

## Раздел четвертый

## КОМПЛЕКСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТЕПЛОВЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

## 4.4. Комплекс реконструктивных и режимно-технологических мероприятий при сжигании газа и мазута

## 4.4.2. Снижение выбросов вредных веществ при сжигании природного газа, мазута и водомазутной эмульсии в энергетических котлах

В.И. Кормилицын, НИУ «МЭИ», Москва, Россия

## АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты экспериментально-теоретических исследований процессов сжигания природного газа и мазута в энергетических паровых котлах, влияние режимно-конструктивных факторов на выброс с дымовыми газами вредных веществ и приёмы снижения оксидов азота в дымовых газах, восстановление их до молекулярного азота.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

паровой котел, природный газ, мазут, нефть, сжигание, режимно-технологические факторы, оксиды азота, бенз(а)пирен.

В процессе сжигания топлива в топках паровых котлов образуются различные токсичные вещества, которые затем выбрасываются в атмосферу вместе с дымовыми газами. К таким веществам в данном случае относятся, во-первых, оксиды азота и серы и, во-вторых, ряд продуктов неполного сгорания, в частности, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ).

Если образование термических оксидов азота, являющихся основным вкладом в  $\text{NO}_x$ , при сжигании природного газа и мазута связано с высокой (>2000К) температурой во фронте пламени, то продукты неполного сгорания топлива образуются лишь при неудовлетворительной работе горелочных устройств или неудачного сочетания горелочных устройств с топками паровых котлов.

Для теоретического анализа принято описание течений реагирующей газовой смеси применительно к течениям в трактах котельных установок полная система уравнений Навье – Стокса, а также уравнение химической кинетики [1]. Но в силу большой размерности задачи и сложности ее решение использование соответствующих программ для проведения массовых параметрических расчетов не представляется возможным, так как течение в топках паровых котлов и далее по тракту имеет пространственно-ориентировочный характер, а скорости химических реакций определяются уровнем температуры в данной точке и составом смеси, поэтому для описания процессов образования оксидов азота и их последующей трансформации применена одномерная газодинамическая модель.

На первом шаге теоретического анализа рассмотрим одномерное течение гомогенной смеси идеальных газов, между компонентами которой протекают химические реакции:

$$W \cdot \frac{dW}{dx} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{w^2}{2} + \sum_{i=1}^N h_i(T) \gamma_i = H_0 \quad (2)$$

$$P = \frac{\rho RT}{\mu}, \frac{1}{\mu} = \sum_{i=1}^N \gamma_i \quad (3)$$

$$\frac{d\gamma_i}{dx} = \frac{1}{W} F_i(\gamma, P, T), i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

Уравнения (1), (2) – уравнения импульса и энергии, (3) – уравнение состояния и следствие уравнения Дальтона, (4) – уравнение химической кинетики. К этим уравнениям добавляем уравнение неразрывности массы:

$$\rho W F = Q \quad (5)$$

В этих уравнениях  $P$ ,  $\rho$ ,  $W$ ,  $T$  – давление, плотность, скорость и температура смеси;  $N$  – число различных компонентов смеси;  $\mu$  – молярная масса смеси;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $h_i(T)$  – индивидуальная энтальпия  $i$ -го компонента;  $\gamma_i$  – мольно-массовая концентрация;  $H_0$  – удельная полная энтальпия смеси;  $x$  – продольная координата;  $F$  – площадь поперечного сечения;  $Q$  – расход смеси через поперечное сечение.

Система (1) – (5) дополняется начальными и граничными условиями, соответствующими конкретному течению в топке котла с соответствующими топочно-горелочными устройствами

При традиционном подходе к численному моделированию процессов в факеле горения используются следующие предположения:

- процесс во фронте пламени считается адиабатическим;
- во фронте пламени достигается химическое равновесие.

На основе этих предположений определяются параметры (в том числе температура продуктов сгорания и их состав) в факеле от фронта пламени и далее вниз по потоку. Для определения трансформации состава газовой смеси при движении по тракту котельной установки обычно используют, либо предположение о химическом равновесии и при этом уравнения химической кинетики заменяются соответствующими равновесными уравнениями (4), либо наиболее пригодным в конкретном случае механизмом химических превращений.

Однако, результаты равновесного расчета дают данные, намного отличающиеся от реальных, так как здесь не учитывается целый ряд факторов (смешение, темпы прогревания смеси, время нахождения регулирующей смеси при максимальной температуре, эффекты замораживания реакций рекомбинации  $\text{NO}_x$  при температурах ниже 2000К и др.), существенно влияющих на конечную величину концентрации оксидов азота в продуктах сгорания топлива. Наиболее правомерные результаты для компонентов продуктов горения топлива (а именно к ним относятся токсичные

компоненты NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O и другие) для различных условий сжигания топлива можно получить с привлечением уравнений химической кинетики (4), для решения которых выбран механизм химических превращений – система химических реакций и константы их скоростей, - а также состав смеси в некоторый начальный момент, после чего ищется совместное решение уравнений (1-5) [1].

Применение теоретического анализа процесса сжигания топлива при различных исходных граничных условиях показано на рис. 1–3.

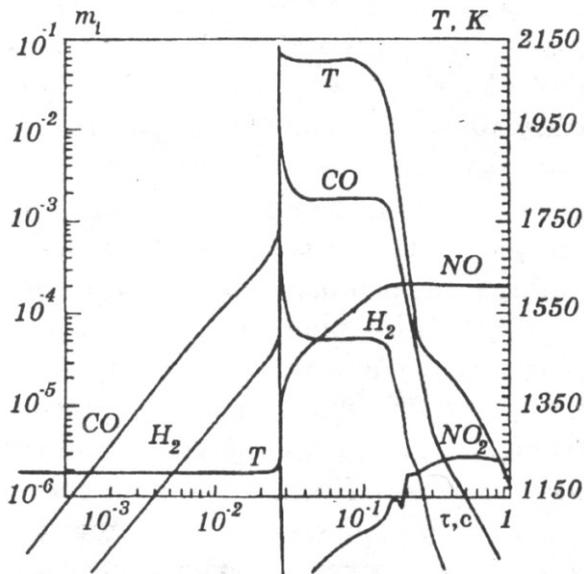


Рис.1. Зависимость температуры и массовых концентраций компонентов продуктов горения метана в воздухе от времени в условиях приближенных к сжиганию газа в топке парового котла ТГМП–314 при  $\alpha=1$ .

