

УДК 662.995:662.61

Таймаров М.А. – доктор технических наук, профессор

E-mail: taimarovma@yandex.ru

Ахметова Р.В. – старший преподаватель

E-mail: electric-station@mail.ru

Сунгатуллин Р.Г. – старший преподаватель

E-mail: ee-kgeu@mail.ru

Казанский государственный энергетический университет

Адрес организации: 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

Лавирко Ю.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: lav.yu55@gmail.com

Желтухина Е.С. – студент

E-mail: lizaetoile@gmail.com

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Снижение вредных выбросов в атмосферу оксидов азота котлами ТЭС

Аннотация

Постановка задачи. Целью исследования статьи является оптимизации режимных параметров работы котлов ТГ-104 Сургутской ГРЭС-1 и снижения выбросов оксидов азота при сжигании попутного газа с применением малотоксичных горелок и с рециркуляцией дымовых газов, подаваемых в количестве до 8 % дымососом рециркуляции из опускного газохода в смеситель воздуховода перед горелками. Состав попутного газа при экспериментах был следующий: метан $\text{CH}_4 = 92,37$ % (объемных), этан $\text{C}_2\text{H}_6 = 4,74$ %, пропан $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,77$ %. Использовались прямоточно-вихревые горелки ГМПВ-50 в количестве 12 штук на один котел. Горелки расположены на фронтальной стене топочной камеры в 2 яруса: первый нижний ярус на отметке 11,1 м, второй ярус на отметке 14,1 м. Котлы ТГ-104 имеют однокорпусное исполнение и П-образную компоновку поверхностей нагрева. Стены топки полностью экранированы трубами наружным диаметром 60 мм и толщиной стенки 6 мм из стали 20 с шагом 64 мм. Под топки образован панелями заднего экрана, имеет наклон к горизонту 15° и защищен от излучения факела слоем огнеупорной кладки.

Результаты. В результате проведенной работы было получено существенное снижение выбросов оксидов азота при малых паровых нагрузках. С ростом нагрузки доля рециркуляции уменьшалась из-за необходимости поддержания высокой температуры вторичного перегрева пара. Это приводило к сильному возрастанию выбросов оксидов азота из-за повышения температуры факела в зоне горения топлива.

Выводы. Было выявлено, что влияние изменения коэффициента избытка воздуха на образование оксидов азота с ростом нагрузки незначительное. Эффект увеличения аксиальной периферийной и внутренней круток воздуха в горелках на снижение образования оксидов азота проявляется при всех значениях нагрузки котлов.

Ключевые слова: оксиды азота, горение топлива, теплота сгорания, температура, котел, КПД, коэффициент избытка воздуха, уходящие газы, выбросы.

Введение

Котлы ТЭС являются главными источниками вредных выбросов оксидов азота в атмосферу практически при всех видах сжигаемого органического топлива при всех режимах работы [1-10]. Меры оперативного контроля над концентрацией оксидов азота в дымовых газах и прилегающей в атмосфере достаточно хорошо разработаны. Погрешность экспериментов при измерении концентрации оксидов азота с помощью известных газоаналитических приборов лежит в пределах ± 10 %. Основным способом является оптический, который в силу своей относительной простоты и дешевизны имеет несомненное преимущество перед электрохимическим способом. Точка отбора дымовых

