

УДК 37.016:5023

В. С. ДЕЦУК, кандидат химических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ В КОТЛАХ ТЭС

Рассмотрено влияние типа конструкции горелок на выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Произведен расчет эмиссии оксидов азота, который показал максимальную эффективность использования горелок двухступенчатого сгорания. Установлено, что рациональный выбор конструкции горелок может без дополнительных вложений снизить эмиссию оксидов азота в атмосферный воздух.

Одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха, особенно оксидами азота NO_x , являются тепловые электрические станции, сжигающие органическое топливо.

В настоящее время принято считать, что оксиды азота при горении образуются в результате четырех основных механизмов, из которых первые три являются существенными для топок котлов: «термического» – по цепному механизму Зельдовича; «быстрого» – за счет активации молекулярного азота по реакциям с углеводородными радикалами, присутствующими в зоне реакции; «топливного» – за счет окисления присутствующих в топливе азотсодержащих соединений; четвертый механизм (образование через N_2O) имеет существенное значение при больших избытках воздуха (газовые турбины и т.п.) [1].

Методы снижения образования оксидов азота направлены на подавление «термических», а при необходимости также и «топливных» NO_x . Снижение образования «термических» NO_x достигается путем воздействия главным образом на максимальную температуру горения, что обеспечивается вводом газов рециркуляции, воды и пара в зону горения или в дутьевой воздух, а также двух- и трехступенчатым сжиганием топлива, снижающим максимальную температуру и содержание кислорода в зоне максимальных температур. Выход «топливных» NO_x в меньшей мере зависит от максимальной температуры, но сильно зависит от избытка воздуха, поэтому здесь более эффективным является ступенчатое горение.

При сжигании газа часто удается существенно уменьшить выход «термических» NO_x , приблизив их концентрации к уровню «быстрых» или к $100\text{--}120 \text{ мг/м}^3$ при холодном дутьевом воздухе и к $150\text{--}200 \text{ мг/м}^3$ при горячем воздухе. Чаще всего для снижения выбросов оксидов азота на действующих ТЭС применяются так называемые технологические (или внутритопочные) мероприятия, в частности внедрение технологических методов по подавлению эмиссии оксидов азота в топках, применяя наиболее рациональные режимы горения или конструкции горелок. Поскольку при разработке систем отопления предпочтение отдается требованиям технологии, в основу классификации горелочных устройств положены степень развития в них процесса смешения топлива с воздухом для горения. Различают инжекционные горелки, в которых струи газа инжектируют воздух, и дутьевые (или напорные), в которых воздух подается принудительно при помощи автономного дутьевого вентилятора или встроенного вентилятора, а также горелки двухступенчатого сгорания [2].

Метод рециркуляции дымовых газов широко применяется в котельной технике. Обычно дымовые газы с температурой $300\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$ отбираются перед воздухоподогревателем и специальным рециркуляционным дымоходом подаются в топочную камеру. В результате максимальная температура в топке снижается на $120\text{--}130 \text{ }^\circ\text{C}$ и, кроме того, падает концентрация кислорода в зоне горения, что также уменьшает образование топливных NO_x . При этом КПД котла снижается сравнительно мало ($0,01\text{--}0,03 \%$ на 1% рециркулирующих газов).

Наибольшее распространение получил ввод дымовых газов рециркуляции в смеси с дутьевым воздухом. Подача рециркуляционных газов с топливом более эффективно снижает выход оксидов азота, чем подмешивание их в дутьевой воздух. При одинаковой степени рециркуляции, например при сжигании газа, в первом случае выход NO_x снижается на $45,4 \%$, а во втором – на $22,7 \%$. Это имеет существенное значение, так как применение рециркуляции приводит к снижению КПД котлов пропорционально количеству подаваемых газов рециркуляции. Так, при увеличении степени рециркуляции с 20 до 30% КПД котла снижается соответственно на $0,5$ и $0,75 \%$.

