

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический институт  
Кафедра «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

  
\_\_\_\_\_

подпись

С. В. Комонов

инициалы, фамилия

2016 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА НА КРАСНОЯРСКОЙ ТЭЦ-2**

18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»

код и наименование специальности

Пояснительная записка

Руководитель

  
\_\_\_\_\_

подпись, дата

доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

И. В. Андруняк

инициалы, фамилия

Выпускник

  
\_\_\_\_\_

подпись, дата

Д. А. Меркулова

инициалы, фамилия

Консультант  
по нормативно-  
правовой базе

  
\_\_\_\_\_

подпись, дата

С. В. Комонов

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

  
\_\_\_\_\_

подпись, дата

С. В. Комонов

инициалы, фамилия

Красноярск 2016

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Снижение выбросов оксидов азота на Красноярской ТЭЦ-2» содержит 66 страниц текстового документа, 31 использованный источник, 7 листов графического материала.

**ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ВЫБРОСЫ ОКСИДОВ АЗОТА, УГОЛЬНАЯ ТЭС, ДВУХСТУПЕНЧАТОЕ СЖИГАНИЕ, РАСЧЕТ РАССЕЙВАНИЯ.**

Объект исследования – угольная теплоэлектростанция.

Цели работы:

- ознакомиться с общей структурой промышленного предприятия;
- изучить механизмы образования выбросов на теплоэлектростанции;
- разработать мероприятия по снижению выбросов;
- провести расчет рассеивания до и после мероприятий;
- рассчитать экологический ущерб и плату за выбросы предприятия.

В результате разработки ВКР была изучена структура предприятия, выявлены его основные выбросы в атмосферу. В качестве мероприятия по снижению выбросов оксидов азота была предложена модернизация оборудования со ступенчатым сжиганием топлива. В результате предложенного решения происходит сокращение выбросов оксидов азота в атмосферу и уменьшение платежей теплоэлектростанции.

**АННОТАЦИЯ**  
**к выпускной квалификационной работе**  
**на тему: Снижение выбросов оксидов азота на Красноярской ТЭЦ-2**

ВКР выполнена на 66 страниц, включает 8 таблиц, 31 литературный источник.

Объектом исследования является угольная теплоэлектростанция.

Целью исследования является модернизация котла Е-500.

В ВКР входит введение, семь глав, итоговое заключение по работе.

Во введении раскрывается актуальность выпускной квалификационной работы по выбранному направлению, ставится проблема, цель и задачи.

В первой главе дана характеристика предприятия.

Во второй главе выявлены характерные выбросы ТЭС.

В третьей главе рассмотрены технологические методы подавления оксидов азота.

В четвертой главе проведен расчет рассеивания выбросов оксидов азота в атмосферном воздухе до и после мероприятия.

В пятой главе исследованы режимы сжигания топлива в топке котла Е-500.

В шестой главе представлена экономическая часть предлагаемого мероприятия.

В седьмой главе представлена нормативно-правовая база.

В заключении сформулированы выводы по выпускной квалификационной работе.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический институт  
Кафедра «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

  
Подпись

С. В. Комонов  
инициалы, фамилия

2016 г.

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
в форме бакалаврской работы**

Студенту: Меркуловой Дарье Александровне.

Группа ФЭ12-096. Направление (специальность): 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.

Тема выпускной квалификационной работы: «Снижение выбросов оксидов азота на Красноярской ТЭЦ-2».

Утверждена приказом по университету № 5148/с от 14.04.16г.

Руководитель ВКР: И.В. Андруняк, к.т.н., доцент кафедры ИЭиБЖД.

Исходные данные для ВКР: справочная литература, учебная литература, методическая литература, ГОСТы, СНИПы, технические инструкции с предприятия.

Перечень разделов ВКР: общие сведения о предприятии, характерные выбросы ТЭС, обзор технологических методов подавления оксидов азота, проведение расчета рассеивания выбросов оксидов азота в атмосферном воздухе до и после мероприятия, исследование режимов сжигания топлива в топке котла Е-500, экономическая часть, нормативно-правовая база.

Перечень графического материала:

Лист 1 – План-схема промышленной площадки предприятия.

Лист 2 – Схема котла БКЗ-500-140-1.

Лист 3 – Схема двухступенчатого сжигания.

Лист 4 – Выбросы загрязняющих веществ до и после мероприятия.

Лист 5 – Карта рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере.

Лист 6 – Расчет загрязнения атмосферного воздуха источниками выбросов вредных веществ от котельного цеха теплоэлектростанции.

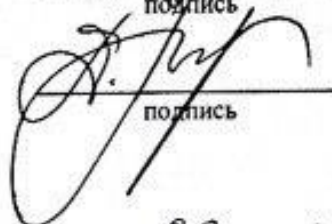
Лист 7 – Распределение температуры газов в топке котла до и после мероприятия.

Руководитель ВКР

  
\_\_\_\_\_

И. В. Андруняк  
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

  
\_\_\_\_\_

Д. А. Меркулова  
инициалы и фамилия

«30» мая 2016 г.


**КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК**  
выполнения ВКР

Наименование и содержание этапа	Срок выполнения
Сбор и анализ исходной документации и литературы	30.05.16 – 04.06.16
Постановка основной задачи, освоение расчетных методик и программ	06.06.16 – 08.06.16
Выполнение расчетов, оформление результатов, составление выводов	09.06.16 – 18.06.16
Графическое оформление чертежей	20.06.16 – 23.06.16
Работа над нормативно-правовой базой, оформление расчетно-пояснительной записки	24.06.16 – 26.06.16
Оформление прочей документации	27.06.16 – 29.06.16

«22» июня 2016 г.

Руководитель ВКР

Задание принял к исполнению

  
\_\_\_\_\_ подпись  
  
\_\_\_\_\_ подпись

И. В. Андруняк  
инициалы и фамилия

Д. А. Меркулова  
инициалы и фамилия

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
1 .Общие сведения о предприятии .....	9
1.1 Месторасположение и природно-климатические условия территории расположения предприятия.....	9
1.2 Характеристика предприятия, как источника загрязнения атмосферы ....	10
1.3 Анализ работы котла БКЗ-500-140-1 .....	11
2 Характерные выбросы ТЭС .....	14
2.1 Преобразование вредных выбросов ТЭС в атмосферном воздухе.....	18
2.2 Топливо – источник образования оксидов азота .....	20
2.3 Образование оксидов азота в топках котлов.....	21
2.4 Общие вопросы охраны окружающей среды на ТЭС.....	26
3 Обзор технологических методов подавления оксидов азота .....	29
3.1 Классификация технологических методов снижения выхода оксидов азота .....	31
3.2 Методические принципы подавления оксидов азота.....	34
3.3 Перспективность использования канско-ачинских углей .....	39
3.3.1 Особенности применения методов снижения оксидов азота при сжигании канско-ачинских углей.....	40
3.4 Предложения по организации топочного процесса котла 500 т/ч с двухступенчатым сжиганием.....	42
4 Проведение расчета рассеивания выбросов оксидов азота в атмосферном воздухе до и после мероприятия .....	46
5 Исследование режимов сжигания топлива в топке котла Е-500.....	50
6 Экономическая часть .....	53
6.1 Оценка величины предотвращенного экологического ущерба .....	53
6.2 Расчет платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.....	55
7 Нормативно-правовая база.....	58
Заключение .....	64
Список использованных источников .....	65

## ВВЕДЕНИЕ

Источниками поступления в атмосферу Земли оксидов азота являются природные процессы и антропогенные выбросы. Количество оксидов азота антропогенного происхождения значительно меньше (менее 10 %), однако они представляют наибольшую опасность, так как сосредоточены на территории крупных городов.

Наибольшую зону загрязнения воздушного бассейна от выбросов ТЭС составляют оксиды азота, которые по характеру образования разделяются на топливные (азотсодержащие компоненты топлива) и воздушные (молекулярный азот воздуха, подаваемый на горение).

Среди образующихся оксидов азота рассматривается влияние в экологическом аспекте монооксида (NO) и диоксида (NO<sub>2</sub>) азота, сумму которых принято обозначать NO<sub>x</sub>. Они под воздействием ультрафиолетового излучения активно участвуют в фотохимических реакциях в атмосфере с образованием других веществ.

Снижение концентраций окислов азота в дымовых газах электростанций является одной из основных задач теплоэнергетики по защите окружающей среды.

К настоящему времени научно-технические и технологические проблемы снижения выбросов оксидов азота на ТЭС решены в той степени, которая достаточна для соблюдения экологических нормативов действующими и вновь создаваемыми энергетическими предприятиями.

Практическое решение данной проблемы ограничивается экономическими факторами, необходимостью инвестиций в реконструкцию существующего оборудования и существующих энергопредприятий в целом.

На предприятиях энергетического профиля ведутся различные работы, связанные с уменьшением выбросов окислов азота в атмосферный воздух. Одним из способов подавления образования оксидов азота является ступенчатое сжигание топлива. В настоящей работе приведены результаты количественного изменения выбросов при внедрении двухступенчатого сжигания твердого топлива.



## **1 Общие сведения о предприятии**

### **1.1 Месторасположение и природно-климатические условия территории расположения предприятия**

Рассматриваемая угольная теплоэлектростанция находится в г. Красноярске. Климат Красноярска резко континентальный. Континентальность выражена большой годовой ( $38^{\circ}\text{C}$  по средним месячным значениям) и суточной ( $12-14^{\circ}\text{C}$ ) амплитудой колебаний температуры воздуха. Многолетняя среднегодовая температура воздуха в Красноярске положительная, составляет  $0,5-0,6^{\circ}\text{C}$ . Самый холодный месяц январь – минус  $17^{\circ}\text{C}$ , хотя в отдельные годы самым холодным месяцем является февраль. Абсолютный минимум – минус  $53^{\circ}\text{C}$ . Сильные морозы со средней суточной температурой воздуха минус  $20^{\circ}\text{C}$  и ниже в Красноярске редко бывают продолжительными. Самая холодная декада – третья декада января. Самым жарким месяцем является июль –  $18,4^{\circ}\text{C}$ . Абсолютный максимум –  $36^{\circ}\text{C}$ . В июле, в среднем, в течение 26 дней средняя суточная температура выше  $15^{\circ}\text{C}$ , из них в течение 10 дней выше  $20^{\circ}\text{C}$ .

В течение всего года в Красноярске преобладают циклоны, приходящие с юго-запада (63 %). Чаше циклоны этого направления повторяются в теплое время года (72 %). В холодный период повторяемость юго-западных циклонов составляет 57 %, северо-западных – 17 %. Повторяемость циклонов западного направления в течение года составляет 23%.

В холодный период преобладают антициклоны западного и северо-западного направлений (33 %), юго-западные составляют 29 %. В теплый период увеличивается число западных антициклонов (41 %).

Район относится к зоне достаточного увлажнения. Среднегодовое количество осадков – 454 мм. Большая часть выпадает в теплое время года (4-9 месяцы) – 78 %. Наибольшее среднемесячное количество осадков приходится на июль – 81 мм, наименьшее в феврале и марте – 11 мм.

Влажность воздуха имеет четко выраженный годовой и суточный ход. Упругость водяного пара в течение года меняется аналогично ходу температуры воздуха. Наиболее низкая относительная влажность (55-61 %) наблюдается в апреле-июне. Наибольшего значения относительная влажность достигает в декабре-феврале (75%).

Для Красноярска характерна однородность режима ветра в течение всего года. С мая по август повторяемость юго-западных и западных ветров 40-45%. Зимой повторяемость ветров северных, восточных и юго-восточных небольшая (1-3%). Наименьшей же изменчивостью в течение года отличаются ветры северного, юго-восточного и южного направлений. Их повторяемость колеблется от 1 % (ноябрь) до 7% (май). При переходе от зимы к лету, несколько увеличивается повторяемость ветров северной четверти, хотя преобладают по-прежнему юго-западные и западные ветры.

## 1.2 Характеристика предприятия, как источника загрязнения атмосферы

В котельном цехе ТЭС установлено 3 котлоагрегата БКЗ-420-140, 3 котлоагрегата БКЗ-500-140, 2 котла ПТВМ-180 (ПТВМ находятся в резерве).

В качестве золоулавливающих устройств установлены:

- на котлах № 1-3 типа БКЗ-420-140 четырехпольные электрофильтры типа УГ2-4-74 (по два на котел);
- на котлах № 4-5 типа БКЗ-500-140 четырехпольные электрофильтры типа ЭГА2-88-12-6-4-330-5;
- на котле БКЗ-500 ст. № 6 четырехпольный электрофильтр типа ЭГБМ-2-74-12-6-4.

Энергетические котлы №1-4 и пиковые водогрейные котлы подключены к одной дымовой трубе высотой 180 м с диаметром устья 7,2 м. Котлоагрегаты ст. № 5, 6 подключены ко второй дымовой трубе высотой 180 м и диаметром устья 6 м.

Наиболее мощным источником поступления в атмосферу загрязняющих веществ являются дымовые трубы ТЭС.

В процессе сжигания органического топлива с дымовыми газами в атмосферу поступают:

- пыль неорганическая (зола);
- сернистый ангидрид;
- окислы азота (диоксид азота, оксид азота);
- оксиды углерода;
- мазутная зола в пересчете на ванадий.

Выбросы золы зависят от количества и зольности потребляемого топлива, а также от совершенства и уровня эксплуатации золоуловителей.

Выделение сернистого ангидрида практически целиком определяется содержанием в исходном топливе серы. В топочном процессе происходит частичное связывание соединений серы, содержащихся в минеральной части топлива, окислами кальция и магния. Уровень связывания соединений серы составляет 20% для котлов № 4, 5 и 5 % для котлов № 1-3 (котлы с жидким шлакоудалением).

Выбросы окислов азота при сжигании угля связаны с окислением азота, содержащегося в топливе, при его термическом разложении.

Количество выделяющихся окислов азота зависит в определенной мере от организации топочного процесса и может частично регулироваться топочными методами.

Окислы азота поступают в атмосферу в основном в виде NO, большая часть которого (до 80 %) доокисляется в атмосфере до NO<sub>2</sub>.

На промплощадке ТЭС имеется также ряд небольших по мощности источников выделения вредных веществ, в основном в виде неорганизованных выбросов.

Поступление в атмосферу угольной пыли происходит вследствие выдувания мелких фракций (менее 10 мкм) из штабелей топливного склада, пыления при разгрузке вагонов, работы аспирационных установок на тракте топливоподачи.

Для снижения пыления угольного склада предусмотрено послойное укатывание бульдозерами, для укатывания откосов предусматриваются прицепные катки. Для снижения пыления угольного склада в процессе его формирования на галерее выдачи топлива на склад предусмотрена установка телескопической трубы, с целью сокращения высоты открытого ссыпания топлива.

Системы аспирации воздуха предусматриваются в помещении тракта: вагоноопрокидывателя, дробильного корпуса, узлах пересыпки топлива.

Выбросы углеводородов возникают вследствие испарения при сливе и хранении нефтепродуктов (основную часть составляют предельные углеводороды).

Незначительное количество вредных веществ выделяется на вспомогательных производствах – холодная и термическая обработка металлов, сварочные работы, окраска, изоляционные работы, а также от технологического транспорта, которые не оказывают заметного воздействия на общий баланс вредных выбросов ТЭС в атмосферу и уровень загрязнения природной среды за пределами промплощадки ТЭС.

### **1.3 Анализ работы котла БКЗ-500-140-1**

Паровой котел Е-500-140 (модель БКЗ-500-140-1) однобарабанный вертикально-воздухотрубный с естественной циркуляцией предназначен для сжигания ирша-бородинского бурого угля при твердом шлакоудалении. Котел спроектирован для работы со следующими параметрами:

- номинальная производительность по перегретому пару 500 т/ч(138,9кг/с);
- давление в барабане 159 кгс/см<sup>2</sup> (15,6 МПа);
- давление перегретого пара 140 кгс/см<sup>2</sup> (13,7 МПа);
- температура перегретого пара 560°С;
- температура питательной воды 230°С.

Компоновка котла выполнена по П-образной схеме. Топочная камера является первым восходящим газоходом. В горизонтальном газоходе расположены конвективные пакеты пароперегревателей. В нисходящем газоходе размещены поверхности водяного экономайзера и воздухоподогревателя.

Топочная камера котла БКЗ-500 открытого типа призматической формы полностью выполнена из цельносварных панелей, изготовленных сваркой труб 60×6 с полосой 6×20. Шаг труб 80 мм. В нижней части фронтальной и задней экраны образуют скаты холодной воронки. Вверху трубы фронтального экрана круто отгибаются и образуют слабонаклонный (под углом 15° к горизонту) потолок. Здесь находятся низкоопущенные ширмы пароперегревателя. Объем

топочной камеры составляет 3770 м<sup>3</sup>. Топка оборудована двенадцатью прямооточными горелками, расположенными в три яруса и направленными горизонтально и по касательной к условной окружности диаметром 1,1 м. Смонтированы индивидуальные пылесистемы прямого вдувания с мельницами-вентиляторами и с газовой сушкой топлива. Газы рециркуляции подаются во вторичный воздух и через горелки направляются в топку. В нижнюю часть холодной воронки предусмотрена подача горячего воздуха через систему нижнего дутья. Диапазон допустимых нагрузок котла обеспечивается включением в работу при различном сочетании двух или трех пылесистем из четырех.

Размол и сушка топлива осуществляется в четырех мельницах-вентиляторах МВ 2700/650/590. В качестве сушильного агента используются дымовые газы, отбираемые из верхней части топки, с присадкой уходящих газов. Аэросмесь распределяется по ярусам горелок делителем пыли слоистого типа. Для снижения температуры газов в зоне активного горения предусмотрена дополнительная подача газов рециркуляции в топку вместе с вторичным воздухом.

