

ТЕПЛО- ЭНЕРГЕТИКА

В номере:

- *Исследование пусков на скользящем давлении во всем пароводяном тракте котла ТГМП-314 энергоблока 300 МВт Каширской ГРЭС*
- *Исследование возможности перевода котлов ТП-92 Яйвинской ГРЭС на непроектные виды углей*
- *Системы пылеприготовления с мельницами-вентиляторами к котлам крупных энергоблоков*

9 **2008**

**ООО МАИК «НАУКА/
ИНТЕРПЕРИОДИКА»**

С. Торайғырған
атындағы ПМУ-дің
академик С. Б. Қасымбаев
атындағы ғылыми

Издается с января 1954 года **КІТАПХАНАСЫ** Экспериментальный теоретический и научно-практический журнал

МОСКВА

№ 9 СЕНТЯБРЬ 2008

ООО МАИК «НАУКА/ИНТЕРПЕРИОДИКА»

Журнал с 1974 года переводится на английский язык под названием «Thermal Engineering» (<http://www.maik.ru>)

СОДЕРЖАНИЕ

Шаари А.Л., Гомболовский В.И., Чугреев А.А., Скуратов А.В., Коновалов В.К., Яшин О.В. Исследование пусков на скользящем давлении во всем пароводяном тракте котла ТГМП-314 энергблока 300 МВт Каширской ГРЭС	2	Каменецкий Б.Я. Надежность топочных экранов водогрейных котлов	37
Илюмов М.А., Супранов В.М., Росляков П.В., Новиков А.В. Исследование возможности перевода котлов ТП-92 Яйвинской ГРЭС на непроектные виды углей	7	Рищенко И.Л., Сухоруков И.А. Автоматизация пусков котельного оборудования энергблоков при внедрении полимасштабных автоматизированных систем управления Ч I	61
Мишина К.И., Леонов А.И. Особенности и преимущества технологии сжигания углей в высокотемпературном кипящем слое	19	Григорьев Р.Р., Залкинд В.И., Иванов П.П., Лялин Д.А., Мирошинченко В.И. Термодинамическая модель и анализ гибридных установок с твердооксидными топливными элементами и ГТУ	65
Алезнович А.И. Уточнение расчетной схемы закрепления частиц и роста шлаковых отложений	24	СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ	
Воинов А.П., Воинова С.А. Возможность управления внешней эрозией в котлах с кипящим слоем	29	Абдулагатов А.И., Степанов Г.В., Абдулагатов И.М. Критические свойства водных растворов Ч II	70
Лисейкин И.Д. Повышение эффективности водогрейных котлов в результате применения мембранных и оребранных поверхностей нагрева	34	КРИТИКА И БИОГРАФИЯ	
Баубеков К.Т. Исследование механизма образования оксидов азота в топках котла при ступенчатом сжигании газа	44	Перечень журнальных статей по топливу, топочным устройствам, вопросам горения и экологии, опубликованных в 2006—2007 гг.	78
Клепиков Н.С., Абыденников В.В., Волков А.Б., Симонов В.В., Векслер Ф.М., Монахова В.И., Огуцова Л.В. Системы пылеприготовления с мельницами-вентиляторами в котлах крупных энергблоков	51	ХРОНИКА	
		Алексей Данилович Трухний [к 70-летию со дня рождения]	3-я стр. обл.
		РЕКЛАМА	
		ОАО ТКЗ «Красный котельщик»	2-я стр. обл.
		ПТК «Сарган»	4-я стр. обл.

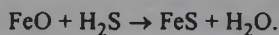
Исследование механизма образования оксидов азота в топках котлов при ступенчатом сжигании газа

Баубеков К.Т., канд. техн. наук

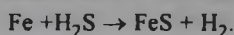
Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова¹

Приводятся краткие результаты исследований процесса ступенчатого сжигания природного газа, выполненных на близких по конструкции котлах БМ-35РФ, БГ-35 Кисловодской ТЭЦ, БГМ-35 (агрегат № 5) ПО «Тольяттиназот», БГ-35Р ПО «Карболит» (г. Орехово-Зуево), а также на модернизированном котле ПТВМ-30М (КВГМ-30) цеха № 40 АП «Куйбышевгазот»².

В настоящее время исследовано много способов ступенчатого (нестехиометрического) сжигания газа и мазута, значительная часть которых апробирована в процессе длительной эксплуатации на газомазутных котлах. Однако в некоторых работах [1—3] отмечается, что при подаче на котлы сверхкритического давления (СКД) сернистых мазутов и сероводородных газов применение таких способов сжигания проблематично из-за возможности возникновения в зоне нижней радиационной части (НРЧ) котлов сероводородной коррозии экранных труб. Действительно, при сжигании сернистых топлив в зоне боковых экранов НРЧ могут образовываться восстановительные зоны с высокой концентрацией сероводорода и продуктов неполного сгорания. Присутствие сероводорода в пристенной зоне котла при температурах металла выше 770 К приводит к прямой реакции его взаимодействия с поверхностью металла [4]:



Сульфидная коррозия протекает также и при прямом контакте сероводорода с металлом в соответствии с реакцией



Таким образом, при ступенчатом сжигании сернистых топлив потоки топливоздушную смеси с коэффициентом избытка воздуха $\alpha < 1$ при горении будут характеризоваться образованием развитых восстановительных зон, обусловленных наличием H_2S и других продуктов неполного сгорания. В качестве примера на рис. 1 показана кривая изменения локальных концентраций сероводорода в зависимости от локальных избытков воздуха в топке котла ПК-41-1. Из рисунка видно, что поскольку сероводород исчезает при $\alpha_{\text{лок}} > 1,25$, то реализацию самого принципа ступенчатого сжигания

сернистого топлива необходимо организовывать с образованием в пристенном участке зон с $\alpha_{\text{лок}} > 1,25$.

