

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ NO_x В ПЫЛЕГАЗОВЫХ ГОРЕЛКАХ КОТЛОВ ТЭС

Сегодня в Украине существует острая необходимость в техническом перевооружении действующей пылеугольной теплоэнергетики с учетом современных технологий топливоподготовки, сжигания, высокоэффективных способов снижения вредных выбросов в атмосферу.

Использование угля для производства электроэнергии и тепла связано с экологическими проблемами, возникающими при его горении. Из 103 энергоблоков ТЭС Украины 90 работают на углях шахтной добычи с незначительной долей обогащения. Около 92% энергоблоков ТЭС отработали свой расчетный ресурс (100 тыс. часов), из которых почти 64% превысили принятый в мировой энергетической практике граничный ресурс и предел физического износа (170 тыс. и 200 тыс. часов, соответственно) и требуют модернизации или замены [1]. Кроме того, из-за повышенной зольности угля происходит физический износ поверхностей нагрева котлов и их вспомогательного оборудования. В результате этого общая установленная мощность системы снижается, экологические показатели (удельные выбросы на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии) ухудшаются [2].

Для снижения образования оксидов азота в энергетике получили применение следующие мероприятия [3, 4]:

- уменьшение доли первичного воздуха в пределах устойчивого горения;
- увеличение контакта рециркулирующих высокотемпературных газов в корень факела со струями аэросмеси;
- организация ступенчатого сжигания аэросмеси путем затягивания процесса перемешивания ее с вторичным воздухом;
- ввод влаги в зону активного горения, приводящий к процессу паровоздушной газификации.

Пылеугольные горелки котлов и котельных должны обеспечивать устойчивое зажигание пыли, заданную экономичность, отсутствие сепарации на подтопки, исключение шлакования топочных экранов, соответствие экологическим требованиям. Особенности сжигания угольной пыли определяются сложностью регулирования факела, жесткой зависимостью устойчивости горения от режимов работы котлов, условиями воспламенения и выгорания, уровнем температуры. Все это затрудняет разработку универсального метода подавления оксидов азота, образующихся в топках пылеугольных котлов ТЭС.

При факельном сжигании эмиссия оксидов азота существенно зависит от условий смесеобразования. Чем лучше перемешивание топлива и окислителя достигается в горелочном устройстве, тем выше температура в ядре факела и режим горения приближается к кинетическому. Это способствует увеличению эмиссии оксидов азота, причем максимум образования NO_x соответствует минимуму механического недожога q_4 [5]. Таким образом, в связи с противоречивостью эколого-экономических процессов существует необходимость оптимизации ведения эксплуатационных режимов котлов ТЭС. Вихревой факел характеризуется высокой интенсивностью горения. Порядка 80% оксидов азота (топливных и термических) образуется на начальном участке факела, на расстоянии 2-3-х калибров от выходного сечения амбразуры горелки. Максимальные концентрации NO_x имеют место за ядром факела. Далее по его длине содержание NO_x в продуктах сгорания остается практически без изменений [6].

Наиболее распространенными при сжигании угля являются методы подавления образования токсичных продуктов сгорания, определяемые конструкцией горелочных устройств. Разработка конструкций пылеугольных горелок с целью снижения негативного влияния ТЭС на окружающую среду при одновременном повышении эффективности использования угля (без газа и мазута) является весьма актуальной задачей.

Известны следующие конструкции пылеугольных горелок со сниженной эмиссией NO_x [3, 6]:

- *горелки с разделенным потоком вторичного воздуха*, которые позволяют организовать более поздний подвод воздуха к аэросмеси на начальном участке факела, что затягивает

процесс смешения топлива с воздухом. Эти условия реализуются в двухпоточной вихревой горелке, разработанной для котла ПК-39-II при участии КазНИИЭ, Сибтехэнерго и НПО ЦКТИ (рис.1). Вторичный воздух подается по двум коаксиальным каналам с равными расходами со скоростью во внутреннем канале, равной скорости аэросмеси. Последнее достигается путем изменения положения индивидуальных шиберов. Такая организация подачи аэросмеси и вторичного воздуха во внутреннем канале обеспечивает на начальном участке факела минимальную интенсивность перемешивания спутных закрученных потоков.

