

## ОХРАНА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ОТ ВЫБРОСОВ ЭНЕРГОПРЕДПРИЯТИЙ

### 1.1. Снижение выбросов оксидов азота

#### 1.1.2. Технологические методы снижения образования оксидов азота в топках котлов при сжигании различных видов органического топлива

##### 1.1.2.1. Режимно-наладочные мероприятия по снижению выбросов оксидов азота

##### 1.1.2.1.2. Нестехиометрическое сжигание (Biased Burner Firing — BBF)

Росляков П.В., МЭИ(ТУ)

Энергетические котлы имеют, как правило, несколько ярусов горелок или, во всяком случае, несколько горелок в одном ярусе. Это позволяет без дополнительных затрат внедрить метод нестехиометрического сжигания.

Нестехиометрическое сжигание — это нетрадиционный способ сжигания топлива с организацией в топочной камере отдельных восстановительной ( $\alpha < 1$ ) и окислительной ( $\alpha > 1,2 \dots 1,25$ ) зон горения при сохранении традиционных избытков воздуха на выходе из топки (рис. 1.5). В этом случае в восстановительной зоне происходит подавление образования термических и топливных оксидов азота из-за недостатка кислорода (на рис. 1.2 это изображено смещением режима из точки А в точку В'), а в окислительной зоне образование термических  $\text{NO}_x$  сдерживается в результате снижения температуры горения за счет больших избыточных объемов воздуха (на рис. 1.2 это изображено смещением режима из точки А в точку В''). При этом в восстановительной зоне повышается содержание  $\text{CO}$ , но в окислительной зоне имеется «лишний» кислород, который доокисляет  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$ .

На практике нестехиометрическое сжигание топлива в топках котлов реализуется путем разбаланса топливо-воздушного соотношения в горелочных устройствах или по ярусам горелок [6]. Для этого используются три схемы разбаланса (см. рис. 1.5):

- воздушный разбаланс;
- топливный разбаланс;
- комбинированный разбаланс.

Воздушный разбаланс осуществляется перераспределением подачи воздуха по горелочным устройствам путем частичного прикрытия воздушных шиберов перед частью горелок при равномерной раздаче топлива. Час-

ток дополнительного количества воздуха на остальные горелочные устройства, воздушные шиберы перед которыми остаются полностью открытыми. При этом общий расход воздуха на котел остается неизменным, что можно контролировать по содержанию кислорода в дымовых газах за топкой.

Данный способ разбаланса является достаточно универсальным и может быть использован при нестехиометрическом сжигании любых топлив, а также при их совместном сжигании. Реализация его проста и требует лишь предварительной проверки работы исполнительного механизма привода воздушных шиберов. Изменение нагрузки котла осуществляется путем регулирования подачи топлива на котел и давления воздуха в общем коробе.

Топливный разбаланс осуществляется перераспределением подачи топлива в горелки при равномерной раздаче воздуха по всем горелочным устройствам. Для этого все воздушные шиберы перед горелками полностью открыты. Данный вид разбаланса рекомендуется при нестехиометрическом сжигании природного газа и в отдельных случаях при сжигании угля. При нестехиометрическом сжигании природного газа топливный разбаланс может быть зафиксирован путем изменения проходных сечений в газораздающих трубках горелок верхнего и нижнего ярусов. Это малозатратное мероприятие страхует от возможных ошибок малоквалифицированного эксплуатационного персонала, следствием которых может быть нарушение оптимального соотношения избытков воздуха в горелках разных ярусов. При реализации топливного разбаланса характер аэродинамики топki, условия воспламенения и выгорания топлива практически не изменяются. При нестехиометрическом сжига-