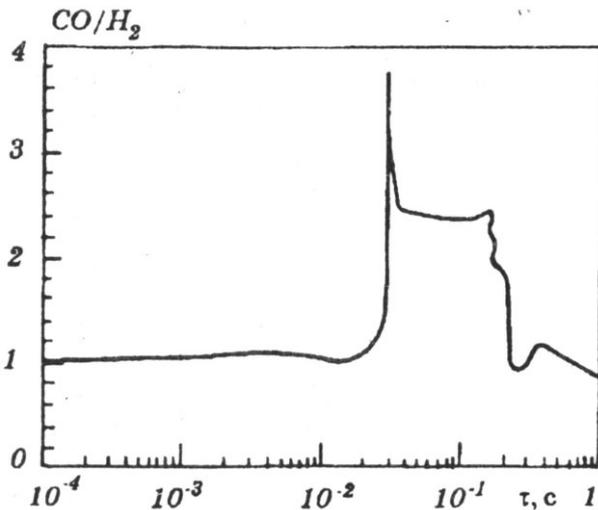
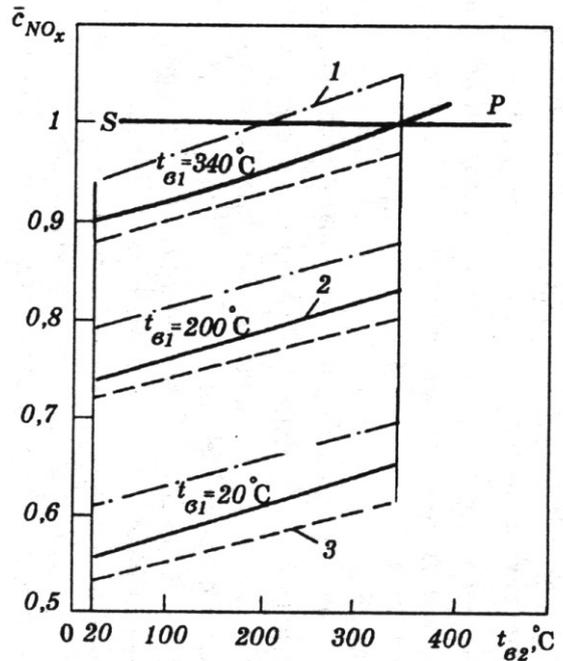


Рис.2. Теоретическая зависимость соотношения мольных долей CO/H<sub>2</sub> в продуктах сгорания метана в воздухе при условиях, характерных для энергетических котлов



1 –  $\alpha_0 = 1,10$ ; 2 –  $\alpha_0 = 1,05$ ; 3 –  $\alpha_0 = 1,02$ .  
 $\bar{c}_{NO_x} = c_{NO_x} / c_{NO_x}$  (при  $\alpha_0 = 1,05$ ;  $t_{01} = 340$  °C)

Рис.3. Зависимость относительных концентраций оксидов азота в продуктах сгорания топлива от температуры первичного и вторичного дутьевого воздуха и коэффициентов избытка воздуха при двухступенчатом сжигании природного газа ( $\alpha_1=0,81$ ): 1 –  $\alpha_0 = 1,10$ ; 2 –  $\alpha_0 = 1,05$ ; 3 –  $\alpha_0 = 1,02$ .

Как следует из рис.1, знание теоретических зависимостей параметров различных процессов сжигания топлива и способов их реализации существенно способствует пониманию их физико-химической сущности, помогает проанализировать отклики различных конструктивных исполнений топочно-горелочных устройств и режимно-технологических факторов на эффективность процессов снижения оксидов азота, что позволяет определить, выбрать и реализовать на практике (естественно с технико-экономическим обоснованием) наиболее рациональные решения.

Проведенные теоретические расчеты процесса сжигания природного газа в котле типа ТГМП–314 при значениях коэффициентов избытка воздуха 1,01 и 1,04 приведены в табл.1 и сопоставлены с опытными данными, полученными на котле ТГМП–314. Замеры концентраций основных компонентов смеси (O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO и оксидов азота) в газовых пробах отобраны из расщетки конвективного пароперегревателя.

Как следует из представленных данных, имеется некоторое несоответствие расчетных и замеренных значений концентраций H<sub>2</sub>, CO и NO<sub>x</sub>. Для объяснения этого факта предлагаются следующие гипотезы:

- продукты неполного сгорания H<sub>2</sub> и CO могут появиться в дымовых газах при довольно низком для эксплуатации избытке воздуха  $\alpha = 1,01$  за счет неидеального перемешивания с окислителем, так называемого химического недожога топлива;

Таблица 1. Содержание основных реагирующих компонентов в дымовых газах парового котла ТГМП – 314

$\alpha$	Компоненты, мольные доли				$C_{NO_x}$ , мг/м <sup>3</sup> (при нормальных условиях)
	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CO	
1,01	0,001–0,003	0	0,002–0,003	0,002–0,003	260–280
	0,00238	10 <sup>-15</sup>	4·10 <sup>-6</sup>	3·10 <sup>-6</sup>	140
1,04	0,009	0	0	0	325
	0,00812	10 <sup>-15</sup>	6·10 <sup>-7</sup>	5·10 <sup>-7</sup>	190

Примечание: числитель – опыт, знаменатель – расчет

- при контроле процесса сжигания топлива в производственных условиях трудно определить истинное значение микроконцентраций O<sub>2</sub> в дымовых газах, особенно при сжигании топлива в режимах приближающихся к стехиометрическим. Косвенное определение  $\alpha$  со стабильным удержанием режимов сжигания топлива, выполненное с применением системы «Оптим-Хром», работающей на принципе высокоточного определения микроконцентраций H<sub>2</sub> в дымовых газах и приближающимся к единице коэффициента корреляции H<sub>2</sub> с O<sub>2</sub>, свидетельствует о более полном согласовании теоретических результатов с опытными данными.

- различия в величинах  $C_{NO_x}$ , полученных в опытах и в результате их расчетов по предложенной методике, могут быть и вследствие некоторой неполноты кинетической модели, например, из-за не учета механизма быстрых оксидов азота.

В целом же, параметрический анализ процесса сжигания топлива позволяет выявить основные его закономерности при варьировании режимно-технологических методов с количественной их оценкой по экологическим (NO, NO<sub>2</sub>) и технико-экономическим показателям (CO, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>), что способствует рациональной организации сжигания топлива.

За последние годы эксплуатации паровых котлов принципиально ничего не изменилось в практике подавления процессов образования оксидов азота, так как по-прежнему применяются лишь различные разновидности режимно-технологических природоохранных вариантов и их конструктивные оформления по реализации в процессах сжигания топлива:

- предельно низких коэффициентов избытка воздуха;
- повышение эффективности рециркуляции дымовых газов;
- варьирования времени нахождения продуктов горения в зоне максимальных температур;
- снижение максимальной температуры и времени нахождения реагирующей массы топлива в ней;
- ступенчатого сжигания топлива;
- впрыска воды и ввода активных добавок в зоны генерации вредных веществ для их подавления и нейтрализации;
- комбинирование различных методов.

