

УДК 621.311

М. А. Таймаров, Н. Е. Кувшинов, Д. Е. Чикляев,  
И. Ю. Мазаров

## СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКИСЛОВ АЗОТА В КОТЛАХ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГОРЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

*Ключевые слова:* окиси азота, КПД котла, ТГМ, продуктов сгорания, теплотехнических расчетов, компьютеризованных, выбросы.

*В статье отражены результаты исследования по снижению выбросов окислов азота в котлах путем управления процессом горения на основе компьютеризованных расчетов. Получено, что наибольший выброс окислов азота наблюдается при теплоте сгорания топлива 40000 кДж/м<sup>3</sup>. При этом главное влияние на выброс окислов азота оказывает рост адиабатной температура горения. Расчетное время образования окислов азота при теплоте сгорания 40000 кДж/м<sup>3</sup> сокращается в 2 раза по отношению ко времени при теплоте сгорания 25000 кДж/м<sup>3</sup>. С увеличением доли рециркуляции от 0,10 до 0,16 при увеличении избытка воздуха в продуктах рециркуляции суммарный выброс окислов азота заметно снижается.*

*Key words:* oxides of nitrogen, boiler efficiency, TGM, combustion products, thermal calculations, computerized emissions.

*The article reflects the results of a study on reduction of NOx emissions in boilers by controlling the combustion process based on computerized calculations. It was obtained that the highest emissions of nitrogen oxides occurs when the heat of combustion 40000 kJ/m<sup>3</sup>. The main impact on the emission of nitrogen oxides has increase in adiabatic temperature of combustion. The estimated time of formation of nitrogen oxides during the heat of combustion 40000 kJ/m<sup>3</sup> is reduced by 2 times compared to the time when the heat of combustion 25000 kJ/m<sup>3</sup>. With the increase in the share of recycling from 0.10 to 0.16 with the increase of excess air in the products recycling total emission of nitrogen oxides is significantly reduced.*

### Описание проблемы

Окислы азота являются основными вредными выбросами в атмосферу для энергетических котлов. Среди существующих методов по уменьшению этих выбросов на практике может использоваться снижение температуры горения топлива путем применения топлива с низкой теплотой сгорания и регулированием количества воздуха, подаваемого на горение. Регулируемой величиной является величина разрежения в топке при использовании котлов с уравновешенной тягой. При всех способах регулирования контролируемой величиной является КПД котла, нижний предел изменения численного значения которого является показателем экономической эффективности применения метода. Поэтому для практического использования может быть применено компьютеризованное прогнозирование выбросов окислов азота при сжигании топлива с заданной теплотой сгорания и набором режимных параметров работы котлов, которые дают наибольший эффект по снижению выбросов при приемлемом значении КПД. Расчетные зависимости выбросов окислов азота от изменения различных режимных параметров рассматриваются в данной статье. Эти данные могут быть использованы в управлении работой котлов на тепловых электрических станциях путем применения последовательного или параллельного соединения котлов [1-2]. Тепловые электрические станции с поперечными связями имеют параллельное соединение котлов. Если условие параллельной работы выполнить невозможно, то котлы включаются последовательно с увеличением нагрузки.

### Методика расчета и результаты

В качестве объекта для расчета применена конструктивная схема топок котлов ТГМ-84А, ТГМ-84Б, ТГМ-96, ТГ-104 с естественной циркуляцией и уравновешенной тягой при использовании газового топлива для параллельной схемы включения. Указанные котлы имеют газомазутные горелки, расположенные на фронтальной стенке в два яруса. Расчетные зависимости приведены в работах [3-6]. В табл. 1 приведены исходные данные для вычисления выбросов окислов азота в зависимости от низшей теплоты сгорания газового топлива при различных значениях адиабатной температуры и значениях температуры продуктов сгорания на выходе их топки, которая является экспериментально полученной для теплоты сгорания 30000...35000 МДж/м<sup>3</sup>. Как видно из табл. 1, наибольший выброс окислов азота наблюдается при теплоте сгорания топлива 40000 кДж/м<sup>3</sup>. При этом главное влияние на выброс окислов азота оказывает рост адиабатной температура горения. Расчетное время образования окислов азота  $\tau_p$  при теплоте сгорания 40000 кДж/м<sup>3</sup> сокращается в 2 раза по отношению ко времени при теплоте сгорания 25000 кДж/м<sup>3</sup>.

В табл. 2 приведены данные по выбросам окислов азота при изменении доли рециркуляции продуктов сгорания  $\gamma$  и избытка воздуха в продуктах рециркуляции  $\alpha_p$  при сжигании газа Уренгойского месторождения с теплотой сгорания 33771 кДж/м<sup>3</sup> и температуре на выходе из топки 1100 °С.