Применение рециркуляции связано с определенными трудностями, к которым относится необходимость в специальном рециркуляционном вентиляторе и в газоходах. Кроме того, повышается сопротивление воздушного тракта, возможны нарушения стабилизации пламени или появление сажи при чрезмерной степени рециркуляции. В настоящее время рециркуляция газов применяется в мощных котлах энергоблоков, работающих на угольной пыли, мазуте и природном газе. Очень широко используется рециркуляция газов и в зарубежных котлах. По результатам исследований влияния подачи газов рециркуляции в дутьевой воздух на выход NO_x , проведенных Институтом газа НАНУ, подача газов рециркуляции в количестве 20% от объема воздуха, необходимого для горения, позволяет в 2 раза снизить выход оксидов азота, но при этом КПД котла снижается на $0,64 \%$.

Кроме того, из-за перегрузки тягодутьевых устройств на максимальной нагрузке котла, где выход оксидов азота наибольший, рециркуляция часто не используется или используется недостаточно.

Принцип организации двухступенчатого сжигания заключается в пространственном разделении в объеме топочной камеры двух основных процессов (ступеней), влияющих на образование оксидов азота. Через основные горелки в топочную камеру подается топливо с

недостатком воздуха ($a < 1$), а остальная (необходимая для полного сгорания топлива) часть воздуха подается далее по факелу через специальные сопла. При упрощенном двухступенчатом сжигании вместо специальных сопел для ввода воздуха используются отключенные по топливу горелки.

Важнейшей особенностью ступенчатого сжигания является наличие восстановительной зоны, где из-за недостатка воздуха появляются продукты неполного сгорания CO и H₂, а оксид азота не образуется. Этот основополагающий принцип – формирование в факеле восстановительной зоны – в настоящее время широко применяется также при разработке малотоксичных горелок.

При ступенчатом сжигании концентрация NO в восстановительной зоне снижается, а при трехступенчатом сжигании оксид азота, поступивший из окислительной зоны, даже восстанавливается до молекулярного азота.

Конструктивно стадийное горение применяют в котельных агрегатах с многоярусным расположением горелок, что позволяет регулировать соотношение топливо – воздух по длине факела. Горелочные устройства нижнего яруса работают с недостатком воздуха, остальной воздух подается через фурмы воздушного дутья или горелочные устройства верхнего ряда, куда топлива подается мало или оно совсем не подается.

Горелки инжекционного типа, в которых образование газозвушной смеси происходит за счет энергии струи газа, могут быть в зависимости от количества инжектируемого воздуха с неполной инжекцией воздуха и с полным предварительным смешением газа с воздухом.

Принцип действия инжекционной горелки заключается в том, что поток воздуха всасывается при воздействии мощной газовой струи в корпус, где происходит их смешение. Такой принцип действия возможен при условии давления газа, которое равняется атмосферному давлению. Газ во время прохождения сквозь сопло сильно ускоряется, что способствует образованию разрежения за соплом. Горелки, у которых происходит полное смешение газа среднего давления с необходимым количеством воздуха, в процессе работы выпускают небольшое пламя, а сам процесс заканчивается в минимальном объеме. Газовые горелки, у которых воздух с газом смешиваются только частично, в корпус для смешения попадает только от 40 до 60 % необходимого воздуха. Остальной необходимый воздух поступает извне непосредственно к самому пламени за счет разрежения в топках смеси газовых и воздушных потоков, которые инжектировались в смеситель.

Самыми весомыми недостатками односопловых горелок являются:

- большая длина, учитывая высокую тепловую мощность;
- ось сопла должна строго совпадать с осью горелки;
- слишком шумные в работе.

К недостаткам горелок с низким газовым давлением относят:

- большую длину факела;
- влияние топочного разжижения на интенсивность подачи вторичного воздуха [3].

При всем разнообразии конструкций горелок, их достоинств и недостатков при выборе той или иной модификации обычно упускается аспект эмиссии загрязняющих веществ и их сравнительный анализ.

Целью работы является сравнение уровня эмиссии оксидов азота при использовании горелок различных конструкций при сжигании органических топлив в котлах ТЭС.

Исходные данные для расчета эмиссии оксидов азота: водогрейный котел работает в общем случае; температура горячего воздуха (воздуха для дутья) $t_{гв} = 30$ °С; доля воздуха, подаваемого в промежуточную зону факела, $\delta = 0$; рециркуляции нет; объем сухих дымовых газов рассчитывается по составу топлива; теплонепряжение топочного объема рассчитывается; в качестве топлива используется природный газ, газопровод – Уренгой – Надым – Пунга – Ухта.

