

Национальный исследовательский
Томский политехнический университет

Кафедра теоретической и
промышленной теплотехники

Лекции по курсу:
«Природоохранные технологии в промышленной
теплоэнергетике»

Разработчик: к.т.н., Разва А.С.

Томск 2010

Особенности природоохранных мероприятий (Краткий обзор природоохранных технологий)

1. Прспективные направления развития природоохранных технологий

В мире (и, в частности, в нашей стране) обозначилась тенденция к перераспределению общего топливного баланса, где доля использования твердых топлив, по отношению к жидким и газообразным, возрастает главным образом за счет более широкого вовлечения в энергобаланс низкосортных углей [21, 78]. Причина этого лежит в ограниченности мировых запасов нефти и газа по сравнению с углем с одной стороны, и в возможностях создания технологий сжигания угля, удовлетворяющих жестким экологическим требованиям, с другой.

В нашей стране крупнейшими из эксплуатируемых месторождений бурого угля являются канско-ачинские. Их использование во многом определяет энергетическую политику государства. Поэтому предполагается дальнейшее развитие канско-ачинского энергетического комплекса (КАТЭКа) [60, 65], включая и социальную инфраструктуру региона вместе с ее тепловыми потребителями. Кроме того, угли бассейна используются почти по всей территории Сибири и Дальнего Востока, часто в крупных промышленных центрах на ТЭЦ. В этой связи следует отметить, что снабжение ряда сибирских ТЭС канско-ачинскими углями (КАУ) характеризуется резким изменением качества поставляемого топлива относительно проектного [88]. В свою очередь, при поставках несортного топлива на ТЭС, не приспособленных к надежному его сжиганию, нарушается надежность работы оборудования, надежность энергообеспечения, ухудшаются экологические показатели, экономичность, оборудование быстрее стареет, снижается безопасность его эксплуатации. Это требует проведения комплекса работ по усреднению качественных характеристик топлива либо на месте добычи, либо, путем обогащения, в технологической схеме топливоподготовки ТЭС. При этом экологическая обстановка как в целом на КАТЭКе, так и в отдельных городах крайне тяжелая [60, 65, 69].

Развитие электроэнергетической системы Сибири

Таблица 1

Показатель	1990 г.	1995 г.	2000 г.
Электропотребление по Сибири в целом, млрд. кВт·ч,	307	350...365	410...430
в т.ч. ОЭЭС Сибири	223	250...258	270...285
Установленная мощность электростанций ОЭЭС Сибири, млн. кВт:			
всего	47,6	61...61,2	71...71,5
в т.ч. ГЭС	22,4	26,6	28,5
ТЭЦ	15	20	25
КЭС	10,2	14,4...14,6	17,6...18
из них КЭС КАТЭКа	1,6	4	8,8

Положение усугубляется тем, что парк энергетического оборудования в значительной степени морально и физически устарел. Мощность морально устаревшего оборудования в стране более 5 млн. кВт при удельных расходах топлива более 400 г/кВт·ч, причем значительная часть этого оборудования сосредоточена в Сибирьэнерго [31].

Предполагаемое развитие электроэнергетической системы Сибири показано в табл.1, откуда видно, что основное направление для обеспечения роста

электротеплопотребления Сибири - строительство ТЭЦ. В то же время прогнозируемая добыча угля на КАТЭКе в 2000 г. должна составлять 110...115 млн. т/год против 60 млн. т/год в 1990 г. из которых 70% потребляет Минэнерго [60].

В то же время, в условиях увеличения потребления угля электростанциями, для предотвращения только увеличения суммарного выброса в окружающую среду вредных веществ потребуются значительное улучшение экологических показателей [132] (на базе создания новых технологий сжигания твердых топлив) не только вновь вводимых мощностей, но и действующих, так как существующий в настоящее время уровень очистки является недостаточным. Создание таких технологий особенно актуально для крупных промышленных центров с их теплоцентралями.

Отличительной особенностью ТЭЦ является комбинированная выработка электрической и тепловой энергии. Это определяет их строительство вблизи потребителей тепла, что всегда предполагает развитую жилищно-коммунальную и бытовую инфраструктуру. Именно выработка тепла и близость густонаселенных жилых районов определяет остальные особенности ТЭЦ - по выбору промплощадки, установленной и единичной мощности, несению нагрузки, включению в единую энергосистему (ЕЭС), резервированию мощности и др. Причем особенное значение приобретают такие факторы (особенно для крупных городов) как сложившаяся схема тепловых, транспортных, кабельных и др. коммуникаций, водоснабжение, фоновые загрязнения, роза ветров, другие. Сегодня, в связи с переходом к рыночной экономике, появились новые факторы требующие учета. В первую очередь - это вопросы финансирования всех видов работ от проектирования до строительства. Кроме того, часть предприятий, выпускающих энергетическую продукцию, волею судеб оказалась за границей, что, если и не ограничивает возможности выбора оборудования, то, как минимум, увеличивает капиталовложения за счет таможенных пошлин. Нельзя не отметить и возросшую роль социального фактора, так как сегодня сила общественного мнения порой может повлиять на принятие решения. С другой стороны, требования предъявляемые к экологически чистой ТЭС в какой-то мере решают вопросы безопасности граждан, на что в конечном счете влияет загрязнение окружающей среды [83], но, тем самым, осложняют (и без того непростую) проблему финансирования, так как добиться требуемой очистки выбросов без значительных финансовых затрат не представляется возможным. В то же время, нельзя забывать и возможность (а может быть и необходимость) энергообеспечения городов с учетом мнения населения, так как именно люди являются конечными потребителями электроэнергии и тепла. Такой подход предполагает наличие альтернативных вариантов энергоснабжения и еще более осложняет проблему финансирования как с точки зрения проработки нескольких альтернатив, так и с точки зрения проведения процедур по выяснению общественного мнения.