Сопоставление между собой различных конструктивно-технологических мероприятий, применяемых для подавления процессов образования оксидов азота в паровых котлах типа ТГМП–204 при традиционном представлении опытных данных, приведено на рис. 4. Здесь показаны зависимости концентраций оксидов

азота от коэффициентов избытка воздуха с указанием характерных особенностей организации процессов сжигания топлива в экологическом аспекте: рециркуляции дымовых газов, как при традиционном исполнении, так и с реконструируемой системой выхода струй из горелочных устройств, впрыске влаги в зону горения и сопутствующих конструктивных особенностях исполнения горелочных устройств.

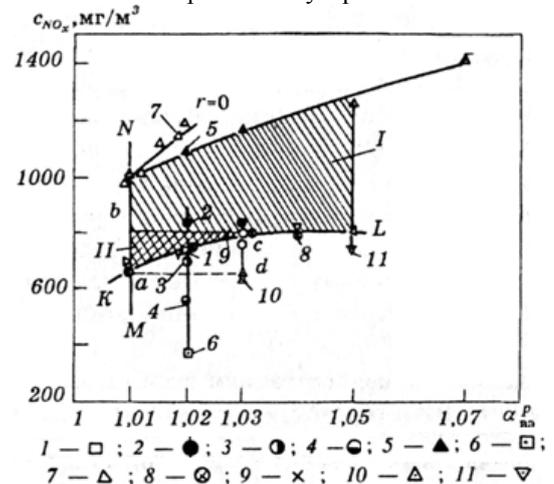


Рис.4. Сравнительная эффективность влияния различных конструктивных факторов и способов сжигания мазута в паровых котлах типа ТГМП–204 на концентрации оксидов азота в дымовых газах: I – область сочетаний конструктивных и режимно-технологических факторов, в которой образуются повышенные концентрации оксидов азота; II – то же, что и I, но с пониженными концентрациями NO<sub>x</sub>.

Количественные показатели оксидов азота, полученные при различных режимно-технологических мероприятиях, которые являются необходимыми для существенного снижения концентраций оксидов азота в дымовых газах, как правило, являются значительно меньшими величинами. Они ограничиваются эксплуатационными условиями котельных установок. Например, для парового котла типа ТГМП–204 рециркуляция дымовых газов на номинальной нагрузке поддерживается около 8% ( $УП_{дрг} = 60/60\%$ ). Между тем, снижение концентраций оксидов азота требуется более глубокое. Поэтому повышение эффективности рециркуляции дымовых газов достигается дополнительной реконструкцией системы струй дымовых газов на выходе из горелочных устройств с умеренными расходами газов рециркуляции, результаты испытаний которых приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительные испытания влияния различных конструктивно-технологических мероприятий на снижение концентраций оксидов азота в дымовых газах при сжигании мазута в паровых котлах типа ТГМП–204

Конструктивно-режимное мероприятие подавления процессов образования оксидов азота	г, % (УП <sub>ДРГ</sub> )	C <sub>NO<sub>x</sub></sub> , мг/м <sup>3</sup>
Базовый вариант с вихревыми горелочными устройствами ТКЗ	8 (60/60)	730
Вариант с вихревыми горелочными устройствами и с рекомендованной системой выхода струй азот рециркуляции из горелочных устройств	8 (60/60)	690
	12 (80/80)	540
Вариант с прямоточно-вихревыми горелочными устройствами	8 (60/60)	880
Вариант МЭИ с локальным вводом влаги в зону горения g=(3,3-4,4)% и прямоточно-вихревыми горелочными устройствами	8 (60/60)	340

Примечание: г – рециркуляция дымовых газов, УП<sup>А</sup><sub>ДРГ</sub>/УП<sup>Б</sup><sub>ДРГ</sub>; C<sub>NO<sub>x</sub></sub> – концентрация оксидов азота в дымовых газах в рассечке ВЭ; УП – указатель положения направляющего аппарата ДРГ по нитке А в числителе и по нитке Б в знаменателе.

Опытные данные по концентрациям оксидов азота на рис.4 сгруппированы таким образом, чтобы можно было проанализировать как индивидуальное, так и совместное влияние коэффициентов избытка воздуха и рециркуляции дымовых газов на концентрации NO<sub>x</sub>. На рис. 4 заштрихованная область соответствует концентрации оксидов азота в дымовых газах парового котла при взаимных варьированиях α и г в процессе сжигания топлива при выполнении нормативных требований по условиям выгорания топлива и надежности работы котельной установки. В этой области находится весьма небольшое число сочетаний режимных факторов ограниченное слева линией MN и снизу KL.

Линия MN может смещаться влево и вправо в зависимости от качества распыла топлива и условий смешения его с окислителем, а также по ограничениям недожога и концентрациями бенз(а)пирена. Обычно она чуть больше критического коэффициента избытка воздуха, а в случае автоматического регулирования процесса горения топлива, например, при автоматическом поддержании соотношения “топливо-воздух” при помощи системы «Оптим-Хром» – коэффициенты избытка воздуха приближаются к стехиометрическим.

Снизу область сочетаний технологических параметров ограничивается линией KL. Сверху линии KL находится область концентраций оксидов азота характерных для нормативных условий эксплуатации котельных установок. Поэтому линия KL характеризует минимальный уровень концентраций оксидов азота в дымовых газах при воздействии технологическими методами на подавление процессов образования оксидов азота и при сжигании топлива с соблюдением нормативных ограничений эксплуатации котельных установок.

Из представленной графической зависимости концентраций оксидов азота от конструктивных и режимно-технологических природоохранных мероприятий (рис.4) следует интерпретация эквивалентной значимости коэффициентов избытка воздуха и рециркуляции дымовых газов. Так, рассмотрение треугольников abc и acd (рис.4) показывает, что снижение концентраций NO<sub>x</sub> в дымовых газах с 780 мг/м<sup>3</sup>, при α<sup>ВЭ</sup> = 1,03 и г = 8% b при сжигании мазута в паровом котле на номинальной нагрузке с вихревыми горелочными устройствами, до 640 мг/м<sup>3</sup> требует увеличения рециркуляции дымовых газов в горелки на 10% при

α<sup>ВЭ</sup> = const или снижения α<sup>ВЭ</sup> до 1,01 при г = const.

Таким образом, одинаковую эффективность подавления процессов образования оксидов азота, которая при сжигании мазута в паровом котле ТГМП–204 на номинальной нагрузке в данном случае составляет 140 мг/м<sup>3</sup>, имеют Δг (10%) и Δα<sup>ВЭ</sup> (0,02) в диапазоне α<sup>ВЭ</sup> = 1,01 – 1,03. Но окончательное решение должно приниматься технико-экономическим обоснованием с учетом условий эксплуатации оборудования.

