

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДА NO_x В КОТЛАХ, РАБОТАЮЩИХ НА ДВУХ ВИДАХ ТОПЛИВА

М. Араблю, Е. Пурсаэди

Департамент инженерной механики, Инженерный факультет, Университет Зенджана, Зенджан, Иран
epsaeidi@znu.ac.ir

Исследованы пути сокращения выхода NO_x котла мощностью 250 МВт, работающего на двух видах топлива, посредством ступенчатой подачи кислорода и острого дутья. В ходе численного моделирования определены наилучшие места на стенках котла для ввода воздуха и топлива. Устанавливая инжекторы в этих местах, можно сократить выход NO_x более чем на 70 % без увеличения количества CO . Это значение находится в хорошем соответствии с опубликованными в литературе данными. Результаты моделирования (состав газа и температура) согласуются с данными экспериментов на натурном котле.

Ключевые слова: котел, вычислительная гидродинамика, NO_x , острое дутье, горение.

ВВЕДЕНИЕ

По мере увеличения количества сжигаемого углеводородного топлива продукты сгорания представляют всё большую угрозу окружающей среде. Главными продуктами сгорания являются диоксид углерода и вода. До недавнего времени они считались безвредными. Сейчас уже доказано, что диоксид углерода значительно воздействует на атмосферу, приводя к парниковому эффекту.

К менее очевидным продуктам сгорания принадлежат оксиды азота NO_x . Во второй половине двадцатого столетия стало ясно, что NO и NO_2 относятся к основным факторам появления смога и озона в городском воздухе и в итоге в тропосфере. Кроме того, NO_x участвуют в цепных реакциях с разрушением озонового слоя в стратосфере, что вызывает увеличение ультрафиолетовой радиации, достигающей земной поверхности. Поэтому уменьшение выхода NO_x представляется важной проблемой в процессах горения.

Для котлов, работающих на дизельном топливе, используется так называемый базовый метод сокращения выхода оксидов азота, состоящий в модификации условий сгорания с целью предотвращения их образования. В зависимости от вида топлива, модели топочной камеры и системы сжигания возможно применение различных технологий и мер: горелки с низким выходом NO_x , технологическая под-

готовка смеси топливо/воздух, острое дутье, дожигание и рециркуляция топочного газа. В большинстве случаев базовые методы не обеспечивают выполнения новых, очень жестких требований, и необходимы дополнительные методы, например селективное химическое сокращение эмиссии NO_x . И хотя стоимость некоторых базовых методов достаточно низка, все же возникает проблема оптимизации, связанная с тем, что изменение условий сгорания, вероятно, может привести к значительному уменьшению выхода NO_x и, таким образом, к сокращению габаритов и эксплуатационных требований к дорогостоящему оборудованию для снижения выхода NO_x .

На практике всегда необходима точная оценка выхода NO_x в конкретных эксплуатационных условиях. Получение такой оценки *in situ* путем эмпирического описания поведения агрегата обычно задача трудная для таких больших промышленных установок, как котел, работающий на двух видах топлива. Поскольку разработка технологического регламента в наши дни связана с жесткими требованиями, а размер и сложность оборудования значительны, можно запланировать и осуществить только специфические и единичные тесты. Набор собранных, имеющих большую погрешность данных обычно бывает неполным [1].

В настоящее время для прогнозирования реакции котла представляется наиболее приемлемым использовать развитые математические модели и численные методы, поскольку можно реально получить большой объем данных. Од-

нако при очевидных преимуществах математические модели являются только приближением, что обусловлено сложностью основных процессов, так что эти данные должны подкрепляться результатами измерений. Тем не менее численное моделирование полезно, по крайней мере, в качестве руководства при определении методологии управления котлом. Обосновав его в отношении выбранных условий эксплуатации, можно найти заслуживающий доверия расчетный инструмент, позволяющий выбрать эксплуатационные решения. Этого вполне достаточно, если речь идет о количественной тенденции, а не об абсолютной физической величине, которую требуется установить, как и в случае простых мер по уменьшению NO_x . Таким образом, необходимость длительного и дорогостоящего сбора данных на промышленных установках в значительной степени устраняется.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДА NO_x

Математическая модель выхода NO_x в реагирующих системах может быть разработана на основе трех подходов [2]:

1) использование детальной химической схемы (включающей сотни элементарных реакций) вместе с априорными оценками полей скоростей и температур, которые очень приближительны;

2) использование упрощенной химической кинетики (полученной сокращением числа реакций) вместе с детальным описанием полей скоростей, температур и концентраций компонентов по всей системе;

3) получение эффективных инженерных корреляций из большого многообразия эксплуатационных условий в реальных системах, которые затем используют для прогнозирования выхода NO_x при других сценариях.

Первый вариант реализуется для газовых реакций, т. е. для гомогенных реакций газообразных топлив, и ориентирован главным образом на химическую кинетику. При горении распыленного жидкого топлива полное моделирование выхода NO_x и его уменьшения дополнительно требует включения в модель сложного турбулентного двухфазного потока, гетерогенных реакций, тепло- и массопереноса. Поскольку все эти процессы взаимосвязаны, использование детальных кинетических механизмов неосуществимо и неоправданно, так что

допускается простейшее приближение. Третья альтернатива требует проведения хорошо контролируемых экспериментов, что для больших котлов нереально. Поэтому моделям с глобальной кинетикой, включенной в вычислительный аппарат, отдается предпочтение при оценке выхода NO_x в котлах.