Доля загрязнения окружающей среды от действия ТЭЦ в значительной мере определяется совершенством котельного, паросилового и вспомогательного оборудования. Примечательно, что паросиловое оборудование и сопутствующие ему вспомогательные механизмы, включая и систему охлаждения конденсатора, оказывает лишь тепловое воздействие на окружающую среду и с дренажной водой через различные протечки охлаждающих жидкостей и смазывающих веществ. В то же время, от работы котельного оборудования, включая системы топливоподготовки и очистки дымовых газов, в основном зависит степень загрязнения окружающей среды. Главным образом, это связано с выбро-

сом в атмосферу продуктов сгорания с температурой 120...150 °С, аэрозольная часть которых в значительной степени осаждается на землю с осадками, а газовая часть может вступать во взаимодействие с атмосферной влагой, кислородом или другими элементами воздуха. Такие выбросы, кроме непосредственного воздействия на окружающую среду вблизи энергоисточника, в конечном итоге, приводят к образованию так называемых “кислотных дождей”, утонению озонового слоя Земли, увеличению толщины облачного покрова и возникновению парникового эффекта [117], и охватывают территории, расположенные за сотни, а то и тысячи [15] километров от источника выбросов. Вместе с тем, нежелательными экологическими факторами действия угольных ТЭС являются золоотвал, загрязнения с химводоочистки, промывок, другие относительно мелкие утечки от различных вспомогательных служб (мазутное хозяйство, склад ГСМ, гараж, газогенераторная, аккумуляторная, РММ и т.д.).

Очевидно, что элементная база создания новых технологий является одним из решающих факторов снижения вредных выбросов от действия ТЭС. В этой связи можно выделить два направления развития. Первое - это создание развитых систем серо-, азото- и золоочистки дымовых газов, в том числе и с утилизацией отходов в виде производства продукции для сельского хозяйства и стройиндустрии, и второе - это получение минимального содержания вредных веществ в дымовых газах за счет совершенствования топочных процессов, в том числе и создания развитых систем термической подготовки топлива.

Выводы:

1. В условиях роста потребления твердых ископаемых топлив, по комплексу экономических, технологических, экологических и физико-химических свойств, следует считать перспективным использование КАУ, в том числе и в крупных городах на ТЭЦ.
2. В условиях высокого загрязнения окружающей среды, сложившихся в крупных промышленных регионах, необходимо создание новых технологий сжигания угля удовлетворяющих жестким экологическим требованиям.

2. Системы очистки дымовых газов - как элементная база создания новых технологий

2.1. Общие сведения

Как уже отмечалось выше, дымовые газы являются основным источником загрязнения от действия ТЭС. Содержание вредных веществ в них определяет не только состояние атмосферы, но во многом и состояние почвы и водного бассейна, влияет на жизнь флоры и фауны и, конечно, человека. Именно через атмосферные выбросы вокруг городов Ачинска, Назарово, Канска сложились ареалы техногенного изменения окружающей среды диаметром до 20...30 км, где сильно нарушена структура почв, растительности, био- и микроценозов [60]. Особенно тяжелая ситуация сложилась в крупных промышленных центрах Сибири. В г. Ачинске, например, только глиноземный комбинат выбрасывает в атмосферу ежегодно около 160 тыс. т пыли, 22 тыс. т сернистого газа, 14,5 тыс. т оксидов азота. Аналогичная обстановка и в Новокузнецке, Назарово, Прокопьевске, Кемерово и ряде других городов [60, 65, 92].

Из всей гаммы токсичных веществ, находящихся в дымовых газах, наибольшую опасность представляют зола, двуокись серы (SO_2) и окислы азота (NO_x). Выбросы именно этих веществ регламентируются жесткими нормами (Лекция №1, табл.1).

Существуют разные способы и системы очистки дымовых газов. Часто (для золы всегда) это аппараты, устанавливаемые после конвективных поверхностей нагрева котлов.