Для очистки поверхностей нагрева от наружных отложений, на котле установлены следующие устройства: 53 паровых обдувочных аппарата ОГРУ и ОМ-0,35 и четыре аппарата АВО для экранов, 22 глубоко выдвигаемых аппарата типа ОГ для фестона и пароперегревателя, три глубоко выдвигаемых обдувочных аппарата типа ОГ-П для ширм и дробеочистка для поверхностей нагрева, расположенных в конвективной шахте.

Интенсификация шлакования экранов наблюдалась при поступлении березовского угля, что обуславливает необходимость регулярного применения водяной очистки. Это подтверждено результатами трехмесячного сжигания в 1987 г. на котле Е-500 ТЭС березовского угля. Проведенные исследования показали работоспособность котла на высокошлакующем угле с высокими технико-экономическими показателями:  $\eta_{\text{бп}}=92,1\%$ ,  $q_2=7,0\%$ ,  $q_4=0,5-0,6\%$ .

При сжигании ирша-бородинского угля были проведены опыты по определению влияния коэффициента избытка воздуха в топке ( $\alpha_T$ ) на интенсивность и прочность вторичных отложений. При доле рециркулирующих уходящих газов 11-15 %, одних и тех же температурах газов ( $\nu_T$ ) в пристенной области изменение  $\alpha_T$  в диапазоне 1,14-1,26 практически не повлияло на скорость роста и прочность вторичных отложений. Эти показатели главным образом, зависят от температуры газов. Так при снижении  $\alpha_T$  с 1,3 до 1,2 температуры газов повышаются (адиабатическая на 50°С, а на выходе из топки на 30°С), а скорость роста вторичных отложений возрастает в верхней части топки на 15 %.

Предотвратить рост  $\nu_T$  (с целью ограничения скорости роста вторичных отложений) на существующем котле Е-500, при его работе в режиме пониженных  $\alpha_T$ , можно за счет эффективной водяной очистки топочных экранов. В опытах включение один раз в сутки двух дальнобойных водяных аппаратов приводит к снижению температуры газов на выходе из топки на 30°С.

Серьезным недостатком котлов БКЗ-500-140-1, ограничивающим их применение на электростанциях, являются высокие выбросы оксидов азота. Так при работе котла на трех пылесистемах с коэффициентом избытка воздуха в топке  $\alpha_T = 1,25$  концентрация  $\text{NO}_x$  ( $C_{\text{NO}_x}$ ) в дымовых газах достигает  $430 \text{ мг/нм}^3$ , а на четырех пылесистемах –  $580 \text{ мг/нм}^3$ . При зондировании топки установлено, что максимальная концентрация оксидов азота наблюдается на расстоянии 4-5 калибров горелки.

## 2 Характерные выбросы ТЭС

Как известно, различают естественные примеси, т. е. обусловленные природными процессами, и антропогенные, т. е. возникающие в результате хозяйственной деятельности человечества. Уровень загрязнения атмосферы примесями от естественных источников является фоновым и имеет малые отклонения от среднего уровня во времени.

Антропогенные загрязнения отличаются многообразием видов примесей и многочисленностью источников их выброса. Наиболее устойчивые зоны с повышенными концентрациями загрязнений возникают в местах активной жизнедеятельности человека. Установлено, что каждые 10-12 лет объем мирового промышленного производства удваивается, а это сопровождается примерно таким же ростом объема выбрасываемых загрязнений в окружающую среду. По ряду загрязнений темпы роста их выбросов значительно выше средних. К таковым относятся аэрозоли тяжелых и редких металлов, синтетические соединения, не существующие и не образующиеся в природе, радиоактивные, бактериологические и другие загрязнения.

Примеси поступают в атмосферу в виде газов, паров, жидких и твердых частиц. Газы и пары образуют с воздухом смеси, а жидкие и твердые частицы – аэрозоли (дисперсные системы), которые подразделяют на пыль (размеры частиц более 1 мкм), дым (размеры твердых частиц менее 1 мкм) и туман (размер жидких частиц менее 10 мкм). Пыль, в свою очередь, может быть крупнодисперсной (размер частиц более 50 мкм), среднедисперсной (50-10 мкм) и мелкодисперсной (менее 10 мкм). В зависимости от размера жидкие частицы подразделяются на супертонкий туман (до 0,5 мкм), тонкодисперсный туман (0,5-3,0 мкм), грубодисперсный туман (3-10 мкм) и брызги (свыше 10 мкм). Следует отметить, что аэрозоли чаще полидисперсные, т.е. содержат частицы различного размера.

Основными химическими примесями ТЭС, загрязняющими атмосферу, являются следующие:

Оксид углерода (СО) – бесцветный газ, не имеющий запаха, известен также под названием «угарный газ». Образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива (угля, газа, нефти) в условиях недостатка кислорода и при низкой температуре. При этом 65% от всех выбросов приходится на транспорт, 21% – на мелких потребителей и бытовой сектор, а 14% – на промышленность. При вдыхании угарный газ за счет имеющейся в его молекуле связи (С=О) образует прочные комплексные соединения с гемоглобином крови человека и тем самым блокирует поступление кислорода в кровь. Это вызывает головные боли, тошноту, а при более высокой концентрации смерть.

Максимальная разовая ПДК СО – 5 мг/м<sup>3</sup> а среднесуточная – 3 мг/м<sup>3</sup>. При 14 мг/м<sup>3</sup> возрастает вероятность смерти от инфаркта миокарда. Столь экстремальные концентрации часто наблюдаются в районах повышенной антропогенной нагрузки на окружающую среду: в часы пик на транспорте или

при инверсиях (т.е. в условиях слабого воздушного обмена), благоприятствующих возникновению смога. Уменьшение выбросов угарного газа достигается путем дожигания отходящих газов и использования альтернативных источников топлива.

Двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ), или углекислый газ, – бесцветный газ с кисловатым запахом и вкусом, продукт полного окисления углерода. Является одним из парниковых газов.

Двуокись серы ( $\text{SO}_2$ ) (диоксид серы, сернистый ангидрид) – бесцветный газ с резким запахом. Образуется в процессе сгорания серосодержащих ископаемых видов топлива, в основном угля, а также при переработке сернистых руд. Он в первую очередь участвует в формировании кислотных дождей. Общемировой выброс  $\text{S}_2$  оценивается в 190 млн. т в год. Концентрация диоксида серы особенно велика в районах, где расположены крупные тепловые станции, металлургические и горнообогатительные заводы. Максимальная разовая ПДК для диоксида серы составляет  $0,5 \text{ мг/м}^3$ , а среднесуточная –  $0,05 \text{ мг/м}^3$ .

Длительное воздействие диоксида серы на человека приводит вначале к потере вкусовых ощущений, стесненному дыханию, а затем - к воспалению или отеку легких, перебоям в сердечной деятельности, нарушению кровообращения и остановке дыхания. Растения гораздо чувствительнее к воздействию диоксида серы, чем человек. Так, листовые пластинки растений, произрастающих на расстоянии менее 1 км от предприятий, выбрасывающих диоксид серы, обычно густо усеяны мелкими некротическими пятнами, образовавшимися в местах оседания капель серной кислоты.

Окислы азота (оксид и диоксид азота) – газообразные вещества: монооксид азота  $\text{NO}$  и диоксид азота  $\text{NO}_2$  объединяются одной общей формулой  $\text{NO}_x$ . При всех процессах горения образуются окислы азота, причем большей частью в виде оксида. Оксид азота достаточно быстро окисляется до диоксида, который представляет собой красно-белый газ с неприятным запахом, сильно действующий на слизистые оболочки человека. Чем выше температура сгорания, тем интенсивнее идет образование окислов азота.

Другим источником окислов азота являются предприятия, производящие азотные удобрения, азотную кислоту и нитраты, анилиновые красители, нитросоединения, вискозный шелк, целлулоид. Количество окислов азота, поступающих в атмосферу, составляет 65 млн т в год. От общего количества выбрасываемых в атмосферу окислов азота на транспорт приходится 55%, на энергетику – 28%, на промышленные предприятия – 14%, на мелких потребителей и бытовой сектор – 3% .

В летний период при интенсивном солнечном облучении продолжительностью 12-14 ч вследствие высокой растворимости в воде (облака, дождь) и сорбции на увлажненных поверхностях азотная кислота быстро выпадает на земную поверхность. В городах наиболее высокие концентрации окислов азота наблюдаются утром, до начала фотохимических процессов. При ярком солнечном свете окислы азота реагируют с

несгоревшими бензиновыми парами и другими углеводородами, образуя низкоатмосферный озон, или смог, т.е. красно-бурую дымку.

Максимальная разовая ПДК диоксида азота составляет 0,2 мг/м<sup>3</sup>. При концентрациях свыше 0,15 мг/м<sup>3</sup> возникают острые заболевания органов дыхания. При остром отравлении диоксидом азота может развиваться отек легких. Признаками хронического отравления являются головные боли, бессонница, раздражение слизистых оболочек.

Озон(O<sub>3</sub>) – газ с характерным запахом, более сильный окислитель, чем кислород. Его относят к наиболее токсичным из всех обычных загрязняющих воздух примесей. В нижнем атмосферном слое озон образуется в результате фотохимических процессов с участием диоксида азота и летучих органических соединений (ЛОС). Поскольку к ЛОС относят порядка 260 химических соединений, при образовании озона получаются смеси, состоящие из сотен химических веществ и называемые фотохимическим «смогом». Наиболее высокие концентрации озона наблюдаются в промышленных районах. Однако, поскольку эмиссии диоксида азота и ЛОС участились даже в сельской местности, то и здесь зафиксированы повышенные концентрации озона. Озон относят к 1-му классу опасности, при этом максимально разовая ПДК составляет 0,16 мг/м<sup>3</sup> а среднесуточная – 0,03 мг/м<sup>3</sup>.

Углеводороды–химические соединения углерода и водорода. К ним относят тысячи различных загрязняющих атмосферу веществ, содержащихся в несгоревшем бензине, жидкостях, применяемых в химчистке, промышленных растворителях и т.д. Многие углеводороды опасны сами по себе. Например, бензол, один из компонентов бензина, может вызвать лейкемию, а гексан – тяжелые поражения нервной системы человека. Бутадиен является сильным канцерогеном.

Промышленные пылевые зависимости от механизма их образования подразделяют на следующие 4 класса:

- механическая пыль– образуется в результате измельчения продукта в ходе технологического процесса;
- возгоны–образуются в результате объемной конденсации паров веществ при охлаждении газа, пропускаемого через технологический аппарат, установку или агрегат;
- летучая зола–содержащийся в дымовом газе во взвешенном состоянии несгораемый остаток топлива, образуется из его минеральных примесей при горении;
- промышленная сажа– входящий в состав промышленного выброса твердый высокодисперсный углерод, образуется при неполном сгорании или термическом разложении углеводородов.

Основной параметр, характеризующий взвешенные частицы, – это их размер, который колеблется в широких пределах от 0,1 до 850 мкм. Из этой гаммы наиболее опасны частицы от 0,5 до 5 мкм, поскольку они не оседают в дыхательных путях, и именно их выдыхает человек.



Основными источниками антропогенных аэрозольных загрязнений воздуха являются теплоэлектростанции (ТЭС), потребляющие уголь высокой зольности, обогатительные фабрики, металлургические, цементные, магнезитовые и другие заводы. Аэрозольные частицы от этих источников отличаются большим химическим разнообразием. Чаще всего в их составе обнаруживаются соединения кремния, кальция и углерода, реже - оксиды металлов: железа, магния, марганца, цинка, меди, никеля, свинца, сурьмы, висмута, селена, мышьяка, бериллия, кадмия, хрома, кобальта, молибдена, а также асбест. Еще большее разнообразие свойственно органической пыли, включающей алифатические и ароматические углеводороды, соли кислот. Она образуется при сжигании остаточных нефтепродуктов, в процессе пиролиза на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и других подобных предприятиях.

К постоянным источникам аэрозольного загрязнения относятся промышленные отвалы – искусственные насыпи из переотложенного материала, преимущественно вскрышных пород, образующихся при добыче полезных ископаемых или же из отходов предприятий перерабатывающей промышленности, ТЭС. Производство цемента и других строительных материалов также является источником загрязнения атмосферы пылью.

Сжигание каменного угля, производство цемента и выплавка чугуна дают суммарный выброс пыли в атмосферу, равный 170 млн т/г.

Значительная часть аэрозолей образуется в атмосфере при взаимодействии твердых и жидких частиц между собой или с водяным паром.

К опасным факторам антропогенного характера, способствующим серьезному ухудшению качества атмосферы, следует отнести ее загрязнение радиоактивной пылью. Так, при ядерных взрывах или авариях на АЭС большая часть радионуклидов образуется в результате деления урана-235, урана-238 и плутония-239. Установлено, что через несколько десятков секунд после взрыва образуются примерно 100 различных радионуклидов, 29 из которых вносит наибольший вклад в радиоактивное загрязнение атмосферы через час, 20 – через двое суток, а 3 – через 100 лет. Особую потенциальную опасность для человека и животных представляет стронций-90 не только как долгоживущий элемент, но и как аналог кальция, способный заменять его в костях.

Во время ядерных взрывов радионуклиды находятся в газообразном состоянии и по мере понижения температуры конденсируются в аэрозольное облако. Наиболее крупные частицы (диаметром более 40 мкм) выпадают из атмосферы и оседают на земной поверхности. Мелкие же частицы (диаметром от 1 до 20 мкм) попадают не только в верхние слои тропосферы, но и в стратосферу, обуславливая так называемое глобальное загрязнение, сопровождающееся выпадением радионуклидов в пределах обоих полушарий.

Следует отметить, что время пребывания мелких частиц в нижнем слое тропосферы составляет в среднем несколько суток, а в верхнем – 20-40 суток. Что касается частиц, попавших в стратосферу, то они могут находиться в ней до года, а иногда и больше.

## 2.1 Преобразование вредных выбросов ТЭС в атмосферном воздухе

Вредные выбросы и природные вещества в атмосфере подвергаются сложным процессам превращения, взаимодействия, вымывания и т. д. Эти процессы различны для взвешенных частиц и газообразных примесей. Время нахождения взвешенных частиц в атмосфере зависит от их физико-химических свойств, метеорологических параметров и некоторых других факторов, в первую очередь от высоты выброса частиц в атмосферу и их размеров.

Основными путями вывода аэрозолей из атмосферы (самоочищения) являются осаждение частиц под воздействием сил тяжести, осаждение их на растения и водоемы, а также вымывание дождем. Частицы размером более 10 мкм относительно быстро опускаются на землю под действием сил тяжести. Частицы диаметром от 4 до 10 мкм поднимаются с дымом на высоту более 1 км и могут перемещаться потоком воздуха на сотни километров. Частицы от 1 до 4 мкм очень медленно осаждаются, достигая земной поверхности в течение года. Частицы менее 1 мкм распространяются подобно молекулам газа.

Вопрос о времени жизни и превращениях газообразных загрязнений атмосферы изучен еще недостаточно. Например, диоксид серы сохраняется, по данным разных исследователей, от нескольких часов до нескольких дней.

Диоксид серы в атмосфере постепенно окисляется до триоксида серы, который, взаимодействуя с влагой воздуха, образует серную кислоту. На скорость процесса окисления влияет солнечный свет и мельчайшие частицы пыли, каталитически ускоряющие процесс окисления. На процесс окисления влияет также влажность воздуха. С увеличением влажности процесс окисления сернистого ангидрида ускоряется.

Установлено, что в атмосфере происходит реакция фотодиссоциации диоксида азота  $\text{NO}_2$  на  $\text{NO}$  и  $\text{O}$ , при этом поглощается излучение ультрафиолетовой области солнечного спектра, которое играет преобладающую роль в атмосферных фотохимических процессах. Энергия, необходимая для разрыва связи между азотом и кислородом, составляет около 300 кДж/моль.

Следствием диссоциации  $\text{NO}$  является большое количество вторичных реакций. Совместное окисление углеводородов и окислов азота приводит к образованию соединений, которые в результате дальнейших реакций образуют так называемые пероксиацилнитраты (ПАН), обладающие сильным токсичным действием. Вещества группы ПАН можно обнаружить в загрязненном городском воздухе во время токсичного тумана (смога).

Среди вторичных фотохимических реакций важное значение имеет взаимодействие молекулярного кислорода и оксида азота  $\text{NO}$  с атомарным кислородом, в результате чего образуются озон  $\text{O}_3$  и диоксид азота. Фотохимические реакции с диоксидом азота протекают в следующих направлениях:





В результате перечисленных реакций происходит постепенное доокисление монооксида NO до диоксида NO<sub>2</sub>, по мере удаления дымового факела от дымовой трубы. На выходе из дымовой трубы 85 – 90% всех оксидов азота представляет NO. Итоговое преобразование NO в NO<sub>2</sub> приводит к усилению отрицательного воздействия продуктов сгорания на природу и живые организмы, так как последний более токсичен.

Установлено, что основной причиной фотохимических превращений в приземном слое атмосферы городов является высокая степень загрязнения воздуха органическими веществами (преимущественно нефтяного происхождения) и оксидами азота.

Суммарная концентрация окислителей, называемых еще оксидантами, образующихся в атмосферном воздухе в результате фотохимических превращений, в ряде случаев может быть использована как гигиенический показатель интенсивности протекания этих реакций. Концентрации оксидантов подвержены большим колебаниям, но наблюдается определенная закономерность.

При высоких концентрациях NO и NO<sub>2</sub> они частично окисляются под воздействием солнечной радиации до высшего оксида азота N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, который, взаимодействуя с влагой воздуха, образует азотную кислоту.

Соединения ванадия, аэрозоли бенз(а)пирена, распространяясь в атмосфере вместе с пылью, дождем или снегом, оседают на почву и водоемы. Из сказанного выше следует, что вредные выбросы ТЭС – пыль, оксиды серы и азота и другие вещества, воздействуя на биосферу в районе расположения электростанции, подвергаются различным превращениям и взаимодействиям и затем осаждаются или вымываются атмосферными осадками.