Образование и уменьшение концентрации оксидов азота — процесс очень сложный, включающий большое число промежуточных компонентов, чаще всего с малым временем жизни. Как правило, наиболее важны частицы NO , NO_2 , N_2O , NH_3 и HCN [2, 3]. Их концентрации и значимость зависят в основном от температуры газа и отношения топливо/кислород вблизи горячей частицы. Вклад «быстрых» NO_x обычно незначителен при сжигании в котлах жидкого или твердого топлива [4, 5]. Он становится заметным только в богатых топливом углеводородных пламенах [2]. Взаимодействие с радикалами CH_i (дожигание) вносит вклад в сокращение конечного количества выхода NO_x при горении дизельного топлива.

Все эти процессы можно моделировать с учетом химической кинетики, достаточно детальной (будем надеяться) для описания процесса, но содержащей всего несколько основных реакций для упрощения вычисления полей скоростей, температур и концентраций. При моделировании методом вычислительной гидродинамики (CFD) топочной камеры, работающей на двух видах топлива, выход NO_x определяется обычно независимо от структуры пламени [2–5]. Сначала находят скорости, температуры и концентрации главных компонентов, а затем на основе обработки этих данных прогнозируется выход NO_x . Такой прием приемлем, поскольку наличие следовых количеств вещества практически не влияет на процесс сгорания, контролируемый сравнительно быстрыми реакциями окисления топлива. Совместное решение задачи горения дизельного топлива и газа и кинетики образования NO_x в любом случае приводит к чрезмерным вычислительным сложностям.

1.1. Тепловые оксиды азота

Тепловые оксиды азота NO_x генерируются при окислении азота, присутствующего в воздухе. Образование тепловых NO_x определяется совокупностью сильно зависящих от температуры химических реакций, известных как расширенный механизм Зельдовича [6]:



В данном случае образование оксида азота определяется выражением

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{NO}]}{dt} = & K_1[\text{O}][\text{N}_2] + k_2[\text{N}][\text{O}_2] + \\ & + k_3[\text{N}][\text{OH}] - k_{-1}[\text{NO}][\text{N}] - k_{-2}[\text{NO}][\text{O}] - \\ & - k_{-3}[\text{NO}][\text{OH}], \quad (4) \end{aligned}$$

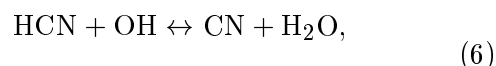
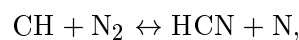
где $k_{\pm 1}$, $k_{\pm 2}$, $k_{\pm 3}$ — константы скоростей прямых и обратных реакций (1)–(3) из расширенного механизма Зельдовича. Различные авторы [7, 8] критически оценивают сведения о надежности и соотношении этих констант. Если предположить квазиравновесие в образовании и расходовании атома азота, что разумно в этом случае, скорость образования теплового NO_x (уравнение (4)) можно упростить:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2[\text{O}] \frac{k_1[\text{N}_2] \frac{k_{-1}k_{-2}[\text{NO}]^2}{k_2[\text{O}_2]}}{1 + \frac{k_{-1}[\text{NO}]}{k_2[\text{O}_2] + k_3[\text{OH}]}}. \quad (5)$$

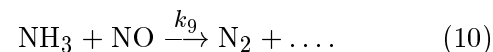
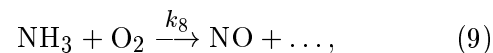
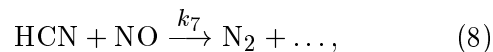
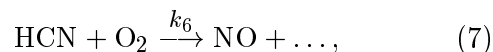
Для использования уравнения (5) требуются некоторые предположения относительно локальных концентраций радикалов O и OH, поскольку они обычно не рассматриваются общими моделями горения, в которых учитываются только основные компоненты. В ряде работ [2, 4, 9] описаны разные подходы к решению задачи, связанные в основном с предположениями относительно равновесия или парциального равновесия в зависимости от области пламени и природы топлива. Вопрос все еще является объектом некоторой дискуссии. В данной работе принято приближение частичного равновесия для атома кислорода и гидроксильного радикала.

1.2. «Быстрые» оксиды азота

«Быстрые» оксиды азота NO_x преобладают главным образом в богатых пламенах. Образование оксидов азота происходит в результате совокупности реакций множества возможных промежуточных компонентов. Принят следующий путь реакций [10]:



Предполагается, что некоторые компоненты, возникающие при фрагментации топлива (например, CH, CH_2 , C, C_2H), являются источниками «быстрых» NO_x в углеводородных пламенах. Но основной вклад дают CH и CH_2 по реакции $\text{CH}_2 + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{HCN} + \text{NH}$. Продукты этих реакций могут привести к образованию аминов и цианистых соединений, которые впоследствии реагируют с образованием NO по реакциям, аналогичным реакциям окисления топливного азота (модель топливного азота не исследована, потому что количество N_2 в топливе незначительно):



В экспериментах [11–13] получены значения кинетических констант для гомогенных реакций (7)–(10), а также для схемы с участием NH_3 в реакциях (9), (10). В [14] широко используется модель гетерогенного сокращения выхода NO_x . Выход оксидов азота согласно кинетической схеме (7)–(10) дается следующим выражением [11]:

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{NO}]}{dt} = & k_7[\text{HCN}][\text{O}_2]^\alpha + k_9[\text{NH}_3][\text{O}_2]^\alpha - \\ & - k_8[\text{NO}][\text{HCN}] - k_{10}[\text{NO}][\text{NH}_3], \quad (11) \end{aligned}$$

где α — порядок реакции по кислороду.

