# Лекция 5

## 3.4. ОБРАЗОВАНИЕ ОКИСЛОВ АЗОТА В ТОПКАХ КОТЛОВ

Окислы азота, даже при минимальных дозах, раздражающе воз­действуют на органы дыхания, разрушают оборудование и материалы, способствуют образованию смогов и ухуд­шают видимость в городах.

Степень токсичности окислов азо­та подтверждается данными табл.1.5:   
максимально-разовая ПДК двуокиси азота

* почти в 6 раз меньше, чем ПДК сернистого ангидрида,
* в 30 раз меньше, чем для окиси углерода.

Окислы азота об­разуются за счет окисления азота, который содержится в топливе и воздухе, поэтому они обнаруживаются в продуктах сгорания всех топлив.

Условием окисления азота воздуха является диссо­циация молекулы кислорода воздуха под воздействием высоких температур, идущая с поглощением теплоты:

О2 ⇔ О + О - 495 кДж/моль. (3.4)

Атомарный кислород реагирует с молекулой азота, а образовавшийся в результате эндотермической реак­ции атомарный азот вступает в экзотермическую реак­цию с молекулярным кислородом:

N2 + O ⇔ NO + N – 314 кДж/моль;

О2 + N = NO + О + 134 кДж/моль;

N2 + О2 = 2NO - 180 кДж/моль. (3.5)

Таким образом в топочной камере образуется в основном окись азота NO (более 95%). Образование двуокиси азота NO2 за счет окисления NO происходит при низких темпера­турах и требует зна­чительного времени -– этот процесс протекает в атмосфере в результате сложных фотохимических реакций.

Для расчета концентрации NO в результате протекания последней из приведенных реакций теория дает такое выражение:

****, г/м3 (3.6)

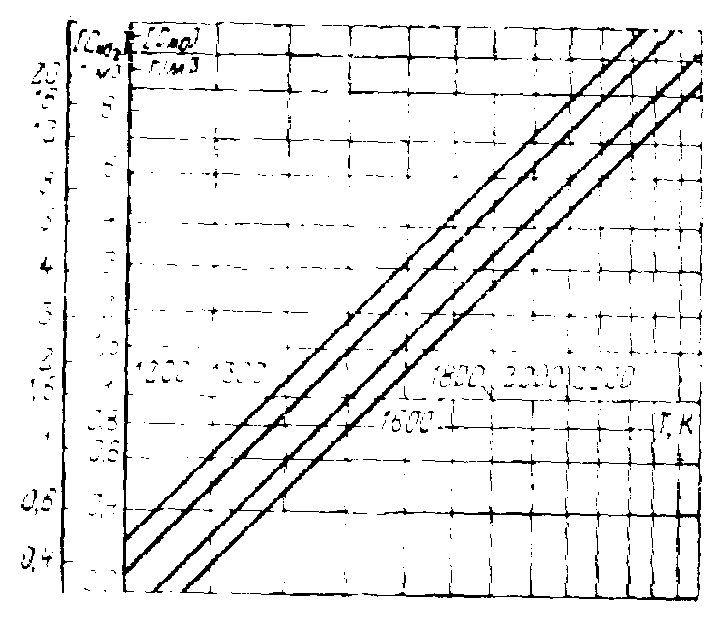
где  - равновесная концентрация NO (т. е. кон­центрация, получающаяся   
 при неограниченно долгом протекании реакции);

 - увеличение теоретического объема газа по сравнению с теоретическим   
 объемом воздуха, необходимым для полного сгорания. Эта величина   
 колеблется в пределах:

* 0,04-0,10 для каменных углей;
* 0,15-0,20 для бурых углей;
* 0,075 для мазута;
* 0,125 для природного газа.

С учетом ограниченного времени пребывания реагирующих ве­ществ в топке действительные концентрации окислов азота будут в несколько раз меньше.

По уравнению (3.4) построена зависимость рав­новесной концентрации NO от температуры.