Выбросы современной ТЭС с высокими дымовыми трубами распространяются на десятки и сотни километров. Здесь следует иметь в виду, что почти все выбрасываемые ТЭС вещества не являются инородными для окружающей природы и участвуют в круговороте веществ между атмосферой, литосферой и гидросферой. Так, в атмосфере Земли содержится около 2000 млрд. т углерода в виде углекислого газа CO<sub>2</sub>. При этом около 100 млрд. т/год находится в состоянии непрерывного круговорота между атмосферой, сушей и морем. Таким образом, общие выделения CO<sub>2</sub> в результате человеческой деятельности, составляющие в настоящее время примерно 15 млрд. т в год, не приведут к значительным изменениям, так как небольшое увеличение CO<sub>2</sub> в воздухе компенсирует способность растений и водорослей поглощать углекислый газ. Однако дальнейшее увеличение выбросов CO<sub>2</sub> может повлиять на климат планеты благодаря так называемому

парниковому эффекту. Парниковый эффект для Земли – это повышение средней температуры планеты благодаря тому, что углекислый газ пропускает тепловое излучение Солнца и в то же время является теплозащитным экраном обратному потоку тепла.

Наличие оксидов серы и азота в воздухе в отдалении от источников выброса в сотни раз меньше допустимых концентраций. Объясняется это тем, что время нахождения в атмосфере большинства загрязняющих компонентов не превышает нескольких суток.

Наибольшее значение для животного мира оказывает кислород воздуха. В процессе дыхания животных и горения топлива уменьшается его концентрация в атмосфере, которая восстанавливается растительным миром суши и океана.

Ощутимых изменений концентрации кислорода в атмосфере нет. Однако это совсем не значит, что проблема в глобальном масштабе исчерпана, так как одновременно с антропогенным использованием кислорода в мире совершаются и другие процессы, отрицательно влияющие на воспроизводство кислорода, а именно загрязнение мирового океана и снижение площади лесов.

Для теплоэнергетики актуальным является решение вопросов обеспечения допустимых концентраций вредных веществ в районах расположения электростанций.

## **2.2 Топливо – источник образования оксидов азота**

Азотсодержащие соединения, входящие в состав жидких и твердых топлив, являются источником образования топливных оксидов азота. Ввиду того, что энергия диссоциации связей N-N в 2-4 раза превосходит энергию диссоциации связей C-N и N-H, азотсодержащие соединения, входящие в состав топлива, легче превращаются в NO, чем молекулярный азот воздуха. Превращение азота топлива в оксиды азота происходит при наличии в зоне реакции достаточного количества кислорода уже при температурах 250-300 °С.

Особенностью образования топливных NO<sub>x</sub> является наличие «конкурирующих» реакций: образующиеся при выходе летучих промежуточные радикалы (амины NH<sub>i</sub> и цианиды CN<sub>i</sub>) при избытке окислителей (O, OH) переходят в NO, а при недостатке, т.е. в среде, обогащенной топливом, образуют прочную молекулу N<sub>2</sub>.

При горении твердых и жидких азотсодержащих топлив органические нитросоединения, присутствующие в топливе, вероятно, претерпевают некоторое термическое разложение, прежде чем попасть в зону горения. Поэтому предшественниками образования NO должны быть азотсодержащие соединения с малой молекулярной массой, например NH<sub>3</sub>, HCN, CN. Вот почему в случае сжигания твердых и жидких топлив в потоке воздуха образование топливных оксидов азота протекает достаточно быстро – в основном на стадии выгорания летучих, которая завершается на начальном участке факела.

Коэффициент превращения (или степень конверсии) азотсодержащих компонентов топлива в оксиды азота изменяется в зависимости от содержания связанного азота топлива  $N^P$ . При очень низком содержании  $N^P$  имеет место почти полная конверсия в  $NO$ .

Экспериментальные исследования выявили, что образование диоксида азота происходит в двух зонах: предпламенной и послепламенной. В первой зоне образовавшийся  $NO_2$  полностью разлагается. В то же время быстрое перемешивание горячих и холодных областей в турбулентном пламени может привести к быстрому замораживанию  $NO_2$ , что является причиной появления относительно больших концентраций диоксида азота в холодных зонах потока. Эмиссия  $NO_2$  в послепламенной зоне происходит в верхней части топки и в горизонтальном газоходе (при  $T \geq 900-1000$  К) и при определенных условиях также может достигать заметной величины.

Гемиоксид азота  $N_2O$ , образующийся при сжигании топлив, является, по всей видимости, кратковременным промежуточным веществом. Гемиоксид азота  $N_2O$  практически отсутствует в продуктах сгорания за котлами.

### 2.3 Образование оксидов азота в топках котлов

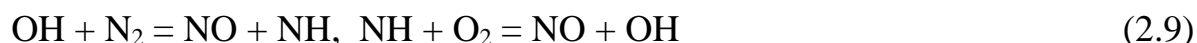
Одним из основных вредных компонентов техногенной деятельности являются оксиды азота –  $NO_x$ . При этом основная доля их приходится на топливоиспользующие установки. По данным разных авторов, до 70-80 % приходится на долю энергетики, до 17 % – на автотранспорт, до 6 % – черная металлургия, до 2 % – химическая промышленность, остальное – нефтеперерабатывающая и другие отрасли. Для правильной выработки путей и методов по снижению этих выбросов необходимо четко понимать механизм образования оксидов азота и степень влияния состава органического топлива, условий и режимов его сжигания на их уровень.

Выбросы оксидов азота при сжигании органического топлива связаны с окислением азота воздуха в высокотемпературном газовом факеле. При сжигании угля определяющим является окисление азота топлива, выделяющегося в начальном участке факела при термическом разрушении связанного азота топлива. Количество выделяющихся оксидов азота зависит в значительной мере от организации топочного процесса и может в определенном диапазоне регулироваться технологическими методами. В состав оксидов азота входят моноокись азота  $NO$  (до 95%), двуокись азота  $NO_2$  (около 4 – 5%), закись азота и другие оксиды. К настоящему времени сформулированы основные теоретические положения, характеризующие механизм образования оксидов азота в топке. Выявлено три основных механизма окисления азота при сжигании энергетических топлив:

- 1) Окисление молекулярного азота воздуха в зоне максимальных температур с образованием тепловых (или воздушных) оксидов (механизм Я. Б.Зельдовича).



Кроме реакции окисления азота атомами кислорода существует возможность образования монооксида азота через гидроксильные радикалы:



Ведущей здесь является реакция между молекулярным азотом и атомарным кислородом. Образование  $\text{NO}_x$  по Зельдовичу зависит от ряда факторов:

- Температура в зоне горения. В связи с высокой энергией активации реакция образования NO происходит при высоких температурах (выше  $1500^\circ\text{C}$ ). С увеличением температуры происходит экспоненциальный рост образования NO.

- Время пребывания в зоне горения. С увеличением времени пребывания продуктов сгорания топливовоздушной смеси (в том числе промежуточных продуктов) в зоне максимальных температур факела, характеризуемом темпом охлаждения факела в зоне максимальных температур, выход оксидов азота увеличивается.

- Избыток воздуха в факеле. Зависимость выхода  $\text{NO}_x$  от избытка воздуха в факеле имеет экстремальный характер. Значение экстремального коэффициента избытка воздуха, соответствующего наибольшему выходу оксидов азота, зависит от вида топлива, способа организации и структуры факела. При  $\alpha < \alpha_{\text{кр}}$  увеличение концентрации в смеси свободного кислорода способствует интенсификации окисления азота воздуха, возрастанию равновесной концентрации; при  $\alpha > \alpha_{\text{кр}}$  более существенным становится снижение максимальной температуры факела за счет охлаждения его ядра избыточным воздухом. При кинетическом горении (сжигание идеально перемешанных смесей топлива и воздуха)  $\alpha_{\text{кр}} = 1,0$  в диффузионном факеле по мере ухудшения смесеобразования, значение  $\alpha_{\text{кр}}$  возрастает.

2) Окисление азота топлива, выделяющегося при термическом разрушении азотсодержащих соединений топлива.

Механизм окисления топливного азота, включает кинетику выхода летучих угля с образованием горючей газовой смеси (в состав которой входят азотсодержащие соединения), переход азотсодержащих соединений в оксиды азота, диффузионный процесс смешения летучих с окислителем. Образование оксидов азота при сжигании угля на 75 – 80% определяется окислением

летучих азотсодержащих соединений, выделяющихся при скоростном термическом разложении частиц топлива. Для мазута и других топлив выход всей массы топливных оксидов азота связан с горением паровой фазы. Выход оксидов азота при сжигании твердого топлива зависит также от природы азотсодержащих соединений топлива – термической устойчивости. Такой механизм образования оксидов азота исключает возможность однозначной связи содержания азота в топливе (материнский азот) и выхода оксидов азота. Однако далеко не всегда учитывается многофакторность процесса конверсии азота топлива в оксиды азота.

При сжигании азотсодержащих топлив оксиды азота образуются, в основном, за счет окисления азотных соединений, находящихся в газовой фазе ( $\text{HCN}$ ,  $\text{NH}_3$ ) после пиролиза топлива в начальном участке факела:



Этот процесс идет при температуре  $550 - 1000^\circ\text{C}$ . Окисление азота, оставшегося в коксовых частицах, незначительно влияет на выход  $\text{NO}_x$  (не более  $20 - 25\%$  общего выхода «топливного» азота). Значительная часть азота топлива переходит в молекулярный азот (в кузнецком угле до  $70 - 78\%$ ), часть азота сохраняется в связанном виде в уносе. Степень перехода связанного азота топлива  $\text{NO}$  зависит от следующих факторов:

- Температура в зоне горения. Температура факела влияет на образование «топливных» оксидов в меньшей степени, чем в процессе окисления азота воздуха. Влияние это осуществляется косвенным путем через скорость газификации топлива в начальном участке факела – чем выше скорость выделения летучих (в том числе, азотсодержащих), тем меньше избыток воздуха в зоне выделения летучих за счет незавершенности процесса смесеобразования и тем меньше выход «топливных» оксидов. Температурный уровень топочного процесса оказывает существенное влияние на роль связанного азота топлива в общем выходе оксидов азота (тепловых, быстрых, топливных). При снижении температуры в топке  $1450^\circ\text{C}$  связанный азот топлива становится доминирующим фактором в образовании оксидов азота при сжигании углей.

- Избыток воздуха в факеле. При распаде термически неустойчивых соединений угля азот твердого топлива конвертирует, в основном, в  $\text{HCN}$  и  $\text{NH}_3$ . Эти соединения переходят частично в оксиды азота, частично в молекулярный азот. С уменьшением концентрации свободного окислителя процесс смещается в сторону увеличения выхода молекулярного азота. Величина избытка воздуха  $\alpha$  на начальном участке факела (в зоне наиболее интенсивного образования  $\text{NO}_x$ ) при сжигании азотсодержащих топлив является наиболее существенным фактором. Повышение  $\alpha$  приводит

кснижению температуры факела и смещению зоны газификации, выделения азотных соединений топлива в область с повышенным избытком воздуха. При коэффициенте избытка воздуха в факеле ниже 1,0 концентрация оксидов азота в дымовых газах для различных углей (при прочих равных условиях) стремится к одному уровню.

- Содержание связанного азота в топливе. Степень перехода связанного азота топлива в  $\text{NO}_x$  зависит от содержания азота в исходном топливе – чем выше N, тем ниже степень конверсии азота, но выше общий валовый выход  $\text{NO}_x$ . Содержание азота в твердом топливе значительно (N до 3%), выход  $\text{NO}_x$  в этом случае осуществляется, главным образом, за счет азота топлива. При сжигании газа и мазута выброс оксидов азота в отличие от сжигания твердого топлива, в основном, зависит от конверсии молекулярного азота, так как процентное содержание азота в топливе невелико. Замедленное подмешивание вторичного воздуха к корню факела, формирование минимального избытка воздуха в зоне выделения газообразных азотосодержащих соединений топлива, обеспечиваемое конструктивным выполнением устройств ввода аэросмеси и вторичного воздуха в топку, нивелируют влияние различного содержания азота в топливе на выход оксидов азота. Выбирая способ сжигания и конструкцию топочно-горелочного устройства, можно нивелировать уровень выброса оксидов азота при сжигании углей с различным содержанием связанного азота топлива - в наибольшей мере чувствительных к технологическим способам подавления оксидов азота угли с повышенным содержанием связанного азота. Это положение объясняет различную эффективность способов подавления оксидов азота при использовании различных углей.

- Вид азотосодержащих соединений. Рассмотренный механизм образования оксидов азота исключает однозначную связь содержания связанного азота в топливе и образования оксидов азота при сжигании данного топлива. Выход оксидов азота при сжигании твердого топлива зависит также от природы азотсодержащих соединений топлива, термической устойчивости. С увеличением степени метаморфизма твердого топлива отмечается не только снижение содержания связанного азота, но также возрастает доля наиболее устойчивых азотных соединений. Поэтому для торфов бурых углей степень конверсии азота является наибольшей. Для полукоксов степень перехода связанного азота в  $\text{NO}_x$  не превышает 10 – 12%, поскольку наименее термостойкие азотные соединения выделены в процессе полукоксования. Испытания реальных котлоагрегатов при попеременном сжигании кизеловского и кузнецкого угля (с различным содержанием связанного азота), а также опытное сжигание партии полукокса ирша-бородинского угля в топке котла, постоянно работающего на кузнецком угле, показали отсутствие существенного различия выхода оксидов азота в одних и тех же топочных устройствах при использовании указанных топлив.

Таким образом, степень перехода связанного азота топлива в оксиды азота при сжигании зависит от термостойкости азотосодержащих соединений, которая в свою очередь определяется степенью метаморфизма угля,

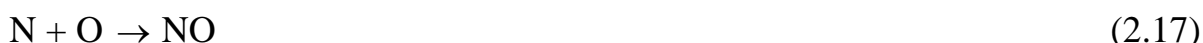


предварительной термической обработкой топлива. Наименьшая степень перехода связанного азота топлива во окислы азота характерна для тощих углей, антрацитов, полукоксов.

Несмотря на различие мнений о механизме перехода азота топлива в  $\text{NO}_x$ , большинство авторов сходится на том, что в отличие от «термических» окислов, скорость образования «топливных» окислов имеет слабую зависимость от температуры. Величина топливной составляющей  $\text{NO}_x$ , в основном, определяется содержанием азота в топливе и концентрацией кислорода в зоне горения и, в меньшей степени, температурой. Образовавшаяся в начальном участке факела окись азота может реагировать с продуктами химического недожога, например, с  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ .

3) Образование «быстрых» оксидов азота в начальном участке факела при сравнительно низких температурах (механизм К. П. Фенимора).

Этот механизм действует в зоне разогрева топливовоздушной смеси и слабо зависит от температуры среды. Здесь определяющим является участие радикалов, образующихся в процессе термического разложения топлива ( $\text{CH}$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NH}$ ,  $\text{NH}_2$  и другие), также атомарного кислорода:



Реакция образования «быстрых» оксидов протекает во фронте пламени при аномально высоких скоростях реакций и низкой концентрации окислителя. Доля «быстрых» окислов азота в топке энергетических котлов при факельном сжигании не превышает, как правило, 10 – 15% от общего выхода окислов азота в топочном процессе.

В реальных топочных устройствах приходится учитывать возможность одновременного действия рассмотренных механизмов образования  $\text{NO}_x$ . Ведущая роль того или иного механизма определяется свойствами топлива (содержание связанного азота, теоретическая температура горения), а также спецификой организации факела (интенсивность смесеобразования, температурный уровень процесса). Экспериментальными исследованиями установлено, что зона образования оксидов азота локализована в начальном

участке факела в области максимальных температур. Основная масса образуется на участке до 2-2,5 диаметров горелки. Установлена существенная роль продуктов неполного сгорания в процессах восстановления оксидов азота непосредственно в зоне образования, а также на последующем участке факела.

Удельный выход окислов азота для новых котлов ограничивается уровнем, предусмотренным ГОСТ Р50831-95.

## **2.4 Общие вопросы охраны окружающей среды на ТЭС**

Атмосферный воздух является жизненно важным компонентом окружающей природной среды, неотъемлемой частью среды обитания человека, растений и животных.

Федеральный закон устанавливает правовые основы охраны атмосферного воздуха и направлен на реализацию конституционных прав граждан на благоприятную окружающую среду и достоверную информацию о ее состоянии.

На практике государственное управление качеством окружающей среды осуществляется через систему природоохранных требований (условий), закрепленных в законодательных и нормативных документах федерального, регионального и местного уровней. Базовым законодательным документом в области охраны окружающей среды является Федеральный закон. Одним из основных требований базового и других федеральных законов является осуществление нормирования в области охраны окружающей среды.

Нормирование в области охраны окружающей среды заключается в установлении:

- нормативов качества окружающей среды;
- нормативов допустимого воздействия на окружающую среду при осуществлении хозяйственной и иной деятельности;
- иных нормативов в области охраны окружающей среды.

К нормативам качества относятся нормативы, установленные в соответствии с химическими, физическими, биологическими показателями. Нормативы качества подразделяют на экологические и гигиенические.

Социальным (гигиеническим) критерием качества атмосферного воздуха является соответствие его физиологическим потребностям человека, его безвредности и безопасности для здоровья. Исходя из этих критериев, установлены общие для всех воздухопользователей нормативные требования к составу и свойствам атмосферного воздуха, которые должны строго учитываться при разработке технологических схем очистки и предельно допустимых выбросов (ПДВ) загрязняющих веществ.

Критерием содержания в воздухе загрязняющих веществ является предельно допустимая концентрация (ПДК). ПДК являются верхними (максимальными) границами концентрации токсичных веществ, которые допускаются в воздушную среду.