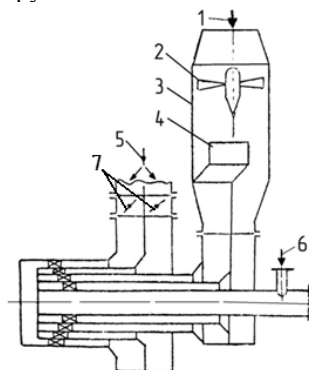


Рис. 1. Горелка вихревая двухпоточная по каналу аэросмеси и вторичному воздуху
1 – подвод аэросмеси; 2 – завихритель; 3 – пылеконцентратор; 4 – разделительная труба;
5 – подвод вторичного воздуха; 6 – подвод центрального воздуха;
7 – шиберы наружного и внутреннего потоков вторичного воздуха

В результате нестехиометрического сжигания топлива снижение образования топливных оксидов азота в зависимости от системы шлакоудаления может достигать (15...25)% [6]. Причем меньшее значение относится к котлам с жидким шлакоудалением, например, ТПП-210А, работающим на кузнечных углях марки СС [7].

- *горелки ступенчатого сжигания* с разделением воздуха на вторичный и третичный. В вихревой горелке фирмы Steinmuller (ФРГ, энергоблок 707 МВт) аэросмесь подается по центральному кольцевому каналу. Воздух разделяется на вторичный, подаваемый через наружный кольцевой канал в количестве, необходимом для стабильного зажигания и горения, и третичный, поступающий в топку через сопла, размещенные по периферии горелки (рис.2). На выходе образуется зона горения, обогащенная топливом, и обеспечивается полное выгорание его с существенным снижением выбросов NO_x без образования у экранов топки зон с восстановительной средой. Струи третичного воздуха перемешиваются с основным факелом на некотором удалении от горелки.

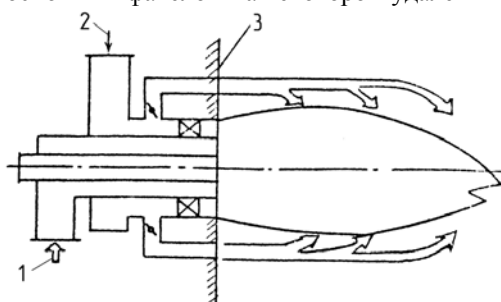


Рис. 2. Вихревая горелка ступенчатого сжигания фирмы Steinmuller
1 – подвод аэросмеси; 2 – подача вторичного воздуха; 3 – сопла третичного дутья

При сжигании угля с содержанием $N^p = 1,3\%$ образование оксидов азота при номинальной нагрузке и $\alpha_2 = 0,9$ снизилось на 40%, при $\alpha_2 = 0,75$ – в 2 раза по сравнению с исходной концентрацией NO_x , равной $1,1 \text{ г/м}^3$ [3].

- *горелки многостадийного сжигания* - создают три зоны ступенчатого сжигания (Пат. 60-27890 Япония, МКИ⁴ F23 C 11/00). В первой (восстановительной) зоне избыток воздуха устанавливается меньше единицы; во вторую (окислительную) зону на определенном расстоянии подается избыточное количество воздуха; в третьей зоне, куда подводится

дополнительное топливо, сжигание обеспечивается за счет остаточного кислорода второй зоны (рис.3).

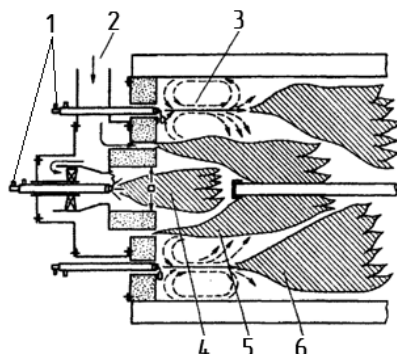
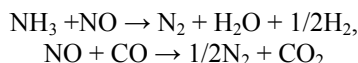


Рис. 3. Горелка многостадийного сжигания топлива

- 1 – подача топлива; 2 – подача воздуха; 3 – зона рециркуляции продуктов сгорания;
- 4 - восстановительная зона ($\alpha < 1$); 5 – окислительная зона ($\alpha > 1$);
- 6 – зона дополнительного ввода топлива ($\alpha < 1$).

- горелки с предварительным подогревом пыли, в которых азотсодержащие газообразные компоненты топлива (NH_3 и др.), продукты частичной газификации (CO), вышедшие вместе с летучими (при $\alpha \ll 1$), участвуют в образовании молекулярного азота N_2 , а не его оксида [3]:



Вихревая горелка ВТИ (рис.4,а) с предварительным подогревом угольной пыли имеет внутри центрального канала пламенную трубу, где осуществляется ее нагрев путем смешения с продуктами сгорания микрофакельной горелки [8]. Эксплуатация таких горелок на котле ТПП-210А при сжигании кузнецких углей марок Т и СС в полуоткрытых топках с жидким шлакоудалением показала снижение выхода NO_x , улучшение качества сжигания топлива и выхода жидкого шлака. Испытаниями на стенде КазНИИЭ при подогреве пыли кузнецкого угля до $730^\circ C$ установлено снижение образования NO_x в 2...2,5 раза [9].