1.3. Дожигание

Уменьшению выхода NO_x способствует процесс дожигания, который имеет место в реакциях с радикалами CH_i , увеличивающими количество HCN:





Скорость уменьшения NO_x определяется из уравнения

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = -k_{12}[\text{NO}][\text{CH}] - k_{13}[\text{NO}][\text{CH}_2] - k_{14}[\text{NO}][\text{CH}_3], \quad (15)$$

где k_{12} , k_{13} , k_{14} — константы скорости реакций (12)–(14). Эти реакции обычно промотируются инъекцией углеводородсодержащих топлив, приводящей к увеличению концентрации радикалов CH_i . Уменьшение выхода NO_x по этому механизму в некоторой степени также имеет место в обычных пламенах распыленного дизельного топлива без дополнительной инъекции топлива, поскольку быстроиспаряющееся вещество выделяет малое количество радикалов CH_i . В [15] представлена глобальная кинетика, полученная путем численного моделирования кинетических параметров реакций дожигания в ламинарном пламени легких углеводородов. Несмотря на то, что условия были совершенно другие, эти данные были применены в модели дожигания при исследовании горения дизельного топлива, поскольку нет другой альтернативы.

2. ПРИМЕР КОТЛА

Одна из мощных иранских электростанций Shahid Rajaee имеет четыре котла мощностью 250 МВт Foster Wheeler. На рис. 1 показана схема расположения горелок и теплообменников внутри котла ($16 \times 20 \times 55.5$ м) [16]. Топка предназначена для сжигания смесей дизельного топлива и натурального газа. Каждый из этих котлов содержит 20 горелок, помещенных на двух экранных поверхностях навстречу друг другу. Горелки имеют один центральный завихряющий инжектор дизельного топлива и шесть газовых инжекторов вокруг, как показано на рис. 2. Теплообменники установлены в трех отдельных газоходах внутри котла. Конечный пароперегреватель и элементы подогревателя размещаются в газоходе 1; газоход 2 является областью рекуперации тепла; в газоходе 3 располагаются основной пароперегреватель, основной и вторичный подогреватели.

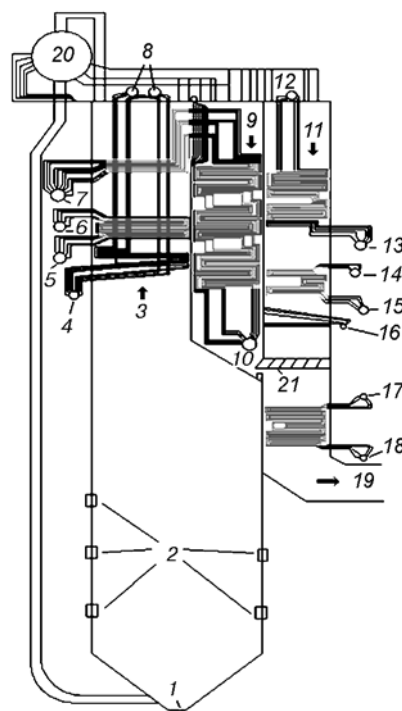


Рис. 1. Схема котла электростанции Shahid Rajaee:

1 — ввод воздуха, 2 — горелки, 3 — газоход 1, 4 — входной коллектор второй ступени пароперегревателя, 5 — входной коллектор конечного пароперегревателя, 6 — выходной коллектор конечного пароперегревателя, 7 — выходной коллектор подогревателя, 8 — выходной коллектор второй ступени пароперегревателя, 9 — газоход 2, 10 — входной коллектор подогревателя, 11 — газоход 3, 12 — входной коллектор первой ступени пароперегревателя, 13 — выходной коллектор первой ступени пароперегревателя, 14 — выходной коллектор второй ступени подогревателя, 15 — входной коллектор второй ступени подогревателя, 16 — входной коллектор из области боковой стенки теплообменника, 17 — выходной коллектор первой ступени подогревателя, 18 — входной коллектор первой ступени подогревателя, 19 — выпускная труба, 20 — барабан, 21 — шибер дымохода с автоматической регулировкой

В данной работе исследовалось влияние ступенчатой подачи воздуха и острого дутья на выход NO_x в описанных выше котлах. Проблема слишком сложная, потому что все эти паровые котлы были введены в строй непосредственно после 1992 г. и для них не предусмотрены какие-либо меры по снижению выхода NO_x . Более того, число различных условий, которые должны моделироваться, очень велико из-за высоких требований к безопасной эксплуатации котла.

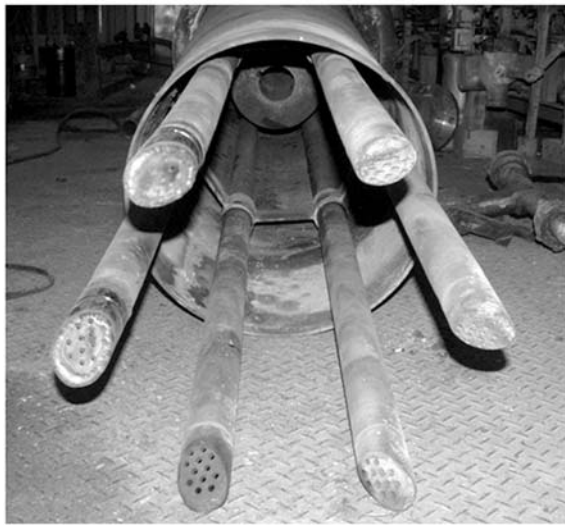


Рис. 2. Горелки котла

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПКИ

Характеристики природного газа и дизельного топлива для котла электростанции Shahid Rajaei приведены соответственно в табл. 1 и 2 [17].