Для оптимизации ступенчатого сжигания сернистых топлив в топках мощных котлов (где в зоне максимального тепловыделения $T_{\text{ст}} \gg 770 \text{ К}$ и где возможна высокотемпературная коррозия) автором совместно с Л.М. Цирульниковым и А. Валиходжаевым разработан другой способ (назовем его способ 1) ступенчатого сжигания. Сущность его заключается в том, что при ступенчатом сжигании сернистых топлив (как правило, с обязательным образованием двух зон с $\alpha_1 < 1$ и $\alpha_2 > 1$) для предотвращения коррозии боковых экранных труб восстановительную среду в пристенных участках заменяют на окислительную путем поддержания коэффициента избытка воздуха в потоках топливоздушной смеси, подаваемых через крайние вертикальные ряды горелок, $\alpha_3 = 1,25 \dots 1,28$ (рис. 2). При этом для изолирования пристенных участков от восстановительной среды потоки из крайних вертикальных рядов горелок формируют в виде плоских струй, параллельных боковым стенкам топки котла (см. рис. 2). Такие потоки топливоздушной смеси позволяют создавать плоскую обволакивающую аэродина-

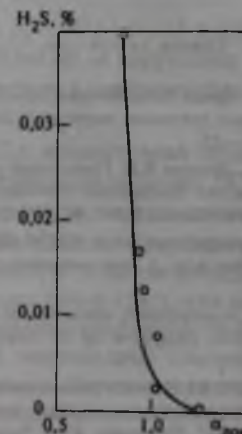


Рис. 1 Зависимость локальных концентраций сероводорода от локальных избытков воздуха в топке котла ПК-41-1

¹140008, Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, д. 64. ПГУ им. С. Торайгырова.

² Поскольку эти работы проводились автором в АОЗТ ЭКОЭН в период с 1991 по 1992 г. все предприятия России указаны под их старыми наименованиями.

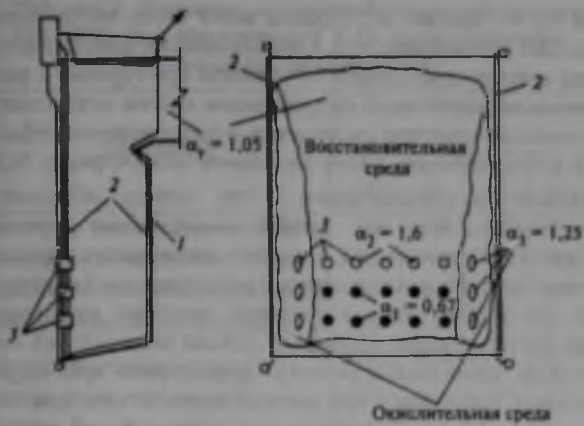


Рис 2 Схема перераспределения топливоздушной смеси при ступенчатом сжигании сернистых топлив в топке котла с однофронтной многоярусной компоновкой горелок 1 — топка котла, 2 — экранные трубы, 3 — горелки с круглыми и эллиптическими амбразурами

мическую стенку, отделяющую восстановительную среду с H_2S от пристенной зоны.

Идея ступенчатого сжигания сероводородсодержащего газа и сернистого мазута получила дальнейшее развитие в способе 2 и конструкции горелок со встроенной ступенью горения (рис. 3, а, б), разработанных автором совместно с А. Валиходжаевым. При таком способе воздух подают через горелки равномерно по всему сечению потока, а топливо — неравномерно: с преобладанием расхода топлива в одной половине потока (в количестве 60...70 %), и с недостатком его в другой (в количестве 30...40 % общего расхода топлива). При этом в зоне сжигания образуются два сомкнутых параллельных потока с окислительной и восстановительной средами (см. рис. 3, б). Для эффективного разделения сомкнутых потоков на окислительную и восстановительную среды, а также снижения скорости диффузии, между потоками вводится инертная среда (рециркулирующие газы, пар или вода) в виде плоской струи (см. рис. 3, а).