Теоретические исследования влияния технологических параметров на концентрации оксидов азота и опытные данные показывают нелинейную зависимость C<sub>NO<sub>x</sub></sub> от α. Этот фактор справедлив и для зависимости оптимального расхода воздуха как для номинальной, так и для частичной нагрузок котельной установки. Рассматривая относительное снижение C<sup>α>ПНИВ</sup><sub>NO<sub>x</sub></sub> от единичной доли изменения Δα<sup>α>ПНИВ</sup> в области больших коэффициентов избытка воздуха α<sup>ВЭ</sup> = 1,03 – 1,05, видим, что оно существенно отличается по величине в области с меньшими коэффициентами избытков воздуха α<sup>ВЭ</sup> = 1,01 – 1,03, т.е.

$$\frac{\Delta C_{NO_x}^{ПНИВ}}{\Delta \alpha_{ПНИВ}} > \frac{\Delta C_{NO_x}^{\alpha > ПНИВ}}{\Delta \alpha_{\alpha > ПНИВ}}$$

или

$$\frac{0,780 - 0,640}{1,03 - 1,01} > \frac{0,800 - 0,780}{1,05 - 1,03}$$

Соотношение 70 > 2 наглядно свидетельствует о большой значимости коэффициентов избытка воздуха на подавление процессов образования NO<sub>x</sub> при сжигании топлива, которые находятся в области предельно низких коэффициентов избытка воздуха (ПНИВ) или близких к стехиометрическому.

Анализ экспериментально-теоретических результатов показывает, что для прорыва из зоны повышенных концентраций оксидов азота в дымовых газах в зону пониженных концентраций, расположенную ниже линии KL (см. рис.4), нужно выполнить три допущения:

- во-первых, сохранить хорошие условия выгорания топлива, не допуская повышения химического и механического недожога топлива;

- во-вторых, обеспечить приемлемые условия температурного режима НРЧ;
- в-третьих, сохранить температуру промперегрева пара.

Первое условие реализуется как совершенствованием процесса распыливания мазута, (например, применение металлокерамических форсунок, сохраняющих стабильные характеристики в течение длительного периода их эксплуатации), так при перемешивании горючего с окислителем в горелочных устройствах.

Второе условие связано со снижением теплонапряжения в зоне НРЧ топки парового котла, которое решается при поднятии ядра факела в топке (например, реконструкцией горелочных устройств из вихревых в прямоточно-вихревые), а также при подаче влаги в зону горения топлива с интенсивной генерацией оксидов азота.

Третье условие реализуется технико-экономическим ограничением верхнего уровня рециркуляции дымовых газов, что для парового котла данного типа составляет 8% ( $УП_{ДРГ} = 60/60\%$ ).

На рис.2 приведены линии прорыва из зоны с содержанием повышенных концентраций  $NO_x$  в меньшие зоны (решаемые различными конструктивными мероприятиями на базе рециркуляции дымовых газов с учетом коэффициента избытка воздуха): первая линия при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha^{вэ} = 1,05$  и при подаче газов рециркуляции в горелки  $r' = 15,5\%$ , вторая линия – то же, что и первая, но при  $\alpha^{вэ} = 1,03$  и третья линия – реконструированная система выхода газов рециркуляции из горелочных устройств  $r = 12\%$ ,  $\alpha^{вэ} = 1,02$ .

Как показывают опытные данные, эти предложения приводят к снижению концентраций оксидов азота в дымовых газах, выходя за границу линии KL, характеризующей минимальные уровни  $NO_x$  в дымовых газах, которые, однако, остаются сравнительно высокими. Поэтому для парового котла ТГМП–204 при поднятии ядра факела по высоте и осуществлении локального дозированного впрыска в него влаги достигается еще более глубокое снижение концентраций оксидов азота.

Характерными особенностями факела в топке парового котла ТГМП–204 при применении прямоточно-вихревых горелок являются изменения выгорания топлива по длине, смещение ядра факела вверх и повышение уровня концентраций  $NO_x$  в дымовых газах. Концентрации  $NO_x$  в дымовых газах при реализации этого варианта в исходном варианте, при сжигании мазута в топке парового котла ТГМП–204, составляет  $880 \text{ мг/м}^3$ . Применение же дополнительного локального дозированного впрыска влаги в зону горения приводит к существенному подавлению процессов образования оксидов азота в топке парового котла. При подаче воды в количестве 6 – 8 т/ч (что составляет 3,3 – 4,4 % от расхода мазута), степени рециркуляции дымовых газов в горелки  $r = 8\%$  и  $\alpha^{вэ} = 1,02$  концентрации оксидов азота в дымовых газах снижаются до  $340 \text{ мг/м}^3$ . Это соответствует их снижению в усло-

вляющих дымовых газах более чем в два раза в условиях промышленной эксплуатации котельных установок. Существенным преимуществом наличия влаги в зоне активного горения топлива является снижение канцерогенных веществ в продуктах сгорания топлива (в частности бенз(а)пирена).

Наличие в эксплуатации большого количества однотипных котлов с различными решениями топочно-горелочных устройств и их компоновкой позволяет накопить большой опыт по эффективности первичных природоохранных решений. В частности, в паровых котлах типа ТГМП–314 горелочные устройства располагаются на стенках топочной камеры в специальных предтопках в подовой части котла. Подобные конструкции котлов прорабатывались для решения различных задач, связанных с увеличением эффективности и надежности их работы.

Вместе с тем различия в топочно-горелочных устройствах приводят к различной организации процессов горения топлива и, как следствие, разному выходу токсичных оксидов азота.

Экспериментальные исследования, по выявлению влияния режимных и конструктивных факторов на концентрации оксидов азота в дымовых газах паровых котлов при сжигании газа и мазута, проведены на паровых котлах типа ТГМП–314. Его компоновка: настенное расположение горелок с паромеханическими форсунками «Титан» и горелками «Пиллард» (ТГМП–314Б), подовая компоновка горелок (ТГМП–314П), циклонные предтопки (ТГМП–314Ц).