2.2. Выбросы золы и очистка от них

Зола представляет из себя твердые частицы негорючих элементов угля. В основном - это оксиды кремния (SiO_2), железа (Fe_2O_3), алюминия (Al_2O_3), магния (MgO), кальция (CaO), серы (SO_3) и некоторые другие, в том числе незначительное количество мышьяка и тяжелых металлов (свинец, ванадий, хром, цинк). Для разных углей элементарный состав золы может значительно отличаться друг от друга. Например, в КАУ (в отличие от каменных углей Кузнецкого бассейна) окись кальция является одним из основных компонентов, но даже и для КАУ содержание CaO колеблется от 26 до 42,5% в зависимости от месторождения и разреза [88].

Однако, основной параметр, характеризующий золовые частицы - это их размеры или дисперсность. Они колеблются в широких пределах - от десятых и сотых долей микрона до 100 мкм и более, и зависят от способа сжигания.

Следует отметить, что наибольшую опасность для человека представляют частицы размером 0,5...5 мкм, более крупные задерживаются в полости носа, более мелкие - выдыхаются. Содержание именно этого диапазона частиц в приземном слое атмосферы способствует возникновению у человека болезненных симптомов, вплоть до повышения смертности, (табл.1.4).

Аппараты золоочистки, точнее - уловители аэрозолей, и диапазон размеров улавливаемых ими частиц показан на рисунке 1.

Кроме представленных на рисунке, существует ряд перспективных пылеулавливающих устройств. К ним относятся: конденсационный пылеуловитель, в

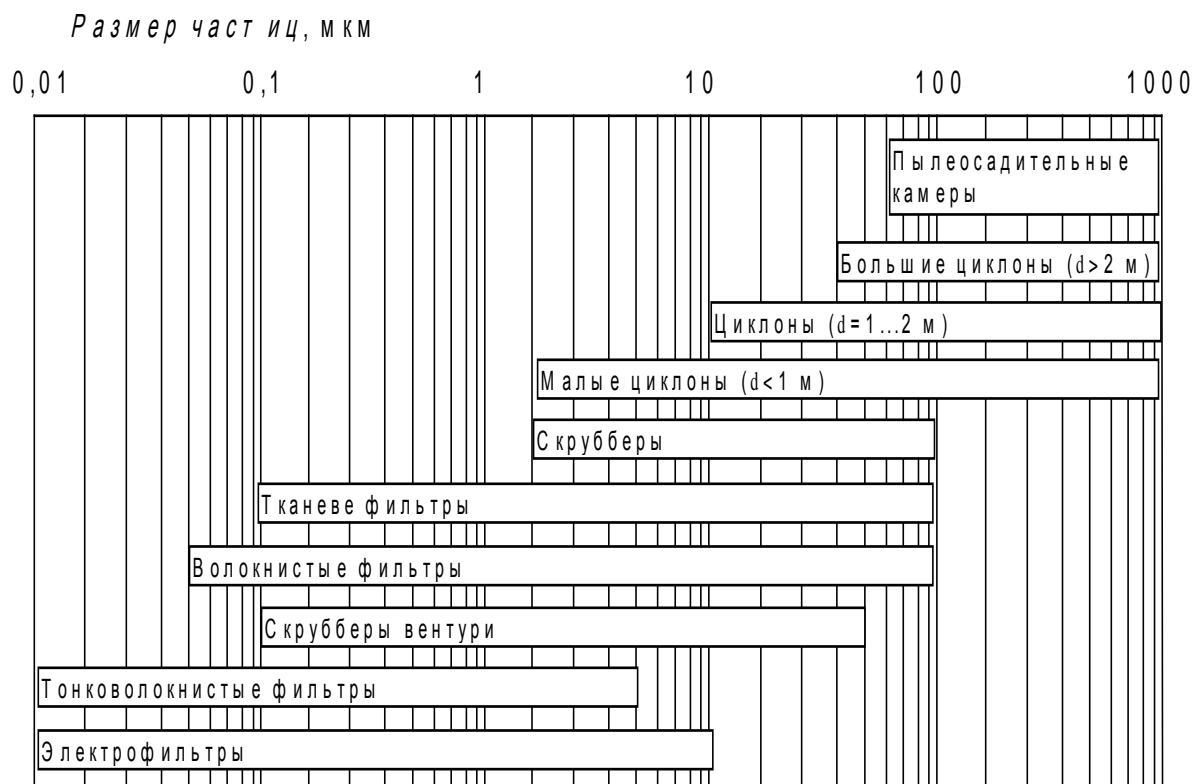


Рис. 1. Аппараты для улавливания взвешенных частиц

котором применены два механизма осаждения (во-первых, укрупнение частиц при конденсации на них паров из парогазовой смеси путем смешения очищаемых газов с паром, во вторых - частицы (при охлаждении парогазовой смеси) захватываются потоком пара, диффундирующим к центрам конденсации (каплям охлаждающей жидкости) или охлаждающим поверхностям. Таким способом можно осадить даже субмикронные частицы.

