

УДК 621.181.126
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-27-31

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В КОТЛЕ

Е.Н. Слободина, А.Г. Михайлов, М.В. Етчо

Аннотация. Рассмотрена классификация оксидов азота, образующихся при сжигании органического топлива. Рекомендованы способы подавления образования NO_x при сжигании топлива. Приведены результаты расчетного исследования ступенчатого сжигания газообразного топлива в топке котла, распределения температур в зависимости от коэффициента избытка воздуха и концентрации оксидов азота. Рассмотрено изменение максимальных температур при одноступенчатом и ступенчатом сжигании топлива. Приведены результаты расчетного исследования концентрации оксидов азота на выходе из области активного горения при одно- и двухступенчатом сжигании. Обосновано уменьшение образования оксидов азота при изменении в области горения в топке коэффициентов избытка воздуха. Предлагается на котле ТП-82, работающем на газообразном топливе, использовать двухступенчатое сжигание топлива с целью снижения образования оксидов азота.

Ключевые слова: оксиды азота; органическое топливо; котел; ступенчатое сжигание.

ТАБИГЫЙ ГАЗДЫН КАЗАНДАГЫ БАСКЫЧТУУ КҮЙҮҮ ПРОЦЕССИН ЭСЕПТӨӨЧҮ ИЗИЛДӨӨ

Е.Н. Слободина, А.Г. Михайлов, М.В. Етчо

Аннотация. Макалада органикалык отунду күйгүзүүдө пайда болгон азот оксиддеринин классификациясы каралат. Отун күйгөндө NO_x тин пайда болушун басуу жолдору сунушталат. Буу казандын мешинде газ түрүндөгү отундун баскычтуу күйүшүн, абанын ашыкча коэффициентине жана азот оксиддеринин концентрациясына жараша температуранын бөлүштүрүлүшүн эсептик изилдөөнүн натыйжалары келтирилген. Бир жана эки баскычтуу күйүүдө активдүү күйүү аймагынан чыгууда азот оксиддеринин концентрациясын эсептөөчү изилдөөнүн натыйжалары келтирилген. Меште ашыкча аба коэффициенттеринин күйүү аянтынын өзгөрүшү менен азот оксиддеринин пайда болушунун төмөндөшү далилденген. Азот кычкылдарынын пайда болушун азайтуу максатында газ түрүндөгү отун менен иштеген ТП-82 казанында эки этаптуу күйүүчү отунду колдонуу сунушталды.

Түйүндүү сөздөр: азот оксиддери; органикалык отун; казан; баскычтуу күйүү.

COMPUTATIONAL STUDY OF STAGED COMBUSTION OF NATURAL GAS IN A BOILER

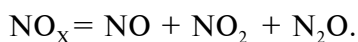
E.N. Slobodina, A.G. Mikhailov, M.V. Etcho

Abstract. The article considers the nitrogen oxides classification formed during the combustion of fossil fuels. Measures designed to suppress the formation of NO_x during fuel combustion are presented. The computational study results of the staged gas fuel combustion in the boiler furnace, the temperature distribution depending on the excess air coefficient and the concentration of nitrogen oxides are presented. The change in maximum temperatures during single-stage and staged fuel combustion is considered. The computational study results of the nitrogen oxides concentration at the exit from the region of active combustion in one- and two-stage combustion are presented. The decrease in the formation of nitrogen oxides with a change in the combustion area in the furnace of the excess air coefficients is substantiated. It is proposed to use a two-stage fuel combustion in the gas fuel boiler TP-82 operating in order to reduce the formation of nitrogen oxides.

Keywords: nitrogen oxides; fossil fuel; boiler; fuel-stage combustion.

Эффективность работы различных отраслей экономики России связано, в том числе, и с эксплуатацией теплоэнергетических производств, использующих источники теплоты различной мощности, работающих на органическом топливе. Эксплуатация подобных источников сопровождается формированием определенных объемов газовых выбросов. Это оказывает влияние на природную среду. Поэтому развитие энергетики России должно учитывать и экологическую составляющую.

Весомым токсичным образованием, формирующимся при сжигании органического топлива в котлах, являются оксиды азота NO_x . В качестве окислителя используется кислород воздуха. При этом азот, находящийся в воздухе и топливе, образует оксиды:



Основной процент (до 99 %) образовавшихся в продуктах сгорания котлов NO_x относится к монооксиду азота NO . Диоксид NO_2 , геммоксид N_2O азота формируются в меньших количествах.