Для моделирования горения, течения газа и частиц, тепло- и массопереноса внутри топki была использована коммерческая программа [18]. Пространство нижней части котла моделировалось вплоть до начала газохода 1. Вначале пространство котла было разбито на 749 983, 883 857 и 1 065 790 ячеек, затем проведен параметрический анализ с целью подтвердить, что результаты моделирования не зависят от количества ячеек. После этого количе-

ство ячеек было принято равным 883 857. Густота сетки увеличивалась вблизи инжекторов топлива и воздуха и постепенно уменьшалась в объеме топочной камеры.

Горение неперемешанных смесей в топочной камере при различных эксплуатационных нагрузках (60, 80 и 100 % от полной нагрузки) моделировалось с использованием функции распределения вероятностей (PDF). Поля скоростей, температур и концентраций компонентов вычислялись отдельно по уравнениям сохранения массы, импульса и энергии. Предполагалось, что поток стационарный. Была применена схема с расщеплением, потому что неустойчивость каждого уравнения сохранения не влияет на устойчивость других уравнений. Турбулентность учитывалась по стандартной $k-\epsilon$ -модели [19, 20]. Что касается граничных условий, то массовые скорости, температуры и концентрации задавались на входных сечениях [18], а неравновесные пристеночные функции использовались вблизи твердых стенок. В соответствии с количеством воды, которая превращалась в пар на топочном экране, вычислялся тепловой поток на стенки камеры. Затем задавалось постоянное значение теплового потока на стенки — 116.2 кВт/м^2 ; шероховатость стенок котла (отношение размера неровности к характерному размеру котла (гидравлический диаметр камеры)) принималась равной 0.05. Избыточное давление на выходе выбрано в качестве граничного условия и предполагалось равным нулю.

Поскольку объемная доля дизельного топлива (диспергированная фаза) была менее 0.001, для решения многофазной проблемы бы-

Таблица 1
Состав природного газа, используемого на электростанции Shahid Rajaei

H ₂ S	N ₂	C1	CO ₂	C2	C3	i-C4	n-C4	i-C5	n-C5	C6	Теплотворная способность, МДж/м ³	
ppm	молярная доля, %										низшая	высшая
3.6	4.7	88.7	0.6	4.3	1.08	0.2	0.27	0.08	0.05	0.02	34.4	38.1

Таблица 2
Состав дизельного топлива, используемого на электростанции Shahid Rajaei

C	H	O	S	ASH	V	Na	Ni	Pb	Ca	Теплотворная способность, ккал/кг	
% (по массе)					ppm					низшая	высшая
85.05	10.25	1.82	2.88	0.02	65	21.4	17.4	0.3	2.6	9798.7	10290.83

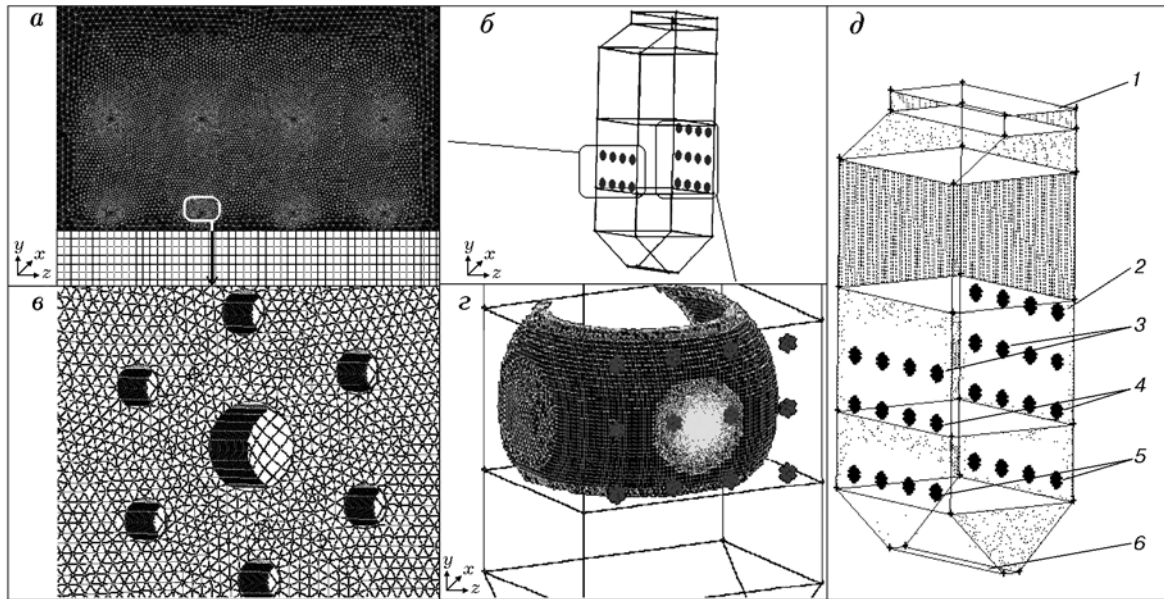


Рис. 3. Разбиение камеры сгорания ячейками:

a — расположение горелок, *б* — ступенчатая геометрия подачи воздуха, *в* — геометрия горелок, *г* — разбивка котла на ячейки, *д* — модифицированная геометрия котла: 1 — выход из топки, 2 — вход острого дутья, 3 — вторичные горелки, 4 — повторный ввод воздуха, 5 — горелки с низким выходом NO_x , 6 — первичный ввод воздуха

ла применена дискретная фазовая модель [21]. При исследовании котла использовались инжекторы дизельного топлива с воздушным обдувом, в то время как кончики этих инжекторов были завихряющего типа для улучшения распыла. При моделировании рассматривалось воздушное диспергирование. Для стохастического слежения за каплями использовали модель дискретного случайного блуждания. Теплопроводность была равна $0.025 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, вязкость — $2 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$, коэффициент поглощения задавался как *wsggm-cell-based* (см. [18]), коэффициент рассеяния смеси принят равным нулю.