К нормативам допустимого воздействия на окружающую среду относятся нормативы допустимых выбросов загрязняющих веществ и микроорганизмов, нормативы допустимых антропогенных нагрузок.

На практике разрабатываются нормативы допустимых выбросов, называемые предельно допустимыми выбросами (ПДВ) загрязняющих веществ. В соответствии с под нормативом ПДВ понимается, норматив предельно допустимого выброса вредного (загрязняющего) вещества в атмосферный воздух, который устанавливается для стационарного источника загрязнения атмосферного воздуха с учетом технических нормативов выбросов и фоновое загрязнение атмосферного воздуха при условии не превышения данным источником гигиенических и экологических нормативов качества атмосферного воздуха, предельно допустимых (критических) нагрузок на экологические системы, других экологических нормативов.

Основным условием нормирования выбросов в атмосферный воздух на границе санитарно-защитной зоны или на границе ближайшей жилой застройки должно выполняться соотношение:

$$\frac{C_i + C_{\phi i}}{ПДК_{\text{мрi}}} \leq 1 \quad (2.18)$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества, создаваемая выбросом вещества массой  $M_i$  от источника загрязнения и рассчитанная по утвержденной в установленном порядке методике;

$C_{\phi i}$  – фоновая концентрация  $i$ -го вещества;

$ПДК_i$  – предельно допустимая концентрация  $i$ -го вещества в атмосферном воздухе населенных мест.

В случае суммации вредного действия веществ, характеризующихся однонаправленным механизмом токсического действия, устанавливается более жесткое требование – сумма отношений концентраций каждого из них к соответствующим ПДК не должна превышать единицу.

Нормативы ПДВ устанавливаются для каждого загрязняющего вещества и для каждого источника загрязнения. Обязательной составной частью работ при установлении нормативов ПДВ для действующих, реконструируемых и проектируемых предприятий являются расчеты загрязнения атмосферного воздуха. Результаты расчетов входят в состав проектов ПДВ для действующих предприятий. Для расчетов загрязнения используют инженерные методы прогноза воздействий на окружающую среду, позволяющие спрогнозировать уровни загрязнения атмосферы относительно действующих источников загрязнения атмосферы.

При расчетах загрязнения атмосферы учитываются физико-географические, климатические условия местности, месторасположение промплощадки, существующей и планируемой в перспективе жилой застройки, зон отдыха городов, санаториев.

Годовой норматив, устанавливаемый как для отдельных источников, так и их совокупности, необходим для оценки снижения объемов выбросов, возможной утилизации загрязняющих веществ. Контрольные нормативы устанавливаются для условий полной нагрузки технологического и очистного оборудования и их нормативной работы и используются при проведении государственного и производственного экологического контроля соблюдения нормативов на предприятии. Норматив для предприятия в целом определяется как сумма нормативов по отдельным источникам загрязнения атмосферы, установленных при нормативной работе технологического и очистного оборудования

Перечень загрязняющих веществ, по которым проводятся расчеты загрязнения и устанавливаются нормативы, включает как основные загрязняющие вещества, являющиеся едиными для всех предприятий регионов РФ, так и специфичные.

На период разработки и реализации этих мероприятий предприятию, наряду с ПДВ, устанавливают лимиты выбросов (временно согласованные выбросы (ВСВ)). По мере осуществления отдельных этапов планов воздухоохраных мероприятий по достижению нормативов ПДВ лимиты пересматриваются в сторону их уменьшения с учетом внедрения наилучших имеющихся технологий по очистке выбросов.

Результаты разработки нормативов ПДВ оформляются в виде документа под названием «Проект нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ».

При разработке проектов активно используются данные материалов инвентаризации выбросов. Дополнительную информацию предприятие получает по письменному запросу в территориальный орган Росгидромета (материалы по привязке заводской системы к городской системе координат; ситуационная карта-схема района расположения предприятия; метеорологические характеристики и коэффициенты, определяющие условия рассеивания ЗВ в атмосфере; фоновые концентрации загрязняющих веществ в атмосфере в месте расположения предприятия).

### 3 Обзор технологических методов подавления оксидов азота

Оксиды азота, появляющиеся при сжигании углей, по механизму образования подразделяются на термические, быстрые и топливные.

Термические образуются в результате реакции атмосферного азота с кислородом при температурах свыше 1500°C. Скорость образования термических  $\text{NO}_x$  зависит от температуры и концентрации кислорода в зоне максимальных температур. Из рассмотрения основных химических реакций следует, что минимизация термических  $\text{NO}_x$  возможна путем снижения времени нахождения и концентрации окислителя в высокотемпературной зоне, а также путем снижения температуры газов в зоне горения.

Быстрые оксиды азота образуются на фронте углеводородных пламен в результате реакции между углеводородными радикалами топлива и атмосферным азотом, в результате которых образуется «активный азот».

Топливные  $\text{NO}_x$  образуются в результате взаимодействия кислорода с азотсодержащими компонентами органической массы топлива в процессе его сжигания и зависят от содержания азота в топливе и избытка воздуха. Топливные  $\text{NO}_x$  (до 80 %) образуются на начальном участке факела при сравнительно низких температурах (1000-1400°C) в зоне максимальных скоростей выгорания топлива, т.е. на стадии воспламенения и горения летучих соединений.

Исследованиями установлено, что при температуре факела до 1500°C (низкотемпературное сжигание) оксиды азота при сжигании углей образуются в основном из азота топлива. На долю термических и быстрых  $\text{NO}_x$  приходится около 5 %, поэтому роль их весьма незначительна, особенно при сжигании бурых углей в топках с твердым шлакоудалением. Таким образом, в пылеугольных топочных устройствах при горении образуются преимущественно топливные оксиды азота.

Снижение образования топливных оксидов азота достигается уменьшением коэффициента избытка воздуха в зоне воспламенения топлива. Этот способ называется двухступенчатым или нестехиометрическим сжиганием топлива. Недостатком этого метода является возможность увеличения шлакования поверхностей нагрева и повышения потерь тепла с механическим недожогом.

В зарубежной и отечественной энергетике реализация метода нестехиометрического сжигания осуществляется следующими путями:

1. Оптимизация существующих систем сжигания, заключающаяся, прежде всего в отладке режима работы котла с минимально возможным избытком воздуха при приемлемой степени выгорания топлива, уровне окиси углерода (CO) и шлакования. Сжигание ирша-бородинского угля в котле Е-500 ТЭС, с минимально возможным избытком воздуха показало, что со сниженным  $\alpha_T''$  от 1,25 до 1,17 концентрация оксидов азота снижалась с 430 мг/нм<sup>3</sup> до 310 мг/нм<sup>3</sup> при работе в трехмельничном режиме работы и с 580 мг/нм<sup>3</sup> до 460 мг/нм<sup>3</sup> - в четырех мельничном при приемлемой степени выгорания топлива, уровне

оксида углерода (СО) и шлакования. Предотвратить рост температуры газов (с целью ограничения скорости роста вторичных отложений) удалось за счет эффективной водяной очистки топочных экранов.

2. Применение горелок с пониженным выходом  $\text{NO}_x$ . Конструктивно горелки выполняются таким образом, чтобы имело место затягивание перемешивания первичного и вторичного воздуха (поворот сопел вторичного воздуха в горелке, по отношению к струям аэроsmеси, на  $20-25^\circ$  в сторону экранов), т.е. обеспечивался бы ступенчатый подвод воздуха (ступенчатость по горизонтали). В этом случае горение летучих происходит при значительном недостатке кислорода, что приводит к снижению  $C_{\text{NO}_x}$  на 30-50 % (Великобритании, США).

В тангенциальных топках такой же эффект можно получить при внедрении схемы концентрической подачи воздуха, т.е. подачи части вторичного воздуха вне горелок. Размыкание горелочной струи по горизонтали, когда 10-20 % воздуха подается тангенциально сбоку от горелок, позволяет также уменьшить избытки воздуха на начальных участках горелочной струи. Через 3-4 м с момента начала развития процесса горения, факел и третичный воздух смыкаются и происходит догорание коксового остатка частиц топлива. На котле ТП-85 Иркутской ТЭЦ-9 паропроизводительностью 420 т/ч успешно внедрена схема концентрического сжигания в сочетании с упрощенной схемой трехступенчатого сжигания, позволившая снизить выбросы  $\text{NO}_x$  с 1100 до 700  $\text{мг/м}^3$  (на 36 %) без заметного увеличения  $q_3$  и  $q_4$ .

3. Двухступенчатое сжигание. Часть воздуха (20-30 %) подается в топку выше основных горелок через специальные сопла (ступенчатость по вертикали). В зоне горелок образуется восстановительная атмосфера ( $\alpha''_{\text{св}} \leq 1,0$ ), в которой происходит восстановление образовавшихся на начальных участках факела оксидов азота. Смещение верхнего третичного дутья и продуктов сгорания топлива обеспечивают выгорание продуктов химического и механического недожога. Отсутствие продуктов химического недожога топлива в зоне горения, при наличии интенсивного массообмена, обеспечит низкий темп шлакования. Исследования показали, что эффективность снижения концентраций оксидов азота при двухступенчатом сжигании выше при времени пребывания пылегазового потока в восстановительной зоне факела до 1 секунды. Оптимальная величина доли третичного дутья при различном времени нахождения факела в восстановительной зоне и постоянном  $\alpha''_{\text{св}}$  составляет 0,25-0,35. Размыкание факела по вертикали обеспечивало снижение концентраций оксидов азота на 40 %.

Впервые схема двухступенчатого сжигания была реализована на котле паропроизводительностью 210 т/ч (Западно-Сибирская ТЭЦ, г. Новокузнецк) при сжигании каменного угля марки Г и промпродукта в тангенциальной топке.  $C_{\text{NO}_x}$  снизилась в 1,5 раза и составила 500-600  $\text{мг/м}^3$ . Шлакование и коррозия топочных экранов не наблюдались. Температура газов на выходе из топки увеличилась на  $40^\circ\text{C}$ .

4. Трехступенчатое сжигание, при котором часть топлива с недостатком кислорода вводится в топку выше основных горелок, восстанавливают их до атомарного кислорода. Воздух, необходимый для дожигания продуктов неполного сгорания, подается выше зоны восстановления.

Метод трехступенчатого сжигания пока не нашел широкого распространения в России, но отдельный опыт в энергетике имеется.

Таблица 1 – Эффективность технологических методов снижения оксидов азота

Наименование мероприятий	Снижение оксидов азота, %
Снижение общего коэффициента избытка воздуха	10-15
Отключение горелок	15-20
Горелки с низким выходом оксидов азота	20-30
Двухступенчатое сжигание	30-40
Рециркуляция газов	15-20
Трехступенчатое сжигание	40-50
Сочетание методов	50-80

### 3.1 Классификация технологических методов снижения выхода оксидов азота

Многообразие используемых в теплоэнергетике методов воздействия на выход оксидов азота определяет необходимость некоторой их классификации, что позволит выявить наиболее общие закономерности воздействия на процессы образования  $\text{NO}_x$ , определить оптимальные решения в рамках каждого отдельного метода. Классификация проводится по следующим признакам:

#### 1) Пространственные рамки воздействия.

Реализуемые на практике технологические методы подавления оксидов азота образуют три основные группы, различающиеся пространственными рамками воздействия на процесс образования оксидов азота:

- совершенствование исходных характеристик топлива до подачи в топку в т. ч. выносных аппаратах или встроенных системах (термохимическая предварительная обработка твердого топлива, мазута; диспергирование, измельчение топлива до оптимальных показателей);

- оптимизация начальной структуры факела за счет мероприятий, осуществляемых непосредственно в горелочных устройствах и формирующих, так называемые, малотоксичные горелки (разделение воздуха подаваемого в топку на ряд изолированных потоков – концентричных, плоскопараллельных; формирование определенного скоростного режима работы горелки; подача флегматизаторов – инертных дымовых газов; использование высококонцентрированной аэросмеси). Здесь процессы подавления окислов азота локализуются в начальном участке факела;

- внутритопочные мероприятия, охватывающие весь объем топочной камеры, они связаны с регулированием физико-химических, аэродинамических, теплообменных процессов в огромных по массе потоках топливо-воздушной смеси, высокотемпературных дымовых газов в обширном объеме топочной

камеры (ступенчатое сжигание с организацией восстановительных процессов; рециркуляция дымовых газов, инициирование процессов восстановления оксидов азота введением присадок – аммиак, карбонид; интенсификация теплоотвода от факела размещением дополнительных экранных поверхностей нагрева; организация центрального вихревого потока в топке - концентрическая система сжигания с тангенциальной установкой прямооточных горелок; снижение общего избытка воздуха в топке; предотвращение загрязнения и шлакования поверхностей нагрева).

## 2) Направленность воздействия.

Избирательный характер воздействия на каждый из основных механизмов образования оксидов азота – «воздушных», «топливных», «быстрых» позволяет выделить группы технологических методов давления оксидов азота по направленности воздействия:

- ограничение окисления связанного азота топлива – достигается затягиванием смесеобразования в начальном участке факела, позволяющим осуществить термическое разрушение связанного азота топлива и перевод его в молекулярный азот за счет недостатка окислителя (сжигание высококонцентрированной аэросмеси; сжигание основной части топлива с недостатком воздуха с последующим дожиганием продуктов неполного горения; поддержание скоростного режима горелки, соответствующего минимальному окислению азота топлива; предварительная термохимическая обработка топлива с выделением основной части связанного азота топлива в бескислородной среде);

- снижение степени окисления азота воздуха – обеспечивается снижением общего избытка в топке и в горелочном устройстве, температурного уровня процесса (ввод балластирующей инертной среды -дымовые рециркулирующие газы; впрыск влаги в факел; размещение дополнительных тепловоспринимающих экранных поверхностей -двухсветный экран, увеличение степени экранирования топки; снижение температуры горячего воздуха; растягивание процесса горения по высоте топочной камеры рассредоточением ввода воздуха);

- предотвращение образования «быстрых» оксидов азота – путем сокращения протяженности зоны горения и организации интенсивного охлаждения факела (интенсификация смесеобразования и выгорания в начальном участке факела на фоне пониженной температуры факела путем ввода инертной балластирующей среды – рециркулирующие дымовые газы, организацией микрофакельного процесса).

На этой ступени выделены в отдельные группы технологические методы воздействия на выход оксидов азота, различающиеся физико-химическим механизмом, на максимальное включение которого направлены соответствующие технологические приемы. Однако реализация одного из них всегда сопряжена с одновременным неизбежным проявлением (в различной мере) других механизмов. Поэтому на этой ступени классификация



технологических методов подавления оксидов азота в определенной мере условна.

3) Временное соотношение процессов подавления и образования оксидов азота.

Выделяются две основные группы технологических методов подавления оксидов азота, различающиеся относительным временем развития процессов подавления и образования оксидов азота:

- превентивные методы – предусматривают опережающее воздействие, в результате которого складываются неблагоприятные условия окисления азота воздуха и связанного азота топлива;

- восстановительные методы – используют процессы, следующие по времени за образованием оксидов азота; они непосредственно не влияют на генерацию оксидов азота и осуществляют подавление уже образовавшихся оксидов путем их восстановления в результате химических превращений в молекулярный азот в пределах топочной камеры или непосредственно на выходе из нее (трехступенчатое сжигание).

4) Условия реализации (режимные и конструктивные мероприятия).

Технологические методы подавления оксидов азота могут также классифицироваться по условиям их реализации:

- некоторые из них могут быть осуществлены путем определенного изменения режима эксплуатации котла (перераспределение воздуха и топлива между отдельными горелками, снижение общего избытка воздуха в топке, отключение части горелок по топливу) – эта группа относится к немногочисленным режимным мероприятиям по подавлению оксидов азота. Простота их реализации сочетается с ограниченной эффективностью, возможностью ухудшения технико-экономических показателей котла (режимные мероприятия);

- основная группа технологических мероприятий, позволяющих эффективно воздействовать на выход оксидов азота, требует для своей реализации конструктивного совершенствования топочно-горелочной системы котла (реконструктивные мероприятия),

5) Технологическая сущность.

В рамках каждой из указанных групп выделены конкретные технологические способы подавления оксидов азота в соответствии со своеобразием технологических и конструктивных признаков. Эта группа классификации соответствует наиболее распространенной в технической и методической литературе схеме разделения технологических методов подавления оксидов азота. Каждой группе методов соответствует обширный набор вариантов конкретного воплощения. Так, рециркуляция дымовых газов организуется вводом инертной среды в холодную воронку котла, через периферийные либо промежуточные каналы горелок, через специально организованные шлицы для ввода в топку дымовых газов, непосредственно в воздухопроводы до поступления воздуха в горелки. Множество вариантов воплощения имеет система ступенчатого сжигания (зонирование по

горизонтали либо вертикали, использование верхнего яруса горелок для сброса дожигательного воздуха, ввод избыточного воздуха помимо горелок ниже тарелочного пояса и др.). Многообразие этих вариантов определяется не только недостаточной осведомленностью разработчиков, но главным образом, стремлением учесть компоновочные и конструктивные ограничения, уменьшить затраты на реконструкцию, решать попутно с экологическими проблемами также чисто технологические задачи (повышение экономичности, надежности котла).

### **3.2 Методические принципы подавления оксидов азота**

Сложившиеся представления о механизме образования оксидов азота в топочных устройствах определяют основные подходы к разработке и выбору технологических методов их подавления:

1) Дифференцированный выбор средств воздействия на топочный процесс.

Исходным моментом в экологической рационализации топочного процесса является выявление тех отдельных его параметров, направленное воздействие на которые наиболее целесообразно в конкретных топочно-горелочных устройствах. Затем определяются оптимальные способы организации направленного воздействия на топочный процесс – конструктивное оформление, характер изменения режима работы топки (с учетом экологической и экономической эффективности, надежности оборудования и других конкретных обстоятельств).