Способ 2 является амфотерным и может использоваться для предотвращения:

высокотемпературной коррозии пристенных участков топки при сжигании сернистых топлив [например, в топке котла ТГМП-204 с подовой компоновкой горелок путем разделения потоков топливоздушной смеси внутри горелок (рис. 4)] с образованием агрессивной восстановительной зоны в центральной части топки и созданием защитной окислительной зоны в пристенных участках топки; при этом около НРЧ обеспечивается снижение влияния максимальной температуры, в пристенной же зоне средней и верхней радиационных частей температура металла невысока ($T_{ст} \ll \ll 770 \text{ K}$) и даже в случае проскока H_2S высокотемпературная коррозия уже невозможна;

окалинообразования (путем инверсии способа) в металлургических печах 1 (рис. 5), оборудованных

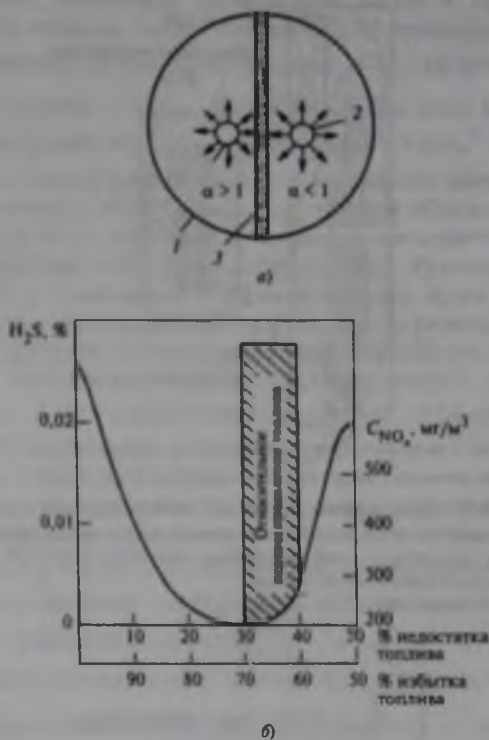


Рис 3. Схема перераспределения топливоздушной смеси в двух сомкнутых потоках в горелке (а) и влияние перераспределения топлива в окислительной и восстановительной зонах ступенчатого сжигания на концентрации оксидов азота C_{NO_x} и сероводорода C_{H_2S} (б)

1 — амбразура горелки; 2 — сопла для подачи топлива, 3 — шлицы для подачи инертной среды

преимущественно газовыми горелками 2 при безокислительном нагреве заготовок 3, предназначенных дляковки различных деталей.

Кроме того, способ 2 после некоторой конструктивной доработки можно использовать при коксовании и безостаточной газификации твердого топлива.

Таким образом, ступенчатое сжигание топлива, являющееся средством подавления образования оксидов азота, должно не создавать дополнительные проблемы, а, напротив, помогать решать их при использовании анизотропности и амфотерности зон нестехиометрического сжигания.

Для реализации ступенчатого сжигания, например, на котлах с многоярусной фронтальной компоновкой горелок в целях снижения выбросов оксидов азота перераспределение газообразного топлива производят следующим образом: расход его в двух сомкнутых потоках составляет в нижней части канала горелки 60...70 % общего расхода, а в верхней части — 40...30 % (см. рис. 3, б). Этот способ сжигания отработывался на котлах Кисловодской ТЭЦ (КТЭЦ) для подавления оксидов азота при сжигании бессернистого природного газа Ставропольского месторождения. Котлы БМ-35РФ и БГ-35 паропроизводительностью соответственно 13,9 и

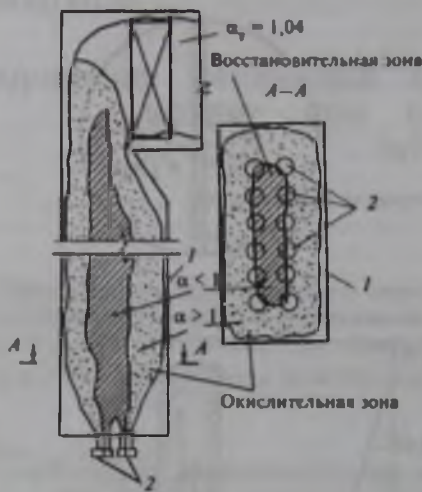


Рис. 4. Схема перераспределения топливоздушной смеси в окислительной и восстановительной зонах при ступенчатом сжигании в топке экранированного котла ТГМП-204 с подовой компоновкой горелок.
1 — топка котла; 2 — горелки



Рис. 5. Схема реализации ступенчатого сжигания топлива для предотвращения окалинообразования в процессах безокислительного нагрева заготовок в газовых печах.
1 — газовая печь безокислительного нагрева; 2 — газовая горелка; 3 — заготовки, предназначенные дляковки различных деталей

8,3 кг/с и параметрами острого пара $T_{0п} = 713$ К и $p_{0п} = 4$ МПа имеют П-образную компоновку. У обоих котлов на фронтальной стенке топки установлены в два яруса четыре двухпоточные реверсивные горелки конструкции САФВНИИпромгаз³ (по две в каждом ярусе). До внедрения нового способа сжигания топлива на котлах КТЭЦ были определены уровни концентрации оксидов азота C_{NO_x} при номинальной нагрузке и коэффициенте избытка воздуха за топкой $\alpha_t = 1,04 \dots 1,12$. На котле БМ-35РФ C_{NO_x} составила 290...325, на котле

³Среднеазиатский филиал Всесоюзного научно-исследовательского института использования газа в народном хозяйстве и подземного хранения нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов.

