

**ОБРАЗОВАНИЕ И СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА
В КОТЛАХ ТГ-104 С ПРЯМОТОЧНО-ВИХРЕВЫМИ ГОРЕЛКАМИ
И ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПОДАЧЕЙ ГАЗА**

**М.А.ТАЙМАРОВ, Р.В. АХМЕТОВА, Р.Г.СУНГАТУЛЛИН,
Д.Е. ЧИКЛЯЕВ, Е.Г.ЧИКЛЯЕВ**

Казанский государственный энергетический университет

В статье рассматриваются вопросы распределения температуры и падающих тепловых потоков на экранные поверхности нагрева котлов ТГ-104 при работе на Уренгойском газе и тепловой эффективности топков для снижения образования окислов азота. Температура продуктов сгорания измерялась оптическим методом и с помощью термопар контактным методом. Падающие тепловые потоки измерялись радиометром полного излучения. Сжигалось топливо – природный газ по ГОСТ 30319.1-96 с низшей теплотой сгорания 35146 кДж/м³.

Ключевые слова: оксиды азота, горение, котел, подвод газа, крутка воздуха, температура, топка.

Введение

Самыми мощными источниками выбросов оксидов азота являются котлы ТЭС [1–3]. Снижение вредного антропогенного воздействия выбросов оксидов азота на окружающую среду является актуальной задачей. Выполненный критический анализ исследований в области снижения выбросов окислов азота котлами ТЭС показал, что основные мероприятия по снижению выбросов оксидов азота связаны с применением рециркуляции дымовых газов в топку и с применением ступенчатого сжигания топлива. При рециркуляции происходит выравнивание распределения температур и исключение высокотемпературных зон в топке. При этом в горелки подается частично разреженный воздух и концентрация кислорода у основания пламени понижена, поэтому понижена и температура всего пламени. Это оказывает существенное влияние на образование термических оксидов, но мало воздействует на топливные.

Среди методов снижения воздействия выбросов важное место занимает организация топочного процесса сжигания топлив с минимальными количествами оксидов азота в продуктах сгорания. Нормативными документами удельные выбросы окислов азота ограничиваются предельным значением для котлов паропроизводительностью до 400 т/ч: при сжигании природного газа – 255, при сжигании мазута – 290, при сжигании каменных углей – 570 мг/нм³. Поэтому результаты экспериментов данной работы могут быть использованы для организации топочных процессов с целью снижения выбросов окислов азота.

Описание объекта исследования и условия проведения опытов

Котел ТГ-104 однокорпусный и имеет 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 18,624 м и по глубине 7,232 м. Объем топки 2640 м³, удельное теплонепрежение (до ширмового пароперегревателя) 208 кВт/м³.

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.

На фронтальной стене топки установлены в 2 яруса (на отметке 11,1 и 14,1 м) 12 газомазутных прямооточных горелок *ECOTOP* (Экотоп) – по шесть в каждом ярусе производительностью 4,5 т/ч по мазуту и $4500 \text{ м}^3/\text{ч}$ – по природному газу. В центральной трубе горелки установлена мазутная форсунка паромеханического распыливания и запальное устройство типа ЗЗУ4. Горелки типа *ECOTOP* для котла ТГ-104 имеют некоторый недостаток, а именно: удлиненный факел от прямооточных горелок *ECOTOP* при малой глубине топки дает наброс продуктов горения на задний экран, что приводит к разрушению обмуровки, а также к пережогу металла экранных труб.

Газ подается как в центральную часть горелки, так и в периферийную. Воздушный канал разделяется на два потока, между которыми имеется возможность перераспределения воздуха.

Среди многих параметров топочного процесса на интенсивность образования окислов азота большое влияние оказывают излучательные характеристики пламени, которые определяются, при заданных температурах, составом продуктов сгорания и зависят от вида сжигаемого топлива и способа сжигания.

