10. Мельников, Н.А. Матричный метод анализа электрических сетей [Текст] / Н.А. Мельников. – М.: Энергия, 1972.
11. Лосев, С. Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем: научное издание [Текст] / С. Б. Лосев, А. Б. Чернин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 528 с.
12. Гусейнов, А.М. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся режимов в сложных системах [Текст] / А.М. Гусейнов // Электричество. – 1989. – №3.
13. Бернас, С. Математические модели элементов электроэнергетических систем [Текст] : Пер. с польск. / С. Бернас, З. Цек. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.: ил.
14. Заварыгин, В.М. Численные методы [Текст]. / В. М. Заварыгин. – М: Просвещение, 1991. – 250 с.

Тринченко А.А., Парамонов А.П., Митрофанов И.И.

Влияние двухсветного экрана на экологические показатели котла Е-210-13,7 при сжигании каменного угля Никольского месторождения

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi: 10.18411/lj-09-2020-24

idsp: ljjournal-09-2020-24

Аннотация

В работе представлены результаты исследований влияния двухсветного экрана на образования оксидов азота в топочной камере парового котла средней мощности. Разработаны методика, математическая модель и расчетная программа, позволяющие оценить степень снижения выбросов оксидов азота в процессе сгорания твердого топлива при установки двухсветного экрана в топку. Расчетными исследованиями подтверждено, что наличие двухсветного экрана позволяет снизить генерацию оксидов азота на величину от 10 до 12 % в сравнении с вариантом топки котла без двухсветного экрана.

Ключевые слова: паровой котел, двухсветный экран, твердое топливо, оксиды азота

Abstract

The paper presents the results of studies of the effect of a two-light screen on the formation of nitrogen oxides in the combustion chamber of a medium-power steam boiler. A methodology, a mathematical model and a computational program have been developed that allow one to assess the degree of reduction in nitrogen oxide emissions during the combustion of solid fuel when installing a two-light screen in the furnace. Computational studies have confirmed that the presence of a two-light screen makes it possible to reduce the generation of nitrogen oxides by an amount from 10 to 12 % in comparison with the option of a boiler furnace without a two-light screen.

Keywords: steam boiler, double-light screen, solid fuel, nitrogen oxides

Введение

Одной из основных проблем сжигания твердого топлива в котлах ТЭС является снижение выбросов в атмосферу вредных газообразных загрязнителей уходящих дымовых газов, к которым, наряду с оксидами серы, окисью углерода и др., относятся оксиды азота ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) [1, 2]. Превышение выбросов этих загрязнителей над пороговыми значениями, установленными действующими природоохранными нормативами [3], приводит к ухудшению экологической обстановки крупных городов и промышленных центров [4–6], что имеет ряд негативных последствий для человека (таких как раздражение слизистой оболочки глаз, дыхательных путей, нарушение дыхательных функций, деятельности центральной нервной системы [7] и др.), металлических конструкций, строений, окружающего природного и животного мира [8, 9]. При сооружении новых, реконструкции или расширении действующих ТЭС,

необходимо обеспечить соблюдение установленных санитарными органами и государственными стандартами [1] допустимых концентраций газообразных загрязнителей в дымовых газах, главным образом – оксидов азота.

Для борьбы с генерацией и выбросами оксидов азота применяют, в основном, режимно-конструктивные мероприятия [2, 9] и различные методы очистки дымовых газов [9–11]. Затраты на очистку дымовых газов от оксидов азота, как минимум на один-два порядка превышают стоимость реализации режимно-конструктивных мероприятий по снижению их образования [10]. В тоже время конструктивные мероприятия, как правило, позволяют достичь требуемого уровня выбросов оксидов азота с относительно невысокими капитальными затратами.