**Таблица 1 - Выбросы окислов азота при сжигании газового топлива при избытке воздуха на выходе из топки  $\alpha_v=1,1$ , доле рециркуляции продуктов сгорания  $r=0,1$  при избытке воздуха в продуктах рециркуляции  $\alpha_p=1,17$**

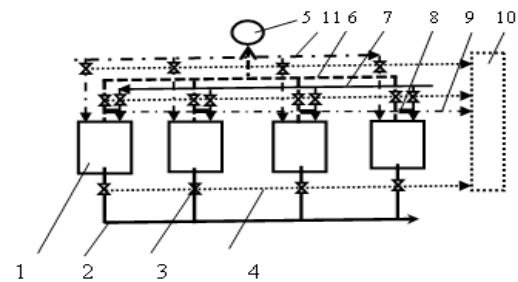
Теплота сгорания газового топлива $Q_{н^p}$ , кДж/м <sup>3</sup>	Адиабатная температура горения $t_a$ , °С	Расчетное время пребывания газов в топке $\tau_o$ , сек	Расчетное время образования оксидов азота $\tau_p$ , сек	Температура газов на выходе из топки $t''$ , °С	Суммарный выброс окислов азота $NO_2$ , г/м <sup>3</sup>
25000	1367	2,88	0,25	1050	0,091
30000	1609	2,61	0,19	1100	0,101
35000	1842	2,36	0,16	1150	0,115
40000	2069	2.20	0,14	1200	0,308

**Таблица 2 - Выбросы окислов азота при изменении доли рециркуляции продуктов сгорания  $r$  и избытка воздуха в продуктах рециркуляции  $\alpha_p$  при сжигании газа Уренгойского месторождения с теплотой сгорания 33771 кДж/м<sup>3</sup> и температуре на выходе из топки 1100 °С при избытке воздуха на выходе из топки  $\alpha_v=1,08$**

Доля рециркуляции продуктов сгорания $r$	Избыток воздуха в продуктах рециркуляции $\alpha_p$	Адиабатная температура горения $t_a$ , °С	Расчетное время пребывания газов в топке $\tau_o$ , сек	Расчетное время образования оксидов азота $\tau_p$ , сек	Суммарный выброс окислов азота $NO_2$ , г/м <sup>3</sup>
0,10	1,12	1810	2,49	0,16	0,106
0,12	1,16	1811	2,45	0,15	0,103
0,14	1,20	1820	2,41	0,15	0,101
0,16	1,24	1828	2,37	0,14	0,099

Из табл. 2 следует, что с увеличением доли рециркуляции от 0,10 до 0,16 при увеличении избытка воздуха в продуктах рециркуляции суммарный выброс окислов азота заметно снижается. Из всех рассмотренных способов уменьшения выбросов окислов азота [7-20] для котлов наиболее эффективным является рециркуляция продуктов сгорания из опускного газохода в зону расположения горения топлива. Адиабатная температура горения повышается незначительно с 1810 до 1828 °С.

На рис. 1 представлена схема компьютеризированного управления процессом горения газового топлива в котлах ТЭС с поперечными связями для снижения выбросов окислов азота. Функционирование этой схемы происходит следующим образом. При пуске котла 1 устанавливается предельно допустимая норма выбросов окислов азота по компьютерной программе и в соответствии с сигналом газоанализатора 8 о теплоте сгорания топливного газа и паровой нагрузкой котла в главный паропровод 2 устанавливается степень открытия задвижки на газопроводе 7 перед котлом и степень открытия задвижки на воздухопроводе 11. При работе на главный паропровод нескольких котлов при поперечных связях компьютерной программой выбирается котел с наибольшим КПД и наименьшими выбросами окислов азота, который эксплуатируется в режиме подхвата паровой нагрузки на главный паропровод.



**Рис. 1 - Схема компьютеризированного управления процессом горения на основе теплотехнических расчетов для снижения выбросов окислов азота в котлах с поперечными связями: 1 - котел, 2 - главный паропровод, 3 - задвижка с электроприводом, 4 - линия электроуправления задвижками, 5 - дымовая труба, 6 - дымоход, 7 - газопровод, 8 - газоанализаторы состава дымовых газов и газового топлива, 9 - линия сигналов с газоанализаторов, 10 - компьютеризированный пульт управления процессом горения, 11 - воздухопровод**

### Выводы

1. Наибольшее влияние на снижение выбросов окислов азота в котлах вызывает применение рециркуляции дымовых газов в зону горения.
2. Наиболее опасным режимом, который сопровождается сильным увеличением выбросов окислов азота является сжигание газового топлива с высокой теплотой сгорания при низких коэффициентах избытка воздуха и высокой температуре на выходе из топки.