Проведено моделирование газофазного гомогенного горения при использовании гипотезы о равновесии и данных о богатых пределах распространения пламени для расчета неравновесных реакций в предположении частичного равновесия [18]. Массовые доли в каждый момент определяли в единицах мгновенных долей смеси. Средние массовые доли топлива, окислителя и продуктов получали из средних значений и дисперсии мгновенных значений в предположении β -PDF распределения. Для увязки давления со скоростью использовали метод SIMPLE, для аппроксимации конвективных членов — дифференциальную схе-

му второго порядка. Считалось, что решения сходятся, когда сумма нормированных остатков для каждого контрольного уравнения порядка 10^{-6} .

Перед проведением этой работы были изучены многие методы сжигания с низким уровнем выхода NO_x и промоделированы методом CFD многие положения вдува (воздух/топливо). Несмотря на многочисленные ограничения, свойственные модифицированным котлам, моделирование методом CFD позволило найти оптимальное расположение элементов на стенках модифицированного котла: первый ярус — горелки с низким выходом NO_x , второй ярус — ввод воздуха и топлива и третий ярус — острое дутье. На рис. 3 показаны расположение горелок, ступенчатая геометрия подачи воздуха, геометрия горелок, разбивка котла на ячейки и модифицированная геометрия котла.

Горение моделировалось для трех различных эксплуатационных режимов с использованием функции распределения вероятностей, взятой из таблицы преобразований, полученной с помощью программы PrePDF для неадиабатических вычислений для природного газа и дизельного топлива. Программа PrePDF использует базу данных CHEMKIN (Thermo.db)

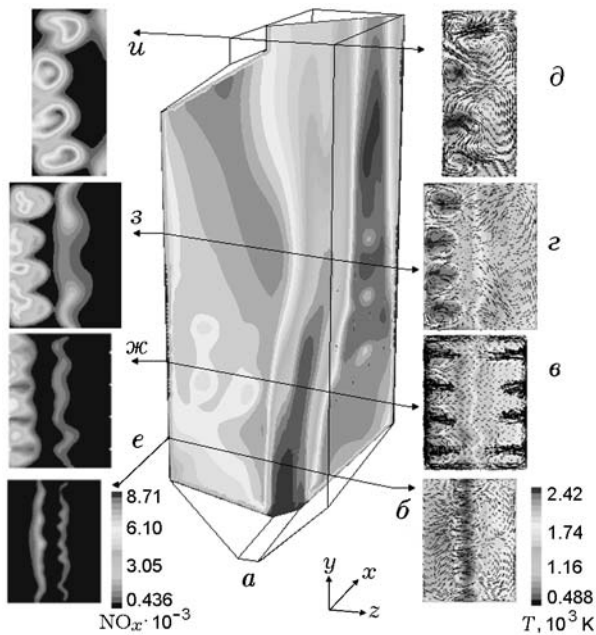


Рис. 4. Результаты моделирования горения в котле до его модификации:

a — поле температур в котле; *б-д* — поле температур (в горизонтальных плоскостях) в положениях, указанных стрелками; *е-и* — концентрации NO_x (в горизонтальных плоскостях) в положениях, указанных стрелками

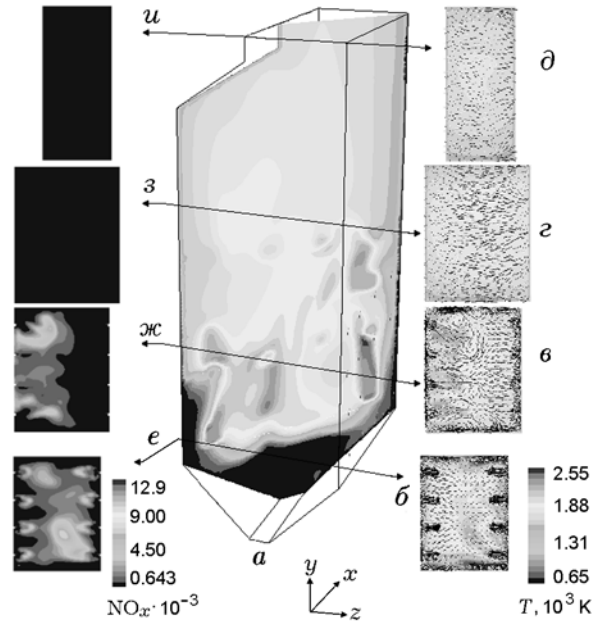


Рис. 5. Результаты моделирования горения в модифицированном котле:

a — поле температур в котле; *б-д* — поле температур (в горизонтальных плоскостях) в положениях, указанных стрелками; *е-и* — концентрации NO_x (в горизонтальных плоскостях) в положениях, указанных стрелками

для вычисления термодинамических свойств компонентов [22].