Газ можно сжигать в виде несветящегося или светящегося факела. В первом случае получается наиболее простой вид факела, который для случая полного горения состоит из смеси трехатомных продуктов сгорания, азота и кислорода при избытке воздуха больше единицы. Излучательные характеристики такого факела определяются содержащимися в нем водяными парами и углекислым газом. Поэтому степень черноты несветящегося факела можно рассчитать по степеням черноты сухих трехатомных газов и водяных паров.

На практике, однако, для случая несветящегося факела степень черноты определяется со значительными отклонениями от действительных величин вследствие неизотермичности факела, неравномерной концентрации CO_2 и H_2O в различных частях объема факела и сильной зависимости степени черноты CO_2 и H_2O от температуры. В практике расчетов обычно учитывают не только излучение CO_2 , но также CO и SO_2 общей суммой RO_2 , излучение которой принимается по излучению CO_2 , так как содержание CO и SO_2 в топочных газах обычно небольшое. Измерение температуры пламени проводилось бесконтактным радиационным методом с помощью ТЕРА-50. С помощью сдвоенных хромель-алюмелевых термопар измерялась также температура продуктов сгорания в пристеночном слое топки. Падающие от факела тепловые потоки измерялись радиометром полного излучения, отградуированным по абсолютно черному телу. Оксиды азота измерялись газоанализатором ДАГ-500 [4–5]. Погрешность опытов составляла $\pm 3,5 \%$.

Обсуждение результатов экспериментальных исследований

Исследование топочных процессов с целью снижения выбросов окислов азота проведены на Сургутской ГРЭС-1. При экспериментах сжигалось топливо – природный газ по ГОСТ 30319.1-96 с низшей теплотой сгорания 35146 кДж/м^3 . Максимальная нагрузка котла ТГ-104 при опытах составляла 680 т/час при расходе газа 52 тыс. $\text{м}^3/\text{час}$. Значения выбросов оксидов азота приведены в табл.1.

Измерения оксидов азота проводились прибором ДАГ-500 в режимном сечении опускного газохода после экономайзера котла ТГ-104 через каждые 20 мин при постоянной нагрузке.

Таблица 1

Выбросы оксидов азота при сжигании газа Уренгойского месторождения с теплотой сгорания 35146 кДж/м³ в котле ТГ-104 ст. №3 без рециркуляции продуктов сгорания (концентрация NO₂ приведена к $\alpha=1,4$)

Нагрузка, т/час	Расход газа, тыс. м ³ /час	Тепловое напряжение, МВт/м ²	Избыток воздуха на выходе из топки	Температура на выходе из топки, °С	Суммарный выброс окислов азота NO ₂ , г/нм ³
550	49	3,57	1,07	1231	0,159
616	50,5	3,68	1,06	1300	0,166
680	52	3,79	1,05	1362	0,173

При поперечном сечении топки 133,9 м² и теплоте сгорания газа 35146 кДж/м³ максимальное тепловое напряжение равно 3,79 МВт/м². Выбросы при нагрузке 680 т/час составляют 0,173 г/нм³, то есть не превышают допустимых значений при сжигании газа 0,255 г/нм³.

Низкие значения выбросов оксидов азота связаны с конструкцией горелки ЭКОТОП, схема которой показана на рис. 1.

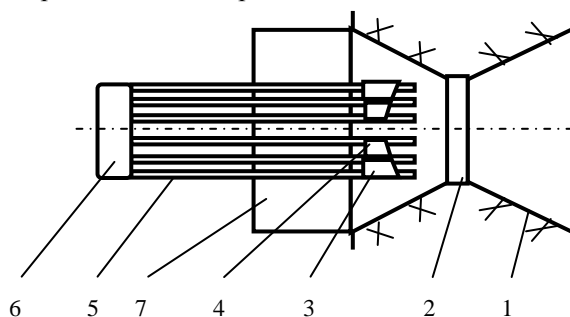


Рис. 1. Схема разреза прямоточно-вихревой горелки ЭКОТОП котла ТГ-104 мощностью 58,5 МВт и расходом газа на горелку 3895 нм³/ч: 1 – конический диффузор; 2 – пережим; 3 – завихритель внешний; 4 – завихритель внутренний; 5 – газоподводящие трубы; 6 – газовый коллектор; 7 – воздушный короб

Поступающий в горелку воздух распределяется между завихрителями, расположенными в центре, и периферийной частью канала. Угол наклона лопаток к оси горелки 45°. Подача газа периферийная через 12 шт. газоподводящих труб. Мощность одной горелки при работе на газе – 58,5 МВт. Всего горелок 12 шт.: 6 на 1 нижнем и 6 на 2-м ярусе.