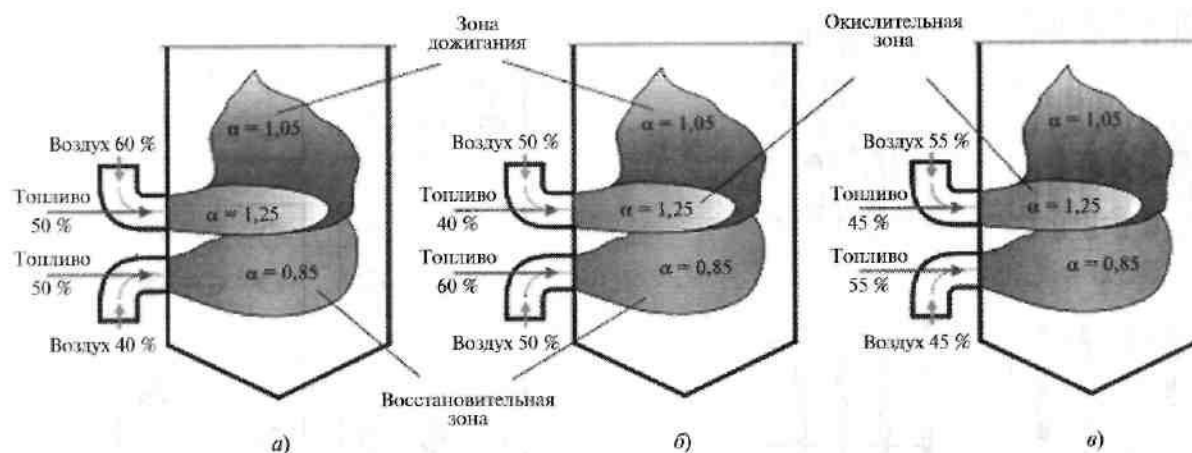


Рис. 1.5. Примеры организации топливо-воздушного разбаланса при нестехиометрическом сжигании:  
а — воздушный разбаланс; б — топливный разбаланс; в — комбинированный разбаланс

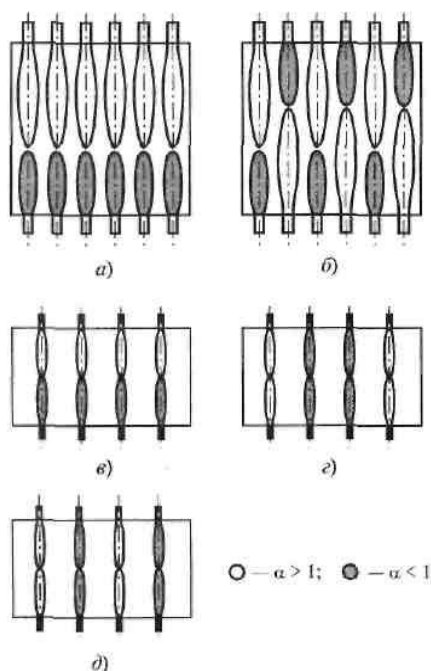
точное закрытие индивидуальных воздушных шиберов перед соответствующими горелками обеспечивает пере-

нии мазута топливный разбаланс не рекомендуется из-за ухудшения качества распыла и сепарации раскаленных

капель мазута из воздушного потока, что приводит к появлению химического недожога и загрязнению поверхностей нагрева в газоходах котла.

Комбинированный способ разбаланса заключается в одновременном перераспределении и воздуха, и топлива по горелочным устройствам в целях создания в топочной камере ярко выраженных восстановительных и окислительных зон горения. Для этого через одни горелки обеспечивается пониженный расход топлива, а через другие — пониженный расход воздуха. Комбинированный разбаланс может быть рекомендован в тех случаях, когда простым перераспределением по горелкам или топлива, или воздуха не удастся обеспечить оптимальные значения избытков воздуха в окислительных  $\alpha_{ок}$  и восстановительных  $\alpha_{в}$  факелах. Этот способ разбаланса топливоздушного соотношения рекомендуется для нестехиометрического сжигания природного газа, углей, а также при совместном сжигании разных видов топлива.

Эффективность подавления образования оксидов азота при нестехиометрическом сжигании топлив существенно зависит от режимных условий. При сжигании природного газа минимальный выход оксидов азота наблюдается при избытках воздуха соответственно в восстановительной и окислительной зонах  $\alpha_{в}/\alpha_{ок} = 0,75/1,35$ . В свою очередь, наибольшее снижение выбросов  $NO_x$  при



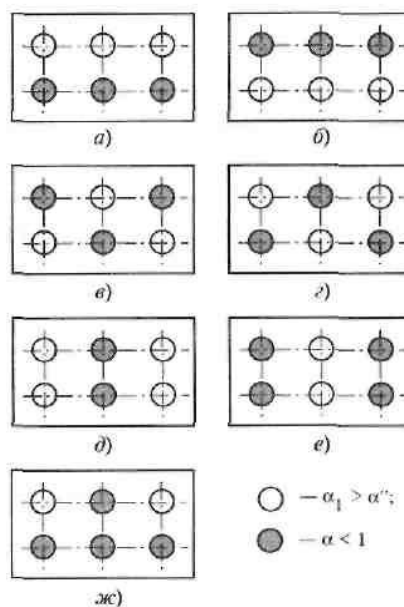
**Рис. 1.6.** Схемы организации нестехиометрического сжигания «по горизонтали» при одноярусной компоновке горелок: а — встречная (котел ПТВМ-100); б — шахматная (котел ПТВМ-100); в — встречная (котел ТПЕ-430); г — центральная (котел ТПЕ-430); д — чередующаяся (котел ТПЕ-430)