*Рис. 3.4.* Зависимость равновес­ной концентрации окислов азо­та от температуры *Т*   
 и избытка воздуха: линии сверху вниз - α = ∞; 1,6; 1,4; 1,2

Слева на рисунке приведена шкала концентраций окислов азота в пересчете на NO2, равная

=1,53. (3.7)

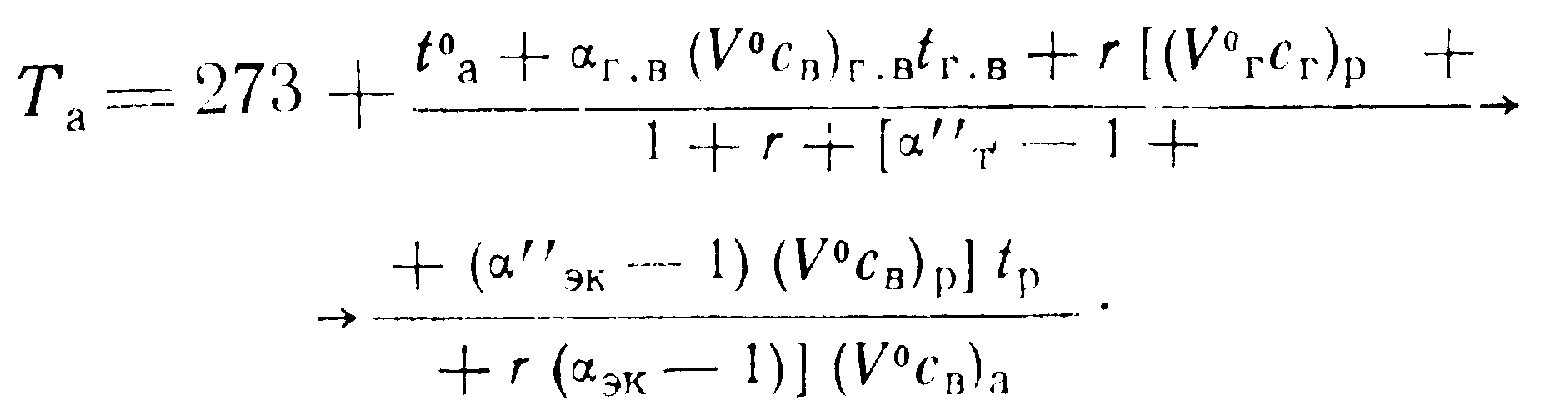
Из рис. 3.4 следует, что концентрация NO свыше 1 г/м3 имеет место при температуре бо­лее 1600°С н удваивается при повышении температу­ры на каждые 200 - 250°С.

Изменение избытка воздуха от α = ∞ (чистый воздух) до α =1,2 при той же тем­пературе снижает содержа­ние окислов азота пример­но вдвое.

Температура *Т,* входящая в формулу (3.26), связана с температурой в ядре фа­кела, а последняя с *Та* - адиабатиче­ской температурой горения.

Температура *Та* зависит от теплоты сгорания топлива, степени подогре­ва воздуха, величины рециркуляции дымовых газов в топку, а также потерь теплоты от от химической неполноты сгорания, механического недожо­га, с теплом шлаков.

После и некоторых упрощений и преобразований окончательное выражение для рас­чета адиабатической температуры может быть записано в виде

(3.8)

Здесь *t*0a - адиабатическая температура при α = 1, температуре горячего воздуха *t*г.в*=* 0°C   
 и коэффициенте рециркуляции газов *r =* 0*;   
 t*р *-* температура рециркулирующих газов, °С;

(V°*c*в)г.в, (V°гcг)р, (V°cв)р *,* (V°cв)а - соответственно те­плоемкости горячего воздуха,   
 газов и воздуха рециркуляции и воздуха при температуре *t*a по отношению   
 к те­плоемкости газов при температуре *t*a ;   
 αг.в, α″эк, α″т - избыток горячего воздуха, избыток воз­духа за экономайзером   
 и на выходе из топки.

Средние величины адиабатических температур и теплоемкостей газов и воздуха для различных топлив при­ведены в табл. 3.3.

Из этой таблицы следует, что величина *t°а* сильно меняется в зависимости от качества топлива. В связи с этим наибольший вы­ход окислов азота характерен для высококалорийных сортов топлива.

#### Таблица 3.3

**Средние значения адиабатических температур и теплоемкостей газов и воздуха для различных видов топлива**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Топливо | *t°а* ,°С | (V°cв)а | (V°г*c*г)р | (V°*c*в)г.в≈(V°*c*в)р | Δαг |
| Мазут | 2200 | 0,85 | 0,89 | 0,78 | 0,075 |
| Каменные угли | 2100 | 0,85 | 0,86 | 0,76 | 0,07 |
| Природный газ | 2000 | 0,86 | 0,86 | 0,72 | 0,125 |
| Бурый уголь | 1800 | 0,75 | 0,85 | 0,67 | 0,17 |
| Горючий сланец | 1600 | 0,75 | 0,85 | 0,68 | — |

Из анализа формулы (3.8) можно сделать вывод, что для снижения концентрации окислов азота вдвое для котла, работающего на мазуте, надо обеспечить кратность циркуляции г = 0,22 или снизить температуру воздуха на 250°С.