Образование оксидов азота происходит вследствие реакции окисления в ядре факела органического топлива тремя способами: топливные – формируются при температуре газовой среды от 800 до 2100К за счет азота в топливе; термические – формируются при температурах более 1600К и окислении азота, входящего в воздух; быстрые формируются в результате контакта между промежуточными углеводородными образованиями при сжигании газообразного топлива или мазута с азотом воздуха в начальной зоне горения при температурах примерно 1000К и выше. На рисунке 1 показаны области формирования оксидов азота при сжигании органических топлив.

Известны первичные мероприятия, предназначенные для подавления образования NO_x : уменьшение максимальной температуры в топке; изменение времени нахождения продуктов сгорания в зоне максимальных температур; образование области реакций с восстановительной средой (избыток воздуха), в которых формирование топливных NO затруднено и восстановление оксидов происходит до молекулярного азота.

Подобные мероприятия реализуются с использованием следующих режимно-технологические решений: применение горелочных устройств с небольшим выбросом NO_x ; ступенчатое сжигание топлива или подвод воздуха; рециркуляция продуктов сгорания; впрыск воды или водо-мазутной эмульсии в область высоких температур; комбинация указанных методов. Предложенные решения требуют относительно небольших затрат и их применяют для обеспечения нормируемых выбросов оксидов азота.

В качестве вторичных мероприятий, направленных на снижение выбросов NO_x , используют селективный некаталитический и каталитический методы восстановления NO_x до молекулярного азота.

На практике наиболее реально уменьшить выбросы в атмосферу оксидов азота котлами можно с помощью использования рациональной технологии сжигания топлива.

В качестве рационального способа снижения выхода оксидов азота, предлагается на котле ТП-82, работающем на газообразном топливе, использовать ступенчатое сжигание. Данное техническое решение возможно осуществить после соответствующих тепловых расчетов.

Рассмотрим более детально метод ступенчатого сжигания топлива. Данное сжигание относится к методам, основанным на снижении избытка воздуха [1, 2]. При реализации данных методов на начальном участке факела подается количество воздуха, меньше необходимого для полного сгорания топлива, т. е. $\alpha < 1$. В последующие участки факела для дожигания органического топлива подается оставшееся количество воздуха. При реализации данных методов происходит увеличение области интенсивного горения в объеме, снижение количества кислорода и максимальной температуры в области горения, что приводит к уменьшению скорости реакции образования NO_x [1–4], и к снижению образования термических и топливных оксидов азота. Значительная часть оксидов формируется в первой области. Большая часть топлива сгорает в объеме при недостатке окислителя и коэффициенте избытка воздуха меньше единицы (восстановительная зона), дожигание топлива – в окислительной области с коэффициентом избытка воздуха больше единицы, что сопровождается уменьшением максимальных

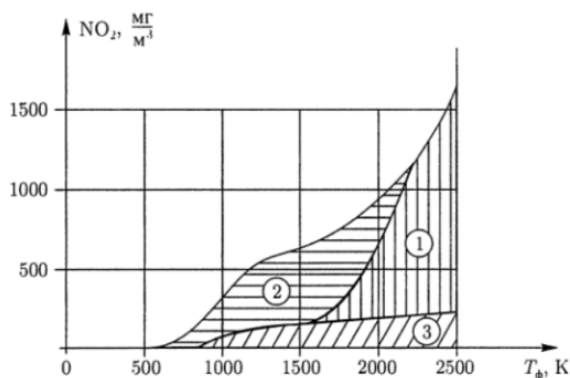


Рисунок 1 – Области формирования оксидов азота при сжигании органических топлив:
1 – термические; 2 – топливные; 3 – быстрые

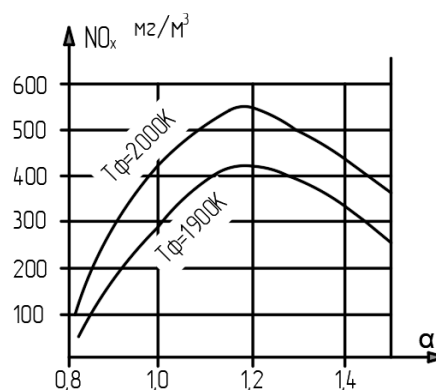


Рисунок 2 – Распределение NO_x в зависимости температуры и коэффициента избытка воздуха α