В газомазутных котлах объектом воздействия превентивного характера являются процессы образования тепловых (воздушных) и быстрых оксидов. Мероприятия по подавлению оксидов азота должны обеспечивать снижение температурного уровня топочного процесса, сокращение времени выгорания и пребывания топливо-воздушной смеси и продуктов сжигания в зоне активного горения (ЗАГ), выравнивание температурного поля в сечении топочной камеры, снижение тепло напряженности в горелочном поясе и в объеме ЗАГ.

Внутритопочные мероприятия, обеспечивающие снижение выхода оксидов азота при факельном сжигании твердого топлива, ориентированы на ограничение образования топливных оксидов. Здесь наиболее существенным параметром топочного процесса является избыток воздуха в начальном участке факела - зоне термического разрушения азотосодержащих оксидов азота в факеле. Высокотемпературное сжигание твердого топлива (температура факела выше 1500°C), характерное особенно для пылеугольных котлов с жидким шлакоудалением, приводит также к образованию воздушных оксидов. В этом случае для ограничения выхода оксидов азота целесообразны также мероприятия, отмеченные выше для газомазутных котлов.

Эффективность воздействия на процесс конверсии азота топлива при низкотемпературном факельном и слоевом (кипящий, циркулирующий слой) сжигании зависит от:

- содержания связанного азота в топливе;
- вида и термической устойчивости азотосодержащих соединений;
- фактической степени перехода азота топлива в оксиды азота в исходной конструкции.

Дифференцированный выбор технологических способов воздействия на образования оксидов азота в зависимости от преобладания того или иного механизма образования  $\text{NO}_x$  с учетом специфики сжигаемого топлива и конструктивных особенностей котла, топочно-горелочного устройства позволяет определить не только наиболее экологически эффективные решения для конкретных условий, но также обеспечить при этом минимальные капитальные и эксплуатационные затраты.

Набор конкретных технологических решений по снижению выхода оксидов азота может быть определен следующим образом:

- Котлы на природном газе – рециркуляция дымовых газов; ступенчатое сжигание; двухканальные горелки; предельное сокращение зоны горения (особенно, начального участка); снижение избытка воздуха; температуры
- Котлы на твердом топливе – горелки двухканальные по вторичному воздуху, с расщеплением потока аэросмеси; горелки со встроенным узлом термообработки угольной пыли непосредственно в полости горелки; тангенциальная установка горелок в топочной камере; двух и трехступенчатое сжигание; подача в топку высококонцентрированной аэросмеси.

- Котлы на мазуте – сжигание водомазутной эмульсии с использованием диспергатора; рециркуляция дымовых газов.

## 2) Комбинация ряда технологических методов.

Значительный эффект по снижению выбросов оксидов азота достигается в том случае, если на котле одновременно внедряются сразу несколько технологических методов подавления оксидов азота, воздействующих на различные механизмы образования  $\text{NO}_x$ . Это обеспечит независимость воздействия каждого мероприятия и сложение эффектов подавления оксидов азота, свойственных каждому из них. Примером такого комплексного воздействия может служить блок мероприятий по снижению выбросов оксидов азота на котлах типа П-57 (блоки 500 МВт, экибастузский уголь):

- а) поддержание оптимального скоростного режима работы горелок (равенство импульсов потоков аэросмеси и вторичного воздуха) – замедленное смесеобразование, снижение концентрации кислорода в корне факела;

- б) изменение избытка воздуха в горелках верхнего яруса, сброс избыточного воздуха через сопла над горелками верхнего яруса обеспечивают нестехиометрическое сжигание за счет снижения концентрации свободного кислорода; понижение температуры факела на 100 – 120°C; создание зоны с восстановительной средой.

При одновременном использовании на котле различных методов подавления оксидов азота отмечается сложение эффектов, проявляющихся при раздельном их применении – ступенчатое сжигание и рециркуляция, впрыск воды в факел и рециркуляция. Реконструкция котла ТГМП-114 блока 300 МВт

Среднеуральской ГРЭС - характерный пример успешной комплексной реализации воздухоохраных мероприятий: замена горелок новыми малотоксичными горелками ВТИ-ХФ ЦК5; организация ступенчатого сжигания (выполнено восемь шлицев вторичного дутья на фронтальной и задней стенками над горелками – 25% общего расхода воздуха); ввод газов рециркуляции через горелки. Здесь достигнуто снижение выхода оксидов азота на 90%.

3) Сочетание мероприятий экологического и технологического характера.

В большом числе случаев снижение выбросов оксидов азота совмещается с решением иных технологических задач (повышение устойчивости горения, надежности и стабильности работы оборудования, улучшение технико-экономических показателей):

- сжигание ПВК (предотвращение износа пылепроводов, улучшение схода жидкого шлака, повышение устойчивости горения при сжигании топлива ухудшенного и нестабильного качества);

- рециркуляция дымовых газов (выравнивание поля температур в сечении топочной камеры на выходе, регулирование температуры перегрева пара);

- минимизация избытка воздуха (снижение затрат на тягу и дутье, предотвращение низкотемпературной коррозии);

- нижнее дутье с вводом части воздуха через холодную воронку (предотвращение сепарации пыли);

- уменьшение присосов в топку и последующий газовый тракт.

4) Учет возможности и предотвращение побочных негативных воздействий на надежность оборудования.

Ряд используемых мероприятий может оказать в определенных условиях негативное влияние на надежность оборудования:

- ступенчатое сжигание – повышение температуры металла пароперегревателя; высокотемпературная коррозия экранных труб;

- снижение общего избытка воздуха в топке – сажеобразование при сжигании природного газа, шлакование.

Поэтому при разработке технической документации по реконструкции котла с уменьшением выбросов оксидов азота, при последующей наладке необходимо принимать меры по предотвращению снижения надежности котла и обеспечивать тщательный контроль состояния оборудования. Часть указанных последствий можно уверенно прогнозировать, используя расчетные методы – температуру факела и дымовых газов на выходе из топки, тепловосприятие экранных поверхностей, температура перегрева (первичного и вторичного). Это позволит заблаговременно принять необходимые решения, например, изменение пароперегревателя, пароохладителя, системы впрысков. Указанные проблемы могут быть сняты путем одновременного изменения режима работы топки, ослабляющего нежелательное воздействие внедряемых технологических методов, например, снижение избытка воздуха в горелках, уплотнение топочной камеры.

5) Ограничение негативного влияния на КПД котла.

Существенно различно влияние различных методов подавления  $\text{NO}_x$  на технико-экономические показатели котлов. В ряде случаев достигается одновременное улучшение экологических и экономических показателей – сжигание высококонцентрированной аэросмеси, минимизация избытка воздуха, высокотемпературный подогрев топлив, снижение присосов в топку. Однако использование большей части методов воздействия на выход  $\text{NO}_x$  связано с ухудшением технико-экономических показателей, неадекватным их эффективностью. Снижение КПД котла при ступенчатом сжигании до 0,3%; рециркуляции дымовых газов – до 0,2%; вводе влаги в топку – до 0,5%. Поэтому перевод котла в режим работы с уменьшением выбросов оксидов азота (с использованием режимных либо реконструктивных мероприятий) предполагает в качестве исходного условия осуществление ремонтно-восстановительных и реконструктивных работ по обеспечению нормативных требований по плотности топочной камеры и конвективного газохода, пароохладителей, равномерности распределения топлива и воздуха по горелкам, соблюдению расчетного качества и подготовки топлива, избытка воздуха в топке, а также реконструктивных работ, направленных на повышение экономичности котла (в частности, использование низкопотенциальных теплообменников), что позволит компенсировать снижение КПД котла в результате внедрения воздухоохраных мероприятий.

6) Оптимизация состояния и режима эксплуатации котла.

Эффективность методов подавления  $\text{NO}_x$  зависит в определенной степени от состояния котельного агрегата, режима его эксплуатации:

- со снижением общего избытка воздуха в топке увеличивается эффект применения ступенчатого сжигания, рециркуляции дымовых газов;

- при повышении плотности топки и газового тракта более эффективной становится рециркуляция дымовых газов.

7) Учет свойств и режима сжигания различных топлив.

При попеременном сжигании на котле различных видов топлива подавление оксидов азота может осуществляться на основе универсального решения (равно приемлемого и эффективного для режима работы котла на всех используемых видов топлива) либо использованием специфических для отдельных видов топлива приемов воздействия на выход оксидов азота. Так, для котла с пылегазовыми горелками возможны, например, два подхода:

- ступенчатое сжигание в режимах совместного использования угля и природного газа;

- использование пыли высокой концентрации, подогрева пыли при работе на угле и нестехиометрического сжигания (перераспределения топлива, воздуха между отдельными горелками) природного газа (попеременное сжигание этих топлив).

В первом случае упрощается эксплуатационное обслуживание, отпадает необходимость ряда технологических операций при переходе от одного вида топлива к другому. Во втором случае возможна большая эффективность воздействия на выход оксидов азота, поскольку здесь можно в большей мере

учесть специфические условия образования и подавления оксидов азота для каждого вида топлива. Если обычные методы совместного сжигания угля и природного газа (работа части горелок на угле, части - на газе; подсветка основного пылеугольного факела природным газом подачей его непосредственно через пылеугольные горелки, оснащенные газораздающими устройствами) приводят к увеличенному (по сравнению с работой на угле) выходу оксидов азота, то экологически эффективными способами одновременного сжигания этих топлив является использование природного газа для получения восстановительной среды в режиме трехступенчатого сжигания угля (расход газа до 20-25%), для предварительного подогрева угля непосредственно перед подачей в топку. В отмеченных случаях достигается снижение выхода оксидов азота на 50-60% до уровня, приближающегося к показателям для работы котла на природном газе. Таким образом, свойства природного газа позволяют при оптимальном его использовании в режиме совместного сжигания существенно улучшить экологичность энергопроизводства на основе угля.

В целом, выбор рассмотренных подходов индивидуален для конкретных условий, определяющим при этом является суммарный эколого-экономический эффект.

8) Предпочтительность локального воздействия, сосредоточенного в начальном участке факела – основной зоны генерации топливных, воздушных и быстрых оксидов азота.

Локализация управляемых процессов подавления оксидов азота в начальном участке факела упрощает их конструктивное обеспечение и делает более эффективным направленное воздействие по сравнению с аэродинамическими, физико-химическим, теплообменными процессами в объеме топочной камеры. Практика показала, что создание малотоксичных горелок (в том числе, получаемых реконструкцией существующих горелочных устройств) -наименее затратный метод глубокого воздействия на выход  $\text{NO}_x$ . Это связано не только с ограниченным объемом реконструкции котлоагрегата для достижения заданного эффекта по подавлению  $\text{NO}_x$ , но также возможностью тщательной отработки таких методов на моделях в условиях горячих опытных стендов. Локализация механизмов воздействия на выход  $\text{NO}_x$  позволяет избежать ряда негативных побочных явлений, свойственных ступенчатому сжиганию и другим общетопочным процессам (коррозия металла поверхностей нагрева в восстановительной среде, перераспределение тепловосприятости по высоте топочной камеры, недожог и др.).

### 3.3 Перспективность использования канско-ачинских углей

Одной из перспективных задач теплоэнергетики является широкое использование углей Канско-Ачинского бассейна – самого дешевого топлива в нашей стране. Угольный бассейн является безусловным лидером в России по запасам, соответствующим мировым кондициям и наряду с Кузбассом является основой энергетической безопасности России. Обеспечение растущей потребности в угле может быть обеспечено, в основном, за счет предприятий открытого способа добычи в Канско-Ачинском бассейне и в Кузбассе. Основной прирост потребности в энергетических углях будет приходиться на электроэнергетику, а реальным источником его обеспечения может стать только канско-ачинский уголь.

В настоящее время Ирша-Бородинское месторождение является основной топливной базой для некоторых действующих ТЭС Красноярского края.

Существует опасность загрязнения воздуха, связанная с процессами сжигания топлива на тепловых электрических станциях и в котельных. Это привело к тому, что дальнейшее развитие теплоэнергетики, как в России, так и за рубежом в значительной степени определяется экологическими требованиями.

Крупнейшими загрязнителями атмосферы являются продукты сгорания тепловых электрических станций и котельных. Так, при сжигании органических топлив в атмосферу с дымовыми газами котлов попадает большое количество токсичных веществ, таких как оксиды азота и серы, зола и т.д. В настоящее время в теплоэнергетике России доля природного газа и мазута составляет более 73% от всего сжигаемого органического топлива, причем в крупных промышленных городах европейской части России доля природного газа и мазута в топливном балансе приближается к 100%.

Обоснование положения о перспективности использования углей Канско-Ачинского бассейна исходит из сравнительной оценки их качественных показателей с углями других бассейнов с учетом выбросов, приходящихся на единицу сожженного условного топлива. В этом смысле бурые угли Канско-Ачинского бассейна обладают несомненными преимуществами. Так, приземная концентрация серы на уровне ниже 0,5 ПДК и лучшие показатели по выбросам оксидов азота обеспечиваются при сжигании только канско-ачинских углей. Выбросы золы при условии применения на электростанциях электрофильтров с эффективностью очистки 97,5-98,0% для углей действующих разрезов бассейна не превышают нормативы удельных выбросов в соответствии с установленными требованиями. Концентрации токсичных элементов в канско-ачинских углях находятся на уровне 0,1-0,2 потенциально опасных концентраций и значительно ниже, чем в углях других бассейнов. Низкое содержание золы в углях бассейна предопределяет возможности сокращения площадей золоотвалов на ТЭС и снижение скорости их заполнения. Затраты на размол канско-ачинских углей ниже, чем для других бурых углей.

Результаты исследований и длительный опыт сжигания канско-ачинских углей в топочных камерах различных конструкций показывают, что наилучшие результаты, с точки зрения обеспечения бесшлаковочной работы, достигаются при использовании низкотемпературных топочных устройств с вихревой аэродинамикой факела. По снижению образования оксидов азота и серы при сжигании высокорекреакционных канско-ачинских углей значительный эффект может быть получен за счет организации ступенчатого сжигания угольной пыли.

В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

- разработать методики рационального подхода селективности излучения с выявлением особенностей радиационного теплообмена;
- выбор наиболее благоприятных конструктивных и режимных параметров сжигания для обеспечения наиболее «чистых» условий работы;
- разработать режимные и конструктивные мероприятия по повышению надежности экранов и конвективных пакетов в реальных условиях эксплуатации (проверить надежность при повышенных нагрузках до 120% с определением температурных разверок и запасов по поверхностному кипению).

### **3.3.1 Особенности применения методов снижения оксидов азота при сжигании канско-ачинских углей**

Длительный опыт использования и результаты исследований канско-ачинских углей показывают, что особенности поведения их органического и минерального состава в топочном процессе являются определяющими факторами при выборе технологии, обеспечивающей высокую эффективность их сжигания.

Канско-ачинские угли характеризуются умеренной влажностью – до 38 %, низким содержанием серы – до 0,6 % и зольности – до 12 %.

Зола углей канско-ачинского бассейна отличается по составу от золы большинства других бурых и каменных углей повышенным содержанием окиси кальция (до 60 %). Химический состав золы сильно зависит от зольности угля. Эта закономерность характерна для всех месторождений Канско-Ачинского бассейна. С уменьшением зольности топлива в золе увеличивается содержание CaO при соответствующем снижении SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. поэтому поведение минеральной части КАУ в топочном процессе сильно меняется с изменением зольности в достаточно узком диапазоне (5-16 %). Это обстоятельство оказывает существенную роль на выбор способа сжигания. Специфический состав минеральной части, ее распределение между внутренней и внешней золой обуславливают высокие шлакующие свойства КАУ. Высокое содержание CaO в золе вызывает образование на поверхностях нагрева прочных сульфатносвязанных отложений. Кроме того, селективное выделение железосодержащих компонентов обуславливает формирование прочных первичных железистых отложений с содержанием оксидов железа до 35-80 % в зависимости от условий сжигания.



Шлакование связано с осаждением на топочные экраны частиц золы различного фракционного и минерального состава, часть из которых вследствие оплавления при высокой температуре топочных газов обладает повышенной адгезией. По мере роста толщины отложений поверхностный слой на стенке может оплавляться и интенсифицировать процесс шлакования - на стенке закрепляется уже не часть, а практически все соударяющиеся с ней частицы. В результате образуются шлаковые отложения, которые ухудшают параметры теплообмена между топочной средой и поверхностями нагрева. При их обрушении повреждаются трубы холодной воронки топки и шнеки системы твердого шлакоудаления. Рост температуры газов на выходе из топки может привести к увеличению загрязнения конвективных поверхностей нагрева и снижению экономичности котла. Чтобы предотвратить эти нежелательные последствия обычно стремятся снизить падающие тепловые потоки и температуры газов в топке и сократить их неравномерность вблизи топочных экранов. Для этого необходимо уметь рассчитывать изменение температуры газов в объеме топочной камеры и распределение воспринятых и падающих тепловых потоков по площади стен.