Торцы газоподводящих труб 5 представлены двумя плоскостями, в которых располагаются газоподающие отверстия. Одна из плоскостей перпендикулярна оси канала, другая наклонена так, что внешняя нормаль обращена к оси горелки. На каждой плоскости расположены по три круглых отверстия. Средний диаметр сопловых отверстий равен 12 мм. Корпус горелки соединён с коническим диффузором.

На рис. 2–5 приведены экспериментальные данные по температуре продуктов сгорания в поперечном сечении топки по котлам ТГ-104 №16, №7, №13, №3 на уровне горелок по отметке 12,6 м.

Как видно из рис. 2–5, температура продуктов сгорания и факела в топке распределена неравномерно. Наибольшие значения температуры по результатам измерений через боковые лючки находятся в области, прилегающей к заднему экрану, а наименьшие – в области, прилегающей к фронтальному экрану. Разница в

температурах продуктов сгорания между областями, прилегающими к заднему и фронтальному экрану составляет в среднем от 220 °С до 310 °С.

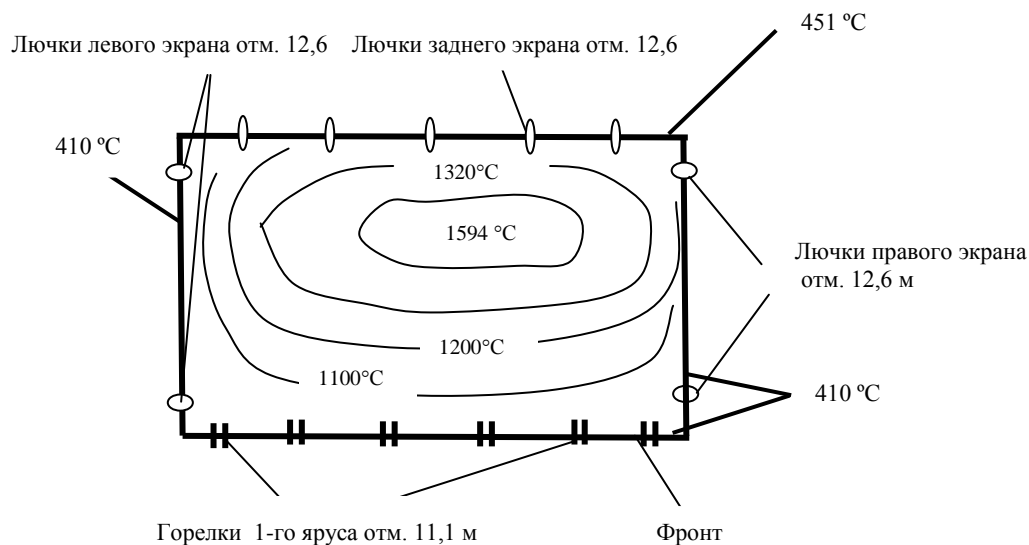


Рис. 2. Изотермы в поперечном сечении по высоте топки котла №16 ТГ-104, температура ядра факела 1594 °С и температура металла экранных труб (ЖИРНЫЙ ШРИФТ) на уровне лючков на отметке 12,6 м при паропроизводительности $D_k=611$ т/час. (температура уходящих газов $t_{ух.г}=127$ °С; содержание кислорода в уходящих газах $O_2=1,3$ %; расход природного газа $V=51$ тыс.м³/час)