Результаты экспериментальных исследований зависимости концентраций оксидов азота в дымовых газах от коэффициента избытка воздуха и рециркуляции дымовых газов при сжигании природного газа в паровых котлах типа ТГМП–314 приведены на рис.5-7. Как следует из рис. 5 более высокий уровень концентраций оксидов азота наблюдается при сжигании природного газа в паровом котле ТГМП–314Ц, затем – несколько ниже в котле ТГМП–314П, и далее в котлах ТГМП–314Б и ТГМП–314. При сжигании природного газа в паровом котле ТГМП–314Ц концентрация  $NO_x$  изменяется от  $1,11 \text{ г/м}^3$  до  $0,84 \text{ г/м}^3$  при уменьшении  $\alpha^{вэ} = 1,075$  до  $\alpha^{вэ} = 1,035$  без подачи воды в зону горения и от  $C_{NO_x} = 0,91 \text{ г/м}^3$  до  $C_{NO_x} = 0,66 \text{ г/м}^3$  при подаче 4 т/ч конденсата через паровые каналы мазутных форсунок, т.е.  $\Delta C_{NO_x}$  около  $200 \text{ мг/м}^3$ . Для всех паровых котлов характерно снижение концентрации оксидов азота при снижении коэффициента избытка воздуха. Большое влияние на снижение концентраций оксидов азота при сжигании природного газа оказывает рециркуляция дымовых газов. Например, для парового котла ТГМП–314Ц при  $r = 10\%$  наблюдается снижение концентрации оксидов азота на 24 %, при  $r = 7\%$  наблюдается снижение концентрации оксидов азота на 42 %.

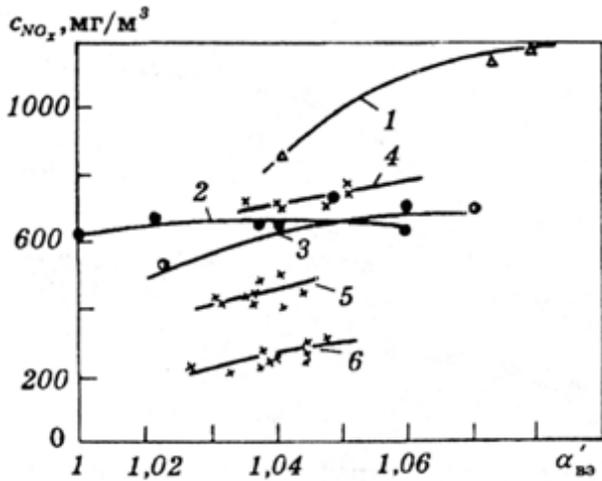


Рис.5. Зависимость концентраций оксидов азота в дымовых газах при сжигании природного газа в паровом котле типа ТГМП-314, оборудованного различными топочно-горелочными устройствами, от коэффициентов избытка воздуха и рециркуляции дымовых газов: 1 – ТГМП-314Ц,  $D_{ПЕ} \approx 900$  т/ч,  $r = 8\%$ ; 2 – ТГМП-314П,  $D_{ПЕ} \approx 940-975$  т/ч,  $r = 0\%$ ; 3 – ТГМП-314Б с горелочными устройствами фирмы «Пиллард»,  $D_{ПЕ} \approx 970$  т/ч,  $r = 12\%$ ; 4 – ТГМП-314,  $D_{ПЕ} \approx 980 - 990$  т/ч,  $r = 2\%$ ; 5 – ТГМП-314,  $D_{ПЕ} \approx 980 - 990$  т/ч,  $r = 8\%$ ; 6 – ТГМП-314,  $D_{ПЕ} \approx 980 - 990$  т/ч,  $r = 12\%$ .

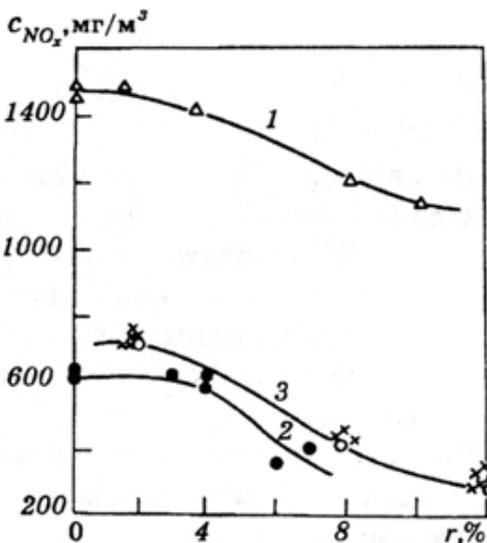


Рис.6. Зависимость концентраций оксидов азота от степени рециркуляции дымовых газов при сжигании природного газа в паровых котлах типа ТГМП-314: 1 – паровой котёл ТГМП-314Ц;  $D_{ПЕ} = 820-900$  т/ч,  $\alpha'_{вэ} = 1.08$ ; 2- паровой котёл ТГМП-314П;  $D_{ПЕ} = 920-940$  т/ч,  $\alpha'_{вэ} = 1.03 - 1.04$ ; 3 - паровой котёл ТГМП-314;  $D_{ПЕ} = 980-990$  т/ч,  $\alpha'_{вэ} = 1.04$ .

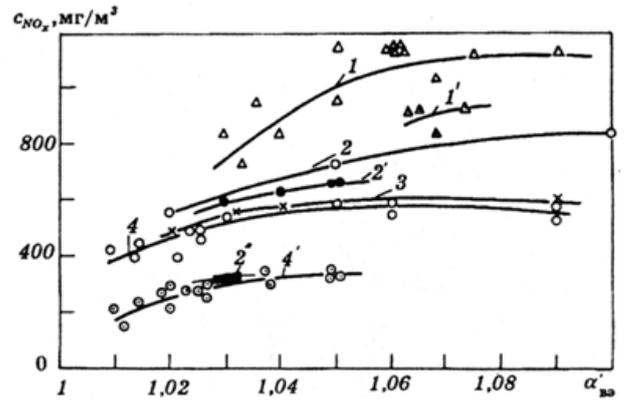


Рис.7 Зависимость концентраций оксидов азота в дымовых газах парового котла типа ТГМП-314 при сжигании мазута от конструктивных и режимно-технологических факторов: 1 – паровой котёл ТГМП-314Ц,  $D_{ПЕ} = 950-975$  т/ч,  $r = 3-5\%$ ; 1' – то же, что и 1, но при впрыске воды в зону горения; 2 – паровой котёл ТГМП-314П ( $n_r = 8$  шт.),  $D_{ПЕ} = 970-980$  т/ч,  $r = 0\%$ ,  $\bar{G} = 0$ ; 2' – ТГМП-314П,  $r = 10\%$ ,  $\bar{G} = 0$ ; 2'' – ТГМП-314П,  $r = 10\%$ ,  $\bar{G} = 10\%$ ; 3 – паровой котёл ТГМП-314Б, горелки фирмы «Пиллард»,  $D_{ПЕ} = 970$  т/ч,  $r = 8\%$ ,  $\bar{G} = 0$ ; 4 – паровой котёл ТГМП-314,  $D_{ПЕ} = 980-1000$  т/ч,  $r = 8\%$ ,  $\bar{G} = 0$ ; 4' – ТГМП-314,  $r = 8\%$ ,  $\bar{G} = 6\%$ .