Характерной особенностью нестехиометрического сжигания является слабая зависимость эмиссии  $NO_x$  от нагрузки котла (рис. 1.8, а). Степень снижения выхода оксидов азота при снижении нагрузки падает с 30...55 % при номинальной нагрузке до 10...15 % при  $D = 0,5 D_{ном}$  (рис. 1.8, б). Объясняется это постоянным положением регулирующей арматуры во всем рабочем диапазоне нагрузок, которое определяется на номинальной нагрузке котла. При снижении нагрузки в этом случае уже не обеспечивается требуемый топливоздушный разбаланс, как это имело место на максимальных нагрузках,

нестехиометрическом сжигании мазута имеет место при избытках воздуха в восстановительном и окислительном факеле  $\alpha_{в}/\alpha_{ок} = 0,8...0,85/1,3...1,25$  [6]. Одновременно обеспечиваются достаточно благоприятные температурные и концентрационные (по  $O_2$ ) условия дожига топлива почти без увеличения химического недожога, который не превышает допустимых значений для газомазутных котлов ( $q_3 \leq 0,15 \%$ ).

Очевидно, что нестехиометрическое сжигание дает больший эффект снижения выбросов  $NO_x$  при работе на природном газе, чем при работе на мазуте и тем более на угле. Причиной этого являются топливные оксиды азота, образование которых подавляется в меньшей степени, чем термических  $NO_x$ .

На практике существует большое разнообразие возможных схем организации нестехиометрического сжигания, выбор которых зависит от габаритных размеров топки, типа и числа горелочных устройств. Так, для одноярусного встречного расположения горелок в топке котла нестехиометрическое сжигание может быть организовано «по горизонтали» (рис. 1.6). Если котел имеет двухъярусную компоновку горелок, то возможна организация большого числа комбинаций нестехиометрического сжигания «по вертикали» (рис. 1.7).



**Рис. 1.7.** Схемы организации нестехиометрического сжигания «по вертикали» при двухъярусной компоновке горелок: а — воздух сверху; б — воздух снизу; в — треугольником вверх; г — треугольником вниз; д — воздух по краям; е — воздух по центру; ж — воздух сверху по краям

поэтому эффект нестехиометрического сжигания становится менее выраженным, а эффект снижения эмиссии  $NO_x$  менее значительным.

Путем организации только нестехиометрического сжигания не всегда удастся обеспечить снижение выбросов  $NO_x$  до нормативных значений. Дополнительный ввод влаги и газов рециркуляции при нестехиометрическом сжигании топлив приводит к снижению максимальных температур факела, что подавляет образование термических оксидов азота, но практически не влияет на выход быстрых и топливных  $NO_x$ , поэтому ввод влаги и

газов рециркуляции в качестве дополнительного мероприятия целесообразно применять при нестехиометрическом сжигании природного газа и мазута. Так, на котле БКЗ-320-140ГМ Камчатской ТЭЦ-2 при нестехиометрическом сжигании мазута выход оксидов азота на номинальной нагрузке составил  $410 \text{ мг/м}^3$  (при обычном сжигании  $600 \text{ мг/м}^3$ ), а при совместной реализации нестехиометрического сжигания с вводом газов рециркуляции в короб горячего воздуха в количестве 20 % содержание  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания снижалось до  $210 \dots 240 \text{ мг/м}^3$ .

При соответствующей наладке внедрение нестехиометрического сжигания на действующих котлах не приводит к ухудшению технико-экономических показателей. При организации нестехиометрического сжигания топлив по схеме воздух сверху (см. рис. 1.7, а) большая часть топлива подается через нижний ярус горелок, что приводит к некоторому опусканию ядра горения по высоте топки. В результате происходит снижение температуры газов на выходе из топки. В свою очередь температура газов в поворотной камере снижалась на  $10 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура уходящих газов уменьшалась на  $2 \dots 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , т.е. не происходило увеличения потерь тепла с уходящими газами. При реализации оптимальной схемы переход на нестехиометрическое сжигание топлива не приводит к заметному росту концентрации  $\text{CO}$  в дымовых

газах и не вызывает существенного увеличения эксплуатационных значений избытков воздуха на выходе из топки. При этом КПД котла практически остается на прежнем уровне.

Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута (как по отдельности, так и совместное) рекомендуется для внедрения на водогрейных котлах тепловой мощностью более 35 МВт (30 Гкал/ч), а также на паровых котлах докритического давления (ДКД) паропроизводительностью не более 420 т/ч.