Поле температур в котле до его модификации при эксплуатационной нагрузке 250 МВт показано на рис. 4, *a* в вертикальной плоскости при диагональном расположении, поля температур и скоростей — на рис. 4, *б-д* в горизонтальных плоскостях, расположенных на уровне нижних горелок, вторых горелок, верхних горелок и на уровне входа газохода 1. Шкала температур одна и та же для всех рисунков. На рис. 4, *е-и* представлено распределение массовой концентрации NO_x по котлу. На рис. 5 приведены те же самые характеристики для этого же котла после модификации при эксплуатационных условиях.

Дизельное топливо инжестировалось только из третьего ряда горелок (верхний ряд) при полной эксплуатационной нагрузке и среднем отношении дизельное топливо/природный газ около 0.5. На большое количество тепла, выделяющегося при окислении летучих компонентов, на рис. 4, *г* указывают светлые области на кромках пламен, возникающих в третьем ряду горелок, в то время как температура

пламен от нижних рядов горелок меньше, чем для третьего ряда. Это связано с тем, что низшие и высшие теплоты сгорания дизельного топлива для котлов Shahid Rajaee выше, чем аналогичные теплоты природного газа.

По мере того как поток движется снизу к выходу, тепло передается трубчатому экрану, создавая градиент температуры, показанный на рисунке. Температура на нижнем уровне горелок меньше, чем на более высоких уровнях. Вблизи третьего ряда инжекторов идет интенсивное образование летучих газов, что свидетельствует о начале первой реакции, которая инициируется при относительно низких температурах. Окисление выходящих легколетучих происходит сразу, в соответствии с уравнениями, которые моделируют процесс горения [23].

При окислении дизельного топлива оксиды NO_x образуются преимущественно после выхода летучих из топлива и их окисления — на верхней кромке воздушных и топливных форсунок третьего ряда горелок, где достигаются высокие температуры. С другой стороны, согласно модели Зельдовича и модели «быстрых» NO_x образование NO_x при окислении природ-

Таблица 3

Сравнение выходов CO и NO_x при различных расположениях инжекторов и потоков острого дутья в модифицированном котле

Расход воздуха, кг/с			$\phi_1 = \phi_2$	Острое дутье, кг/с	(Острое дутье)/ (общий расход воздуха), %	Тепловые и «быстрые» NO _x , ppm	NO _x при дожигании, кг/с	(NO _x при дожигании)/ (тепловые + «быстрые» NO _x), %	Выход из котла, ppm		
основной	в горелке с низким выходом NO _x	вторичный							NO _x	CO	HC
116.7	12	90	0.7	121.3	35.6	168	35.5	21.1	132.5	3	0
100.5	12	90	0.8	137.5	40.4	201	54	26.8	147	3/6	0
88	12	90	0.9	150	44.1	319	105	32.9	214	4/3	0
78	12	90	1	160	47	718	266	37	452	8	0
70	12	89	1.1	169	49.4	816	318	38.9	498	17	0
63	12	87.5	1.2	177.5	51.5	711	298	41.9	413	21	0
57.2	12	85.2	1.3	185.6	54.6	243	105.5	43.4	137.5	27	0
52.3	12	82.7	1.4	193	56.7	165	75	45	90	31	0
48	12	80	1.5	200	58.8	130	60	46.1	70	64	0

Примечание. ϕ_1 — эквивалентное отношение в области горелок с низким выходом NO_x в модифицированном котле, ϕ_2 — эквивалентное отношение в области подачи второго топлива.

ного газа протекает главным образом в областях высоких температур и в нижней части котла соответственно. Определяющая роль высокой температуры, наряду с высокой концентрацией кислорода, в выходе NO_x подтверждается значительным увеличением выхода NO_x на уровне верхних горелок. Рост концентрации кислорода ожидался на тех уровнях, где струи входного воздуха обогащаются остаточным кислородом от горелок нижнего уровня.

Сравнение полей температур в котле до и после его модификации при полной эксплуатационной нагрузке показывает, что градиент температуры в начальном состоянии много выше градиента после модификации. Другими словами, количество азота в высокотемпературных областях в модифицированном котле меньше, чем в котле до модификации. Соответственно выход NO_x в немодифицированном котле много выше по сравнению с модифицированным.

В табл. 3 приведены результаты моделирования горения в модифицированном котле, в том числе и количества NO_x и CO, в условиях полной нагрузки. Моделирование выхода NO_x для модифицированного котла при эксплуатационных нагрузках 250, 200 и 150 МВт прогно-

зирует объемную долю общего NO_x на выходе из камеры 460, 356 и 229 ppm соответственно. Результаты моделирования показали, что применение горелок с частично перемешанными смесями, дающими низкий выход NO_x, с последующей ступенчатой подачей воздуха может сильно уменьшить выход NO_x в котлах без увеличения количества CO и несгоревших углеводородов (см. табл. 3 и рис. 4, 5).

Для выяснения влияния острого дутья (ОД) на уменьшение выхода NO_x проводилось сравнение отношения (количество ОД)/(общий расход воздуха) с отношением (NO_x при дожигании)/(тепловые + «быстрые» NO_x). Как следует из рис. 6, первое отношение играет важную роль в уменьшении образования NO_x. Таким образом, отношение (NO_x при дожигании)/(тепловые + «быстрые» NO_x) прямо пропорционально отношению (количество ОД)/(общий расход воздуха).