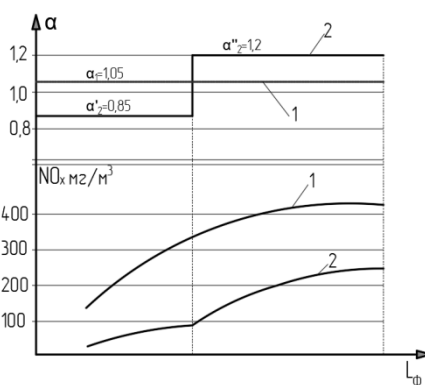


Рисунок 3 – Изменение концентрации оксидов азота на выходе из области активного горения при одно- и двухступенчатом сжигании природного газа: 1 – одноступенчатое сжигание при $\alpha_{top} = \alpha_1 = 1,05$; 2 – двухступенчатое сжигание с разным избытком воздуха

температур с подавлением формирования оксидов азота. На рисунке 2 показан график изменения образования NO_x при переходе с одноступенчатого на двухступенчатое сжигание с использованием двухъярусного расположения горелок. Топливо – природный газ.

В первой ступени коэффициент избытка воздуха меньше единицы, полного сгорания топлива не происходит. Помимо снижения уровня температуры в зоне горения, создаются условия для восстановления оксидов азота. В результате формирование оксидов азота сокращается. Во второй области при коэффициенте избытка воздуха больше единицы температура газов ниже уровня для интенсивного образования оксидов. Данное явление показано на рисунке 3.

Снижение концентрации оксидов азота при ступенчатом сжигании будет проходить тем интенсивнее, чем ниже будет максимальная температура газов в области дожига после смешения восстановительного и окислительного факелов. При этом потери теплоты от химического недожога должны удовлетворять следующему неравенству: $q_3 \leq 0,15$. При рациональной организации двухступенчатое сжигание на 40–55 % снижает выбросы NO_x .

В дальнейшем тепловые расчеты котла осуществлялись с использованием нормативного метода. Ниже приводятся основные расчетные формулы.

КПД брутто котла определяется по обратному балансу:

$$\eta_{бр} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6),$$

где q_2 – потери теплоты с уходящими газами; q_3 – потери теплоты от химической неполноты сгорания; q_4 – потеря теплоты от механической неполноты сгорания; q_5 – потери теплоты от наружного охлаждения; q_6 – потери теплоты с физическим теплом шлаков.

Полезное тепловыделение топки рассчитывается по формуле:

$$Q_T = Q_p^p \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_в - Q_{в.вн} + rH_{э.об},$$

Располагаемая теплота Q_p^p ; $Q_в$ – тепло, вносимое в топку с горячим воздухом; $Q_{в.вн}$ – теплота, внесенная поступающим в котлоагрегат воздухом, подогретым вне агрегата; $rH_{э.об}$ – теплота рециркулирующих продуктов сгорания.

Эффективная температура топочной среды T_Φ определяется по формуле:

$$T_\Phi = 0,925 \sqrt{T_a \cdot T_m^4},$$

где T_a – адиабатная температура сгорания; T_m – температура газов на выходе из топки.

Выброс оксидов азота в пересчете на диоксид азота определялся по выражению:

$$M_{NO_2} = B_p \cdot Q_i^r \cdot K'_{NO_2},$$

где B_p – расчетный расход топлива; Q_i^r – теплота сгорания топлива; K'_{NO_2} – удельный выброс оксидов азота в пересчете на NO_2 .

На первом этапе исследований был осуществлен тепловой расчет котла с учетом технических решений, связанных с подавлением образования оксидов азота. Далее, при известном распределении температур в топке и по длине газоходов, был рассчитан выход оксидов азота. Уточнялась эффективность работы котла.

Получены результаты расчетов максимальной температуры факела при $\alpha_t = 1,1$ на выходе из топки переменных коэффициентах избытка воздуха в области высоких температур.