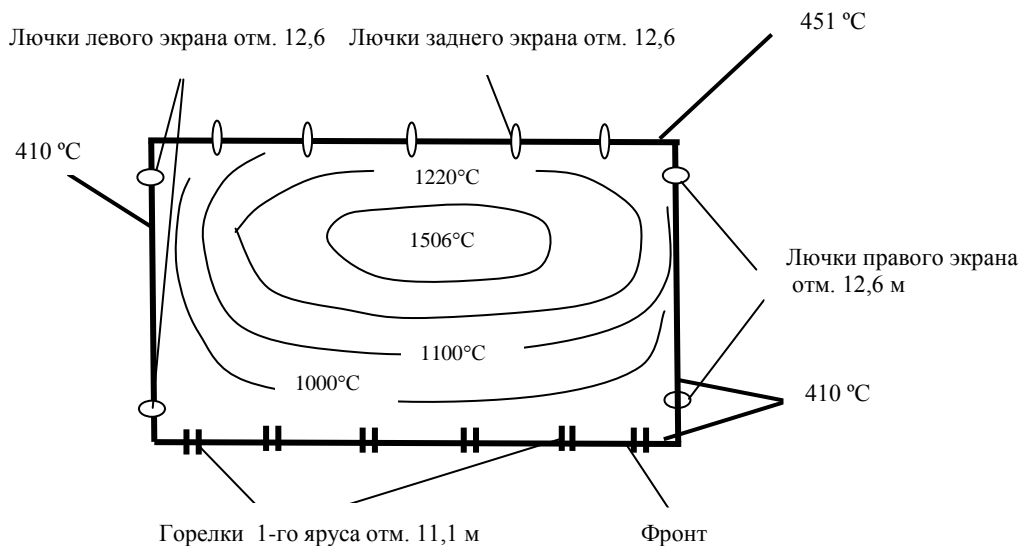


Рис. 3. Изотермы в поперечном сечении по высоте топки котла №7 ТГ-104, температура ядра факела 1506°С и температура металла экранных труб (ЖИРНЫЙ ШРИФТ) на уровне лючков на отметке 12,6 м при паропроизводительности $D_k=690$ т/час ($t_{ух.г}=123$ °С, содержание кислорода в уходящих газах $O_2=1,5$ %, Расход природного газа $V=51,5$ тыс.м³/час)

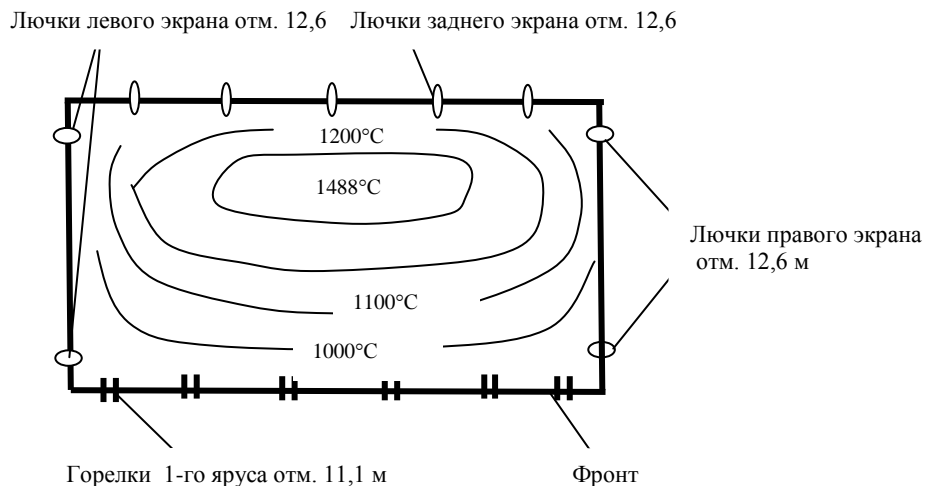


Рис. 4. Изотермы в поперечном сечении по высоте топке котла №13 ТГ-104. Температура ядра факела 1488°C на уровне лючков на отметке 12,6 м при паропроизводительности $D_k=680$ т/час ($t_{ух,г}=118$ °С; содержание кислорода в уходящих газах $O_2=1,2$ %; расход природного газа $V=52$ тыс.м³/час)