В другой установке водо-инерционного типа на орошение подается вода под давлением 240 бар с температурой около 205^o С. Распыливаясь через сопло, она образует двухфазную среду: пар - жидкие капли, при этом капли разгоняются до 300 м/с, и, благодаря инерции, на них осаждаются частицы, в том числе и размером менее 1 мкм [15]. Перспективной сухой золоочисткой являются роторные зернистые фильтры. Они предназначены для очистки газов с температурами до 300^o С от неслипаемой и слабослипаемой пыли. В качестве зернистого материала используются керамические и стеклянные шарики, крупнозернистый песок, отсева щебенки и т.п. КПД такого фильтра может составлять 95...99,8% в зависимости от концентрации пыли в очищаемом газе, при этом концентрация пыли в очищенном газе не будет превышать 0,05...0,1 г/м³ [60].

В последнее время особое внимание уделяется возможностям золоуловителей подавлять окислы серы и азота путем ввода в орошающую воду разных добавок. В разных случаях (в зависимости от вида топлива, его качества, режима работы котла, типа присадок и способа их ввода и т.п.) можно снизить эти выбросы на 10...20%. [23, 30, 78] Правда, при этом стенки золоуловителей, как правило, подвергаются либо коррозии, либо отложениям и для защиты от этого требуют гуммирования (покрытие эластичным материалом). В этом случае, например, обычный циклон или циклон Вентури превращается в сложную и дорогую установку [78], при этом продукты, полученные в результате подавления, вместе с золой попадают в отвал, увеличивается щелочность или кислотность воды (для гидрозолоудаления) и, в целом, увеличивается вредное воздействие отвала на среду.

3. Совершенствование топочных процессов - как элемент перспективного производства электроэнергии и тепла

3.1. Общие сведения

Без термической подготовки в физическом смысле, сжигание твердых топлив в котлах невозможно вообще. Частица пыли, по мере движения в топке, сначала прогревается, из нее выходит часть летучих, затем воспламеняется и сгорает. Процесс горения сопровождается сложными структурными, физическими и химическими превращениями органической массы топлива в тепло с выделением составляющих топлива в виде окислов. Процесс еще недостаточно изучен, но установлено, что на воспламенение, горение и, как следствие, образование окислов вредных веществ влияет:

- вид и качество топлива;
- тип топочного устройства;
- тепловая мощность котла;
- режим работы котла;
- тип горелочного устройства (способ подачи топлива) для пылеугольных котлов;
- фракционный состав пыли - для пылеугольного и размер дробленки или кусков - для слоевого сжигания;

- способ подачи и количество воздуха, подаваемого в топку;
- влажность подаваемого в топку топлива;
- наличие присадок в виде кислорода, пара, аммиака, карбамида, инертных газов или др. в подаваемом воздухе;
- температура и давление в топке;
- наличие (отсутствие) газовой или мазутной подсветки факела для пылеугольных котлов.

Из сказанного следует, что снижения вредных выбросов можно добиться путем грамотного инженерного выбора типа топочного устройства на каждый вид топлива, подбора оборудования топливоподачи, регулирования топочного процесса подачей в топку различных присадок (использование возможностей химической очистки в целях регулирования топочного процесса) или воздуха, регулированием давления, подсветкой и некоторыми другими способами.

На сегодня можно выделить следующие основные направления по которым ведутся работы в области регулирования топочных процессов:

- внутрицикловая газификация топлива [1, 9, 16, 61, 65, 72, 87, 129, 140];
- разработка котлов с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) [8, 32, 50, 60, 61, 91, 135,];
- усовершенствование методов факельного сжигания [13, 49, 55, 61, 78, 89, 96, 99, 116];
- предварительная термическая подготовка топлива с частичной газификацией [17, 36, 85, 119, 132].
- плазменная подсветка основного пылеугольного факела.

3.2. Внутрицикловая газификация топлива

Получение из твердого топлива горючего газа технологически включенное в термодинамический цикл производства электроэнергии, тепла или другого продукта или их совокупности есть внутрицикловая газификация. Такое технологическое совмещение газификации с производством электроэнергии, тепла или другого продукта позволяет использовать не только генераторный газ, как, например, при производстве газа на автономном заводе с транспортом его на электростанции. Кроме этого возможно использование физического тепла получаемого газа (до 25% теплоты сгорания исходного угля [65]), использование газа в газовой турбине, использование для газификации отработавшего в паровой турбине пара. Главным достоинством внутрицикловой газификации является снижение вредного экологического воздействия на атмосферу по сравнению с прямым сжиганием твердого топлива [61, 87, 129, 135, 140].

В основе технологии газификации лежит свойство термодеструкции (пиролиза) измельченного топлива, когда частицы угля под воздействием температуры превращаются в парогазовую смесь в основном состоящую из CO и H₂.

Известны разные способы газификации углей.