При сжигании мазута, как следует из результатов опытов (рис 6), концентрация оксидов азота в дымовых газах наиболее высокие также для парового котла ТГМП-314Ц, а затем, соответственно, уменьшаются для паровых котлов ТГМП-314П, ТГМП-314Б, ТГМП-314. При паровом распыле мазута и сжигании его в паровом котле ТГМП-314Ц, концентрация оксидов азота изменяется до  $1,24 \text{ г/м}^3$  при  $\alpha'_{вэ} = 1,070$ , до  $0,82 \text{ г/м}^3$  при  $\alpha'_{вэ} = 1,020$ , до  $0,82 \text{ г/м}^3$  при  $\alpha'_{вэ} = 1,020$ . При подаче 4—5 т/ч воды в зону горения концентрации  $\text{NO}_x$  уменьшились с  $1,05 \text{ г/м}^3$  до  $0,86 \text{ г/м}^3$  при изменении избытка воздуха с  $\alpha'_{вэ} = 1,075$  до  $\alpha'_{вэ} = 1,05$ . Снижение концентраций  $\text{NO}_x$  от впрыска воды в зону горения составило  $\Delta C_{\text{NO}_x} = 200 \text{ мг/м}^3$  в этом диапазоне избытка воздуха.

Из сравнения экспериментальных данных следует, что концентрация оксидов азота в дымовых газах парового котла ТГМП-314Ц практически одинакова как при сжигании природного газа, так и мазута. Для паровых котлов ТГМП-314П и ТГМП-314 наблюдается незначительное увеличение концентраций оксидов азота в дымовых газах при сжигании природного газа по сравнению с мазутом.

Наиболее низкий уровень концентраций оксидов азота в дымовых газах наблюдается в паровом котле ТГМП-314. Горелки с настенной компоновкой с паромеханическими форсунками типа «Титан» ( $n = 16$  шт.), расположены в два яруса на фронтальной и тыльной сторонах топки. Паровой котел ТГМП-314, с настенной компоновкой горелок, имеет хорошую аэродинамическую схему конструктивного узла распределения воздуха, заключающуюся в равномерном распределении воздуха по горелкам. Здесь сравнительно легко реализуется режим сжигания топлива с пре-

дельно низкими избытками воздуха ( $\alpha_{\text{опг}}=0,98$ ;  $\Delta\alpha_{\text{тк}}=0,04$ ;  $a'_{\text{вз}}=1,02$ ), позволяющий иметь сравнительно низкие концентрации оксидов азота для первых

котлов серии ТГМП–314 и высокоэкономичный процесс сжигания топлива ( $q_3=0$ ).

Таблица 3. Сравнительные испытания влияния различных конструктивно-технологических мероприятий на снижение концентраций оксидов азота в дымовых газах при сжигании природного газа в паровом котле ТГМП-314.

Конструктивно- режимные мероприятия подавления процессов образования оксидов азота (условное обозначение способа сжигания топлива)	$\alpha'_{\text{вз}}$	$C_{\text{NO}_x}$ мг/м <sup>3</sup>
Вариант сжигания природного газа без ввода влаги в зону горения топлива	1,035	496
Подача пара ( $G_{\text{п1}} = 2,56$ т/ч) через паровые каналы форсунок через все горелочные устройства (режим сжигания топлива рекомендованный режимной картой – исходный вариант)	1,040	521
Подача пара ( $G_{\text{п1}} = 1,28$ т/ч) через форсунки нижнего яруса горелочных устройств	1,030	473
Подача пара ( $G_{\text{п1}} = 1,28$ т/ч) через форсунки нижнего яруса горелочных устройств	1,042	446
Подача пара ( $G_{\text{п2}}= 3$ т/ч) в дутьевой воздух	1,040	389
Подача влаги ( $G_{\text{п1}}=1,28$ т/ч + $G_{\text{в}} = 5,5$ т/ч) через форсунки нижнего яруса горелочных устройств в топку парового котла	1,035	366
Сжигание природного газа по способу МЭИ с комбинированной подачей влаги в зону горения топлива ( $G_{\text{п1}}=1,28$ т/ч + $G_{\text{в}} = 5,5$ т/ч) через форсунки нижнего яруса горелочных устройств (+ $G_{\text{п2}} = 3$ т/ч) в дутьевой воздух	1,035	269

Примечание:  $\alpha'_{\text{вз}}$  – коэффициент избытка воздуха на входе в водяной экономайзер;  $C_{\text{NO}_x}$  – концентрация оксидов азота в дымовых газах на входе в водяной экономайзер.

В табл. 3 приведены опытные данные сравнительных испытаний влияния различных конструктивных и режимно-технологических мероприятий на снижение концентраций оксидов азота в дымовых газах при сжигании природного газа в паровом котле ТГМП-314 (станционный №4 Каширской ГРЭС). Опыты проводились на номинальной нагрузке с постоянным коэффициентом рециркуляции дымовых газов  $\gamma = 6\%$  и реконструированным газораздающим узлом горелочных устройств в первичном потоке воздуха с осевым выходом газовых струй. Анализ проб дымовых газов по сечению конвективной шахты производился из четырех зондов, позволяет не только определить средние величины по полутопкам и паровому котлу в целом, но и оценить влияние организации процессов сжигания топлива на перекосы по газовому тракту. Концентрации оксидов азота определялись газоанализатором termotest–33. Наряду с концентрациями оксидов азота были определены и параметры котельной установки, позволившие оценить ее технико-экономические показатели при различных режимах сжигания топлива.

Экспериментальные данные по концентрациям оксидов азота в дымовых газах при различных способах сжигания топлива приведены на рис. 7. Как следует из опытных данных, ввод влаги в зону горения природного газа неоднозначно влияет на концентрации оксидов азота. Наиболее существенное снижение концентраций  $\text{NO}_x$  достигается при организации сжигания топлива по способу МЭИ с  $a'_{\text{вз}}=1,035$ ,  $\gamma = 6\%$  и комбинированном вводе влаги в зону горения: подача пара  $G_{\text{п1}} = 1,28$  т/ч и воды  $G_{\text{в}} = 5,5$  т/ч через форсунки нижнего яруса и  $C_{\text{п2}} = 3$  т/ч в дутьевой воздух.

По сравнению с исходным вариантом  $C_{\text{NO}_x} = 521$  мг/м<sup>3</sup> сжигание природного газа по новому способу позволяет снизить величину до  $C_{\text{NO}_x} = 269$  мг/м<sup>3</sup>, что

соответствует снижению  $C_{\text{NO}_x}$  в дымовых газах на 48% по сравнению с исходным вариантом.