Оценить влияние избытка воздуха на образование окислов азота сложнее, так как эта ве­личина входит в формулу (3.6) дважды: в выражение под корнем и в выражение для *Т.*

После подстановки (3.8) в (3.6) для простейшего случая: Qв = 0, г = 0 и Δαг = 0,- дифференцирования полученного выражения по α и приравни­вания последнего нулю с учетом некоторых упрощений, получают выражение, из которого следует, что избыток воздуха, при котором имеет место максимальный выход окислов азота, зависит в ос­новном от адиабатической температуры для данного то­плива.

Эта величина (α) лежит в пределах от 1,13 для бурых углей и горючих сланцев до 1,16 для высококалорийных углей, газа и мазута.

Выход окислов азота для реальных топочных устройств можно определять по формуле (3.6) и графи­ку рис.3.4, подставляя в качестве максимальной темпе­ратуры в топке *Т* величину

*T* = 273 + *K* *t*a (3.9)

Коэффициент *К,* учитывающий отличие реальной тем­пературы в ядре факела от *t*a , зависит от большого количества факторов в топочной камере - от­ношения тепловыделения к величине экранной поверхно­сти, степени черноты факела, типа горелок и др.

Например, величина коэффициента *К* пропорциональна отношению тепловыделения в топке к поверхности экранов Q/H.

Оно же, в свою очередь, для простейшего случая может быть определено так:

, (3.10)

где *μ* = *D*/*D*н - коэффициент нагрузки;   
 *D, D*н *-* паропроизводительность котла соответственно при текущей и номи­нальной   
 нагрузках.

*Q*н - номинальная теплопроизводительность котла;

 - тепловое напряжение топки, МДж/м3;  
 *V* – объем топки, м3.

Из выражения (3.10) следует, что *QIH* пропорцио­нальна нагрузке, тепловому напряжению топки в степе­ни 2/3 и номинальной теплопроизводительности котла в степени 1/3.

Чем больше величина *QIH,* тем больше ко­эффициент *К* в формуле (3.9), а следовательно, темпе­ратура в ядре факела и выход окислов азота.

Вторым источником образования окислов азота является связанный азот твердых и жидких топлив. Протекание этой реакции происходит при уме­ренных температурах.

Концентрация окислов азота в этом случае определя­ется приведенной концентрацией азота топлива, %/(МДж/кг):

Nпр = Nр / Qрн

Количество окиси азота, получающейся из азота топ­лива, определяется по выражению

 (3.11)

где  - приведенный объем газов на 1 МДж теплоты топлива, м3.

Коэффициент *т* лежит в пределах от 0,2 (для круп­ных паровых котлов) до 0,4 (для небольших паровых котлов). Он несколько снижается при уве­личении содержания азота в топливе Nпр.

Концентрация  может достигать:

* для фрезерного торфа 0,4—0,6 г/м3;
* для углей 0,2— 0,3 г/м3,
* для жидких топлив и горючих сланцев менее 0,1 г/м3;
* для природного газа топливная составляющая окислов азота отсутствует полностью.

Общее количество окислов азота определится как сумма окислов азота, образующаяся при горении за счет окисления азота воздуха и за счет окисления азота топлива