В горелке ЮжВТИ и Луганской ГРЭС (рис.4,б) улитка аэросмеси разделена перегородкой на две части: один поток угольной пыли направляется в жаровую трубу муфеля, где подогревается до температуры $700...850^\circ C$, второй – в канал аэросмеси основной горелки. Поток выделяемого объема пыли после термообработки в муфеле смешивается с основным потоком аэросмеси в пределах наконечника обечайки первичной аэросмеси и вдувается в топку [10].

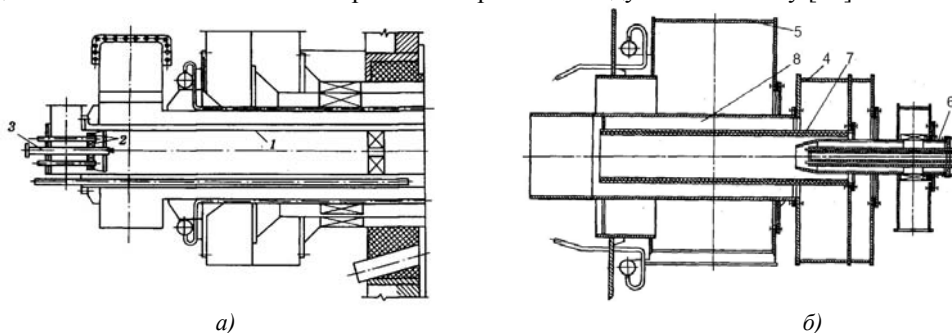


Рис. 4. Горелки с предварительным подогревом угольной пыли ВТИ, котел ТПП-210А (а) и ЮжВТИ и Луганская ГРЭС, котел ТП-100 (б)

- 1 – корпус устройства термоподготовки угольной пыли; 2 – микрофакельная газовая горелка;
- 3 – пылеподача с высокой концентрацией;
- 4 – улитка для подвода аэросмеси (обычная концентрация); 5 – улитка вторичного воздуха;
- 6 – блок газового муфеля; 7 – жаровая труба муфеля; 8 – канал аэросмеси основной горелки

Условия ступенчатого сжигания низкорекреционных углей позволяют не только улучшить сжигание топлива и выход жидкого шлака, но и благоприятно воздействовать на экологию, снижая эмиссию NO_x , что подтверждается испытаниями на действующих котлах. Эксплуатация горелок с ТХП на котле ТПП-210А при сжигании кузнецкого угля марок Т и СС в полуоткрытых

топках с жидким шлакоудалением позволила снизить выход NO_x при подогреве пыли до 1000 К в 2...2,5 раза [9].

- *горелочные устройства с подачей пыли высокой концентрации (под давлением)* ПВКд – отличаются более ранним воспламенением высококонцентрированной аэросмеси. За счет уменьшенного расхода первичного воздуха, который не является транспортирующим пыль агентом, выход летучих и их горение происходят в восстановительной среде ($\alpha < 1$). Сжигание АШ при ПВКд снизило эмиссию NO_x до 500...800 мг/м³ (на 15...20 %); сжигание бурых углей при ПВКр (высококонцентрированная пылеподача под разрежением) - до 315 мг/м³ (на 37%) [8, 11].

В ряде случаев применяются горелочные устройства с комбинированием нескольких способов подавления оксидов азота [3].

Так, кафедрой теплоэнергетических установок тепловых и атомных электростанций НТУУ «КПИ» была разработана и внедрена на котлах ТПП-210А Трипольской ТЭС, сжигающих угли марки АШ, схема ПВКд с проектными горелками ТКЗ мощностью 75 МВт за счет обеспечения более раннего зажигания угольной пыли (концентрация пыли на выходе из горелки увеличена на 30,5%), снижения расхода первичного воздуха на 30% (изменением напора ВГД в пределах 250...170 мм.в.ст.), постепенного смешения горячей аэросмеси со вторичным воздухом, позволила снизить эмиссию NO_x на 20...21,4%. Существует возможность регулирования расхода первичного воздуха за счет воздействия на аэродинамику горелок и коэффициент избытка воздуха в топке (α_t). Кроме того, при ПВКд выявлен эффект влияния транспортирующего воздуха и распределения пыли перед горелкой на экологические и экономические показатели котлов [11, 12].