БГ-35 — 160 мг/м³. Прежде всего было экспериментально установлено, что в находящихся в работе горелках конструкции САФВНИИпромгаз при горении с различными степенью и направлением крутки воздушного потока, а также при сходящемся и расходящемся эффекте взаимодействия соседних пламен концентрация NO_x изменялась незначительно. Это можно объяснить несовершенством как данной модификации горелки САФВНИИпромгаз, так и вообще конструкции горелок этого типа. Горелки указанной модификации фактически не обеспечивают в широких пределах изменение крутки воздушного потока (от сильно закрученного потока до прямого) и не могут формировать ярко выраженные сходящиеся или расходящиеся потоки для получения эффекта взаимодействия пламен. Кроме того, в режиме прямого потока из-за соударения встречных потоков внутри горелки создается турбулизированный воздушный поток, незначительно снижающий скорость диффузии окислителя и, следовательно, скорость реакции эмиссии NO_x .

На основании проведенных расчетов была выполнена следующая реконструкция газовадающей части газовой насадки горелки: удлинена центральная газовая труба до размеров 133×4 мм и в ней просверлены 16 отверстий диаметров 18 мм (в верхней части газовой трубки просверлены пять, в нижней — 11 отверстий в два ряда с шагом 38 мм). Следует заметить, что давление газа перед горелками обоих ярусов при первом предварительном варианте сжигания (ступенчатость организована только путем разбаланса топлива внутри горелок) было $p_0 = 6,5$ кПа. При втором (оптимальном) варианте сжигания (дополнительно создается разбаланс топлива между горелками № 1 и 2 первого яруса и горелками № 3 и 4 второго яруса) путем постепенного перераспределения газа по ярусам давление составило: в горелках первого яруса $p_{1,2} = 22$ кПа, а второго яруса — $p_{3,4} = 1$ кПа. Однако после первой серии испытаний для обеспечения надежности эксплуатации горелок № 3, 4 в рекомендованном режиме ступенчатого сжигания газа диаметры газораздающих отверстий были уменьшены с 18 до 7 мм.

Рассмотренный способ сжигания в течение более чем 16 лет используется на котлах БМ-35РФ и БГ-35 КТЭЦ после реконструкции газовадающего узла реверсивной горелки конструкции САФВНИИпромгаз, но (в связи с незавершенностью всего запланированного комплекса работ) без ввода инертной среды. Анализ эффективности этого способа при подаче воздуха прямоточно-турбулентным потоком, а природного газа через горелки двумя неравными потоками ($p_0 = 6,5$ кПа и соотношение расходов газа по ярусам $B_1:B_2 = 1:1$) показал, что ступенчатое сжигание газа можно осуществить при соотношении избытков воздуха в восстановительной и окислительной зонах $\alpha_v/\alpha_{ок} = 0,7/1,3$. При этом концентрация оксидов азота снизится с 300 до примерно 170 мг/м³ ($\alpha_t = 1,05 \dots 1,09$), т.е. на 43 % бла-

Таблица 3. Результаты исследования состава и восстановительных свойств CO и H₂ на котле БГМ-35 (агрегат № 5) в искусственно создаваемых режимах незначительного недожога в дымовых газах при одно- и двухступенчатом сжигании природного газа

Режимный параметр	Номер опыта								
	1/10	2/11	3/12	4/13	5/14	6/15	7/16	8/17	9/—
Расход острого пара $D_{0,м}$, кг/с	11,5/11,5	11,5/11,5	11,4/11,7	11,45/11,7	11,54/11,5	11,48/11,7	11,6/11,6	11,8/11,5	11,8/—
Температура дымовых газов после пароперегревателя, К	853/829	853/853	846/854	846/850	855/854	848/861	843/868	843/855	862/—
Концентрация O ₂ , %	5,2/5,0	3,8/3,9	3,5/3,3	2,0/3,0	1,9/2,6	1,7/1,6	1,6/1,4	1,5/1,2	1,0/—
Коэффициент избытка воздуха:									
в топке α_T	1,32/1,31	1,23/1,23	1,21/1,19	1,11/1,17	1,10/1,15	1,10/1,09	1,09/1,08	1,08/1,07	1,06/—
в горелках верхнего яруса α_2	1,09/1,08	1,00/1,00	0,98/0,96	0,88/0,94	0,89/0,92	0,87/0,86	0,86/0,85	0,85/0,84	0,83/—
в горелках нижнего яруса α_1	1,09/0,83	1,00/0,75	0,98/0,71	0,88/0,69	0,89/0,67	0,87/0,61	0,86/0,60	0,85/0,59	0,83/—
Концентрация:									
CO ₂ , %	9,8/9,1	9,7/9,7	9,9/10,0	10,8/10,2	10,8/10,5	10,9/11,0	11,0/11,1	11,0/11,2	11,8/—
CO, ppm	16/1	26/2	9/30	18/37	583/328	1 840/1 060	1 990/2 906	1 272/3 090	1 560/—
H ₂ , %	0/0	0/0	0/Следы	0/Следы	0,030/Следы	0,026/—	0,064/0,086	0,120/0,140	—/—
NO, мг/м ³	369/250	378/230	371/215	318/160	232/160	176/187	182/136	195/120	218/—
NO ₂ , мг/м ³	2/4	—/4	4/4	4/4	4/6	6/4	8/6	8/6	8/—

Примечания: 1. В числителе — данные при одноступенчатом, в знаменателе — при двухступенчатом сжигании природного газа. 2. Расход природного газа 1,03 м³/с.