Метод Лурги [1, 9, 62, 63, 140] - заключается в газификации кускового и зернистого топлива в стационарном слое на парокислородном или паровоздушном дутье под давлением 2...3,5 МПа. Недостатками метода являются забалластирование получаемого газа смолами и сточной воды фенолом и низкая интенсивность газификации (2000...2500 кг/м²·ч). Правда, при высокотемпературной газификации кускового топлива ($\delta > 6$ мм) с жидким шлакоудалением и вдуванием уноса обратно в слой может быть достигнута интенсивность 6000 кг/м²·ч (горновой газогенератор ВТИ им. Дзержинского, метод Бритиш-Гэс-Лурги, Англия) [1].

Метод Винклера - заключается в газификации мелкозернистого угля в кипящем слое при атмосферном давлении на парокислородном или паровоздушном дутье. Газификаторы этого типа осваиваются фирмами Дженерал-Электрик, Бабкок-Вилкоккс в США [1, 90]. Метод характеризуется улучшенным тепло- и массообменом и отсутствием в газе смол, но обладает ограниченной интенсивностью (около 2500...3000 кг/м²·ч), которая обусловлена гидродинамикой кипящего слоя, повышенным уносом пылевидного топлива, большим содержанием углерода в шлаках, чувствительностью слоя к режимам (для обеспечения устойчивости слоя, необходимо изменять давление в нем при изменении нагрузки), высокими требованиями к фракционному составу топлива.

Процесс Копперс-Тотцека - это газификация пылевидного угля при атмосферном давлении на парокислородном дутье. Для процесса характерна невысокая интенсивность из-за конструктивных ограничений (газификаторы горизонтального типа) [1, 9, 61]. Интенсивность процесса составляет 5000...7000 кг/м²·ч (в газогенераторах Вестингауз, Вестингауз Электрик Корпорейшн, США [1]), при этом в газе нет смолистых веществ и в воде нет фенолов (как есть в газификаторах Лурги).

В методе Тексако (ТЭС с ПГУ Cool Water, США) [1, 9] газифицируется водо-угольная суспензия, на парокислородном дутье под давлением 4,2 МПа в факеле. Этот способ позволяет уменьшить содержание в дымовых газах окислов серы в 5 раз, а окислов азота в 10 раз по сравнению с прямым сжиганием угля, но обладает рядом недостатков: генерация пара в реакционной зоне генератора ведет к снижению тепловой экономичности ПГУ; большое теплотребление в реакционной зоне из-за испарения воды делает необходимым применение кислородного дутья для обеспечения температурного уровня газификации, и на производство кислорода требуется до 18% от полной мощности ПГУ.

Кроме вышеперечисленных в Швеции (фирма СКФ-Стил), США (НАСА, Минесотский технологический институт, фирма Вестингауз), Германии (концерн Динамит Нобель), Франции (Лиможский университет, фирма Электрик де Франс), Японии, КНР, Канаде и в других странах ведутся активные исследования в области плазменных технологий газификации угля [65, 90, 129].

В целом, их недостатками являются большие затраты электроэнергии на собственные нужды, конструктивная и эксплуатационная сложность плазмотронов и реакторов, отсутствие опыта проектирования и эксплуатации реакторов больших мощностей. Несомненные достоинства - это снижение вредных выбросов в 5...11 раз и больше (по сравнению с прямым сжиганием угля) и независимость от качественного состава угля. Однако, все такого рода установки находятся на стадии опытно-промышленных исследований.

Обобщая вышеперечисленные наиболее известные способы газификации можно утверждать, что экологические, экономические и технологические характеристики их неравноценны. По уровню освоенности в промышленности предпочтительнее выглядят газификаторы Лурги и Винклера, однако низкая интенсивность процесса газификации в них (2000...3000 кг/м²·ч) затрудняет их применение в "большой" энергетике, с другой стороны - уровень отработанности других процессов еще невысок. В целом, все газификаторы (применительно к энергетике) отличаются дороговизной, технологической (конструктивной и эксплуатационной) сложностью и, в связи с невысоким уровнем освоенности промышленностью и отсутствием достаточного опыта эксплуатации, невысокой надежностью.

3.3. Котлы с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС)

Кипящий слой характеризуется интенсивностью дутья, превышающей предел устойчивости плотного слоя, но далеко не достигающей скорости витания частиц крупных размеров. При этих условиях все частицы в слое интенсивно перемешиваются, двигаясь вверх и вниз, но, при этом, слой имеет относительно четкую верхнюю границу. Процесс горения организован и проходит в две фазы (ступени). В качестве первой ступени топки используется сам слой, где происходит прогрев, подсушка и выделение горячих газов. Второй ступенью топки является камера дожигания газа и частиц уноса, выдаваемых слоем. Частицы уноса не успевшие сгореть во второй ступени, улавливаются на выходе из топочного пространства и возвращаются в слой, таким образом можно довести выгорание топлива до 99,5% и выше [60].