3. Для снижения выбросов окислов азота схема компьютеризированного управления процессом горения на основе теплотехнических расчетов в котлах с поперечными связями является вполне доступной для реализации на практике.

### Литература

1. Таймаров М.А. Современные проблемы энергомашиностроения. - Казань : КГЭУ, 2004. 106 с.
2. Таймаров М.А., Чикляев Д.Е. Образование термических окислов азота при сжигании газа. Вестн. Казан. технол. ун-та. - 2013. - Т.16, N 23. С.73-75.
3. Таймаров М.А. Разработка методов снижения выбросов окислов азота котлами ТЭС. Казань, КГЭУ, 2013. 69 с.
4. Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е., Тымчак В. М. Сжигаемые устройства нагревательных и термических печей. Справочник. — М.: Металлургия, 1981. — 272 с.
5. Арсеев А. В. Сжигание природного газа. — М.: Металлургиздат, 1963. — 408 с.
6. Винтовкин А. А., Ладыгичев М. Г., Гусовский В. Л., Калинова Т. В.
7. Таймаров М.А., Сафин Р.Г. Форсунка для сжигания обводненного мазута // Вестник Казан. технол. ун-та. - 2012. - Т.15, N 16. - С.144-145.
8. Таймаров М.А. Повышение эффективности работы энерготехнологических. Научное издание. Казань, КГЭУ, 2010. 108 с.
9. Винтовкин А. А., Арсеев А. В. Стабилизация факела при сжигании природного газа в длиннопламенных горелках. Реф. сб. Использование газа в народном хозяйстве. Вып. 1 — М.: ВНИИЭГазпром, 1975. С. 3-8.
10. Таймаров М.А. Горелочные устройства. Научное издание. Казань: КГЭУ, 2009 г. 147 с.
11. Танатаров М.А., Ахметшина М.Н., Фасхутдинов Р.А. Технологические расчеты установок переработки нефти. М., Химия, 1987. 352 с.
12. Сарданашвили А. Г. Львова А.И. , Примеры и задачи по технологии переработки нефти и газа. М., Химия, 1980. 256 с.
13. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа. М., Химия, 201. 568 с.
14. Сафин Р.Г. Технологические процессы и оборудование деревообрабатывающих производств: Учебное пособие. Ч.1. - М.: МГУЛ, 2002. 688 с.
15. Исмагилова Л.М., Садрутдинов А.Р., Степанова Т.О. Влияние фракционного состава древесного сырья на качество промежуточного продукта при газификации / Вестник Югорского государственного университета. 2015. № S2 (37). С. 161-163.
16. Сафин Р.Г., Ахметова Д.А., Сафина А.В., Степанова Т.О. Термомодификация древесных материалов / Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 22. С. 112-118.
17. Сафин Р.Г., Саттарова З.Г., Хабибуллин И.Г., Зиатдинов Р.Р., Степанова Т.О. Современные направления переработки лесных ресурсов / Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 21. С. 90-93.
18. Таймаров М.А., Додов И.Р., Степанова Т.О. Сжигание сбросных газов для теплофикации в нефтехимии / Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 24. С. 95-98.
19. Тунцев, Д.В. Ресурсосбережение при утилизации отработанных деревянных шпал [Текст]/ Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, Р.Г. Хисматов, М.Р. Хайруллина, Э.Е. Антипова, И.Ф. Гараева // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – №5. – С. 248-250.
20. Тунцев, Д.В. Математическое моделирование процесса термического разложения отработанных деревянных шпал [Текст]/ Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, М.Р. Хайруллина, Э.К. Хайруллина, А.С. Савельев // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18. – №15. - С. 152-154.

© М. А. Таймаров – д-р техн наук, профессор каф. КУПГ, КГЭУ. Taimarovma@yandex.ru; Н. Е. Кувшинов – магистрант каф. КУПГ, КГЭУ, kuvshinovnikita@mail.ru; Д. Е. Чикляев – аспирант каф. КУПГ, КГЭУ, И. Ю. Мазаров – магистрант каф. ПДМ КНИТУ, ivanmazarov92@mail.ru.

© М. А. Taimarov - Doctor of Engineering, professor KUPG, KGEU, Taimarovma@yandex.ru; N.E. Kuvshinov - mahystrant chair. KUPH, KGEU, kuvshinovnikita@mail.ru; D. E. Chiklyayev, aspirant chair. KUPH, KGEU; I. Yu. Mazarov – undergraduate of chair of processing of wood materials, ivanmazarov92@mail.ru, KNRTU.