В [8] также отмечается, что при сжигании газообразного топлива с $\alpha < 1,0$ выход «быстрых» оксидов азота может составлять 65...95 мг/м³ в пересчете на $\alpha = 1,4$. Это тот минимальный уровень выбросов NO_x, которого принципиально можно достичь благодаря воздействию на процесс горения.

С учетом выявленных закономерностей ступенчатого сжигания газа и данных, полученных в ходе исследований влияния топочного процесса на выход «быстрых» оксидов азота, была произведена малозатратная реконструкция котла ПТВМ-30М (КВГМ-30) с подводом (до 15 %) вторичного воздуха над каждой горелкой и балластированием топки газами рециркуляции (с саморециркуляцией $r = 0,17...0,19$) в цехе № 40 АП «Куйбышевазот». При этом положительный эффект был достигнут благодаря близкому (менее 1 м) конструктивному расположению коробов котлов, идущих от дымососа и дутьевого вентилятора, и возможности создания подпора существующими шиберами перед общим коллектором газохода, соединенного с дымовой трубой. Основные результаты измерений, проведенные с помощью газоанализатора Testo-33 при тепловой нагрузке котла 35 МВт (30 Гкал/ч), взятые из актов контрольных измерений и акта внедрения от 10/II 1992 г., представлены в табл. 4. Полученный экспериментально автором один из самых низких уровней выбросов оксидов азота (примерно 42 мг/м³) был подтвержден в работах других исследователей [3, 9].

Таблица 4. Основные результаты измерений, проведенных на котле ПТВМ-30М (КВГМ-30) при тепловой нагрузке 35 МВт

Параметр	Режим работы котла	
	с отключенными устройствами по снижению NO _x	с включенными устройствами по снижению NO _x
Тепловая нагрузка, МВт	35	35
Концентрация O ₂ , %	2,2	2,6
Коэффициент избытка воздуха α_T	1,12	1,14
Концентрация:		
CO ₂ , %	10,7	10,4
CO, %	0	0
NO _x , мг/м ³	126	52
Концентрация NO _x , приведенная к $\alpha = 1,4$ мг/м ³	100	42
Относительное снижение NO _x , %	—	58

В [3] с использованием средств численного моделирования было найдено решение, радикально улучшающее процессы перемешивания дымовых газов и воздуха при организации рециркуляции. При рациональных

Таблица 2. Концентрации оксидов азота, измеренные на котле БГ-35Р, в продуктах сгорания природного газа и смеси природного и формалинового газов при одно- и двухступенчатом сжигании топлива

Вид сжигаемого топлива и его состав	Усредненные концентрации оксидов азота, мг/м ³	
	Одноступенчатое сжигание	Двухступенчатое сжигание
Природный газ (100 %)	300	160
Смесь природного (80 %) и формалинового (20 %) газов	123*	58*

* Концентрация оксидов азота в дымовых газах приведена к $\alpha = 1,4$.

подаче природного газа и его перераспределения между ярусами горелок и одноступенчатого сжигания смеси природного и формалинового газов. В обоих режимах происходит двукратное снижение концентрации оксидов азота (до 160 мг/м³). При двухступенчатом сжигании такой же смеси газов концентрация оксидов азота снижается еще в 2 раза (75 мг/м³). Разбавление дымовых газов присосами воздуха в конвективную шахту ($\alpha = 1,4$) приводит в итоге к четырехкратному снижению концентрации оксидов азота (до предельно низкого значения — около 58 мг/м³). Такой эффект, видимо, можно объяснить изменением степени перераспределения избытка воздуха в зоне горения в сторону более широкой вилки ($\alpha_{в}/\alpha_{ок}$) «богатых» и «бедных» топливовоздушных смесей, которое препятствует образованию, во-первых, «быстрых» оксидов азота в верхней части топки после смешения окислительной и восстановительной зон горения благодаря снижению температуры, обусловленному уменьшением концентрации окислителя.

Измеренные концентрации бенз(а)пирена соответствовали налаженным режимам горения газа и не вызвали у специалистов ПО «Карболит» опасений, связанных с увеличением этих концентраций.