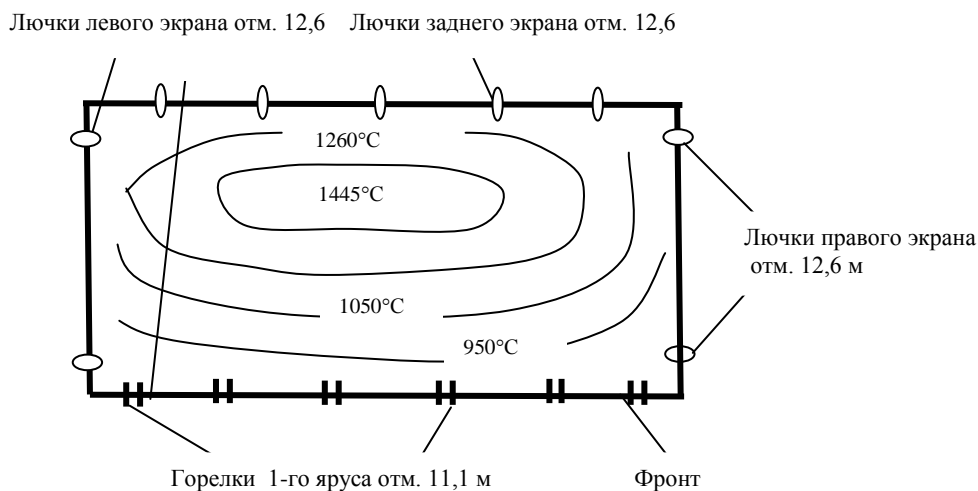


Рис. 5. Изотермы в поперечном сечении по высоте топке котла №3 ТГ-104. Температура ядра факела 1445°C на уровне лючков на отметке 12,6 м при паропроизводительности $D_k=670$ т/час ($t_{ух,г}=132$ °С; содержание кислорода в уходящих газах $O_2=1,2$ %; расход природного газа $V=50,5$ тыс.м³/час)

По результатам прямых измерений оптическим пирометром максимальные температуры по абсолютной величине имеет факел в топке котла №16 в области заднего экрана, которые составляют 1320 °С при паровой нагрузке 611 т/час. КПД по обратному балансу при этом составил 95,16 %.

По ширине топке в котлах №16 и №7 высокотемпературная область факела смещена в сторону правого экрана, а в котле №3 – в сторону левого экрана. В котле №13 высокотемпературная область факела расположена симметрично по отношению к правому и левому экранам. Наименее теплонапряженными являются котлы №3 и №13, а более теплонапряженными – №16 и №7. Температура металла заднего экрана на отметке 12,6 м на котле №13 ТГ-104 СупГРЭС-1 составила 407 °С.

Радиационная температура в высокотемпературной области факела в топках котлов ТГ-104 Сургутской ГРЭС при сжигании газа на отметке 12,6 м приведена в табл. 2.

Таблица 2

Радиационная температура в высокотемпературной области факела в топке котлов ТГ-104 Сургутской ГРЭС-1 при работе на газе на отметке 12,6 м

Параметр	№ котла ТГ-104				Данные работы [6]
	3	7	13	16	
Точка измерения	Лючки правой стороны	Лючки правой стороны	Лючки правой стороны	Лючки левой стороны	Лючки правой стороны
Температура, °С	1445	1506	1448	1594	1477

Радиационная температура в высокотемпературной области факела в топках котлов определена при номинальной электрической нагрузке 210 МВт.

На рис. 6 показана проекция изотерм для левого бокового экрана в котле №3 ТГ-104 СурГРЭС-1. Эти данные показывают, что ядро факела с наибольшей температурой смещено в сторону заднего экрана. Имеет место высокая температура продуктов сгорания на выходе из топки на отметке 21,3 м – 1370 °С, которая при полной паровой нагрузке превышает проектную 1270 °С в среднем на 100 °С.