Образующиеся при горении топлива оксиды азота можно разделить на "топливные" (из азота топлива) и "воздушные" (включающие в себя "термические" (при высоких температурах) и "быстрые" (на начальной стадии горения топлива в зоне относительно низких температур)) [1, 2, 12]. Так как доля "быстрых" оксидов азота в сравнении с остальными механизмами невелика (не более 10 %) [2], считается, что интенсивность генерации NO_x зависит в основном от температурного уровня в топке котла и концентрации кислорода на участке активного горения топлива. Снижение избытка воздуха в топливно-воздушной смеси может повлечь за собой рост величины механического недожога топлива [13–15]. Для снижения температурного уровня на участке активного горения, наряду с другими методами [1, 9, 11], в ряде источников [16, 17 и др.] отмечается возможность установки в топке двухсветного экрана. В работах [18, 19] положительный эффект получен при установке в топке дополнительных тепловоспринимающих поверхностей.

Целью работы является исследование влияния установки двухсветного экрана в топке котла на генерацию оксидов азота при сжигании каменного угля в прямоточном пылеугольном факеле, а также разработка методики оценки их генерации в топке с двухсветным экраном.

Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования рассматривается паровой котел Е-210-13,7-560. Котел барабанный, с естественной циркуляцией, П-образной компоновки, с уравновешенной тягой, без промежуточного перегрева, спроектирован для сжигания пыли каменного угля Никольского месторождения (низшая теплота сгорания $Q_i^* = 21,63$ МДж/кг (5175,6 ккал/кг), влажность $W^* = 18,86\%$, зольность $A^* = 18,86\%$, содержание азота $N^* = 0,96\%$), по схеме прямоточного пылеугольного факела и имеет следующие технические характеристики: паропроизводительность $D = 58,3$ кг/с (210 т/ч), давление перегретого пара $p_{\text{пп}} = 13,7$ МПа, температура перегретого пара $t_{\text{пп}} = 833$ К (560 °С). Котел оборудован восемью пылеугольными горелками, расположенными на фронтальной стене в два яруса по высоте топки.

Величина выбросов оксидов азота (C_{NO_2}), рассчитанная для рассматриваемого котла согласно рекомендациям [20] составила 500 мг/нм^3 (что объясняется значительным содержанием азота в рабочей массе топлива и высоким значением максимальной температуры в топке (1870 °С)) при допустимой нормативными требованиями [3] величине 470 мг/нм^3 . Превышение уровня выбросов оксидов азота над нормативными, определило необходимость разработки и обоснования предложений по их снижению до величины, не превышающей установленных норм.

Модель котла Е-210-13,7-560 с двухсветным экраном в топке представлена на рисунке 1. Двухсветный экран выполнен в виде подвешенных сверху вертикальных панелей из одного ряда труб, который делит топочную камеру на две равные части (полутопки). Для выравнивания давлений между полутопками, путем соответствующей разводки труб, в двухсветном экране выполнены "окна". Для предотвращения прогиба, трубы экрана соединены между собой в нескольких местах по высоте поясами жесткости.

Рисунок 1. Котел E-210-13,7-560 с двухсветным экраном в топке

Для исследования влияния двухсветного экрана на генерацию оксидов азота разработана методика, позволяющая оценить степень снижения их выбросов в процессе сгорания твердого топлива. Температурный уровень по высоте топки находился с использованием позонного теплового расчета [21], согласно рекомендациям к которому, топочная камера котла разбивается по высоте на несколько участков (зон), рисунок 2. Основой расчета является баланс тепла в зоне – тепла, появившегося в зоне и тепла покинувшего зону за счет теплообмена с поверхностями нагрева зоны, с соседними зонами, с газами, ушедшими из зоны.

Рисунок 2. Зоны топочной камеры котла E-210-13,7-560 для позонного расчета

Температура (°C) на выходе из первой зоны определяется по формуле [21]:

$$t_1'' = \frac{\frac{100}{100 - q_4} \beta_{ct} Q_i' + Q_v + i_{tl} - Q_{бшл}}{Vc''} - \frac{4,9 \cdot 10^{-8} a_t T^{n4}}{B_p Vc''} \psi F, \quad (1)$$