Для бесшлаковочной работы зоны активного горения необходимо, прежде всего, обеспечить в ней оптимальные температурные условия. Температурный режим должен обеспечивать надежное воспламенение, стабильное горение и высокую степень выгорания топлива. В то же время необходима умеренная температура в зоне активного горения для исключения интенсивного шлакования топочных экранов

Шлакование топочных экранов резко интенсифицируется при попадании на них горящих частиц угольной пыли. С повышением температуры газов возрастает интенсивность образования и прочность вторичных отложений. Для сильношлакующих КАУ получило развитие сжигание их в низкотемпературных тангенциальных топках с твердым шлакоудалением (БКЗ-500-140-1, П-67). Это единственные котлы, способные надежно сжигать березовский уголь, самый неблагоприятный с точки зрения шлакования. Многолетние исследования и опыт эксплуатации позволили сформулировать основные принципы организации топочного процесса и реализации метода ступенчатого сжигания, обеспечивающие по условиям шлакования надежную и эффективную работу котлов при сжигании КАУ:

- теплонепряжение сечения топки общее, на ярус горелок, лучистой поверхности экранов в зоне активного горения и температуры газов на выходе из зоны активного горения не должны превышать соответственно:  $q_F=3,0-3,5$  Гкал/(м<sup>2</sup> ч),  $q_{Fар}=1,0$  Гкал/(м<sup>2</sup> ч),  $q_{ЛГЭ}=1,0$  Гкал/(м<sup>2</sup> ч), максимальная температура в зоне активного горения  $v_{aa}=1250-1300^{\circ}\text{C}$ ;

- температура газов перед плотными конвективными пучками не должна превышать  $900^{\circ}\text{C}$ ;

- обеспечить необходимую расчетную высоту зоны догорания с оптимальной компоновкой сопел верхнего третичного дутья;

- применять горелки, обеспечивающие эффективное воспламенение и горение летучих в условиях недостатка кислорода с последующим его подводом через каналы горелки и сопла третичного дутья в зоне горелок. Воздушные струи последних будут одновременно играть роль защитных завес у экранов и обеспечивать вблизи экранов окислительную среду;
- стабильное распределение угольной пыли, как по отдельным горелкам, так и в пределах самой горелки;
- аэродинамика топки должна обеспечивать эффективный массообмен при отсутствии наброса факела на топочные экраны, исключать появление возле них зон с восстановительной газовой средой;
- применение эффективных средств очистки топочных экранов (водяная).

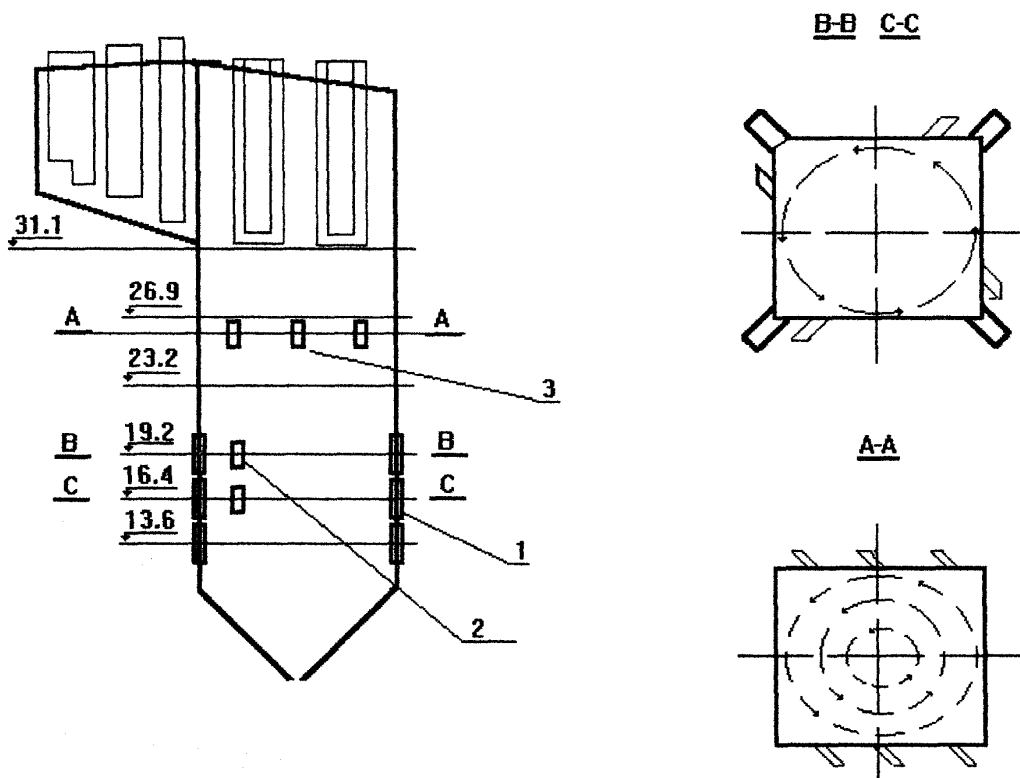
### **3.4 Предложения по организации топочного процесса котла производительностью 500 т/ч с двухступенчатым сжиганием**

Разработаны решения по схеме двухступенчатого сжигания для котла Е-500 угольной теплоэлектростанции с улучшенными экологическими показателями, предназначенного для работы на бородинском и березовском углях Канско-Ачинского бассейна. Подача воздуха в топку осуществляется ступенчато – через горелочные устройства, а также через тангенциальные сопла на отметках второго и третьего ярусов горелок (ступенчатость по горизонтали) и над третьим ярусом горелок (ступенчатость по вертикали). Пылесистема прямого вдувания с четырьмя мельницами-вентиляторами МВ-2700/800/510 и газовой сушкой топлива.

Принципиальная схема двухступенчатого сжигания для котла БКЗ-500-140-1 предлагается на рисунке 1. Сохраняются основные достоинства котла – газовая сушка и размол топлива в мельницах-вентиляторах, тангенциальное многоярусное расположение прямооточных горелок. В горелки 1, 2 и 3 ярусов топливо распределяется равномерно.

Для уменьшения образования оксидов азота на начальном участке горелочной струи организована подача до 12 % горячего воздуха (от теоретически необходимого) помимо горелок через специальные боковые сопла третичного дутья на отметках горелок 2 и 3 ярусов (ступенчатость по горизонтали). Направление продольных осей основных горелок и боковых воздушных сопел выбрано таким образом, чтобы обеспечить слияние горелочных струй и воздуха боковых сопел на расстоянии 4-5 калибра от среза горелки. В этом случае оси боковых сопел должны быть направлены по касательной к воображаемой окружности диаметром 3 метра.

Выше третьего яруса горелок устанавливается группа тангенциальных сопел верхнего третичного дутья с подачей в них 15 % воздуха (от теоретически необходимого) с круткой противоположной направлению вращения основного потока газов относительно вертикальной оси топки. Противоположная крутка необходима для интенсификации массообмена и дожигания продуктов неполного горения.



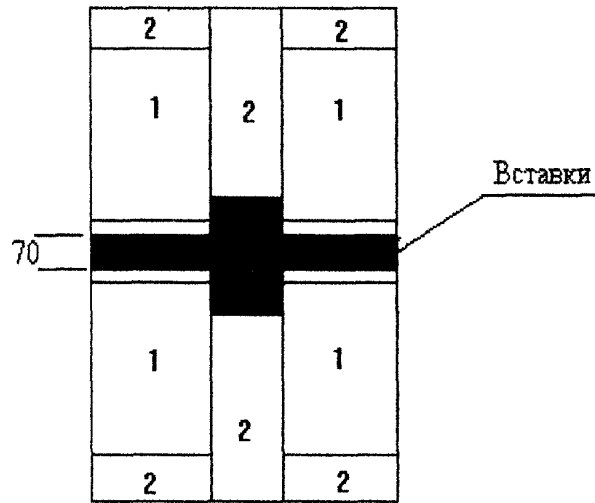
1 – горелки; 2 – сопла дутья в зоне горелок; 3 – сопла верхнего третичного дутья

Рисунок 1 - Схема двухступенчатого сжигания

Для организации равномерного распределения вторичного воздуха по горелкам, отбор воздуха на сопла верхнего третичного дутья осуществляется из переключек, смонтированных между коробами на выходе из воздухоподогревателя.

С целью снижения интенсивности шлакования, как показали исследования котла Е-500, необходима дополнительная подача в зону горения газов рециркуляции. В связи с этим предусмотрена подача до 10 % газов рециркуляции в топку через каналы вторичного воздуха основных горелок.

Горелочные устройства котла Е-500 ТЭС обеспечивают эффективное воспламенение топлива, поэтому конструкция горелок не изменяется. В связи с тем, что 27 % вторичного воздуха отводится из горелок и для сохранения скорости на выходе из горелок  $W_2=35$  м/с, сечение каналов вторичного воздуха уменьшается за счет установки вставок (см. рисунок 2).



1 – каналы аэросмеси; 2 – каналы вторичного воздуха

Рисунок 2 – Горелка котла

Таблица 2 – Выбросы загрязняющих веществ до и после мероприятия

Наименование источника выделения загрязняющих веществ	Наименование источника выброса загрязняющих веществ	Наименование загрязняющих веществ	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Выбросы загрязняющих веществ				Класс опасности
				до мероприятия		после мероприятия		
				г/с	т/г	г/с	т/г	
котельные агрегаты: 3 котла БКЗ-420-140, 1 котел БКЗ-500-140	дымовая труба №1	Диоксид азота	0,2	245,9631	3664,0462	226,2860	3370,9230	3
		Оксид азота	0,4	39,9632	595,3106	36,7661	547,6863	3
		Диоксид серы	0,5	534,2840	6852,3732	534,2840	6852,3732	3
		Оксид углерода	5,0	45,8621	695,4618	45,8621	695,4618	4
		Мазутная зола в пересчете на ванадий	0,002	0,3311	0,0664	0,3311	0,0664	2
		Пыль неорганическая 20-70% SiO <sub>2</sub>	0,3	137,8020	1433,3861	137,8020	1433,3861	3

#### 4 Проведение расчета рассеивания выбросов оксидов азота в атмосферном воздухе до и после мероприятия

Расчет максимальных приземных концентраций производится согласно «Методике расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86».

Степень опасности загрязнения атмосферного воздуха характеризуется наибольшим рассчитанным значением концентрации, соответствующим неблагоприятным метеорологическим условиям, в том числе опасной скорости ветра. Расчет концентрации вредных веществ, претерпевающих полностью или частично химические превращения (трансформацию) в более вредные вещества, проводится по каждому исходному и образующемуся веществу отдельно. Расчетами определяются разовые концентрации, относящиеся к 20 – 30-минутному интервалу осреднения.

В таблице 3 приведены параметры выбросов примесей для расчета рассеивания.

Таблица 3 – Параметры выбросов примесей для расчета рассеивания

Наименование источника выброса вредных веществ	Количество, шт	Высота источника выброса, м	Диаметр устья, м	Параметры газовой смеси на выходе		
				скорость, м/с	объем, м <sup>3</sup> /с	температура, °С
Дымовая труба	1	180,0	7,2	25,789	1050,0	140,0

Таблица 4 – Метрологические характеристики и коэффициенты, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ

Наименование характеристик	Обозначение	Величина
Коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы	A	200
Коэффициент рельефа местности	N	1,3
Средняя температура наружного воздуха наиболее жаркого месяца, °С	T <sub>нар(ж)</sub>	+24,4
Средняя температура наружного воздуха самого холодного месяца, °С	T <sub>нар(х)</sub>	-16,5
Скорость ветра, повторяемость превышения которой составляет 5 %	U*	6,7

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества C<sub>м</sub>, мг/м<sup>3</sup>, при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем достигается при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии X<sub>м</sub>, м, от источника и определяется по формуле:

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}} \quad (4.1)$$

где A – коэффициент температурной стратификации атмосферы;

$M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;

$m$  и  $n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса;

$H$  – высота источника выброса над уровнем земли, м;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

$\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси  $T_r$  и температурой окружающего воздуха  $T_b$ , °C;

$V_1$  – расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с, определяемый по формуле

$$V_1 = (\pi D^2 / 4) \cdot \omega_0, \quad (4.2)$$

$$V_1 = (3,14 \cdot 180^2 / 4) \cdot 25,789 = 1050,0$$

где  $D$  – диаметр устья источника выброса, м;

$\omega_0$  – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с.

Значения коэффициентов  $m$  и  $n$  определяются в зависимости от параметров  $f$ ,  $v_m$ ,  $v'_m$  и  $f_e$ .

$$f = 1000 (\omega_0^2 D / H^2 \Delta T), \quad (4.3)$$

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{V_1 \Delta T / H}, \quad (4.4)$$

$$v'_m = 1,3 (\omega_0 D / H), \quad (4.5)$$

$$f_e = 800 (v'_m)^3. \quad (4.6)$$

$$f = 1000 \cdot (25,789^2 \cdot 7,2 / 180^2 \cdot 115,6) = 1,278$$

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{1050 \cdot 115,6 / 180} = 5,7$$

$$v'_m = 1,3 \cdot (25,789 \cdot 7,2 / 180) = 1,34$$

$$f_e = 800 \cdot (1,34)^3 = 1924,88$$

Коэффициент  $m$  определяется в зависимости от  $f$  по формуле

$$m = 1 / (0,67 + 0,1 \sqrt{f} + 0,34 \sqrt[3]{f}). \quad (4.7)$$

$$m = 1 / (0,67 + 0,11 + 0,37) = 0,87$$

Расстояние  $X_m$ , м, от источника выбросов, на котором приземная концентрация  $C$ , мг/м<sup>3</sup>, при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения  $C_m$  определяется по формуле

$$X_m = (5 - F) / 4 \cdot d \cdot H, \quad (4.8)$$

$$X_m = (5 - 2) / 4 \cdot 21,8 \cdot 180 = 2943$$

где коэффициент  $d$  при  $f < 100$  находится по формуле

$$d = 7 \sqrt{v_i} (1 + 0,28 \sqrt[3]{f}), \text{ при } v_m \geq 2. \quad (4.9)$$

$$d = 16,73 \cdot (1 + 0,28 \cdot 1,09) = 21,8$$

Концентрация оксидов азота на различных расстояниях  $X$ , м от источника выброса в атмосферу по оси факела выброса при опасной скорости ветра по формуле

$$C = S_1 \cdot C_m, \quad (4.10)$$

Коэффициент  $S_1$  – безразмерный коэффициент, определяется в зависимости от отношения  $X/X_m$  для расстояния  $X$ .

$$S_1 = 3(X/X_m)^4 - 8(X/X_m)^3 + 6(X/X_m)^2, \text{ при } X/X_m \leq 1; \quad (4.11)$$

$$\text{При } X = 500 \text{ м, } S_1 = 3 \cdot 0,17^4 - 8 \cdot 0,17^3 + 6 \cdot 0,17^2 = 0,13;$$

$$\text{При } X = 800 \text{ м, } S_1 = 3 \cdot 0,27^4 - 8 \cdot 0,27^3 + 6 \cdot 0,27^2 = 0,29.$$

В результате расчета загрязнения атмосферы получены максимально разовые концентрации оксидов азота в приземном слое атмосферы, создаваемые выбросами предприятия при опасных скоростях ветра, определены расстояния, на котором они достигаются. Результаты расчета рассеивания представлены в таблице 5.



Таблица 5 – Расчет загрязнения атмосферного воздуха источниками выбросов вредных веществ от котельного цеха ТЭЦ-2

Наименование вещества	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	До мероприятия						После мероприятия					
		Приземная концентрация на границе СЗЗ, (500м)		Приземная концентрация на границе жилой зоны, (800м)		Максимальная приземная концентрация, (X <sub>м</sub> =2943м)		Приземная концентрация на границе СЗЗ, (500м)		Приземная концентрация на границе жилой зоны, (800м)		Максимальная приземная концентрация, (X <sub>м</sub> =2943м)	
		мг/м <sup>3</sup>	в долях ПДК (с учетом фона)	мг/м <sup>3</sup>	в долях ПДК (с учетом фона)	мг/м <sup>3</sup>	в долях ПДК (с учетом фона)	мг/м <sup>3</sup>	в долях ПДК (с учетом фона)	мг/м <sup>3</sup>	в долях ПДК (с учетом фона)	мг/м <sup>3</sup>	в долях ПДК (с учетом фона)
Диоксид азота	0,2	0,009	0,65	0,020	0,70	0,069	0,95	0,002	0,60	0,011	0,64	0,052	0,86
Оксид азота	0,4	0,003	0,18	0,004	0,19	0,013	0,22	0,001	0,16	0,002	0,17	0,010	0,20

## 5 Исследование режимов сжигания топлива в топке котла Е-500

Проводимая в настоящее время реструктуризация энергетики направлена на повышение показателей эффективности работы тепловых электрических станций. Значительный резерв, обеспечивающий их достижение, связан с совершенствованием режимов сжигания топлива. По сравнению с совершенствованием конструктивных элементов при реконструкции или модернизации этот путь выглядит менее революционным, но зачастую оказывается более перспективным. Это обусловлено следующими причинами. Во-первых, не требуется значительных капиталовложений. Во-вторых, внедрение подобных технических решений проводится на действующем агрегате без вывода в холодный останов. В-третьих, риск в случае получения отрицательного результата отсутствует, поскольку всегда имеется возможность вернуться к прежнему режиму эксплуатации. И последнее, протекающие в элементах котельного оборудования процессы слишком сложны и противоречивы, и поэтому, довольно часто, из множества взаимосвязанных характеристик и показателей не удается выделить главную составляющую этих процессов, ради которой производится то или иное конструктивное изменение. Следствием этого являются новые существенные недостатки, которые проявляются в совершенно неожиданных местах при эксплуатации и сводят к минимуму положительные аспекты проведенных работ.

В свою очередь, необходимость проведения экспериментальных и расчетных исследований с целью совершенствования режимов работы котлоагрегата обусловлена объективными обстоятельствами, которые сопровождают их разработку. Известно, что основные параметры будущей эксплуатации находятся в ходе балансовых испытаний и отражаются в режимных картах. Такие мероприятия не носят детальный характер, а в результате определяются общие характеристики режима для сжигания угля известного состава в интервале диапазона допустимых нагрузок котла. Например, в системе штатного управления устанавливается положение регуляторов прямо или косвенно отражающих расходы топлива, воздуха, газов рециркуляции и других компонентов направляемых в топочную камеру. Однако, в зависимости от конкретных условий эти расходы могут распределяться в неравных долях между ярусами горелок, отдельными горелочными блоками, дополнительными соплами, что даст возможность более тонко воздействовать на управляемый процесс с целью достижения наилучших показателей.