Химические механизмы подавления выбросов NO_x и SO_2 аналогичны описанным в предыдущих разделах. В этом смысле, в котлах ЦКС, отличия вызваны лишь конструктивными особенностями, при этом можно добиться связывания сернистого ангидрида на уровне 90...98% [32]. В то же время, котлы ЦКС характеризуются низким образованием окислов азота (по сравнению с факельным сжиганием) из-за низких температур слоя ($700...950^\circ\text{C}$). [8, 32, 135]

Из мировой практики известны три модификации топков с ЦКС - это Лурги, Пирофлоу и Циркофлюид. (Всего в мире эксплуатируется и строится немногим более 220 котлов [53]).

В целом котлы с ЦКС выглядят весьма перспективно, однако их внедрение требует больших капиталовложений и, в этой связи, не решает проблемы снижения вредных выбросов на действующих станциях.

3.4. Усовершенствование методов факельного сжигания

Факельный метод сжигания - самый распространенный в энергетике страны. В то же время он является и самым небезопасным с экологической точки зрения. Выбросы, например, оксидов азота могут составлять $800...1100 \text{ мг/м}^3$ и больше [25, 61, 116]. В этой связи безусловно требуется проведение мероприятий по реконструкции действующего оборудования и проектированию нового с учетом современных экологических требований. Среди них предпочтение в основном отдается (как наиболее дешевым и позволяющим проводить реконструкцию действующих ТЭС) организации ступенчатого сжигания на основе совершенствования горелочных устройств и внедрения систем подачи пыли высокой концентрации (ПВК). В то же время, перспективными являются и некоторые другие способы:

- регулирование температур в топке путем ввода пара, аммиака, газов рециркуляции и т.п.;
- регулирование температур в топке путем разделения ее двухсветными экранами;
- предварительный подогрев топлива до высоких температур;
- некоторые другие.

Ступенчатое (стадийное) сжигание - это наиболее простой способ подавления оксидов азота, причем организация топочного процесса происходит так, что с топливом через горелочные устройства подается только часть воздуха, остальной - в виде дополнительного дутья. Как известно, при сжигании твердых топлив, в факеле образуются "быстрые", "термические" и "топливные" NO_x . Для пылеугольных котлов с ТШУ выход "термических" оксидов азота незначителен или отсутствует из-за невысоких температур факела ($T_{\text{ФАКЕЛА}} > 1800 \text{ K}$ - для

“термических”), “быстрые” оксиды азота образуются на начальной стадии горения ($T_{\text{ФАКЕЛА}} \geq 1200 \dots 1300 \text{ K}$) и основную опасность представляют “топливные” оксиды азота, начало образования которых находится в зоне воспламенения и практически завершается в зоне максимальных температур. Основной выход закиси (N_2O) азота наблюдается в предпламенной зоне факела. В целом, на образование каждого вида NO_x влияет температура, скорость реакции и наличие окислителя. Для снижения всех видов NO_x и производится ступенчатая подача воздуха, при которой достигаются локальные избытки воздуха на каждой стадии горения, а регулирование температуры, при необходимости, осуществляется подачей в зону горения пара или газов рециркуляции. При этом, процесс сжигания твердых топлив должен включать четыре характерных стадии с индивидуальными (локальными) избытками воздуха [99].

При такой организации горения происходит следующее. После воспламенения и сгорания летучих, в факеле резко снижается концентрация кислорода, в результате чего тормозятся окислительные реакции с образованием NO и интенсифицируется переход азотосодержащих радикалов NH_i и CN в молекулярный азот. Остальной воздух, необходимый для полного сгорания, подается в виде третичного дутья. Таким образом можно подавить выход оксидов азота, например, для канско-ачинских углей до 200 мг/м^3 , что соответствует требованиям к экологически чистой ТЭС [88, 99].

Отрицательные последствия ступенчатого сжигания:

- повышение температуры газов T_T на выходе из топки, связанное с торможением процесса горения на начальном участке;
- увеличение потерь тепла с механическим недожогом q_4 , особенно при недостаточной высоте топочной камеры;
- возможно некоторое снижение КПД котла от действия первых двух факторов;
- опасность для котлов СКД высокотемпературной коррозии топочных экранов (в варианте, если восстановительная среда будет создаваться вблизи экранных поверхностей нагрева);
- возможность шлакования ширмовых или первых по ходу газа конвективных поверхностей нагрева (из-за повышения T_T), а также топочных экранов (из-за снижения температурных характеристик золы при переходе от окислительной к восстановительной среде).

Последние два фактора в значительной мере зависят от характеристик топлива (шлакуемости, сернистости), аэродинамики топки, расположения горелок, параметров котельной установки. Степень опасности от их действия не поддается расчету и может быть оценена только при переводе головных образцов котлов на ступенчатое сжигание.