Сжигание топлива с локальным дозированным впрыском воды в зону горения топлива с интенсивной генерацией оксидов азота обладает тем преимуществом, что этот метод может быть применен автономно от других конструктивных и режимно-технологических мероприятий для снижения выбросов оксидов азота в атмосферу с дымовыми газами.

Результаты реализации режимно-технологических мероприятий подавления процессов образования оксидов азота при сжигании мазута с впрыском воды 6—10% от его массового расхода в паровых котлах типа ТГМП–314 приведены на рис.7. Для паровых котлов ТГМП–314Ц и ТГМП–314 локальный дозированный впрыск воды в зону горения факела по способу [4] приводит к дополнительному снижению концентраций  $\text{NO}_x$  в дымовых газах на 200 мг/м<sup>3</sup> и является малозатратным мероприятием.

Для парового котла ТГМП–314 с настенной двухъярусной компоновкой горелочных устройств (16 турбулентных двухканальных горелок ТКЗ с паромеханическими форсунками типа «Титан») подача воды в зону горения факела в количестве  $g = 6—10\%$  от расхода мазута приводит к снижению концентраций оксидов азота до величин порядка 0,15—0,25 г/м<sup>3</sup> при сжигании мазута с предельно низкими коэффициентами избытка воздуха  $\alpha = 1,015—1,025$ . В этом случае достигается двукратное снижение концентраций оксидов азота при промышленных условиях эксплуатации парового котла ТГМП–314.

При подаче влаги в тракт горячего воздуха при сжигании мазута [5] подавление оксидов азота составляет меньшую величину по сравнению с локальным дозированным вводом влаги в зону горения топлива с интенсивной генерацией оксидов азота.

Сжигание смеси топлива (44—46 т/ч мазута и 26,5—28,6 тыс. м<sup>3</sup>/ч природного газа) в паровом котле ТГМП–314Ц с паровым распылом мазута показало, что концентрации оксидов азота изменяются от 0,93 г/м<sup>3</sup> при  $\alpha'_{вз} = 1,12$  до 0,66 г/м<sup>3</sup>, при  $\alpha'_{вз} = 1,05$  от 0,66 г/м<sup>3</sup> до  $C_{NO_x} = 0,54$  г/м<sup>3</sup> с подачей воды в зону горения, в том же диапазоне изменения  $\alpha'_{вз}$  (рис.4). Снижение концентрации NO<sub>x</sub> в этих опытах составило  $\Delta C_{NO_x} = 270$  мг/м<sup>3</sup> при  $\alpha'_{вз} = 1,05$  и  $\Delta C_{NO_x} = 120$  мг/м<sup>3</sup> при  $\alpha'_{вз} = 1,12$ . Этот опыт интересен еще тем, что позволяет сравнить избытки воздуха с впрыском воды. Одинаковый экологический эффект для парового котла в снижении оксидов азота достигается либо впрыском воды 4—5 т/ч (менее 6% от расхода горючего) в циклонные предтопки, либо уменьшением избытка воздуха на  $\alpha'_{вз} = 0,07$ . Суммарный же эффект подавления оксидов азота от уменьшения избытков воздуха и впрыска воды составляет 390 мг/м<sup>3</sup> или 42%.

Локальный дозированный впрыск влаги в зону горения энергетических паровых котлов типа ТГМП–314 приводит к дополнительному снижению концентраций оксидов азота в дымовых газах на 200 мг/м<sup>3</sup>. Метод легко реализуется на находящихся в промышленной эксплуатации паровых котлах, мобилен, является малозатратным и применим при сжигании различных видов топлив и смеси топлив (мазут+газ), при различных конструктивных решениях топочно-горелочных устройств паровых котлов. Этот метод косвенно реализуется при промышленной эксплуатации паровых котлов с паромеханическими форсунками, когда при сжигании природного газа подается пар, с целью сохранения повышенной надежности работы котла при аварийном отключении природного газа и переходе на сжигание мазута.

Аналогичные положительные качества, отмеченные для сжигания водомазутной эмульсии, характерны и для описания водотопливных эмульсий на основе сырой нефти. При необходимости дальнейшего снижения концентрации оксидов азота (если исчерпан ресурс первичных природоохранных режимно-технологических мероприятий) может быть применен метод очистки дымовых газов (вторичные природоохранные мероприятия), заключающийся в окислении и поглощении оксидов азота из дымовых газов [6].

Одним из источников образования бенз(а)пирена являются процессы сжигания топлива, не обеспечивающие полного сгорания. Особенно благоприятные условия для образования бенз(а)пирена и других канцерогенных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) создаются в процессах горения топлива, происходящих при высоких температурах с недостатком воздуха.

При сжигании топлива с предельно низкими коэффициентами избытка воздуха, а также при ступенчатом сжигании, появляются реальные опасности резкого возрастания в дымовых газах концентраций бенз(а)пирена.

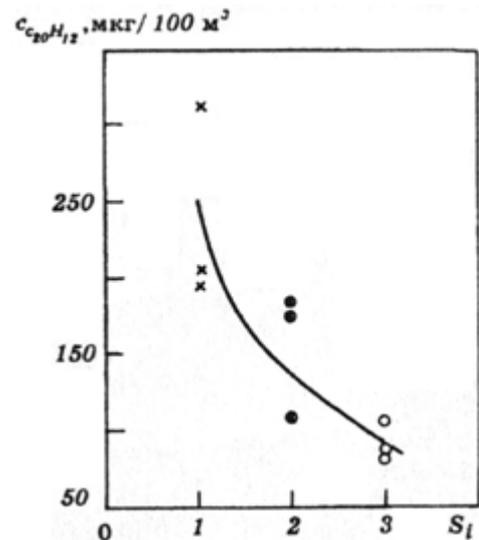


Рис.8. Зависимость концентраций бенз(а)пирена в дымовых газах при сжигании природного газа в паровом котле ТГМП–204ХЛ на номинальной нагрузке от способов сжигания топлива ( $S_i$ ): 1 – сжигание топлива с предельно низкими избытками воздуха  $\alpha'_{вз} = 1.01-1.015$ ,  $H_2 = 0.025-0.030\%$ об. (в систему регулирования процесса горения не включена система «Оптима-Хром»); 2 – то же, что и 1, но с автоматическим регулированием соотношения топливо-воздух с включением системы «Оптима-Хром»,  $H_2 = 0.002-0.005\%$ об.; 3- то же, что и 2, но с подачей влаги в зону горения топлива при сжигании топлива по схеме МЭИ.