Другие недостатки эксплуатации являются объективным следствием того, что балансовые испытания производятся в относительно короткий промежуток времени, а такие негативные процессы как коррозия металла, загрязнение и шлакование поверхностей нагрева, рост внутритрубных отложений и другие растянуты во времени и динамика их протекания не находит прямого отражения при разработке режимных параметров. Поэтому они либо не учитываются совсем, либо учет происходит с большим запасом, что, в свою очередь, приводит к нарушениям. Например, включение аппаратов очистки вне

зависимости от реального наличия шлакозольных отложений, места их расположения вызывает снижение механических свойств металла труб экранов и ширм от термоциклических нагрузок. Отсюда появление свищей и снижение срока службы.

Следует отметить, что с течением времени технические характеристики основного и вспомогательного оборудования меняются. Это связано с износом, поломками, заменой одних деталей другими. Такие изменения не вызывают каких-либо корректировок в режимных картах, а оперативным персоналом учитываются только в случаях выявления очевидного негативного влияния на ход производственного процесса.

Перечисленные причины послужили основанием для проведения экспериментальных исследований режимов сжигания топлива в топочной камере котла Е-500 теплоэлектростанции.

На рисунках 3, 4 показано распределение температуры газов в топке котла у экранов и в центральном сечении до и после мероприятия.

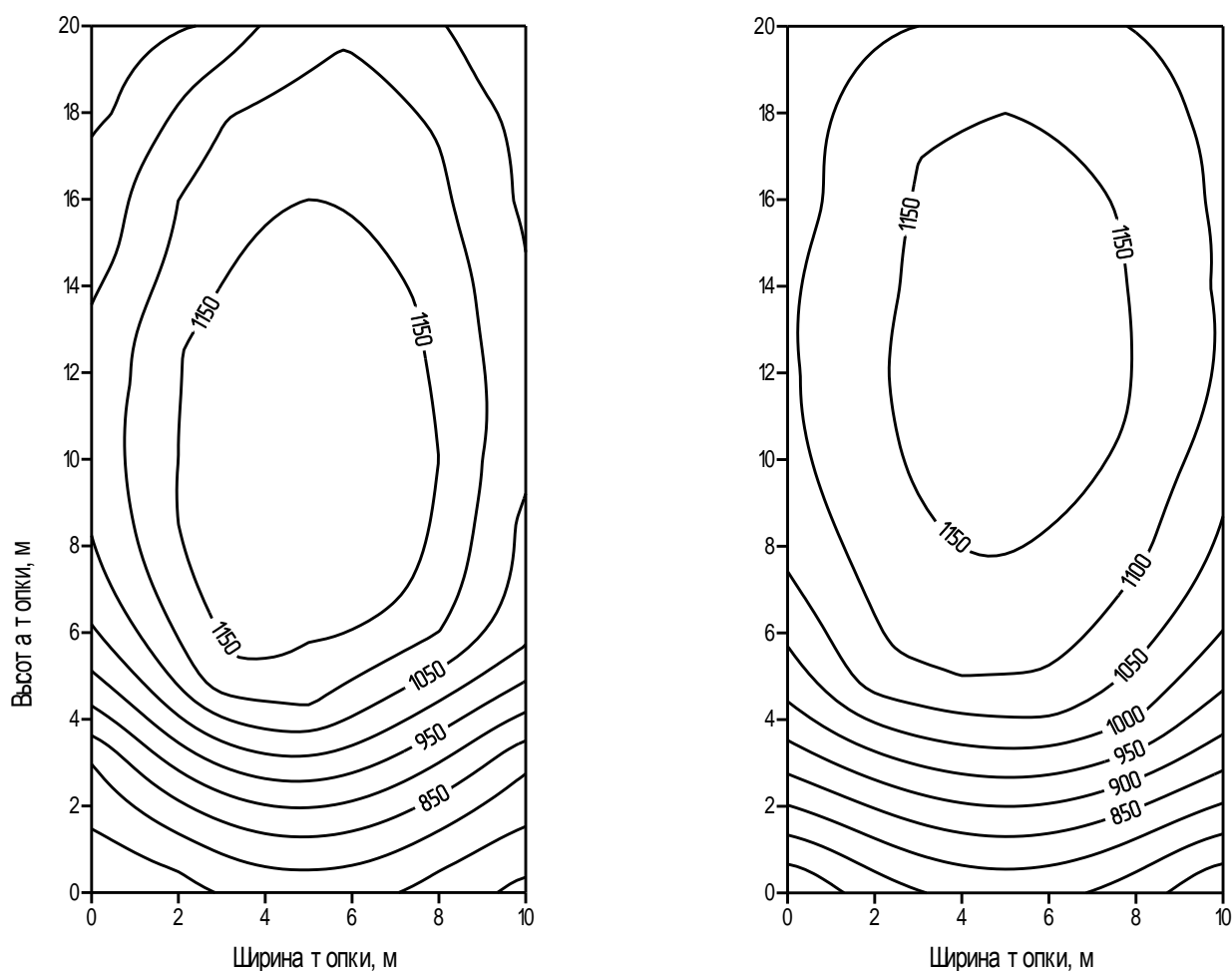


Рисунок 3 – Распределение температуры газов в топке котла до и после мероприятия (у экранов)

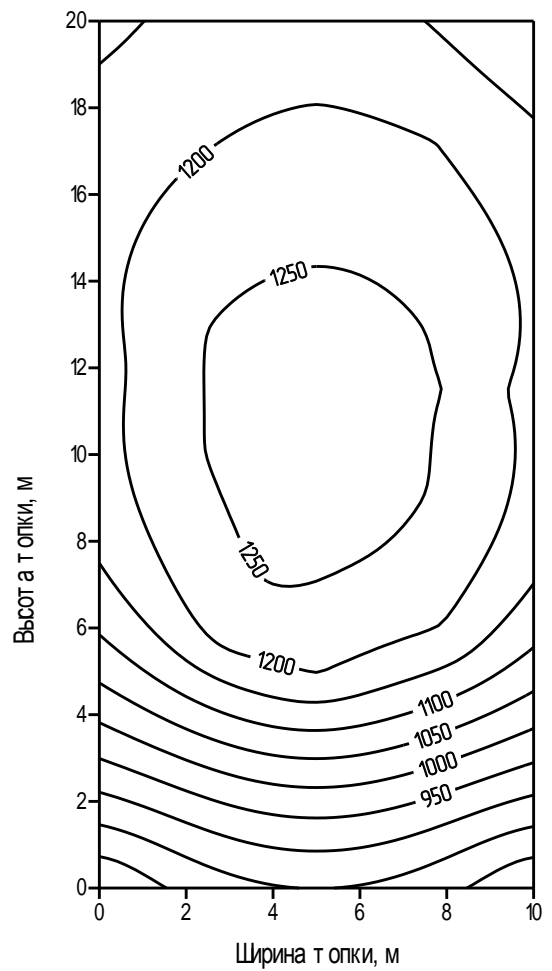
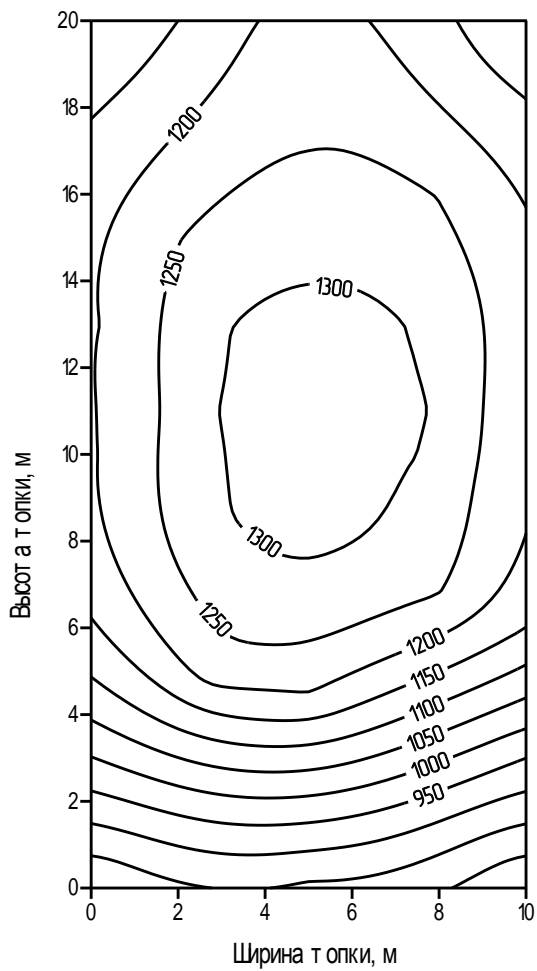


Рисунок 4 – Распределение температуры газов в топке котла до и после мероприятия (центральное сечение)

## 6 Экономическая часть

### 6.1 Оценка величины предотвращенного экологического ущерба

Ущерб – фактические или возможные потери, возникающие в результате каких-либо событий или явлений, в частности негативных изменений в природной среде вследствие антропогенного воздействия.

По основному характеру проявления различают следующие виды ущерба: экономический (например, потери от недополучения продукции); социально-экономический (например, рост заболеваемости, снижение продолжительности жизни); экологический (исчезновение биологического вида).

Подэкологическим ущербом от загрязнения окружающей среды понимается денежная оценка фактических и возможных убытков (потерь), обусловленным воздействием загрязнения.

Механизм возникновения ущерба можно представить следующей схемой:

- 1) образование вредных отходов вследствие хозяйственной деятельности и жизни человека;
- 2) поступление загрязнений (отходов) в окружающую среду;
- 3) изменение (ухудшение) некоторых свойств окружающей природной среды (возникновение ущерба);
- 4) изменение (ухудшение) условий жизнедеятельности под воздействием изменения свойств окружающей среды (возникновение ущерба);
- 5) ухудшение показателей качества жизни, материальных условий производства (возникновение ущерба);
- 6) снижение показателей производительности труда вследствие ухудшения качества жизни (возникновение ущерба);

Оценка экологического ущерба может быть выполнена методом прямого счета и определена как сумма величин убытков у всех объектов, подвергшихся воздействию вредных выбросов. В этом случае лежит такая последовательность:

- выбросы вредных примесей из источников их образования;
- концентрация примесей в атмосфере;
- натуральный ущерб;
- экологический ущерб.

Первая стадия расчетов предполагает анализ объемов и структуры выбросов. На втором этапе для измерений концентраций выбросов проводится расчет рассеивания вредных примесей в атмосфере. Так, для выбросов в атмосферу учитываются: особенности местоположения источника, высота трубы, роза ветров, погодные условия рельеф и прочие особенности. На третьем этапе, учитывая концентрации вредных примесей, можно оценить натуральный ущерб от загрязнения окружающей среды. Обычно речь идет от следующих видах воздействия:

- ухудшение качества жизни, включая рост заболеваемости, смертности и др.)

- сокращение сроков службы имущества (основных фондов);
- ухудшения показателей производственного процесса (рост концентраций вредных примесей в воздухе и воде, используемой в производстве, сокращение урожайности в сельском хозяйстве, сокращение прироста биомассы в лесном хозяйстве).

Этап расчета натурального ущерба является одним из сложных в рассматриваемой схеме: на состояние изучаемых объектов помимо загрязнителей оказывают влияние и другие факторы, поэтому сложно выделить «вклад» загрязнителя.

Расчет годовых величин экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха определяется по формуле

$$Z_{\text{атм}} = \gamma_i \cdot \sigma \cdot f \cdot \sum_{i=1}^{it} A_i \cdot m_{it}, \quad (6.1)$$

где  $\gamma_i$  – оценка единицы выброса в усл. т., в ценах 2004 года  $\gamma_i = 65,66$  руб./т;

$\sigma$  – коэффициент, позволяющий учесть региональные особенности территории, подверженной вредному воздействию равен 1;

$f$  – поправка, учитывающая характер рассеивания примеси в атмосфере равна 1,3;

$A_i$  – коэффициент приведения примеси вида  $i$  к монозагрязнителю, усл. т/т;

$m_{it}$  – фактическая масса выброса  $i$ -го вида примеси загрязнителя.

$$A_i = \frac{1}{\text{ПДК}_i}, \quad (6.2)$$

где  $\text{ПДК}_i$  – предельно допустимая концентрация  $i$ -го компонента, мг/м<sup>3</sup>.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 6.1

Таблица 6 – Исходные данные для расчета предотвращенного экологического ущерба

Наименование вещества	Количество загрязняющего вещества, т/г		ПДК <sub>м.р.</sub> , мг/м <sup>3</sup>
	до мероприятий	после мероприятий	
Диоксид азота	3664,0462	0,085	0,085
Оксид азота	595,3106	0,4	0,4

Таблица 7 – Расчет предотвращенного экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха

Наименование вещества	Денежная оценка единицы выбросов, $\gamma_i$ , руб/усл.т	Коэффициент, учитывающий региональность, $\sigma$	Поправка, $f$	$A_i$ , усл.т/т	Сумма ущерба, $Z_{атм}$ , руб
До мероприятия					
Диоксид азота	65,66	1	1,3	5,0	1563778,3
Оксид азота	65,66	1	1,3	2,5	127036,4
Итого ( $Y_0$ )					1690814,7
После мероприятия					
Диоксид азота	65,66	1	1,3	5,0	143867,2
Оксид азота	65,66	1	1,3	2,5	116873,5
Итого ( $Y_1$ )					260740,7
Предотвращенный ущерб ( $Y_1 - Y_0$ )					-1430074,0

Величина предотвращенного экологического ущерба составила 1430074,0 рублей.

## 6.2 Расчет платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу

В основу исчисления платы за загрязнение положена система базовых нормативов платы. При расчете нормативов платы за загрязнение принят затратный подход, который исходит из необходимости установить плату за загрязнение, позволяющую возместить финансирование природоохранных мероприятий, нужных для ликвидации ущерба или его предотвращения.

Нормативы платы за выбросы загрязняющих веществ рассчитывались с учетом токсичных свойств каждого конкретного вещества через показатель его относительной опасности, являющейся величиной, обратной предельно допустимой концентрации вещества в элементе окружающей среды.

Базовые нормативы платы за выбросы конкретных загрязняющих веществ определяются как произведение удельного экономического ущерба от выбросов загрязняющих веществ в пределах допустимых нормативов или лимитов на показатели относительной опасности конкретного загрязняющего вещества для окружающей среды и на коэффициенты индексации платы.

В настоящее время имеются базовые нормативы платы на единицу массы (руб/т) по 214 наиболее распространенным веществам, загрязняющим атмосферный воздух.

Особенности, связанные с неодинаковыми экологическими и экономическими условиями, учитываются коэффициентами экологической ситуации и значимости состояния атмосферного воздуха территорий экономических районов Российской Федерации.

Базовые нормативы платы за загрязнение (дифференцированные ставки) корректируются с помощью коэффициентов экологической ситуации и значимости, а также ежегодно коэффициентам индексации. Это обусловлено

тем, что постоянно изменяются экономические условия, стоимостные и ценовые пропорции.

Все согласование предельно допустимых нормативов негативного воздействия, определение лимитов осуществляется на региональном уровне исполнительными органами в лице комитетов по охране природы. Решением органов исполнительной власти субъектов Федерации могут увеличиваться коэффициенты экологической ситуации и значимости.

Плата за выбросы загрязняющих веществ в размерах, не превышающих установленные природопользователю нормативы выбросов, рассчитывается по формуле:

$$P_{н\text{ атм}} = \sum_{i=1}^n C_{н\text{ атм}} \cdot M_{i\text{ факт}} \cdot K_{з\text{ атм}} \cdot K_{ин}, \quad (6.3)$$

где  $C_{н\text{ атм}}$  – норматив платы за выброс одной тонны  $i$  – го загрязняющего вещества в пределах установленных нормативов выбросов, руб;

$M_{i\text{ факт}}$  – фактическая масса выброса  $i$  – го загрязняющего вещества, т;

$M_{н\text{ атм}}$  – допустимый выброс  $i$ – го загрязняющего вещества в пределах установленного норматива т;

$K_{з\text{ атм}}$  – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости-района в соответствие со степенью загрязнения и деградации, он равен=1,68.

$K_{ин}$  – коэффициент индексации платы за негативное воздействие на окружающую среду.

Результаты расчётов платы за выбросы до мероприятия после мероприятия приведены в таблице 6.3

Таблица 8 – Расчёт платы за выбросы загрязняющих веществ

Наименование вещества	Фактический выброс, $M_i$ , т/год	Норматив платы, $C_{н\text{ атм}}$ , руб	$K_{з\text{ атм}}$	$K_{ин}$	Сумма платы, руб
До мероприятия					
Диоксид азота	3664,0462	52	1,68	1,3	416118,4
Оксид азота	595,3106	35	1,68	1,3	45505,6
Итого ( $P_0$ )					461624,0
После мероприятия					
Диоксид азота	3370,9230	52	1,68	1,3	312828,9
Оксид азота	547,6863	35	1,68	1,3	37865,1
Итого ( $P_1$ )					350694,0

Полный экономический эффект, выраженный в экономии по платежам на предприятии определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = P_1 - P_0, \quad (6.4)$$

и составляет –  $\mathcal{E} = 350694 - 461624 = -110930$  руб.



Рентабельность с точки зрения предприятия:

$$R = \Delta \Pi_{\text{н.атм}} / Z, \quad (6.5)$$

где  $\Delta \Pi_{\text{н.атм}}$  – плата за выбросы загрязняющих веществ;

$Z$  – затраты на реконструкцию, руб.

$$R = 110930 / 500000 = 0,22$$

Срок окупаемости с точки зрения предприятия,  $T$  (год)

$$T = 1/R = 1 / 0,22 = 4,5 \quad (6.6)$$

Проведение модернизации котла Е-500 приводит к сокращению выбросов оксидов азота в атмосферу, к уменьшению платежей ТЭС за выбросы оксидов азота.