а температура (°C) на выходе из последующих зон – по формуле [21]:

$$\vartheta''_{2(3,4)} = \frac{\Delta\beta_{\text{сг}} Q_i^r}{Vc''} + \frac{c'}{c''} \vartheta'_{1(2,3)} - \left[1 + \left(\frac{T''}{T'} \right)^4 \right] \times$$

$$\times \frac{4,9 \cdot 10^{-8} a_t T'^4 [F_{\text{сг.ср}} (\psi'' - \psi') + \psi_{\text{ср}} F_{\text{сг}}]}{2B_p Vc''}, \quad (2)$$

где $\beta_{\text{сг}}$ – степень выгорания топлива в зоне; Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг; Q_b – количество тепла, вводимое в топку с воздухом, ккал/кг; $i_{\text{тл}}$ – энтальпия 1 кг топлива; $Q_{\text{бшл}}$ – потери тепла с удаляемым из зоны шлаком, ккал/кг; q_4 – величина механического недожога топлива, %; Vc'' – средняя суммарная теплоёмкость продуктов сгорания в первой зоне на 1 кг топлива, ккал/(кг·°C); a_t – степень черноты топки для первой зоны; B_p – расход топлива, кг/час; ψF – произведение коэффициента эффективности на суммарную поверхность, ограничивающую зону; $\Delta\beta_{\text{сг}}$ – коэффициент, характеризующий долю топлива, сгоревшего в пределах рассматриваемой зоны; $F_{\text{ср.сг}}$ – средняя площадь сечения топочной камеры в зоне, м²; $F_{\text{сг}}$ – поверхность стен зоны, м²; $\psi_{\text{ср}}$ – средний коэффициент тепловой эффективности стен зоны; ϑ' и T' ; ϑ'' и T'' – температура на входе и выходе из рассматриваемой зоны, °C и K; c' и c'' – теплоёмкости газов на входе и выходе из зоны, ккал/(кг·°C); $\psi' - \psi''$ – разность коэффициентов излучения теплоты из расположенной ниже зоны в следующую.

Определение концентрации оксидов азота после установки в котле двухсветного экрана выполнено по методике [20] с использованием расчетных данных, полученных по зависимостям (1) и (2) применительно к модели рассматриваемого котла.

Результаты исследования, их анализ и обсуждение

Результаты расчета температуры по высоте топки представлены на рисунке 3. Установка двухсветного экрана привела к снижению максимума температур в топке на 110 °C.

Удельные выбросы оксидов азота (в пересчете на NO₂) K_{NO_2} (г/МДж), рассчитывались как сумма "топливных" $K_{\text{NO}_2}^{\text{топл}}$ и "воздушных" $K_{\text{NO}_2}^{\text{возд}}$ оксидов азота по зависимости (3) [20]:

$$K_{\text{NO}_2} = K_{\text{NO}_2}^{\text{топл}} + K_{\text{NO}_2}^{\text{возд}}. \quad (3)$$

Переводом полученной по (3) величины удельных выбросов оксидов азота к размерности их концентрации в уходящих газах (мг/м³), получено значение $C_{\text{NO}_2} = 444$ мг/м³, что удовлетворяет требованиям [3] применительно к рассматриваемому топливу и типоразмеру котла. Таким образом,

Рисунок 3. Температура по высоте топочной камеры котла Е-210-13,7-560:

————— без двухсветного экрана, - - - - - с двухсветным экраном

расчетными исследованиями подтверждено, что установка двухсветного экрана позволяет (для рассматриваемых условий) снизить концентрацию оксидов азота в уходящих газах на 11,2 %, что можно считать хорошим результатом реализации этого мало затратного метода. Одновременно необходимо отметить, что установка двухсветного экрана привела не только к снижению максимальной температуры в топочной камере, но и к снижению температуры (на 141 °С) на выходе из топки ϑ_t (на уровне середины выходного окна). Это обстоятельство повлияет на обеспечение температуры перегрева пара в конвективных поверхностях, расположенных в газоходах после топки котла. Увеличение температуры газов на выходе из топки до проектных значений возможно путем уменьшения высоты топки до величины, обеспечивающей заданную температуру газов на выходе из нее.