Для исследования возникновения экстремальных восстановительных подзон в зависимости от коэффициента избытка воздуха в топках аналогичного котла БГМ-35 (агрегата № 5) ПО «Тольяттиазот» автором совместно с А.Н. Ключаревым были проведены сравнительные испытания с 14 по 17 февраля 1992 г. Как видно из табл. 3, эксперименты проводились на котле, находившемся в изношенном состоянии. В связи с большим количеством неорганизованного воздуха, поступавшего с присосами в топку и газоходы котла, недожог топлива появлялся уже при $\alpha_{т} = 1,07...1,08$ и, соответственно, образовывалось несколько большее количество NO_x , чем на котле Кисловодской ТЭЦ. В сопоставительных условиях (при разрежении в верх-

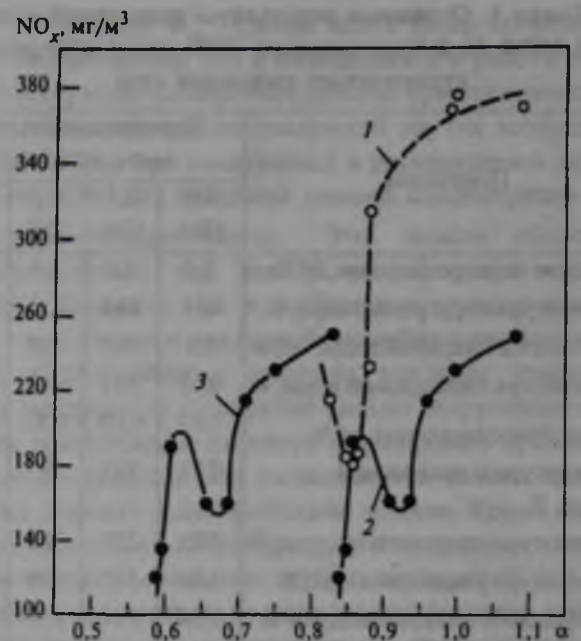


Рис. 6. Концентрация оксидов азота в зависимости от коэффициента избытка воздуха в горелках при одноступенчатом (кривая 1) и двухступенчатом (кривые 2 и 3) сжигании природного газа в топке котла БГМ-35. В горелках: 1 — верхнего и нижнего яруса (при $\alpha_1 = \alpha_2$), 2 — верхнего яруса (при $\alpha = \alpha_1$); 3 — нижнего яруса (при $\alpha = \alpha_2$)

ней части топки $S_T = -30$ Па и присосах в топку $\Delta\alpha_T \approx 0,23$) были исследованы состав и восстановительные свойства CO и H_2 в искусственно создаваемых режимах незначительного недожога в дымовых газах при одно- и двухступенчатом сжигании природного газа. Из табл. 3 следует, что постепенное снижение избытков воздуха в зоне горения, определяемое наличием незначительного количества восстановителей ($C_{H_2} = 0,12...0,14\%$, $C_{CO} = 1\ 272...3\ 090$ ppm) на выходе из топки, приводит к резкому снижению (в 2 раза) образования оксидов азота при $\alpha < 0,88$ в режиме одноступенчатого сжигания газа ($C_{NO_x} = 176$ мг/м³). При дальнейшем уменьшении избытка воздуха ($\alpha < 0,83$) появляется тенденция к росту C_{NO_x} , связанному с образованием «быстрых» оксидов азота (рис. 6). Эти данные качественно согласуются с исследованиями [8]. При двухступенчатом сжигании газа и соотношении расходов топлива $B_2:B_1 = 0,75:1,25$ значение C_{NO_x} составляет примерно 250 мг/м³, а постепенное снижение избытков воздуха в зоне горения также приводит к постепенному двукратному снижению C_{NO_x} (120 мг/м³) (см. рис. 6). При этом, несмотря на взаимодействие топочных процессов в верхнем и нижнем ярусах, четко прослеживается резкое снижение образования NO_x по «термическому» при $\alpha < 0,86$ и «быстрому» при $\alpha < 0,61$ механизмам.

предельных, с точки зрения авторов [3], значениях $r = 15...17\%$ при работе без подогрева воздуха и $r = 17...20\%$ при работе на горячем воздухе достигнуто уменьшение концентрации NO_x в 7,3 раза, что согласуется с предсказанным в [3] значением $C_{\text{NO}_x} = 80 \text{ мг/м}^3$. В [10, 11] отмечается, что концентрация «быстрого» монооксида при $\alpha_1 = 0,60$ (частичной нагрузке) и $\alpha_1 = 0,65$ (полной нагрузке) может достигнуть приблизительно 47 и 115 мг/м^3 . Однако согласно [11] влияние рециркуляции газов на выход NO_x в этих условиях незначительно даже при их равномерном вводе в поток первичного воздуха.

Согласно экспериментальным исследованиям, выполненным в [8] (см. рис 4), при $\alpha \leq 0,9$ эмиссией «термических» оксидов азота можно полностью пренебречь, а при избытке воздуха $\alpha_1 > 0,6...0,65$ и $\alpha_1 < 0,80...0,85$ в начальной стадии факела образуется минимальное количество «быстрого» монооксида азота. Согласно экспериментальным данным, полученным автором, это минимальное количество соответствует $\alpha_1 < 0,57$. Тем не менее результаты, приведенные в этой статье, и данные [8] качественно согласуются между собой.

По мнению автора, влияние рециркуляции на снижение концентрации «быстрого» монооксида азота при ступенчатом сжигании газа можно также объяснить изменением степени перераспределения избытка воздуха в сторону более широкой вилки между зонами «богатых» и «бедных» топливовоздушных смесей, что препятствует интенсификации горения и вторичной эмиссии «термических» оксидов азота.