газов для анализа содержания в них оксидов азота обычно выбирается после конвективного пароперегревателя в опускном газоходе котла. Такой точкой является рассечка водяного экономайзера. В этой точке, определяемой как режимное сечение, измеряется содержание кислорода и подсчитывается коэффициент избытка воздуха, значение которого составляет $\alpha=1,08\dots1,12$. Причинами повышенного образования оксидов азота является высокая температура факела и большой избыток воздуха в зоне горения топлива. Измерить с высокой точностью эти два параметра непосредственно при процессе горения в зоне факела невозможно. Так как размеры топки энергетических котлов достаточно велики, а процесс сгорания происходит с большой скоростью порядка долей секунды и имеются перемещения зоны горения по высоте топки со скоростью порядка $5\dots8$ м/с. Измеряемыми режимными параметрами являются паровая нагрузка котла, от которой зависит расход топлива и количество подаваемого воздуха на горение. Помимо этих двух параметров, локальная температура продуктов горения по объему топки зависит от крутки воздуха и системы газораздачи в горелках. Для уменьшения выбросов оксидов азота на котлах ТЭС применяют два основных способа. Первый способ заключается в снижении эмиссии оксидов азота в факеле посредством внешнего воздействия на процесс сжигания топлива. Второй способ состоит в применении химических методов очистки дымовых газов перед выбросом их в дымовую трубу. Вредные для здоровья человека оксиды азота улавливаются в очистных аппаратах специальными сорбентами. Второй способ характеризуется значительными капитальными и эксплуатационными затратами и на практике не всегда конструктивно осуществим. Первый способ доступен для использования и имеет несколько разновидностей по его применению. Так как в котлах ТЭС при высоких температурах в топке образуются термические оксиды, то снижение температуры осуществляется за счет двухступенчатого или трехступенчатого сжигания при двух или трех ярусном расположении горелок. При этом достигается разбаланс между количеством подаваемого топлива и воздуха на горение. При ступенчатом сжигании в горелках первого нижнего яруса сжигание топлива происходит с недостатком кислорода, и догорание оставшегося топлива происходит в факеле горелок второго яруса. При трехступенчатом сжигании при наличии трех ярусного расположения горелок необходимый для горения оставшегося топлива после первого яруса кислород поступает в горелки второго и третьего ярусов. Однако ступенчатое сжигание не всегда на котлах осуществимо, так как требуются специальные сопла для подвода дополнительного воздуха в горелки второго и третьего ярусов. Наиболее приемлемым подходом снижения локальной температуры в зоне горения является использование крутки воздуха в периферийной части за счет аксиальных лопаточных завихрителей. Этот подход на практике осуществим во время капитального ремонта котлов. В сочетании с рециркуляцией газов, суть которой заключается в отборе части дымовых газов из опускного газохода после водяного экономайзера и подачи этих газов в смеситель воздуховода перед горелками, применение лопаточных аксиальных завихрителей воздуха в горелках котлов ТГ-104 выполнено на Сургутской ГРЭС-1. Результаты экспериментов по испытаниям аксиальных периферийных лопаточных завихрителей для снижения концентрации оксидов азота в дымовых газах на Сургутской ГРЭС-1 представлены в данной статье.

Описание объекта исследования и методики измерений

Эксперименты по измерению выбросов оксидов азота проведены на Сургутской ГРЭС-1 на котлах ТГ-104, имеющих однокорпусное исполнение и П-образную компоновку поверхностей нагрева. Ширина фронта котла по осям колонн составляет 20,3 м, с учетом крайних ферм каркаса 26,7 м, глубина котла в осях колонн составляет 21,95 м. Наивысшая отметка котла по перепускным, трубам – 37,5 м. Топочная камера имеет призматическую форму, в плане представляет собой прямоугольник, с размером в осях труб по фронту – 18,62 м и по глубине – 7,23 м. Объем топки – 2640 м^3 , удельное теплонапряжение (до ширмового пароперегревателя) – 208 кВт/м^3 . Проектное теплонапряжение сечения топки равно 7070 кВт/м^2 . Стены топки полностью экранированы трубами наружным диаметром 60 мм и толщиной стенки 6 мм из стали 20 с шагом 64 мм. Под топку образован панелями заднего экрана, имеет наклон к горизонту 15° и защищен от излучения факела слоем

огнеупорной кладки. Эксперименты по влиянию режимных параметров на образование оксидов азота проведены на Сургутской ГРЭС-1 на котле ТГ-104 со стационарным № 3, оснащенным горелками ГМПВ-50 в количестве 12 шт. на котел.

Горелки расположены на фронтальной стене топочной камеры в 2 яруса: первый нижний ярус на отметке 11,1 м, второй ярус на отметке 14,1 м. Дымовые газы отбираются из опускных газоходов и подаются дымососами рециркуляции газов (ДРГ) через смесители в общий воздухопровод подвода нагретого воздуха в горелки ГМПВ-50. Схема котла ТГ-104 с точками отбора дымовых газов на рециркуляцию и измерений концентрации диоксида азота приведена на рис. 1.