Изменение концентраций теплового и «быстрого» NO_x, а также NO_x, образующегося при дожигании, и концентраций выходящих из топки оксидов NO_x и CO в зависимости от эквивалентного отношения ϕ иллюстрирует рис. 7. Представленные результаты хорошо согласуются с результатами [24, 25].

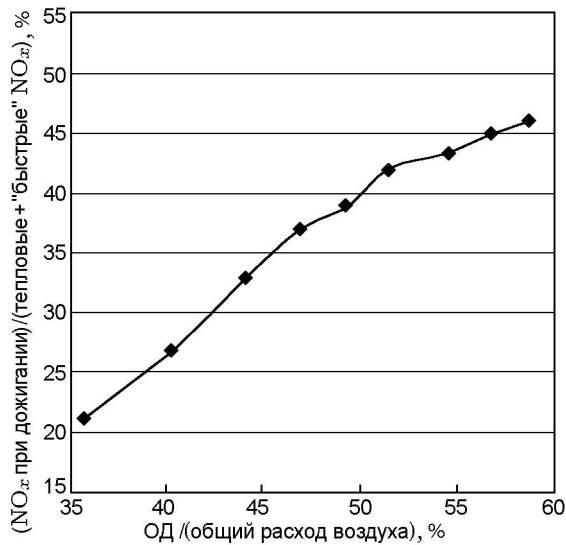


Рис. 6. Зависимость отношения (NO_x при дожигании)/(тепловые + «быстрые» NO_x) от отношения (количество ОД)/(общий расход воздуха)

В соответствии с рис. 7 точка $\phi = 1.4$ является оптимальной, потому что дальнейшее увеличение ϕ приводит к резкому росту концентрации СО с незначительным уменьшением выхода NO_x. Сравнение результатов показывает, что количество образовавшегося NO_x сокращается более чем на 70 % при использовании острого дутья и ступенчатой подачи воздуха. Такое сокращение NO_x очень хорошо согласуется с приведенными в [26] значениями 50 ÷ 75 %.

Результаты показывают, что лучшей

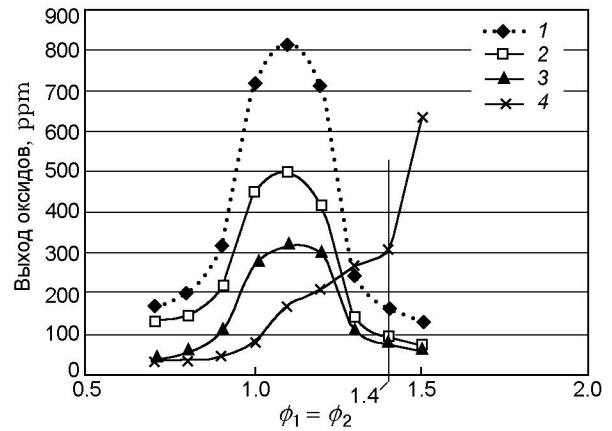


Рис. 7. Зависимость выхода NO_x, теплового + «быстрого» и образующегося при дожигании, а также концентраций NO_x и СО в выходном канале котла от коэффициента избытка топлива ϕ :

1 — тепловые + «быстрые» NO_x, 2 — NO_x на выходе из котла, 3 — NO_x при дожигании, 4 — СО (×10) на выходе из котла

стратегией для сокращения выхода NO_x, HCN, NH₃ является реализация горения богатых смесей ($\phi = 1.4$) на первой стадии процесса. Молекулярный азот, образующийся на первой стадии, не конвертируется в тепловой оксид азота NO, поскольку температура горения неуклонно уменьшается за счет излучения и конвективного переноса тепла. На второй стадии (повторный ввод воздуха) за счет повышения содержания кислорода ($\phi \approx 0.9$) создаются условия для полного окисления топлива, не сгоревшего в горелках на первой стадии (горелки с

Таблица 4

Измеренные объемные доли газовых компонентов внутри выходного канала котла перед точкой Лунгстрема и после нее

Мощность, МВт	Место отбора проб	Избыток воздуха, %	SO ₂ , ppm	NO _x , ppm	CO, ppm	CO ₂ , %	O ₂ , %	HC, ppm	Температура, °C	
									выходной канал	окружающая среда
168	До точки Лунгстрема	50.10	1670	272	24	10.9	1.63	0	271.5	37.7
168	После точки Лунгстрема	50.10	1400	267	2	8.96	5.19	0	141.6	30.3
171	До точки Лунгстрема	54	1824	406	8	10.89	1.78	0	379.9	36.5
171	После точки Лунгстрема	54	1284	295	3	8.05	6.79	0	151.4	28

низким выходом NO_x). Дальнейшее сокращение выхода NO при повторной подаче топлива имеет место в соответствии с реакцией $\text{CH}_i + \text{NO} \leftrightarrow$ продукты. Наконец, острое дутье добавляет некоторое количество воздуха к продуктам сгорания, затем температура уменьшается до 1500 °С. Отметим, что скорость образования NO_x при этой температуре очень низкая.