## 7 Нормативно-правовая база

При проектировании инженерных решений для снижения выхода оксидов азота на угольной теплоэлектростанции необходимо руководствоваться различными нормативно-правовыми актами:

- Конституция РФ;
- Федеральный закон об охране окружающей среды;
- Федеральный закон об охране атмосферного воздуха;
- Федеральный закон о санитарно-эпидемиологическом благополучии.

Законодательство в области охраны окружающей среды основывается на Конституции Российской Федерации и других федеральных законах, а также принимаемых в соответствии с ними иных нормативных правовых актов Российской Федерации, законов и иных нормативных правовых актов субъектов Российской Федерации.

*В соответствии с Конституцией Российской Федерации* каждый имеет право на благоприятную окружающую среду и обязан сохранять природу и окружающую среду, бережно относиться к природным богатствам, которые являются основой устойчивого развития, жизни и деятельности народов, проживающих на территории Российской Федерации.

Этот закон определяет правовые основы государственной политики в области охраны окружающей среды, обеспечивающие сбалансированное решение социально-экономических задач, сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия и природных ресурсов в целях удовлетворения потребностей нынешнего и будущих поколений, укрепления правопорядка в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности.

Федеральный закон регулирует отношения в сфере взаимодействия общества и природы, возникающие при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, связанной с воздействием на природную среду как важнейшую составляющую окружающей среды, являющуюся основой жизни на Земле.

Хозяйственная и иная деятельность, оказывающая воздействие на окружающую среду, должна осуществляться на основе следующих принципов:

- платность природопользования и возмещение вреда окружающей среде;
- независимость контроля в области охраны окружающей среды;
- презумпция экологической опасности планируемой хозяйственной и иной деятельности;
- ответственность за нарушение законодательства в области охраны окружающей среды.

Нормирование в области охраны окружающей среды осуществляется в целях государственного регулирования воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду, гарантирующего сохранение благоприятной окружающей среды, обеспечение экологической безопасности и заключается в установлении нормативов качества окружающей среды, нормативов допустимого воздействия на окружающую среду при

осуществлении хозяйственной деятельности, иных нормативов в области охраны окружающей среды, а также государственных стандартов и иных нормативных документов в области охраны окружающей среды.

Нормативы допустимых выбросов загрязняющих веществ устанавливаются для стационарных источников воздействия на окружающую среду субъектами хозяйственной деятельности исходя из нормативов допустимой антропогенной нагрузки на окружающую среду нормативов качества окружающей среды, а также технологических нормативов. Технологические нормативы устанавливаются для стационарных, передвижных и иных источников на основе использования наилучших существующих технологий с учетом экономических и социальных факторов.

При невозможности соблюдения нормативов допустимых выбросов веществ могут устанавливаться лимиты на выбросы на основе разрешений, действующих только в период проведения мероприятий по охране окружающей среды, внедрения наилучших существующих технологий и реализации других природоохранных проектов с учетом поэтапного достижения установленных нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ. Федеральный закон об охране атмосферного воздуха устанавливает правовые основы охраны атмосферного воздуха.

Основные принципы этого закона:

- охрана здоровья человека;
- поддержание или восстановление благоприятного биологического состояния окружающей среды и сохранение разнообразия;
- научно обоснованное сочетание экологических и экономических интересов общества в целях обеспечения устойчивого развития;
- реализация конституционных прав граждан на благоприятную окружающую среду и достоверную информацию о ее состоянии;
- введение дополнительных экологических требований охраны атмосферного воздуха.

Закон об охране атмосферного воздуха определяет необходимость выполнения мероприятий по регулированию выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Предприятия, деятельность которых связана с выбросами загрязняющих веществ в атмосферу, обязаны проводить организационно-хозяйственные, технические и иные мероприятия для обеспечения выполнения условий и требований, предусмотренных в разрешениях на выброс, принимать меры по снижению выбросов загрязняющих веществ, обеспечивать эффективную бесперебойную работу и поддержание в исправном состоянии сооружений, оборудования и аппаратуры для очистки выбросов и контроля за ними, а также осуществлять постоянный учет количества и состава загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу. Осуществление мероприятий по охране атмосферного воздуха не должно приводить к загрязнению почв и других природных объектов.

Для определения безопасности и безвредности воздействия химических, физических и биологических факторов на людей, растения и животных, в целях оценки состояния атмосферного воздуха следует опираться на гигиенические и экологические нормативы качества атмосферного воздуха и предельно допустимые уровни физических воздействий на него.

Гигиенические и экологические нормативы качества атмосферного воздуха, предельно допустимые уровни физических воздействий на атмосферный воздух устанавливаются Правительством Российской Федерации.

Для регулирования выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух установлены следующие нормативы таких выбросов:

- технические нормативы выбросов установлены для отдельных видов стационарных источников выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух;

- предельно допустимые выбросы установлены для конкретного стационарного источника выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и их совокупности (организации в целом).

В качестве критерия атмосферного воздуха в основном используются установленные Госкомсанэпиднадзором России предельно-допустимые концентрации (ПДК), ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в воздухе.

В рассматриваемом случае на предприятии, имеющем источники выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, не происходит соблюдения предельно допустимых выбросов, поэтому для него установлены временно согласованные выбросы.

Временно согласованные выбросы устанавливаются на период поэтапного достижения предельно допустимых выбросов при условиях соблюдения технических нормативов выбросов и наличия плана уменьшения выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, а также для регулирования вредных физических воздействий на атмосферный воздух устанавливаются предельно допустимые нормативы вредных физических воздействий на атмосферный воздух.

В целях охраны атмосферного воздуха в местах проживания населения устанавливаются санитарно-защитные зоны организаций. Размеры таких санитарно-защитных зон определяются на основе расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе и в соответствии с санитарной классификацией организаций.

Контроль в области охраны атмосферного воздуха проводится в целях обеспечения экологической безопасности и соблюдения требований законодательства, в том числе нормативов и нормативных документов.

Государственный контроль за охраной атмосферного воздуха осуществляют федеральный орган исполнительной власти в области охраны окружающей среды и его территориальные органы, в порядке, определенном Правительством Российской Федерации. Он обеспечивает соблюдение условий, установленных разрешениями на выбросы вредных (загрязняющих) веществ в

атмосферный воздух, а также режима санитарно-защитных зон объектов, имеющих стационарные источники выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух.

Производственный контроль за охраной атмосферного воздуха осуществляют юридические лица, которые имеют источники вредных воздействий на атмосферный воздух. Юридические лица, имеющие стационарные источники выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, обязаны:

- обеспечивать проведение инвентаризации выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и разработку предельно допустимых выбросов и предельно допустимых нормативов вредного физического воздействия на атмосферный воздух;

- внедрять малоотходные и безотходные технологии в целях снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха;

- планировать и осуществлять мероприятия по улавливанию, утилизации, обезвреживанию выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, сокращению или исключению таких выбросов;

- осуществлять учет выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и их источников, проводить производственный контроль за соблюдением установленных нормативов выбросов вредных(загрязняющих) веществ в атмосферный воздух;

- соблюдать правила эксплуатации сооружений, оборудования, предназначенных для очистки и контроля выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух;

- обеспечивать соблюдение режима санитарно-защитных зон объектов хозяйственной и иной деятельности, оказывающих вредное воздействие на атмосферный воздух.

Расчет величин нормативов ПДВ производится на основании рекомендаций, данных в «Методике расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД – 86», Гидрометеиздат, 1987 год.

Производственный экологический контроль за выбросами осуществляется на основании ГОСТов, руководящих документов.

*ГОСТ 17.2.3.02 - 2014. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями.*

ПДВ является научно – техническим нормативом, устанавливаемым для каждого конкретного источника загрязнения атмосферы, исходя из условия, что выбросы загрязняющих веществ от него и всей совокупности источников города с учетом их рассеивания и превращения в атмосфере, а также перспектив развития предприятий не создают приземных концентраций, превышающих установленные нормативы качества атмосферного воздуха (ПДК).

Нормативы ПДВ, установленные для предприятий, пересматриваются в случае изменения мощности источников, технологии производства или режима

работы предприятия не реже одного раза в пять лет и подлежат пересмотру (переутверждению) или уточнению по планам-графикам, согласованными с местными органами Госкомприроды РФ.

*ГОСТ 12.2.4.06 - 90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников рассеивания.*

Настоящий стандарт устанавливает методы определения скорости и объемного расхода газопылевых потоков отходящих от стационарных источников загрязнения в газоходах и вентиляционных систем.

*РД 52.04.59 – 85. Охрана природы. Атмосфера. Требования к точности контроля промышленных выбросов. Методические указания.*

Документ регламентирует методы измерения концентраций загрязняющих веществ и объемного расхода газовой смеси в выбросах для всех типов организованных источников загрязнения атмосферы. Величина выброса загрязняющего атмосферу вещества определяется произведением массовой концентрации этого вещества в газовом потоке и объемного расхода газовой смеси, представленных для данного источника и приведенных к одному сечению.

Измерение концентрации загрязняющего вещества и объемного расхода газовой смеси должны производиться приборами прошедшими государственную метрологическую аттестацию или государственные испытания и внесены в государственный реестр. Приборы должны быть проверены органами метрологической службы.

*ГН 2.1.6.1338 – 03. Предельно – допустимая концентрация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.*

Нормативы используются при проектировании технологических процессов, оборудования и вентиляции для санитарной охраны атмосферного воздуха, для профилактики неблагоприятного воздействия загрязняющих атмосферный воздух веществ на здоровье населения.

*ГН 2.1.6.1339 – 03. Ориентировочно безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.*

Нормативы используются при решении вопросов предупредительного надзора, для обеспечения требований к разработке оздоровительных мероприятий по охране атмосферного воздуха проектируемых, реконструированных производств.

*СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200 – 03. Санитарно – защитные зоны и санитарная защита предприятия.*

Для объектов, их отдельных зданий и сооружений с технологическими процессами, являющимися источниками формирования производственных вредностей, в зависимости от мощности, условий эксплуатации, концентрации объектов на ограниченной территории, характера и количества выделяемых в окружающую среду токсических и пахучих веществ, создаваемого шума, вибрации и других вредных физических факторов, а также с учетом предусматриваемых мер по уменьшению неблагоприятного влияния их на

окружающую среду и здоровье человека при обеспечении соблюдения требований гигиенических нормативов в соответствии с санитарной классификацией предприятий, производств и объектов, устанавливаются минимальные размеры санитарно-защитных зон.

Предусмотренная в данном проекте, реконструкция котла Е-500 позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую среду от выбросов загрязняющих веществ, образующихся при сжигании твердого топлива. При ее проектировании, были учтены требования законодательных актов и нормативных документов Российской Федерации, а также не были нарушены права человека на благоприятную окружающую среду.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для котла Е-500 были разработаны технические решения по организации двухступенчатого сжигания углей Канско-Ачинского бассейна, включающие:

- ступенчатую подачу горячего воздуха в зону активного горения через боковые тангенциальные сопла третичного дутья на уровне горелок 2 и 3 ярусов;

- подачу воздуха в зону дожигания через специальные сопла верхнего третичного дутья.

2. Для 2 и 3 ярусов предлагаются существующие прямоточные горелки с периферийной и рассредоточенной подачей аэросмеси. Сечение горелок по вторичному воздуху уменьшается за счет установки проставок.

3. С целью интенсификации массообмена верхние сопла третичного дутья установлены на боковых стенах топки с противокруткой по отношению к основным горелкам.

4. Валовые выбросы после внедрения схемы двухступенчатого сжигания уменьшаются для диоксида азота с 3370,9230 т/г до 3664,0462 т/г, для оксида азота с 595,3106 т/г до 547,6863 т/г.

5. По результатам проведенного расчета рассеивания максимальная приземная концентрация сокращается для диоксида азота с 0,069 мг/м<sup>3</sup> до 0,052 мг/м<sup>3</sup>, а для оксида азота с 0,013 мг/м<sup>3</sup> до 0,010 мг/м<sup>3</sup>. Концентрация на границе санитарно-защитной зоны уменьшается для диоксида азота с 0,009 мг/м<sup>3</sup> до 0,002 мг/м<sup>3</sup>, для оксида азота с 0,003 мг/м<sup>3</sup> до 0,001 мг/м<sup>3</sup>.

6. Проведение модернизации котла Е-500 приводит к сокращению выбросов оксидов азота в атмосферу, к уменьшению платежей ТЭС за выбросы оксидов азота. Величина предотвращенного экологического ущерба составила 1430074,0 рублей. Экономия по платежам на предприятии составила 110930 рублей.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экология энергетики: Учебное пособие / Под общей редакцией В.Я.Путилова. М.: Издательство МЭИ, 2003. – 716 с.
2. Сигал, Г.Н. Защита воздушного бассейна. / Г.Н. Сигал. – Саратов, 1990. – 327с.
3. Котлер, В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.
4. Контроль вредных выбросов ТЭС в атмосферу / П.В.Росляков, И.Л.Ионкин, И.А. Закиров, Л.Е. Егорова и др./ Под ред. П.В. Рослякова. М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 128 с.
5. Жабо, В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС: Учеб. для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
6. Шницер, И.Н. Технология сжигания топлива в пылеугольных котлах / И.Н. Шницер. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербург., 1994. – 284 с.
7. Росляков, П.В. Защита атмосферного воздуха от газообразных выбросов / П.В. Росляков, Л.Е. Егорова – М.: Издательство МЭИ, 1996. – 182 с.
8. Бабий, В.И. Механизм образования и способы подавления оксидов азота в пылеугольных котлах / В.И. Бабий, В.Р. Котлер, Э.Х. Вербовецкий // Энергетик. – 1996. – № 6. с. 8–12.
9. Экологические проблемы энергетики. / Сост. А.А. Комелев, Г.В. Ташкинова, Б.Б. Чебаненко и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1989. – 332с.
10. Мещеряков, В.Г. Проблемы использования Канско-Ачинских углей на электростанциях. / В.Г. Мещеряков, А.С. Пелипенко, С.В. Богомоллов и др. Сборник докладов. Красноярск, 2000. –290 с.
11. Результаты опытного сжигания ирша-бородинского угля в топочной камере с твердым шлакоудалением / Ю.Л. Маршак, М.Я. Процайло, А.И. Гончаров и др. // Теплоэнергетика. –1976. – № 5. с. 45–51.
12. Исследования образования  $\text{NO}_x$  из азота топлива при горении пыли каменных углей / С.П. Титов, В.И. Бабий, В.М. Барбараш // Теплоэнергетика. – 1980. – № 3. – с. 64–67.
13. Исследование работы котла БКЗ-500-140-1 на пониженных избытках воздуха / С.Г. Козлов, В.В. Васильев, С.Ю. Белов, Е.Г. Алфимов // Сб. науч. тр. «Повышение эффективности и экологической безопасности сжигания углей на электростанциях Сибири». –Красноярск. –1995. – с. 40–48.
14. Котлер, В.Р., Верзаков, В.Н., Лобов, Г.В. Ступенчатое сжигание-метод подавления оксидов азота при сжигании бурых углей // Тяжелое машиностроение. – 1990. – № 10. – с. 26–30.
15. Влияние топочного режима и конструктивных особенностей котельного агрегата на образование окислов азота при сжигании каменных и бурых углей / В.Р. Котлер, С.И. Сучков, В.Д. Суравицкий, Г.В. Лобов // Подготовка и сжигание топлива в крупных энергоблоках. Тр. ВТИ. Вып.15.– М.: Энергия, 1978. – с. 99–107.

16. Котлер, В.Р. Технологические методы уменьшения выбросов окислов азота при сжигании твердого топлива // Энергетик, 1981. – № 5. – с. 30–33.
17. Холл, Р.Е., Котлер, В.Р. Снижение выбросов оксидов азота на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. – 1994. – № 7. – с. 63–67.
18. Попов, В.М., Рябцев, В.И., Рябцев, Г.А. О тепловом загрязнении окружающей среды выбросами и сбросами ТЭС и ТЭЦ // Безопасность жизнедеятельности. – 2002. – № 4. – с. 14–20.
19. Котлер, В.Р., Енякин, Ю.П. Реализация и эффективность технологических методов подавления оксидов азота на ТЭС // Теплоэнергетика. – 1994. – № 6. – с. 2–9.
20. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД-86. – Ленинград.: Росгидрометеоздат, 1987. – с.68.
21. Конституция Российской Федерации: офиц. текст. – Москва: Маркетинг, 2001. – 39 с.
22. Об охране окружающей среды: федер. закон Российской Федерации от 10.01.2002 N 7-ФЗ.
23. Об охране атмосферного воздуха: федер. закон Российской Федерации от 04.05.1999 N 96-ФЗ.
24. О санитарно-эпидемиологическом благополучии: федер. закон Российской Федерации от 30.03.1999 N 52-ФЗ.
25. ГОСТ 17.2.3.02 - 2014. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями. – Взамен ГОСТ 17.2.3.02 – 78; введ. 01.07.2015. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 21с.
26. ГОСТ 12.2.4.06 - 90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников рассеивания. – Введ. 01.01.1991. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1990. – 10 с.
27. РД 52.04.59 – 85. Охрана природы. Атмосфера. Требования к точности контроля промышленных выбросов. Методические указания.– Введ. 01.03.1986.
28. ГН 2.1.6.1338 – 03.Предельно – допустимая концентрация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.– Введ. 25.06.2003.
29. ГН 2.1.6.1339 – 03. Ориентировочно безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.– Введ. 25.06.2003.
30. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200 – 03. Санитарно – защитные зоны и санитарная защита предприятия. – Введ. 15.06.2003.
31. СТО 4.2–07–2014 Система менеджмента качества. Организация учета и хранения документов.– Красноярск : ИПК СФУ, 2014. – 60 с.