Выводы по результатам работы

Установка двухсветного экрана позволяет сократить концентрацию оксидов азота в уходящих дымовых газах котла. Снижение концентрации оксидов азота достигается за счет увеличения тепловосприятия в топке и уменьшения температуры топочного процесса. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании топок аналогичной конструкции, а также оценки экологических показателей факельного сжигания твердых топлив.

1. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра: 1988. – 310 с.
2. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 141 с.
3. ГОСТ Р 50831-95 Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. – М.: Издательство стандартов, 1996.
4. Шульман В.Л. Тепловые электрические станции в окружающей среде современного мира. Екатеринбург: ООО Издательство “Сократ”, 2010. – 376 с.
5. Скалкин Ф.В. Энергетика и окружающая среда / Ф.В. Скалкин, А.А. Канаев, И. З. Копп. – Л.: Энергоиздат: Ленингр. отд-ние, 1981. – 280 с.
6. Энергетика и охрана окружающей среды / Под. Ред. Н.Г. Залогина, Л.И. Кроппа, Ю.М. Кострикина. – М.: Энергия, 1979. – 352 с.
7. Лазарев Н.В. Вредные вещества в промышленности. М.: Химия, 1975. – 831 с.
8. Экология энергетики: Учебное пособие / Под общ. ред. В.Я. Путилова. М.: Издательство МЭИ, 2003. – 716 с.
9. Шницер И.Н., Литовкин В.В. Образование и снижение содержания оксидов азота в пылеугольных котлах. – К.: Техніка, 1986. – 112 с.
10. Повышение экологической безопасности тепловых электростанций: Учеб. Пособие для вузов / А.И. Абрамов, Д.П. Елизаров, А.Н. Ремезов и др.; Под ред. А.С. Седлова. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 378 с.
11. Аникеев В.А., Кропп И.З., Скалкин Ф.В. Технологические аспекты охраны окружающей среды. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 255 с.
12. Оксиды азота и теплоэнергетика: проблемы и решения / Ю.С. Ходаков. – 2-е изд., доп. - М.: ООО "ЭСТ-М", 2001. – 432 с.
13. Хабарова М.А., Кадыров М.Р., Тринченко А.А., Урванцев В.Г., Парамонов А.П. Исследование выгорания топливных частиц в условиях пылеугольного факела / Неделя науки СПбГПУ: материалы науч. конф. с междунар. участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 1 – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 108-111.
14. M. Kadyrov, M. Khabarova, A. Khabarov, A. Trichenko, Simulating combustion processes based on digital technologies, SHS Web of Conferences, Vol. 44, 00043 (2018) doi.org/10.1051/shsconf/20184400043.
15. Хабарова М.А., Кадыров М.Р., Тринченко А.А. Исследование топочного процесса в котле Е-230-14,0-520 для повышения технико-экономических показателей его работы / Наука и инновации в технических университетах: Материалы одиннадцатого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. 25 - 27 октября 2017 г. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 67-68.
16. Мейкляр М.В. Современные котельные агрегаты ТКЗ. Москва: Энергия, 1978. – 223 с.
17. Ковалёв А.П., Лелеев Н.С., Виленский Т.В. Парогенераторы. - М.: Энергоатомиздат, 1985. – 376 с.
18. A.A. Trichenko, A.P. Paramonov, V.E. Skouditskiy, R.G. Anoshin. Numerical Research of Nitrogen Oxides Formation for Justification of Modernization of P-49 Nazarovsky State District Power Plant

- Boiler on the Low-temperature Swirl Technology of Burning. IOP Conf. Ser.: J. Phys.: Conf. Ser. 891 (2017) 012238 (DOI :10.1088/1742-6596/891/1/012238).
19. Тринченко А.А., Парамонов А.П., Кадыров М.Р. Низкотемпературное вихревое сжигание как способ улучшения экологических показателей мощного котла // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 3. С. 74–87. (DOI: 0.18721/JEST.230307).
 20. СО 153-34.02.304-2003. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. – М.: ОАО "ВТИ", 2005.
 21. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Под ред. Н.В. Кузнецова. – М.: Энергия, 1973. – 295 с.
-