Для подтверждения результатов использовались такие основные контрольные параметры, как температура и объемные доли газов на выходе из котла (внутри выходного канала), где проводились регулярные измерения. В табл. 4 приведены измеренные объемные доли NO_x внутри выходного канала котла до его модификации [27]. Расчетные данные необходимо сравнивать с результатами измерения перед точкой Лунгстрема, поскольку возможно натекание, которое добавляет некоторое количество свежего воздуха в выходящий поток, уменьшая выход NO_x . Рассчитанная средне-взвешенная по сечению температура на выходе из топки (уровень 33.8 м) при полной эксплуатационной нагрузке равна 1682 К, что хорошо согласуется со значением 1687 К, приведенным в проектной документации [16]. Кроме того, моделирование показало, что объемная доля NO_x при эксплуатации на уровне мощности 150 МВт с 55 % добавочного воздуха равна 229 ppm, что согласуется с измеренным внутри выходного канала значением (см. табл. 4). Эти результаты подтверждают вывод о достаточной точности результатов моделирования.

Авторы признательны администраторам электростанции Shahid Rajae, особенно Mr. Afzal, за предоставление экспериментальных данных, использованных для обоснования модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Di'ez L., Corte's C., Arauzo I., Valero A. Combustion and heat transfer monitoring in large utility boilers // Intern. J. Therm. Sci. — 2001. — V. 40, N 5. — P. 489–496.
2. Hill S. C., Smoot L. D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems // Prog. Energy and Combust. Sci. — 2000. — V. 26. — P. 417–458.
3. Smoot L. D. A decade of combustion research // Prog. Energy and Combust. Sci. — 1997. — V. 23. — P. 203–232.
4. Coelho P. J., Carvalho M. G. Mathematical modeling of NO formation in a power station boiler // Combust. Sci. and Technol. — 1995. — V. 108. — P. 363–382.
5. Stanmore B. R., Visona S. P. Prediction of NO emissions from a number of coal-fired power station boilers // Fuel Process Technol. — 2000. — V. 64. — P. 25–46.
6. Baulch D. L. et al. Compilation of rate data for combustion modeling supplement I // J. Phys. Chem. — 1994. — V. 23. — P. 847.
7. Baulch D. L., Drysdall D. D., Horne D. G., Lloyd A. C. Evaluated Kinetic Data for High Temperature Reactions. — Butterworth, 1973.
8. Hanson R. K., Salimian S. Survey of rate constants in H/N/O systems // Combustion Chemistry / W. C. Gardiner, Jr (Ed.). — Springer Verlag, 1984.
9. Westbrook C., Dryer F. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion // Prog. Energy and Combust. Sci. — 1984. — V. 10. — P. 1–57.
10. Fenimore C. P. Studies of fuel-nitrogen in rich flame gases // Proc. Combust. Inst. — 1979. — V. 17. — P. 661.
11. DeSoete G. G. Overall reaction rates of NO and N_2 formation from fuel nitrogen // 50th Symp. (Intern.) on Combustion. — The Combustion Inst., 1975. — P. 1093–1102.
12. Mitchell J. W., Tarbell J. M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion // AIChE Journal. — 1982. — V. 28. — P. 302–11.
13. Bose A. C., Dannecker K. M., Wendt J. O. L. Coal composition effects on mechanisms governing the destruction of NO and other nitrogenous species during fuel rich combustion // Energy Fuels. — 1988. — V. 2. — P. 301.
14. Levy J. M., Chen L. K., Sarofim A. F., Beer J. M. NO /char reactions at pulverized coal flame conditions // 80th Symp. (Intern.) on Combustion. — The Combustion Inst., 1981. — P. 20–111.
15. Chen W., Smoot L. D., Hill S. C., Fletcher T. H. A global rate expression for nitric oxide reburning // Energy Fuels. — 1996. — V. 10. — P. 1046–1052.
16. Shahid Rajae Power Plant's Archives. Map No: K0022 {boiler frontview map}. — Iran, 1993.
17. Niroo Research. Metallurgical and Chemical Center. Fuel and Oil Lab. — Report No CF850084. — Iran, 2006.
18. FLUENT. — Fluent Inc. FLUENT 6.3.26 User Manual, 2007.
19. Launder B. E., Spalding D. B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. — London: Academic Press, 1972.
20. Jones W. P., Whitelaw J. H. Modeling and measurement in turbulent combustion // Proc. Combust. Inst. — 1985. — V. 20. — P. 233.
21. Crowe C., Sommerfield M., Tsuji Y. Multi-phase flows with droplets and particles. — CRC Press, 1998.
22. Kee R. J., Rupley F. M., Miller J. A. CHEMKIN II: a FORTRAN chemical kinetics

- package for the analysis of gas-phase chemical kinetics // Techn. Rep. SAND 89-8009. — Sandia National Labs, 1989.
23. **Li Z. Q., Wei Y., Jin Y.** Numerical simulation of pulverized coal combustion and NO formation // Chem. Eng. Sci. — 2003. — V. 58. — P. 5161–5171.
24. **Glarborg P., Miller J. A., Kee R. J.** Kinetic modeling and sensitivity analysis of nitrogen oxide formation in well-stirred reactors // Combust. and Flame. — 1986. — V. 65. — P. 177.
25. **Bartok W., Engleman V. S., Goldstein R., Del Valle E. G.** Basic kinetic studies and modeling of nitrogen oxide formation in combustion processes // AIChE Symp. Ser. — 1972. — V. 68, N 126. — P. 30.
26. **Kido Nobuo, Osamu Watanabe, et al.** Air Pollution Technology Manual. — Overseas Environmental Cooperation Center, Japan, 1998. — P. 175–183.
27. **Niroo Research.** Metallurgical and Chemical Center. Fuel and Oil Lab. — Report No CF870032. — Iran, 2008.

*Поступила в редакцию 6/V 2010 г.,
в окончательном варианте — 18/X 2010 г.*