Таким образом, при оптимизации конструкции и технологических процессов котлов при ступенчатом сжигании газообразного топлива для эффективного подавления эмиссии «быстрых» и «термических» оксидов азота необходимо двойное воздействие: на зону максимального образования «быстрых» оксидов азота со смещением ее в сторону более «богатых» смесей и на общую зону догорания в верхней части топки с балластированием этой зоны газами рециркуляции.

Выводы

1. Разработанный амфотерный способ нестехиометрического сжигания топлива, при котором используется либо окислительная среда для предотвращения коррозии боковых экранных труб ($\alpha = 1,35...1,50$, а $C_{\text{NO}_x} = 0$), например в пристенной зоне экранированной топки котла ТГМП-204 с подовой компоновкой горелок, либо восстановительная среда ($\alpha = 0,60...0,75$, а $C_{\text{NO}_x} = 0$) — в газовой печи безокислительного нагрева для предотвращения окисления заготовок и образования окалины, и его аналог можно применять и при настенной компоновке горелок, а также после некоторой

конструктивной доработки в процессах коксования и безостаточной газификации угля.

2. В результате экспериментального поиска оптимальных восстановительных и окислительных подзон горения в топках котлов БГМ-35РФ и БГ-35 путем комбинирования встроенной ступени внутри горелок ($\alpha_{\text{в}}/\alpha_{\text{ок}} = 0,7/1,3$) и перераспределения газа по ярусам (в соотношении $B_1:B_2 = 1,7:0,3$) удалось путем захвата зоны горения в более широкую вилку [$\alpha_{\text{в}}/\alpha_{\text{ок}} = (0,17...0,47)/(1,79...1,91)$] реализовать условия, способствующие подавлению образования NO_x по «быстрому» и «термическому» механизмам, и значительно снизить концентрацию оксидов азота при сохранении концентрации сажи и бенз(а)пирена на предельно низком уровне.

3. При оптимизации конструкции котлов малой мощности и технологических процессов, протекающих в них при ступенчатом сжигании газообразного топлива в диффузионных горелках, для эффективного подавления эмиссии «быстрых» и «термических» оксидов азота необходимо двойное воздействие: на зону максимального образования быстрых оксидов азота со смещением ее в сторону более «богатых» смесей и на общую зону догорания в верхней части топки с балластированием этой зоны газами рециркуляции.

Список литературы

1. Разработка рекомендаций по снижению выбросов оксидов азота для газомазутных котлов ТЭС / П.В. Росляков, В.А. Двойнишников, А.Э. Зелинский и др. // Электрические станции. 1991. № 9. С. 9—17.
2. Енякин Ю.П., Котлер В.Р. Технологические методы сокращения выбросов оксидов азота // Теплоэнергетика. 1994. № 6. С. 17—20.
3. Совершенствование рабочих процессов в топках котлов ТЭЦ-21 на основе применения современных средств численного моделирования термодинамических процессов / А.П. Тишин, И.Т. Горюнов, Ю.Л. Гуськов и др. // Электрические станции. 2003. № 10. С. 7—12.
4. Ахмедов Р.Б., Цирульников Л.М. Технология сжигания газа и мазута в парогенераторах. Л.: Недра, 1976.
5. Баубекоев К.Т. Разработка экспресс-способа сокращения выбросов оксидов азота путем ступенчатого сжигания природного газа в топках котлов с однофронтной многоярусной компоновкой горелок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1989.
6. А.с. 1208412 (СССР). Способ работы призматической топки / Л.М. Цирульников, А. Валиходжаев, К.Т. Баубекоев и др. // Открытия. Изобретения. 1986. № 4. С. 220.
7. Опыт длительной эксплуатации котлов ТГМ-94 и ТГМ-84 в режиме двухступенчатого сжигания сероводородсодержащего газа / Л.М. Цирульников, К.Т. Баубекоев, Я.И. Соколова и др. // Электрические станции. 1988. № 5 / С. 19—22.
8. Росляков П.В., Бейцзин Чжун, Тимофеева С.А. Минимально достижимый выход оксидов азота в топках котлов // Теплоэнергетика. 1992. № 8. С. 47—49.
9. Упрощенная схема рециркуляции дымовых газов как средство сокращения выбросов оксидов азота / В.Р. Котлер, Е.Д. Кругляк, С.Е. Беликов, Б.Н. Васильев // Энергетик. 1995. № 1. С. 16—17.
10. Эффективность сочетания технологических методов подавления NO_x на котле ТП-87 при сжигании газа / А.М. Архипов, В.Б. Прохоров, В.С. Пашинкин, А.В. Крестов // Теплоэнергетика. 2000. № 6. С. 32—34.
11. Росляков В.П. Разработка теоретических основ образования оксидов азота при сжигании органических топлив и путей снижения их выхода в котлах и энергетических установках: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: МЭИ, 1993.