Организация ступенчатого сжигания, как правило, включает системы подачи пыли высокой концентрации (ПВК) горелочных устройств. Концентрация пыли в них может составлять $10 \dots 30 \text{ кг}$ на 1 кг воздуха [33], что во много раз превышает обычную ($0,2 \dots 1 \text{ кг/кг}$). Это приводит к недостатку кислорода в зоне воспламенения и начальной фазе горения, то есть создаются локальные избытки воздуха. Однако, при таком способе подачи возможно засорение устройств пылеподготовки и ее подачи с образованием отложений в питателях, концентраторах, сепараторах, делителях, мигалках, пылепроводах и т.п. Возможен преждевременный абразивный износ этих устройств. Образование отложений чревато возгоранием или взрывом, тем более для КАУ, так как они относятся к самой опасной в этом отношении 4-ой группе углей.

3.5. Предварительная термическая подготовка твердого топлива с частичной газификацией

Сущностью термической подготовки топлива перед сжиганием в топке энергетического котла является предварительная частичная аллотермическая газификация пыли при температурах 600...800^o С. Это позволяет обеспечить раннее воспламенение и достаточно глубокое выгорание угольной газозвеси на начальном участке горелочных устройств. Термоподготовка может проводиться для части поступающего в котел угля непосредственно в горелочном устройстве [17], либо полностью в специальной предтопке [68, 85]. При этом, в обоих случаях прогрев основного (рабочего) потока топлива осуществляется за счет сжигания небольшого количества высокореакционного топлива (на уровне 8...12% по отношению к рабочему углю). При такой термоподготовке поток рабочего топлива прогревается с образованием двухфазного топлива - газозвеси, содержащей в основном окись углерода, водород, метан, непрореагировавшую угольную пыль, коксовый остаток, углекислый газ и азот [119] и в дальнейшем направляется в топку в первом случае - для поддержания основного факела, во втором - для полного сгорания.

В связи с тем, что подогрев топлива приводит к выходу летучих, начинается генерация NO_x и снижается температура воспламенения факела. В результате выделение "топливных" оксидов азота заканчивается даже раньше, чем температура факела станет максимальной. При этих условиях возможно подавление значительной части NO_x и обеспечение их выброса на уровне 200 мг/м³.

Применительно к канско-ачинским углям с их высоким содержанием Са в золе одновременно существует возможность снижения выбросов серы на 20...30% [85] за счет связывания ее в кальцийсодержащие соединения так, что при содержании серы в топливе ≤0,3% для обеспечения нормируемых показателей по выбросам SO₂ не требуется установки специальных устройств серочистки. При этом термоподготовка не исключает и комбинации с другими методами подавления NO_x и SO₂ в виде вводов реагентов в восстановительную зону горения, организации стадийного сжигания и пр.

Кроме того, к достоинствам термоподготовки можно отнести малозатратность этого метода и возможность широкого применения не только на вновь проектируемых котлах [70] но и на действующих, в рамках их реконструкции.

3.6. Плазменная подсветка основного пылеугольного факела

Плазменный розжиг и подсветка являются технологией, физические основы которой очень близки к технологии термодготовки топлива в термоциклоне. Однако направленность плазменного розжига несколько отличается от технологии термоподготовки. Плазменный розжиг и подсветка пылеугольного факела направлена на вытеснение из топливного баланса ТЭС мазута на эти нужды. Технология заключается в обработке струей низкотемпературной плазмы (3500...5000^o С) потока угольной пыли, транспортируемой воздухом. Высокая температура теплового удара приводит к прогреву топлива со скоростью 10³...10⁴ К/с при размерах частиц менее 250 мкм, при этом достигается конечная температура частиц 800...900^o С и выше, что интенсифицирует разложение органической части топлива.

После обработки плазмой поток газозвеси содержит в себе деструктурированные частицы угля, газы, в том числе и легко воспламеняющиеся водород, метан и углекислоту. Такой состав газозвеси позволяет надежно воспла-

менять и стабильно поддерживать горение основного пылеугольного факела в топке парогенератора.

Тепловая мощность плазмотрона составляет не более 1,5 % от тепловой мощности потока аэропыли. Установка плазмотрона осуществляется или в горелку, или в специальный муфель под горелкой.

Плазменная технология является технически осуществимой и технологически простой в управлении. Однако она имеет и недостатки, сдерживающие ее широкое внедрение:

- ограниченный ресурс плазмотронов;
- ненадежная работа источников питания для плазмотронов.

Выводы:

1. Системы газификации твердого топлива отличаются низким уровнем освоения промышленностью, невысокой интенсивностью процесса газификации, дороговизной, конструктивной и эксплуатационной сложностью, что требует проведения дальнейшей научно-исследовательской работы и отодвигает возможность их широкого применения в “большой” энергетике на более поздний срок.
2. Перспективность котлов с ЦКС не вызывает сомнений, однако их внедрение требует больших капитальных затрат и, в этой связи, не решает проблемы снижения вредных выбросов на действующих ТЭС.
3. Применение термической подготовки твердого топлива не исключает возможности одновременного использования методов подавления вредных веществ характерных для факельного сжигания, отличается дешевизной (по сравнению с химическими методами подавления вредных веществ) и может широко применяться в топливоиспользующих установках.