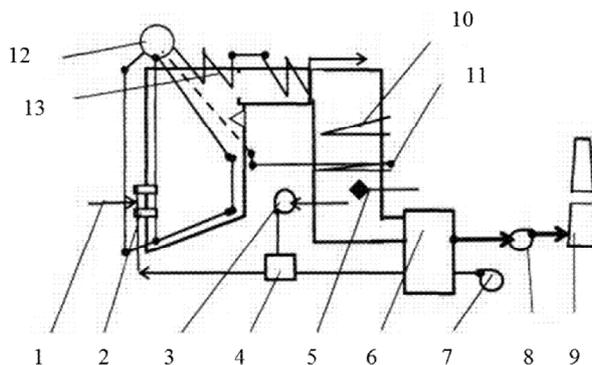


Рис. 1. Схема котла ТГ-104 с точками отбора дымовых газов на рециркуляцию и измерение концентрации оксида азота:

- 1 – топливный газ, 2 – горелка, 3 – дымосос рециркуляции газов, 4 – узел смешения, 5 – точка отбора дымовых газов для определения их состава и измерения концентрации оксида азота, 6 – регенеративный воздухоподогреватель, 7 – дутьевой вентилятор, 8 – дымосос, 9 – дымовая труба, 10 – промежуточный пароперегреватель 11 – водяной экономайзер, 12 – барабан, 13 – конвективный пароперегреватель

Газомазутные прямоточно-вихревые горелки ГМПВ-50 мощностью 50 МВт для котла ТГ-104 (станционный № 3) Сургутской ГРЭС-1 по воздуху выполнены двухпоточными (рис. 2).

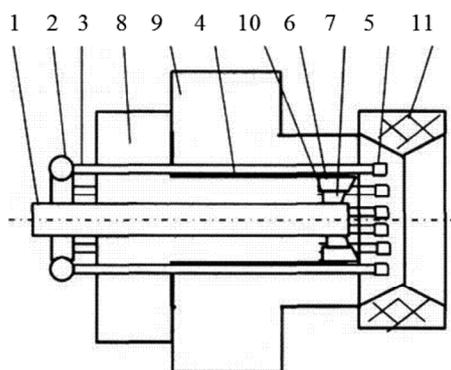


Рис. 2. Схема прямоточно-вихревой горелки ГМПВ-50:

- 1 – центральная труба для размещения мазутной форсунки 2 – газовый коллектор, 3 – газораздающие трубы, 4 – обечайка аксиального воздушного завихрителя, 5 – газовые насадки, 6 – внешние лопатки аксиального завихрителя, 7 – внутренние лопатки аксиального завихрителя, 8 – патрубок внутреннего подвода воздуха, 9 – патрубок периферийного подвода воздуха, 10 – втулка, 11 – амбразура

Она состоит из воздухонаправляющей части и газораздающего устройства, включающего газовый коллектор 2, двенадцать газораздающих труб 3, симметрично установленных по наружной обечайке 4 аксиального воздушного завихрителя и газовые насадки 5. В торцевой части каждой газовой насадки 5 выполнены 4 газоподающих от-

верстия, ориентированные следующим образом: два вдоль и два под углом 45° к оси горелки. Воздухонаправляющая часть горелки состоит из патрубков внутреннего 8 и периферийного 9 подводов воздуха и лопаточного завихрителя аксиального типа, который делит поток воздуха на две закрученные части и служит для подвода воздуха в виде закрученных поток к корню факела. Завихритель состоит из наружного обода 4, втулки 10, внешних 6 и внутренних 7 лопаток, установленных под углом 45° к оси горелки. Выходным участком проточной части горелки является амбразура 11, которая конструктивно относится к топке котла и изготавливается на монтаже по чертежам обмуровки. Центральная труба 1 служит для размещения мазутной форсунки. Схема круток в горелках котла ТГ-104 со стационарным № 3 на Сургутской ГРЭС-1 приведена в табл. 1.