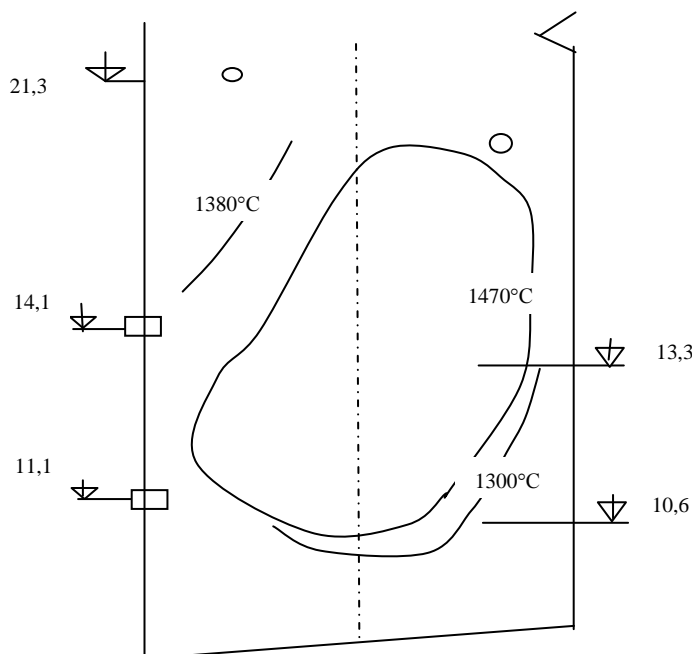


Рис. 6. Проекция изотерм для левого бокового экрана в котле №3 ТГ-104 СурГРЭС-1 (топливо – Уренгойский газ; паровая нагрузка 663 т/ч; содержание кислорода в уходящих газах $O_2 = 1,2\%$)

Горелки ЗАО «ЭКОТОП», за счет конструкции элементов горелки, формируют факел, который учитывает температурные и аэродинамические факторы, влияющие на выход NO_x .

Конфигурация горелок сформирована по определенному отношению закрученного и прямого потоков воздуха, которое обеспечивает снижение образования оксидов азота. Показатели эффективности горелок ЭКОТОП: 1. Низкое аэродинамическое сопротивление, что дает выигрыш по дутью. 2. Низкий уровень образования NO_x .

Однако имеет место наброс факела на задний экран, что является причиной перегрева металла экранных труб.

По результатам измерений теплонапряженности и пирометрии топочного объема может быть осуществлено эксплуатационное диагностирование и управление генерацией и выбросами оксидов азота NO_x на стадии сжигания топлива и нарушений в пусковых режимах, относящиеся к штатным ситуационным моделям. Модель диагностирования генерации оксидов азота использует в качестве диагностических параметров ряд режимных показателей (коэффициент избытка воздуха, тепловая мощность топки, степень рециркуляции дымовых газов) в сочетании с диагностическим параметром $q_{\text{пад. макс}}$ и распределением температуры внутри топки, характеризующим температурный уровень в зоне ядра горения. Модель диагностирования нарушений в пусковых режимах использует в качестве диагностического параметра значение распределения плотности падающего потока $q_{\text{пад}}$ (ППП) в зоне выходного сечения топки. В процессе пуска и эксплуатации должно поддерживаться определенное соотношение между характерным распределением плотности падающего потока $q_{\text{пад}}$ (ППП) теплового излучения и температуры факела в указанной зоне и давлением пара на выходе из котла, характеризующим расход пара через пароперегреватель при работе котла.