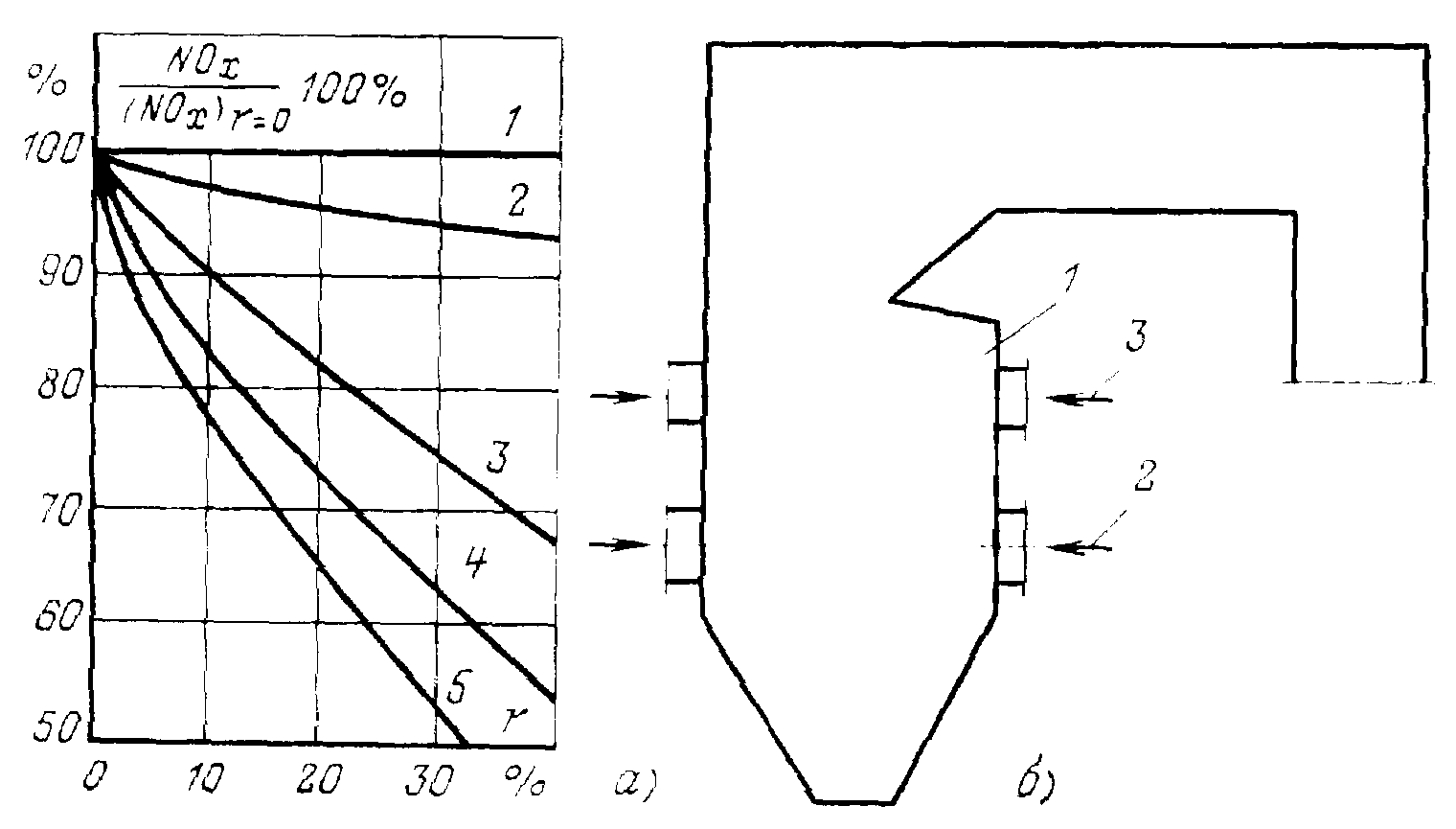
Практические расчеты по выходу окислов азота на различных топливах ведутся по упрощенным выраже­ниям типа (1.3) - (1.7).

## 3.5. МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОКИСЛОВ АЗОТА В ТОПКАХ КОТЛОВ

Из анализа влияния основных факторов на образо­вание окислов азота вытекают методы их подавления в топочной камере.

**Рециркуляция дымовых газов в топоч­ную камеру:** дымо­вые газы обычно после водяного экономайзера при тем­пературе 300-400°С отбираются специальным дымососом и подаются в топочную камеру.

При этом большое значение имеет способ ввода газов в топочную камеру. Из рис.3.5,а видно, что са­мым эффективным является подмешивание газов в дутьевой воздух перед горелками.



*Рис. 3.5.* Методы подавления образования окислов азота.

*а -* влияние степени рециркуляции газов и способа его подачи на снижение концентрации окислов азота: ~~1-подача газов через холодную воронку;~~ 2-то же через подовые боковые шлицы; 3-то же через шлицы под горелка­ми; 4-то же через горелки вторичного воздуха;   
5-подача газов через горелки со всем воздухом:

*б -* схема топки двухстадийного сжигания топ­лива: 1-топочная камера; 2-горелки, в которые подается все топливо и 85% теоретически необходимого количества воздуха; 3-шлицы, в которые подается 21% теоретически необходимого количества воздуха.

Наряду с уменьшением темпера­туры горения рециркуляция приводит к некоторому снижению концен­трации кислорода, уменьшению скорости горения и рас­тягиванию зоны горения и вследствие этого более эф­фективному охлаждению этой зоны топочными экра­нами.