Таблица 1

**Схемы направлений круток воздуха по горелкам ГМПВ-50 котла ТГ-104
(станционный № 3) Сургутской ГРЭС-1**

№ ярусов и отметок размещения горелок	Номера горелок и направления крутки воздуха в горелках					
2-й верхний ярус, отметка 14,1 м	1 	2 	3 	4 	5 	6 
1-й нижний ярус, отметка 11,1 м	7 	8 	9 	10 	11 	12 

Для организации нестехиометрического сжигания в насадках горелок нижнего яруса, диаметр отверстий равен 12,5 мм, верхнего – 11,0 мм, что соответствует расчетному расходу газа через верхние горелки – 44 % , через нижние – 56 %.

В горелке предусмотрены трубы для установки запально зажигательного устройства (ЗЗУ), контроля факела и лючки для наблюдения за горением. Расчетная номинальная тепловая мощность горелки составляет около 50 МВт при среднем расходе газа 4971 $\text{м}^3/\text{час}$ и низшей теплотой сгорания 8100 $\text{ккал}/\text{м}^3$. Номинальное давление газа перед горелками 0,23 $\text{кг}/\text{см}^2$. Измерения оксидов азота проводились на котле ТГ-104 в опускном газоходе в режимном сечении в рассечке водяного экономайзера (РВЭ) при помощи газоанализатора ДАГ-500. КПД котла брутто, коэффициенты избытка воздуха, температура уходящих газов и другие режимные параметры определялись по методикам, описанным в (ОСТ 108.836.05-82. Горелки газомазутные и амбразуры стационарных паровых котлов. М.: Минэнергомаш СССР, 1982. – 55 с.) и работе [11]. Погрешность опытов при определении КПД составляла $\pm 3,51$ %. Во время экспериментов сжигался попутный газ с теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 8023$ $\text{ккал}/\text{м}^3$ с плотностью 0,696 $\text{кг}/\text{м}^3$.

Результаты исследования и их обсуждение

Показатели работы котла ТГ-104 (станционный № 3) с горелками ГМПВ-50 на Сургутской ГРЭС-1 во время экспериментов приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что содержание оксидов азота NO_x в продуктах сгорания в режимном сечении при уменьшении рециркуляции дымовых газов при нагрузках 600 и 670 т/ч возрастает в среднем в 1,67 и 2,33 раза по сравнению с выбросами при нагрузках 335 т/ч. При нагрузках 670 т/ч по рециркуляции дымовых газов в общий короб воздуховода перед горелками нитка А опускного газохода выключена, а нитка Б загружена соответственно на 50 %. Уменьшение рециркуляции дымовых газов при повышенных нагрузках связана с необходимостью поддержания высокой температуры вторичного промежуточного перегрева пара равной 545 $^\circ\text{C}$. При уменьшении рециркуляции температура в топке достаточно сильно повышается, что способствует образованию термических оксидов азота. Значения КПД котла брутто $\eta_{\text{к.бр}}$ и выбросов оксидов азота NO_x для котла ТГ-104 (ст. № 3) Сургутской ГРЭС-1 при различных нагрузках при изменении рециркуляции дымовых газов Γ приведены на рис. 3.

Таблица 2

Показатели работы котла ТГ-104 (станционный № 3)
с горелками ГМПВ-50 во время опытов