Исследованиями ЦКТИ по ступенчатому сжиганию угольной пыли (2- и 3-ступенчатые схемы) установлено, что при подаче 20 % восстановительного топлива в виде пыли, концентрация NO_x на газовых углях может быть снижена при обеспечении $\alpha \leq 1,15$ в зоне дожигания СО. Для обеспечения минимальной концентрации NO_x коэффициент избытка воздуха в горелке необходимо поддерживать в пределах $0,6 < \alpha < 0,9$, что легко реализуется для пригорелочной зоны котлов с ПВКд [13,14].

Выводы

1. Механизм образования NO_x связан с организацией процесса горения, видом и расходом топлива, коэффициентом избытка воздуха, степенью выгорания угля.
2. Котлостроительные заводы пока не предложили ТЭС типовую модернизацию горелок для котлов ТП-100, ТПП-210, ТПП-210А, сжигающих АШ при сниженных выбросах NO_x в атмосферу и потерь топлива от механического недожога.
3. Технологии подачи пыли с высокой концентрацией открывают возможности управления горелочными устройствами и влияния на процесс образования оксидов азота в процессе эксплуатации.
4. Причиной ограниченного объема внедрения мероприятий по снижению выбросов NO_x в атмосферу являются недостаточно жесткие экономические санкции за загрязнение воздушного бассейна Украины по сравнению с требованиями ЕС (в рамках директив Киотского протокола).

Литература

1. Паливно-енергетичний комплекс України. Загальноукраїнський проект. Випуск другий. – К: Новий світ, 2008. – 203 с.
2. Мадоян А.А., В.Н. Балтян В.Н., Гречаный А.Н. Эффективное сжигание низкосортных углей в энергетических котлах. – М: Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.
3. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. – М: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.
4. Котлер В.Р., Камерон С.Д., Грехов Л.Л. Подавление оксидов азота путем использования новых конструкций пылеугольных горелок // Теплоэнергетика. – 1977. – №3. – С.27-31.
5. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник / В.В. Абрамов, В.С. Агабабов, С.Н. Аничков, А.М. Архипов и др. под общей ред. В.Я.Путилова. — М: Издательский дом МЭИ, 2007. – 388 с.
6. Шницер И.Н., Литовкин В.В. Образование и снижение содержания оксидов азота в пылеугольных котлах. – К: Техніка, 1986. – 112 с.
7. Котлер В.Р., Бритвин О.В., Зуев О.Г. Уменьшение выбросов оксидов азота при сжигании кузнечного угля в топке с жидким шлакоудалением // Энергетик. – 1984. – №5. – С.14-16.

8. Бабий В.И., Вербовецкий Э.Х., Артемьев Ю.П., Горелка с предварительной термоподготовкой угольной пыли для снижения образования оксидов азота // Теплоэнергетика– 2000. – №10. – С.33-38.
9. Исследование образования окислов азота в топочной камере при предварительном подогреве угольной пыли / В.И. Бабий, Э.Р. Иманкулов, П.И. Алавердов, О.С. Ткацкая // Вопросы эффективного сжигания энергетических углей. Тр. ЭНИН. М: 1984.
10. Гречаный А.Н., Литовкин В.В., Щербаков А.С. Ступенчатое воспламенение антрацитового штыба в пылеугольных вихревых горелках с газовым муфелем // Электрические станции. – 1991. - №12. – С.65-67.
11. Разработка, исследование, внедрение и опыт эксплуатации системы высококонцентрированной пылеподачи (под давлением) котлов ТПП-210А Трипольской ТЭС / Л.А. Кесова, Г.А. Довготелес, Н.И. Котельников и др. – К: О-во «Знание» Украины, 2001. – 94с.
12. Сигал И.Я., Дубоший А.Н., Кесова Л.А., Салимон Л.П., Вихорев А.Н. Сравнительные испытания по определению экологических характеристик котлов ТПП-210А, сжигающих АШ, при двух технологиях подачи пыли на горелки // Электрические станции. – 1994. – №11. – С.42-44.
13. Шатиль А.А. О расчетной оценке эффективности подавления оксидов азота при ступенчатом сжигании твердых топлив в котлах: Сб. докладов VI Всероссийская конференция «Горение твердого топлива», – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2006. – Ч. 3. – С.272–283.
14. Опыт разработки и внедрения систем двух- трехступенчатого сжигания для снижения выбросов NO_x на пылеугольных котлах: Сб. докладов VI Всероссийская конференция «Горение твердого топлива» / Серант Ф.А., Воронова А.С., Остапенко В.Е. и др. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2006. – Ч.3 – С. 263-271.