Таблица 1. Основные результаты испытаний котла БМ-35РФ № 2 Киселоводской ТЭЦ после внедрения ступенчатого сжигания газа

Показатель	Паропроизводительность, кг/с (т/ч)			
	7,0 (25)	8,3 (30)	11,1 (40)	13,9 (50)
Давление перегретого пара, МПа	3,3	3,6	3,6	3,6
Температура перегретого пара, К	684	693	713	713
Давление питательной воды, МПа	5,3	5,2	5,5	5,5
Температура питательной воды, К	413	413	413	413
Расход природного газа, м ³ /с	0,52	0,68	0,83	1,13
Температура в поворотной камере, К	723	753	793	835
Температура холодного воздуха, К	285	287	288	286
Температура уходящих газов, К	389	395	399	419
Коэффициент избытка воздуха за пароперегревателями $\alpha_{пп}$	1,24	1,18	1,11	1,10
Концентрация оксидов азота, мг/м ³ :				
измеренная за пароперегревателями	85	90	110	115
приведенная к $\alpha = 1,4$	75	76	87	90
Концентрация бенз(а)пирена, мкг/100 м ³	Следы	Следы	0,96	0,73
Концентрация сажи, мг/м ³	4,77	8,59	4,21	4,29

годаря малозатратной реконструкции газораздающих частей горелок. Однако из-за того, что, во-первых, сомкнутые потоки довольно быстро перемешиваются и, во-вторых, технологический процесс сжигания нужно вести в запредельных областях эмиссии NO_x, образующегося по «быстрому» и «термическому» механизмам, лучшего результата достичь не удалось.

Дальнейший экспериментальный поиск оптимальных восстановительных и окислительных подзон горения в топке проводился путем комбинирования предвключенной ступени внутри горелок ($\alpha_{в}/\alpha_{ок} = 0,7/1,3$) и перераспределения газа по ярусам (при $p_{1,2} = 22$ и $p_{3,4} = 1$ кПа, т.е. в соотношении $V_1 \cdot V_2 = 1,7:0,3$). В результате этого поиска удалось при захвате зоны горения в более широкую вилку [$\alpha_{в}/\alpha_{ок} = (0,17...0,47)/(1,79...1,91)$] реализовать условия, способствующие подавлению образования NO_x по «быстрому» и «термическому» механизмам, а также значительно снизить концентрацию оксидов азота при сохранении концентрации сажи и бенз(а)пирена на предельно низком уровне. Визуально в этих условиях горение газа было похоже на горение мазута, что вполне соответствует наличию четырех зон растянутого горения. Основные результаты испытаний котла БМ-35РФ в найденном оптимальном режиме нестехиометрического сжигания газа представлены в табл. 1.

Опыт длительной эксплуатации котлов в 1991—2005 гг. показал, что для котла БМ-35РФ концентрация NO_x составила примерно 90, сажи — 1...10 мг/м³ и бенз(а)пирена — 0,1...1,0 мкг/100 м³. Для котла БГ-35 концентрация NO_x составила примерно 65 мг/м³. Появились также предпосылки для проведения дальнейших исследований процессов подавления образования оксидов азота благодаря применению специфических конструкций горелочных устройств. Руководству КТЭЦ и Грозненской ТЭЦ-2 был выдан проект реконструкции горелочных устройств с возможностью регулируемого перераспределения газа внутри горелок. Помимо двух зон с восстановительной $\alpha_{в} = 0,82...0,89$ и окислительной $\alpha_{ок} = 1,22...1,36$ средней [5—7], снижающих в основном «термические» оксиды азота, с помощью встроенной ступени горения созданы четыре растянутые подзоны с сильно выраженными восстановительными $\alpha_{в} = 0,17...0,47$ и окислительными $\alpha_{ок} = 1,79...1,91$ свойствами, которые позволяют обойти обе зоны наибольшего образования оксидов азота (соответствующие $\alpha_{быстр}^{max}$ и $\alpha_{терм}^{max}$) и таким образом дополнительно снизить C_{NO_x} благодаря по-

давлению образования NO_x по «быстрому» и «термическому» механизмам. Однако отсутствие предусмотренной в способе 2 рециркуляции, видимо, привело к дальнейшей интенсификации горения после смешения «богатых» ($\alpha_1 < 1$) и «бедных» ($\alpha_2 > 1$) топливовоздушных смесей в верхней части топки и вторичной эмиссии NO_x по «термическому» механизму.

Для проверки этой версии и реализации условий, направленных на подавление образования NO_x по «быстрому» и «термическому» механизмам, автором совместно с А.Н. Ключаревым в АОЗТ «ЭКОЭН» были проведены сравнительные исследования на котле БГ-35Р ПО «Карболит» при одно- и двухступенчатом сжигании природного газа и периферийной дополнительной подаче формалинового газа вокруг горелок нижнего яруса в количестве примерно 20 % общего расхода топлива. Состав формалинового газа в период испытаний был следующий (в % об.):

CO ₂	3,2
CO.....	1,8
H ₂	17,6
O ₂	0,1
Формальдегид.....	1,4
Метанол CH ₃ OH.....	4,0
N ₂	71,9

В табл. 2 проводится сравнение одно- и двухступенчатого сжигания чистого природного газа и смеси природного и формалинового газов. Все замеры сделаны за пароперегревателями при $\alpha_{пп} = 1,05...1,10$ и отсутствии химического недожога ($q_3 = 0$). Данные таблицы свидетельствуют о сопоставимости режимов, организованных путем двухступенчатого сжигания при