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Паровая нагрузка, т/ч						
			670	600	515	470	400	335	
Давление пара в барабане	P_b	кгс/см ²	151	146	143	140	139	135	
Давление острого пара за котлом	$P_{пе}$	кгс/см ²	130						
Температура острого пара за котлом	$T_{оп}$	°С	545						
Температура вторичного пара за котлом	$T_{вп}$	°С	545						
Температура питательной воды	$T_{пв}$	°С	248	243	237	232	225	219	
Температура пара до 2-го впрыска	$t'_{вп2}$	°С	397/ 410	402/ 415	394/ 416	404/ 420	408/ 425	410/ 424	
Температура пара после 2-го впрыска	$t''_{вп2}$	°С	368/ 387	368/ 384	378/ 382	372/ 382	372/ 382	379/ 386	
Температура пара до 3-го впрыска	$t'_{вп3}$	°С	482/ 487	486/ 484	490/ 477	483/ 480	481/ 465	487/ 480	
Температура пара после 3-го впрыска	$t''_{вп3}$	°С	-/483	-/480	-/474	-/478	-/481	-/478	
Расход газа на котёл при $T_g = 0^\circ\text{C}$ и $P_g = 2,3 \text{ кг/см}^2$	G_g	тыс. м ³ /ч	48,5	42	37	33,5	29,5	24,5	
Давление газа за регулирующим клапаном	$P_{рк}$	кгс/см ²	0,34	0,29	0,2	0,17	0,14	0,11	
Давление газа перед горелками	верхний ярус	P'_g	кгс/см ²	0,26	0,22	0,15	0,13	0,1	0,09
	нижний ярус			0,2	0,17	0,12	0,1	0,08	0,06
Открытие заслонок перед горелками по указателю поворота	верхний ярус	УП	%	100	100	100	100	100	100
	нижний ярус			100	100	100	100	100	100
Ток эл. двигателя ДРГ, А/Б	$I_{дрг}$	А	0/15	28/28	68/15	78/14	78/14	78/14	
УП направляющих аппаратов ДРГ, А/Б	$УП_{дрг}$	%	0/ 50	10/ 100	100/ 100	100/ 100	100/ 100	100/ 100	
Открытие шиберов горячего воздуха ШГВ-А/Б	УП	%	100/ 20	100/ 30	100/ 80	100/ 80	100/ 100	100/ 70	
Давление воздуха в общем коробе	$P_{в.общ}$	кгс/м ²	150	140	155	180	165	180	
Перепад давления воздуха на РВП-А/Б	$\Delta P_{рвп}$	кгс/м ²	90/ 80	70/ 70	70/ 50	70/ 60	65/ 40	65/ 55	
Содержание кислорода в режимном сечении	O_2	%	1,7	1,7	2	4	5,1	6,1	
Открытие шиберов по воздуху перед горелками	верхний ярус	УП	%	100	100	100	100	100	100
	нижний ярус			100	100	100	100	100	100
Разрежение «вверху» топки	S''_T	кгс/м ²	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	
Температура газов в поворотной камере	$T''_{кппз}$	°С	744	707	673	646	622	602	
Температура уходящих газов	$T_{ухг}$	°С	134	130	128	126	125	125	
Ток эл. двигателей дымососов, А/Б	$I_{дс}$	А	75/ 70	60/ 55	55/ 50	55/ 50	55/ 50	55/ 50	
УП направляющих аппаратов дымососов, А/Б	$УП_{дс}$	%	87/ 73	65/ 60	60/ 50	60/ 50	60/ 50	60/ 55	
Содержание NO_x в дымовых газах, приведенное к $\alpha = 1,4$	C_{NO}	мг/м ³	140	100	60	60	60	60	
Потери тепла с уходящими газами	q_2	%	5,34	4,98	5,04	5,57	5,94	6,78	
КПД котла «брутто»	$\eta_{кбр}$	%	94,3	94,61	94,48	93,91	93,45	92,5	

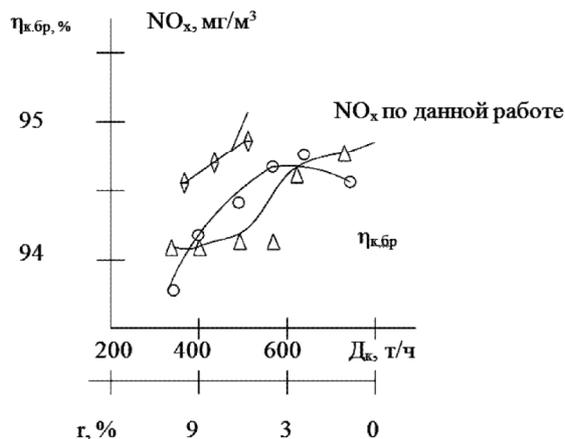


Рис. 3. Значения КПД котла брутто $\eta_{к.бр.}$ и выбросов оксидов азота NO_x , при сжигании газа в горелках ГМПВ-50 котла ТГ-104 (ст. № 3) Сургутской ГРЭС-1, при различных нагрузках D_k , при изменении рециркуляции дымовых газов g , в сравнении с данными Рослякова П.В. [11], полученными, при ступенчатом сжигании природного газа с рециркуляцией в котле ТГМ-96Б со стандартными горелками ХФ ЦКБ-ВТИ-ТКЗ