6. Обобщение перспектив развития природоохранных технологий

Проведенный таким образом анализ современных и перспективных систем очистки от выбросов вредных веществ показал, что в условиях, когда одним из основных источников производства электроэнергии и тепла продолжают оставаться теплоэлектроцентрали, и в условиях прогнозируемого роста потребления твердых горючих ископаемых при высоком фоновом загрязнении окружающей среды, сложившемся в крупных промышленных регионах (в частности, в районе КАТЭКа) наряду с использованием традиционных технологий по обеспечению экологической чистоты ТЭС, необходимо создание новых технологий. При этом химические методы очистки дымовых газов не могут считаться безусловно перспективными из-за большого количества недостатков.

Из систем, обеспечивающих совершенствование топочных процессов с целью снижения вредных выбросов, перспективны малозатратные технологии к которым в первую очередь можно отнести тармоподготовку топлива и плазменный розжиг и подсветку основного пылеугольного факела ввиду их технологичности, простоты, дешевизны и возможности использования даже на действующих энергетических установках.

В то же время, необходимо отметить, что современные энергетические объекты являются крупными комплексами, которые имеют разностороннее влияние на многие сферы жизни и деятельности общества. При этом такие объекты тесно взаимоувязаны с потребителями производимой продукции, с поставщиками сырья и между собой, и образуют энергетические системы с большим количеством экологических, социальных и технологических связей. Последние во многом определяют структуру и технологический профиль самого

энергетического объекта как с точки зрения целесообразности его размещения в той или иной энергосистеме, так и с точки зрения оптимизации его внутрицикловых параметров. Это означает, что при проектировании и разработке новых и перспективных технологий по производству энергопродукции следует учитывать технологические, экологические, экономические и социальные факторы, которые выражают разную сущность, а потому могут иметь разную, не всегда согласующуюся между собой размерность.

Поэтому следует помнить, что кроме технических аспектов проблемы существует и ряд методических проблем к которым можно отнести следующие:

Разработку методик технико-экономических расчетов и оптимизации экологически перспективных энергоблоков как с новыми технологиями, так и с технологиями денитрации и десульфуризации дымовых газов. При этом следует исходить из комплексного учета обеспечения графиков нагрузки, заданной надежности энергоснабжения, возможных режимов работы в энергосистеме и современных требований к инфраструктуре (экологической, социальной, производственной).

Обобщение результатов исследований экспериментальных и опытно-промышленных установок с перспективными технологиями и установок с химической очисткой дымовых газов по выходу, составу, свойствам и характеристикам получаемых продуктов.

Комплексная оптимизация экологически перспективных ТЭС с целью получения рекомендаций по выбору параметров процессов и характеристик оборудования.

Определение технико-экономической эффективности оптимального профиля и рационального направления развития ТЭЦ в новых и перспективных экономических условиях.

В то же время, разрабатываемые на период до 10...12 лет мероприятия должны соответствовать современным технически осуществимым и экономически целесообразным методам снижения токсичных выбросов, условиям энергоснабжения района и не должны приводить к снижению надежности оборудования.

При выборе способов уменьшения загрязнения атмосферы выбросами действующих ТЭС и котельных должен быть рассмотрен широкий круг мероприятий различного характера, в том числе:

- изменение качества топлива – ограничение содержания серы, применение при особо неблагоприятных условиях малосернистого мазута или природного безсернистого газа;
- переход на технологии не требующие использования мазута;
- изменение режима работы и состава основного оборудования – перевод ТЭЦ в режим котельных, демонтаж устаревших котлов, работа городских ТЭЦ по тепловому графику, замена малоэффективных золоуловителей более совершенными установками, автоматизация процесса горения и т.п.;
- реконструкция оборудования, например организация рециркуляции дымовых газов, двухступенчатого сжигания, впрыска воды в горелки для уменьшения оксидов азота;
- обоснование изменения параметров дымовых труб с целью улучшения рассеивания дымовых газов;
- строительство установок по очистке дымовых газов от окислов серы и азота;

- внедрение автоматизированных систем контроля за выбросами и за состоянием атмосферного воздуха в районе максимального воздействия дымового факела ТЭС;
- оснащение котлов системой подавления оксидов азота с использованием контактных теплообменников в “хвосте” котла;
- использование химически активных веществ (например, мочевины) для разложения оксидов азота на азот и кислород;
- разработка и использование катализаторов для очистки дымовых газов от оксидов азота;
- разработка новых способов сжигания топлива с утилизацией углекислоты, снижением окислов серы и азота;
- внедрение физико-химических технологий очистки дымовых газов, в том числе с помощью пучка электронов (радиолиз);
- др.