При базовом сжигании максимальная температура факела $T_m = 2056\text{K}$. Данная температура соответствует областям с интенсивным образованием оксидов азота (рисунок 1). При ступенчатом сжигании и различных коэффициентах избытка воздуха, максимальная температура факела изменяется пропорционально доли сгоревшего топлива для каждой ступени. Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки неизменен и соответствует требованиям нормативных документов. На рисунке 4 показано влияние ступенчатого сжигания газообразного топлива на образование оксидов азота и распределение температур (индексы i, max – текущие и максимальные значения величин, соответственно) в топке котла. При уменьшении коэффициента избытка воздуха в первой ступени наблюдается уменьшение максимальной температуры горения и снижение концентраций образовавшихся оксидов азота. Расчетное суммарное уменьшение вредных выбросов оксидов азота NO_x при сжигании газообразного топлива составило 35 %.

Таким образом, обзор методов снижения выбросов оксидов азота в атмосферу позволил сделать вывод, что ступенчатое сжигание газообразного топлива в энергетических котлах не влияет на энергетическую эффективность котлоагрегата, которая остается неизменной за счет рационального распределения избытка воздуха в интервале $0,935 \leq \alpha \leq 1$ для первой ступени горения в топке. Уменьшение коэффициента избытка воздуха $\alpha < 0,935$ в первой ступени приводит к увеличению потери теплоты

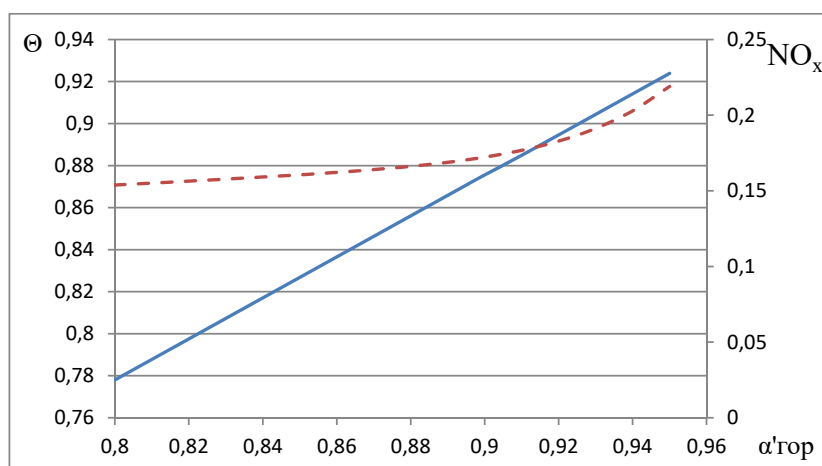


Рисунок 4 – Влияние ступенчатого сжигания на выброс NO_x и распределение температур:

«—» — $NO_x' = NO_x^i / NO_x^{\max}$ – относительная концентрация оксидов азота;
 «---» — $\Theta = T_M^i / T_M^{\max}$ – безразмерная температура.

от химической неполноты сгорания в интервале от 0,15 до 0,5 % и снижению КПД котла. Максимально возможное снижение $NO = 54\%$ при $\alpha_{гор} = 0,935$ в первой ступени. Коэффициент избытка воздуха в зоне горения $\alpha_{гор} = 1,05$.

Выводы. Предложен метод ступенчатого сжигания, как достаточно эффективный и экономически целесообразный способ организации процесса горения органического топлива. Реализация подобного метода возможна на большинстве котлов за счет разбаланса соотношения «топливо-воздух» по ярусам горелок за счет подачи недостающего воздуха через шлицы, погашенные горелки в верхней части топki или за счет организации встречного дутья вторичного воздуха [1].

Поступила: 17.08.22; рецензирована: 31.08.22; принята: 05.09.22.

Литература

1. Росляков П.В. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях / П.В. Росляков. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 144 с.
2. Котлер В.Р. Усовершенствованный метод двухступенчатого сжигания топлива / В.Р. Котлер // Теплоэнергетика. 2007. № 2.
3. Беликов С.Е. Различные схемы ступенчатого сжигания как средство снижения выбросов оксидов азота / С.Е. Беликов, В.Р. Котлер // Известия Академии промышленной экологии. 2005. № 1. С. 57–59.
4. Слободина Е.Н. Влияние расчетных характеристик твердого органического топлива на температуру предварительного подогрева воздуха в энергетических котлах / Е.Н. Слободина, А.В. Васильев, А.Г. Михайлов, И.А. Степашкин // Вестник КРСУ. 2020. Т. 20. № 12. С. 100–106.