Выводы

1. При работе на номинальной электрической нагрузке высокотемпературная область факела смещена по ширине топки в котлах №16 и № 7 в сторону правого экрана, а в котле №3 – в сторону левого экрана, что способствует повышенному образованию оксидов азота в этой зоне. В котле №13 высокотемпературная область факела расположена симметрично по отношению к правому и левому экранам. В котлах №16 и № 7 и левого экрана в котле №3 с помощью изменения крутки факела необходимо добиться симметричного расположения высокотемпературной области факела относительно боковых экранов в котлах №16, № 7 и №3, что позволит снизить концентрацию оксидов азота на выходе из котлов.

2. Выравнивание температуры по объему топок при одновременном снижении ее локальных значений является одним из условий понижения концентрации оксидов азота в выбросах котлов ТГ-104.

3. Применение периферийной подачи газа для котлов ТГ-104 приводит к снижению образования термических оксидов азота.

4. Конструктивная компоновка выпускаемых энергетических котлов ТГ-104 по числу лючков в 4-х уровнях по высоте обеспечивает возможность идентификации положения ядра факела, функции распределения плотности падающих потоков от продуктов сгорания топлива, распределения температуры внутри топки и позволяет осуществлять эксплуатационное диагностирование, управление генерацией и выбросами оксидов азота NO_x на стадии сжигания топлива.

Summary

This article deals with the distribution of temperature and incident heat flux on the display surface boiler heating TG-104 at work at the Urengoy gas and the thermal efficiency of the burners to reduce the formation of nitrogen oxides. The temperature of the

combustion products was measured using an optical method and thermocouple contact method. The incident heat fluxes measured by the radiometer the full radiation. Burned fuel – natural gas according to GOST 30319.1-96 with the lower heat of combustion 35146 kJ/m³.

Keywords: nitrogen oxides, combustion, boiler, gas supply, twist the air, temperature, furnace.

Литература

1. Прохоров В.Б., Рогалев Н.Д., Лысков М.Г. Образование и методы снижения выбросов оксидов азота при сжигании топлив на ТЭС: Учебное пособие по курсу «Природоохранные технологии». М.: Издательство МЭИ, 2001. 32 с.
2. Рихтер Л.А., Волков Э.П., Кормилицын В.И. Экспериментальное исследование содержания оксидов азота в дымовых газах ТЭС // Электрические станции. 1978. № 1. С. 17–18.
3. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. М.: Энергоиздат. 1987. 141 с.
4. Росляков П.В., Егорова Л.Е. Влияние основных характеристик зоны активного горения на выход оксидов азота. // Теплоэнергетика. 1996. № 9. С. 22-26.
5. Енякин Ю.П. и др. Работы ВТИ по снижению выбросов оксидов азота технологическими методами // Теплоэнергетика. 1991. № 6. С. 33-38.
6. Таймаров М.А., Чикляев Д.Е. Образование термических окислов азота при сжигании газа. // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16, № 23. С.73-75.
7. Таймаров М.А. Разработка методов снижения выбросов окислов азота котлами ТЭС. Казань: КГЭУ, 2013. 69 с.
8. Таймаров М.А. Лабораторный практикум по курсу «Котельные установки и парогенераторы». Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004. 107 с.
9. Таймаров М.А. Практические занятия на ТЭЦ. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2003. 64 с.
10. Соболев В.М., Снегирев А.Ю., Лупуляк С.В., Шиндер Ю.К. Моделирование турбулентного диффузионного факела прямоточно-вихревой горелки / Труды 4-й РНКТ (23-27 октября 2006 года, Москва). Том 3. Свободная конвекция. Тепломассообмен при химических превращениях. С. 316–319.

Поступила в редакцию

30 сентября 2016 г.

Таймаров Михаил Александрович – д-р техн наук, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(905)3121629. E-mail: taimarovma@yandex.ru.

Ахметова Римма Валентиновна – старший преподаватель кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 89178801961, ahmetova_rv@bk.ru.

Чикляев Дмитрий Евгеньевич – аспирант кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(906)111-56-33.

Чикляев Евгений Геннадьевич – старший преподаватель кафедры «Физическое воспитание» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(903)314-39-84.

Сунгатуллин Раис Газимуллович – старший преподаватель кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(927)4403927. E-mail: raesg@mail.ru.