На рис. 3 видно, что применение рециркуляции g дымовых газов свыше 6 %, при уменьшении нагрузки ниже 500 т/ч сопровождается резким снижением КПД котла $\eta_{к.бр.}$. При этом выбросы оксидов азота NO_x практически не изменяются. Анализ сопоставления результатов экспериментов с данными Рослякова П.В. [3] показывает, что применение горелок ГМПВ-50 в котле ТГ-104 в сочетании с рециркуляцией дает больший эффект по снижению вредных выбросов оксидов азота по сравнению со ступенчатым сжиганием и рециркуляцией дымовых газов в котле ТГМ-96Б со стандартными горелками ХФ ЦКБ-ВТИ-ТКЗ.

Выводы

1. Применение горелок ГМПВ-50 с трубчатой периферийной газораздачей с использованием большого и малого внутренних лопаточных аксиальных воздухозавихрителей при сжигании попутного газа в котлах ТГ-104 устраняет зоны факела с повышенной температурой и способствует снижению эмиссии оксидов азота 2 раза по сравнению с обычными горелками типа ТКЗ.

2. Использование рециркуляции дымовых газов до значений $g = 6$ % для горелок ГМПВ-50 в котле ТГ-104 не снижает КПД. При более высоких значениях рециркуляции до $g = 9$ % КПД котла снижается на 0,5...0,6 %.

Список библиографических ссылок

1. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М. : Наука, 1980. 478 с.
2. Росляков П. В., Егорова Л. Е. Влияние основных характеристик зоны активного горения на выход оксидов азота // Теплоэнергетика. 1996. № 9. С. 22–26.
3. Росляков П. В., Бэйцзин Чжун, Тимофеева С. А. Минимально достижимый выход оксидов азота в топках котла // Теплоэнергетика. 1992. № 8. С. 47–49.
4. Таймаров М. А., Чикляев Д. Е. Образование термических окислов азота при сжигании газа // Вестник Казанского технического университета. 2013. № 23 (16). С. 73–75.
5. Прохоров В. Б., Рогалев Н. Д., Лысков М. Г. Образование и методы снижения выбросов оксидов азота при сжигании топлив на ТЭС. М. : МЭИ, 2001. 32 с.
6. Росляков П. В., Зинина В. Н. Влияние условий теплообмена в топочных камерах на образование термических оксидов азота // Теплоэнергетика. 1991. № 12. С. 60–62.

7. Росляков П. В., Двойнишников В. А. и др. Разработка рекомендаций по снижению выбросов оксидов азота для газомазутных котлов ТЭС // Электрические станции. 1991. № 9. С. 9–17.
8. Chiu W. S., Shahed S. M., Lin W. T. A Transient Spray Mixing Model for Diesel Combustion // SAE Paper. 1999. № 760128. P. 534–542.
9. Christensen M. Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition // SAE Techn. Pap. Ser. 1998. № 980787. P. 1–18.
10. Fennimore C. P., Jones G. W. Oxidation of soot by hydroxyl radicals // Journal of Physical Chemistry. 1976. № 71. P. 593–597.
11. Таймаров М. А. Практические занятия на ТЭЦ. Казань, 2003. 64 с.