Рециркуляция дымовых газов оказывает влияние на температуру перегрева пара и получила в свое время широкое применение именно для этих целей. После не­которой переделки рециркуляцию, установленную на ряде котлов для регулирования перегрева, можно использовать для снижения образования окислов азота.

Следует также иметь в виду, что рециркуляции связана с некоторыми сложностями:

* Транспортировка запыленных газов повышенной темпе­ратуры требует установки специальных дымососов ре­циркуляции и связана с затратой дополнительной энергии на собственные нужды.
* Рециркуляция дымовых га­зов повышает сопротивление газового тракта и может вызвать некоторое ухудшение условий горения.

**Двухстадийное сжигание топлива** - наи­более радикальный способ снижения образования окис­лов азота.

При его применении в первичную зону горения (рис. 3.5,6) воздуха подается меньше, чем теорети­чески необходимо для сжигания топлива (α = 0,8-0,95). Здесь происходит неполное горение топ­лива при пониженной тем­пературе и менее интенсивном образовании NOx.

Во вторичную зону подается чистый воздух или обед­ненная топливом смесь для дожигания продуктов непол­ного сжигания.

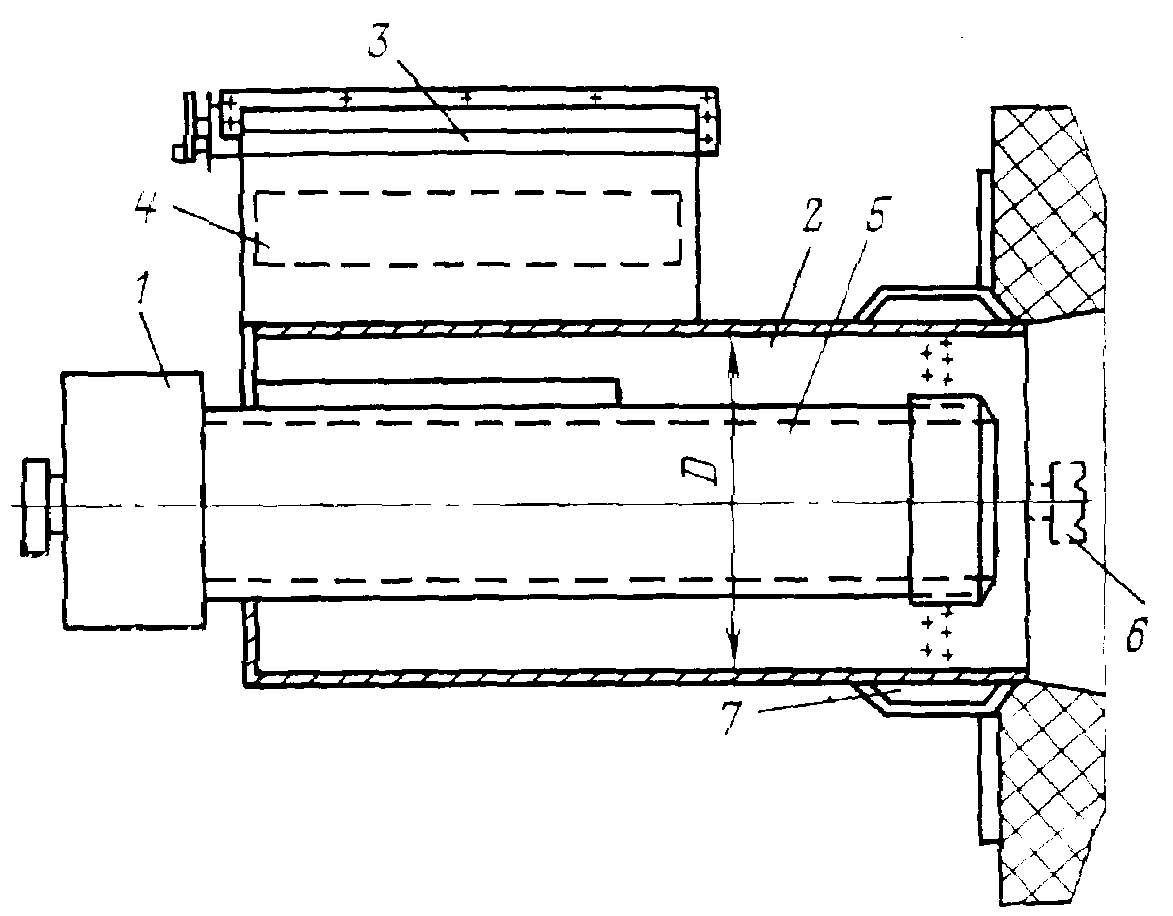
Теплоотвод в первичной зоне горения снижает температуру газов настолько, что и заключитель­ная стадия процесса горения происходит при более низ­кой температуре.