Опытные данные по концентрациям бенз(а)пирена в дымовых газах при сжигании природного газа в паровом котле ТГМП–204ХЛ с предельно низкими коэффициентами избытка воздуха  $\alpha = 1,01-1,0$  и  $H_2 = 0,025-0,03$  соответствующие глубокому подавлению концентрации оксидов азота, а также при  $H_2 = 0,002-0,005$  и с подачей влаги в зону горения приведены на рис. 8. Как следует из опытных данных, при традиционном способе сжигания топлива с вхождением в зону режимов с предельно низкими коэффициентами избытка воздуха и химическим микронедожегом, наряду с глубоким снижением концентраций NO<sub>x</sub> в дымовых газах, наблюдается резкий всплеск концентрации  $C_{20H_{12}}$ , достигающих значений 311 мкг/100 м<sup>3</sup>.

Опытные данные по концентрациям бенз(а)пирена в дымовых газах при различных способах сжигания мазута в паровых котлах типа ТГМ-84 представлены на рис 9. Из рисунка видно, что ввод влаги в зону горения в любом виде (как при самостоятельном разделном вводе, так и с водомазутной эмульсией) весьма благоприятно влияет на снижение концентраций  $C_{20H_{12}}$  в дымовых газах. Наличие в зоне горения влаги, в отличие от других режимно-технологических мероприятий, таких как снижение избытков воздуха и рециркуляция дымовых газов, имеет однонаправленное воздействие как на снижение концентраций оксидов азота, так и концентраций бенз(а)пирена.

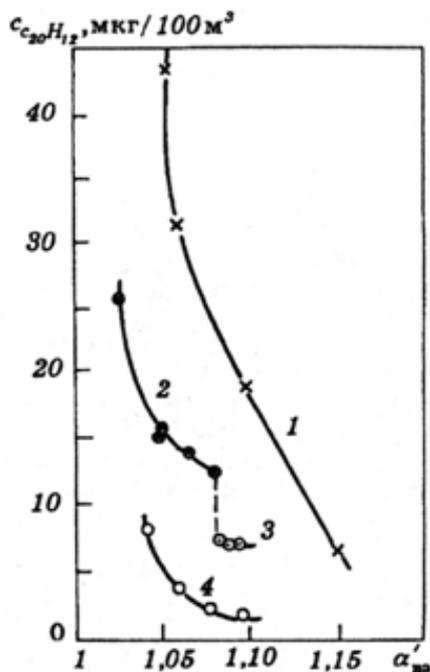


Рис.9. Зависимость концентраций бенз(а)пирена в дымовых газах паровых котлов ТГМ-84 от способа сжигания мазута на номинальной нагрузке: 1 – исходный режим сжигания топлива без впрыска влаги в зону горения топлива; 2 – паровой котёл ТГМ-84Б (станционный №3 Архангельской ТЭЦ), сжигание мазута с паровым распылом; 3 – сжигание водомазутной эмульсии с  $W^P = 7\%$ ; 4 – сжигание мазута с вводом влаги в зону горения  $G_B = 10\%$ .

Опытные данные по концентрациям бенз(а)пирена в дымовых газах при различных способах сжигания природного газа и мазута по различным технологиям в паровых котлах приведены на рис 10. Из рисунка следует, что как при сжигании природного газа, так и мазута, более низкие значения концентраций бенз(а)пирена характерны для режимов сжигания топлива с большими величинами коэффициентов избытка воздуха, а при их равных значениях – при впрысках влаги в зону горения топлива или при сжигании водомазутной эмульсии.

Таким образом, организация процесса сжигания природного газа и мазута в топках паровых котлов существенным образом влияет на концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах. Причем сжигание топлива с применением природоохранных режимно-технологических мероприятий направленных на снижение концентраций оксидов азота может привести к росту концентраций бенз(а)пирена. Поэтому окончательный выбор процесса сжигания топлива должен осуществляться при совместном учете как  $C_{NO_x}$ , так и  $C_{C_{20}H_{12}}$ .

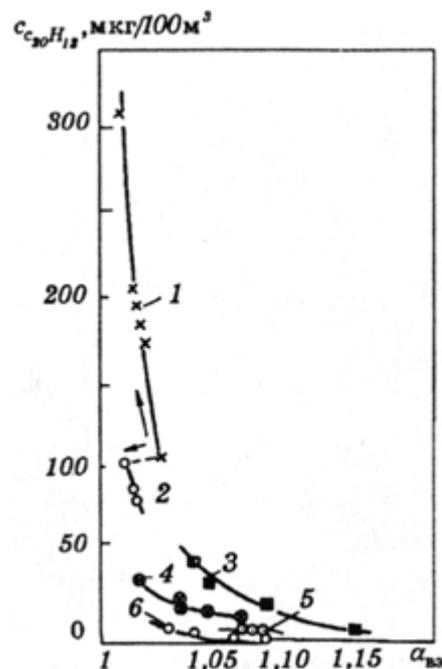


Рис.10. Влияние конструктивно-режимных факторов на содержание бенз(а)пирена в дымовых газах паровых котлов при сжигании природного газа и мазута: 1 – паровой котёл ТГМП-204ЧЛ (станционный №5 Сургутской ГРЭС-2), природный газ,  $G_B = 0$ ; 2 – то же, что и 1, но  $G_B = 0.640$  т/ч; 3 – паровой котёл ТГМ-84, мазут, паровой распыл мазута; 4- паровой котёл ТГМ-84Б, мазут, паровой распыл мазута; 5 – то же, что и 4, но сжигание водомазутной эмульсии  $W^P = 7\%$ ; 6 – то же, что и 3, но с впрыском влаги в зону горения топлива  $G_B = 10\%$ .

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. В.И. Кормилицын. Экологические аспекты сжигания топлива в паровых котлах. Издательство МЭИ 1998 – 336 с.
2. Ж-Г. Л. Гохберг. Увеличение экономичности и экологической чистоты тепловых электростанций при управлении выбросами: Дисс. доктора техн. наук. 1987 - 478 с.
3. Д.Р. Носулько. Повышение надежности и экономичности энергоблока большой мощности Дис. канд. техн. наук 1983 - 218 с
4. В.С. Адуевский, Э.П. Волков, В.А. Григорьев, В.И. Кормилицын и др. А.с. 1076700 МКИ<sup>3</sup> F 23 C 11/00 Способ сжигания топлива / 1984. Бюл. №8.
5. Н.А. Зройчиков, В.Б. Прохоров, А.М. Архипов, В.С. Киричков. Оптимизация аэродинамики факела и конструкции тангенциально направленных горелок на котле ТГМП-314Ц // Теплоэнергетика, 2011, №8, с.27-31.
6. В.И. Кормилицын, В.С. Ежов. Исследование очистки дымовых газов отлов от оксидов азота при сжигании природного газа // Теплоэнергетика, 2013, №2, с. 71-76.