Расчет выделений загрязняющих веществ выполнен в соответствии с «Методикой определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 т пара в час или менее 20 Гкал в час» [4].

Суммарное количество оксидов азота NO_x, т/год, в пересчете на NO₂, выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами, рассчитывается по формуле

$$M_{NO_x} = B_p Q_i^r K_{NO_2}^r \beta_k \beta_r \beta_a (1 - \beta_r)(1 - \beta_\delta) k_n, \quad (1)$$

где B_p – расчетный расход топлива, л/с; Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива, МДж/нм³; $K_{NO_2}^r$ – удельный выброс оксидов азота при сжигании газа, г/МДж,

$$K_{NO_2}^r = 0,01\sqrt{D} + 0,03; \quad (2)$$

D – фактическая паропроизводительность котла, т/ч; β_k – безразмерный коэффициент, учитывающий принципиальную конструкцию горелки; β_r – безразмерный коэффициент, учитывающий температуру воздуха, подаваемого для горения; β_a – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние избытка воздуха на образование оксидов азота; β_r – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов через горелки на образование оксидов азота; β_δ – безразмерный коэффициент, учитывающий ступенчатый ввод воздуха в топочную камеру; k_n – коэффициент пересчета, $k_n = 10^{-3}$.

Коэффициент β_r определяется по формуле

$$\beta_r = 1 + 0,002(t_{гв} - 30), \quad (3)$$

где $t_{гв}$ – температура горячего воздуха, °С.

Коэффициент β_δ определяется по формуле

$$\beta_\delta = 0,022\delta, \quad (4)$$

где δ – доля воздуха, подаваемого в промежуточную зону факела (в процентах от общего количества организованного воздуха).

В связи с установленными отдельными ПДК для оксида и диоксида азота и с учетом трансформации оксида азота в атмосферном воздухе суммарные выбросы оксидов азота разделяются на составляющие по формулам

$$M_{NO_2} = 0,8M_{NO_x}; \quad (5)$$

$$M_{NO} = 0,13M_{NO_x}. \quad (6)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1– Валовые выбросы оксидов азота при использовании различных типов горелок

Загрязнитель	Валовый выброс, т/год		
	Горелка дутьевая напорного типа	Горелка инжекционного типа	Горелка двухступенчатого сгорания
Азота диоксид (азот (IV) оксид)	2,764326	3,065438	2,613771
Азот (II) оксид (азота оксид)	0,449203	0,498134	0,424738

Результаты расчетов показали, что суммарное выделение оксидов азота максимально при использовании горелок инжекционного типа. У горелок дутьевого напорного типа выбросы ниже на 11 %, а при использовании горелок двухступенчатого сгорания – на 15 %, которые к тому же имеют наиболее простую конструкцию. Таким образом, рациональный выбор конструкции

горелок может без дополнительных вложений снизить эмиссию оксидов азота в атмосферный воздух.

Список литературы

- 1 30 Years of Energy Use in IEA Countries. – Paris : IEA, 2004. – 211 p.
- 2 Advice on Developing an Energy Efficiency Strategy. – Brussel : Energy Charter Secretariat, 2001. – 36 p.
- 3 **Кузнецов, В. А.** Сравнительные исследования эффективности сжигания природного газа в топках с подовыми горелками при переводе котлов с твердого топлива на природный газ / В. А. Кузнецов, Е. В. Шуршакова // Экология и строительство. – 2016. – № 1. – С. 4–6.
- 4 **ТКП 17.08-04-2006.** Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт. – Введ. 2006-06-28. – Минск : Минприроды, 2006 – 37 с.

Получено 28.11.2017

V. S. Detsuk. Methods of reducing pollutant emissions when burning Fossil fuels in the boilers of tpp.

The article discusses the influence of the design of burners for emissions of polluting substances into the atmosphere. The calculation of the emissions of nitrogen oxides showed a maximum efficiency burner two stage combustion. Rational design of burners may, without additional investments to reduce emissions of nitrogen oxides in atmospheric air.