Так, прекращение подачи топлива в третий по высоте ярус горелок на котлах ТГМ-96 приводит к снижению генерации окислов азота при сжигании природного газа почти вдвое. При сжигании мазута снижение α в горелках нижнего яруса снижает образование окислов азо­та примерно на 25%.

**Применение специальных горелочных устройств** для двухстадийного горения и растяну­то­го по длине топочной камеры факе­ла также существенно снижает выбросы окислов азота.

Турбулентные (вихревые) горелки с интенсивной закруткой воздушно­го потока повышают концентрацию окислов азота в про­дуктах сгорания в связи с более высокой интенсивно­стью выгорания и близким расположением от горелки ядра пламени.

На рис. 3.6 показана горелка Института газа АН УССР с осевым и закрученным подводом воздуха. Ис­следования, проведенные на этой горелке, показали, что увеличение подачи части воздуха по внутренней трубе без закрутки в количестве 40% общего позволяет сни­зить образование окислов азота на 40% по сравнению с подачей всего воздуха закрученным в межтрубное про­странство.



При выдвижении в сторону топки внутренней трубы первичный воздух не принимает участия в начальной стадии горения и получается двухстадийное горение топ­лива.

*Рис.3.6.* Схема горелочного устройства конструкции Института газа АН УССР с закручен­ным и осевыми подводами воздуха:   
1 - воздушный короб; 2 - цилиндриче­ский канал; 3 - тангенциальный подвод воздуха; 4 - шибер;   
5 *-* осевой под­вод воздуха; 6 *-* место установки мазутной форсунки; 7 - газовая камера;

**Подача воды и пара в зону горения** приводит к некоторому снижению образования окислов азота. В настоящее время еще нет достаточно надежных данных о количественной стороне этого влияния применительно к котлам, хотя в газотурбинных установках получен заметный положительный эффект. Ввод воды или водяного пара в количестве 5-10% всего количества воздуха несколько снижает темпера­турный уровень в топке, как это имеет место и при вво­де рециркулирующего газа.

Могут использоваться и другие методы подавления окислов азота. К ним относятся уменьшение избытка воздуха в топке, снижение темпе­ратуры подогрева воздуха.

При α = 1,03-1,07 происходит умень­шение концентрации кислорода и соответствующее уменьшение cno. Это мероприятие возможно в ограни­ченных пределах и в основном для природного газа и мазута, поскольку снижение избытка воздуха на твер­дом топливе приводит к увеличению механического не­дожога. Условиями работы с низким избытком воздуха являются точная дозировка топлива и воздуха в каж­дую горелку, высокая плотность топочной камеры.

Снижение теплового напряжения в топочной камере приводит к уменьшению температурного уровня в топке, но связано с увеличением габаритов и стоимости котла.

Увеличение степени экранирования топочной камеры приводит, как и предыдущее мероприятие, к снижению температуры в топке.

Снижение температуры подогрева воздуха возможно в ограниченных пределах, так как при этом может ухудшаться процесс горения и ослож­няться процесс глубокого охлаждения уходящих газов, необходимого для повышения к. п. д. котлов.

**Перечисленные способы** при комплексном их исполь­зовании могут существенно снизить образование окислов азота. При производстве новых котлов необходимо, чтобы основные мероприятия по подавлению окислов азота были заложены в их конструкцию.

Однако реализация перечисленных мероприятий возможна не во всех случаях.

*Таблица 3.5*

**Возможные пределы снижения образования NO2в котлах тепловых электростанций, %**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Топливо | Методы подавления | | | | | |
| Малые α | Двухста­дийное горение | Двухста­дийное горение с малыми α | Рецирку­ля­ция | Рецирку­ляция с малыми α | Впрыск воды |
| Природный газ | 33 | 50 | 90 | 33 | 80 | 10 |
| Мазут | 33 | 40 | 73 | 33 | 70 | 10 |
| Уголь | 25 | 35 | 60 | 33 | 55 | 10 |

За счет комбинации различ­ных мероприятий образование окислов азота на природ­ном газе можно сократить в 5-10 раз, на мазуте в 3 ра­за, а на твердом топливе в 2 раза.