated pressures // Proc. Combust. Inst. — 2000. — V. 28. — P. 2435–2441.
5. **Rutar T., Malte P. C.** NO_x formation in high-pressure jet-stirred reactors with significance to lean-premixed combustion turbines // ASME J. Eng. Gas Turbines Power. — 2002. — V. 124. — P. 776–783.
6. **Park J. K.** Modelling study of the effect of chemical additives on soot precursors reaction // Intern. J. Automotive Technol. — 2006. — V. 7. — P. 501–508.
7. **Park J.** A CRN simulation for emission pollutants prediction in lean premixed gas turbine combustion chamber // Asean Eng. J. — 2011. — V. 1. — P. 82–96.
8. **Lee B. R.** A study on NO_x formation pathway of methane-air lean premixed combustion by using PSR model // Trans. KSAE. — 2009. — V. 17. — P. 46–52.
9. **Sturgess G., Shouse D. T.** A hybrid model for calculating lean blow-outs in practical combustion chambers // AIAA Paper. — 1996. — V. 96. — P. 3125.
10. **Nicol D. G.** Development of a five-step global methane oxidation-NO formation mechanism for lean-premixed gas turbine combustion // ASME J. Eng. Gas Turbines Power. — 1999. — V. 121. — P. 272–280.
11. **Novoselov I. V.** Development and application of an eight-step global mechanism for CFD and CRN simulations of lean-premixed combustors // ASME J. Eng. Gas Turbines Power. — 2008. — V. 130.

*Поступила в редакцию 20/VI 2016 г.,
в окончательном варианте — 5/X 2016 г.*