Taymarov M.A. – doctor of the technical sciences, professor

E-mail: taimarovma@yandex.ru

Akhmetova R.V. – senior lecturer

E-mail: electric-station@mail.ru

Sungatullin R.G. – senior lecturer

E-mail: ee-kgeu@mail.ru

Kazan State Power Engineering University

The organization address: 420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya st., 51

Lavirko Yu.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: lav.yu55@gmail.com

Zheltukhina E.S. – student

E-mail: lizaetoile@gmail.com

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Reduction of harmful emissions of nitrogen oxides in atmosphere by coppers at thermal power stations

Abstract

Problem statement. The purpose of the study is to optimize the regime parameters of boilers TG-104 of Surgut GRES-1 and reduce emissions of nitrogen oxides during the combustion of associated gas with the use of low-emission burners and flue gas recirculation, fed in an amount up to 8 % by smoke exhaust recirculation of dropping gas pipeline in the air mixer before burners.

Composition associated gas in the experiments as follows: methane CH₄ = 92,37 % (by volume), ethane = 4,74 % C₂H₆, C₃H₈ Propane = 0,77 %. We used direct swirl burner GMPV-50 in the amount of 12 pieces in one pot. Burners are located on the front of the combustion chamber wall in 2 tiers: the first tier below the level of 11.1 m, the second tier at around 14.1 m TG-104 boilers have an efficiency of one and a U-shaped arrangement of the heating surfaces. The wall of the furnace fully shielded by tubes of outer diameter 60 mm and a wall thickness of 6 mm, made of steel 20 in steps of 64 mm. Under the furnace rear screen panel is formed, it is inclined to the horizontal 15 °, and also protected from the flame radiation layer of refractory brickwork.

Results. Essential reduction surge oxides of the nitrogen is received under small steam load. With growing of the load share recirculation decreased because of need of the maintenance of the high temperature of the secondary overheat pair. This brought about strong growth surge oxides of the nitrogen because of increasing of the temperature of the torchlight in zone of the combustion fuel.

Conclusions. It was found that the effect of changes excess air ratio in the formation of nitrogen oxides with increasing load is insignificant. The effect of increased axial and circumferential inner air twists in burners to reduce the formation of nitrogen oxides is shown for all values of boiler load.

Keywords: nitrogen oxides, fuel burning, heat of combustion, temperature, copper, coefficient of efficiency, coefficient of air excess, leaving gases, emissions.

References

1. Zeldovich Ya. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B., Makhviladze G. M. The mathematical theory of combustion and explosion. M. : Nauka, 1980. 478 p.
2. Roslyakov P. V, Egorova L. E. Influence of the basic characteristics of the active burning zone on the yield of nitrogen oxides // *Teploenergetika*. 1996. № 9. P. 22–26.
3. Roslyakov P. V, Beiching Zhong, Timofeeva S. A. The minimum attainable yield of nitrogen oxides in boiler furnaces // *Teploenergetika*. 1992. № 8. P. 47–49.
4. Taymarov M. A., Chiklyaev D. E. The formation of thermal NO_x from the combustion gas // *Vestnik Kazanskogo technicheskogo universiteta*. 2013. № 23 (16). P. 73–75.
5. Prokhorov V. B, Rogalev N. D., Lyskov M. G. Education and methods for reducing nitrogen oxide emissions from the combustion of fuels at thermal power stations. M. : MEI, 2001. 32 p.
6. Roslyakov P. V., Zinina V. N. Effect of heat transfer conditions in the combustion chambers on the thermal formation of nitrogen oxides // *Teploenergetika*. 1991. № 12. P. 60–62.
7. Roslyakov P. V. Dvoinishnikov V. A. Development of recommendations to reduce NO_x emissions for gas-oil thermal power plant boilers // *Electrichestkie stanczii*. 1991. № 9. P. 9–17.
8. Chiu W. S., Shahed S. M., Lin W. T. A Transient Spray Mixing Model for Diesel Combustion // *SAE Paper*. 1999. № 760128. P. 534–542.
9. Christensen M., et all. Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition // *SAE Teen. Pap. Ser.* 1998. № 980787. P. 1–18.
10. Fennimore C. P., Jones G. W. Oxidation of soot by hydroxyl radicals // *Journal of Physical Chemistry*. 1976. № 71. P. 593–597.
11. Taymarov M. A. Workshops on TPS. Kazan, 2003. 64 p.