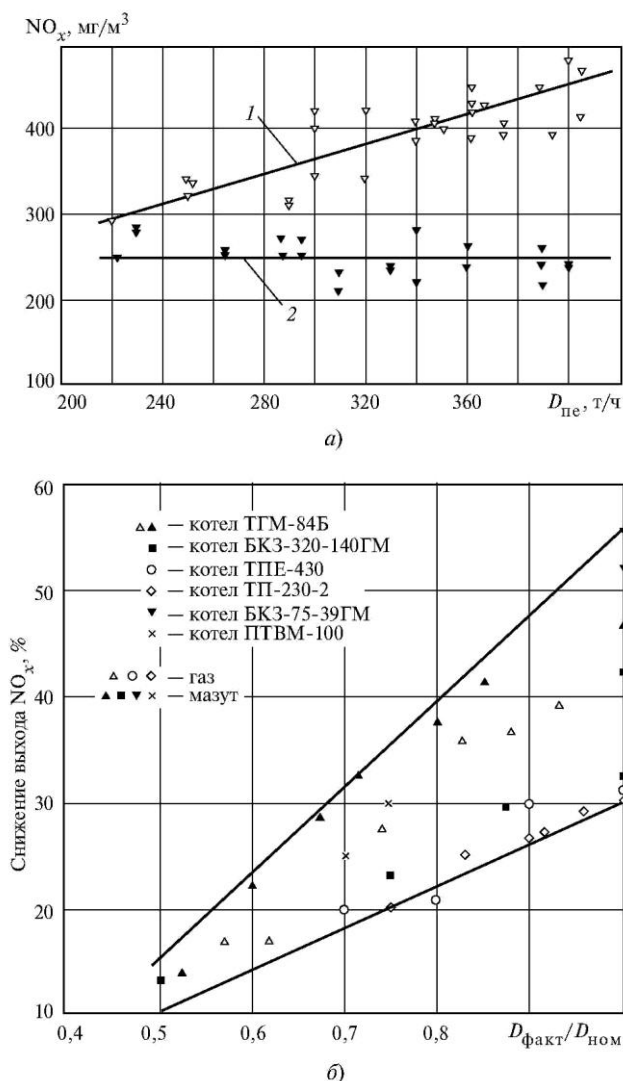
Перевод котла с традиционного на нестехиометрическое сжигание должен включать несколько этапов. В рамках первого (подготовительного) этапа необходимо осуществить проверку уплотнения топочной камеры и газоходов котла и устранить причины ненормативных присосов холодного воздуха. В соответствии с «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей» должна быть обеспечена равномерность распределения воздуха между горелками, произведена проверка мазутных форсунок на водяном стенде в целях обеспечения их равной производительности и удовлетворительного качества распыла. Производится проверка запорной и регуливающей арматуры перед горелками котла и по топливному тракту. Наконец, выполняется проверка и при необходимости наладка технических средств измерений, обеспечивающих контроль технического состояния и режимов работы котельной установки. На период наладочных испытаний (и по возможности на весь следующий рабочий период) на котле должны быть установлены средства инструментального контроля состава дымовых газов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ). Данные мероприятия необходимы для того, чтобы устранить или хотя бы существенно уменьшить известный эффект увеличения критического коэффициента избытка воздуха при переходе на нетрадиционные способы сжигания топлива.

На втором этапе в зависимости от вида сжигаемого топлива и конструктивных особенностей котла определяются способ разбаланса топливовоздушного соотношения в горелках и схема реализации нестехиометрического сжигания.

На третьем, заключительном, этапе выполняются практическое внедрение способа нестехиометрического сжигания и наладочные испытания. В рамках этого этапа на котле производится проверка выбранного способа разбаланса топливовоздушного соотношения в горелках и схемы реализации нестехиометрического сжигания. Соотношение избытков воздуха в восстановительных  $\alpha_v$  и окислительных  $\alpha_{ок}$  факелах следует подбирать таким образом, чтобы общее количество организованно подаваемого в топочную камеру горячего воздуха оставалось прежним, т.е. как и при обычном сжигании. Реальные значения  $\alpha_v$  и  $\alpha_{ок}$  по возможности должны максимально приближаться к рекомендованным для соответствующего вида топлива значениям.

Во время наладочных испытаний определяются оптимальные режимные условия нестехиометрического сжигания топлива во всем рабочем диапазоне нагрузок и разрабатывается режимная карта работы котла. Для поддержания высокой эффективности подавления выбросов оксидов азота на пониженных нагрузках предусматривается переход от нестехиометрического сжигания (на больших и средних нагрузках) к двухступенчатому сжиганию (на малых нагрузках) за счет отключения ряда горелок по топливу.

Выполнение предложенных рекомендаций при вне-



**Рис. 1.8.** Влияние нагрузки котла на выход оксидов азота при нестехиометрическом сжигании: а — котел ТГМ-84Б, 1 — при равномерном распределении топлива и воздуха по горелкам, 2 — нестехиометрическое сжигание; б — степень снижения выхода оксидов азота для различных котлов

дрении способа нестехиометрического сжигания обеспечит снижение выбросов оксидов азота на 35...50 % и надежную работу котла при сохранении его основных технико-экономических показателей.

Преимуществами данного способа сжигания являются:

- возможность реализации на большинстве серийных паровых и водогрейных котлов независимо от конструкций топочной камеры и горелочных устройств;
- универсальность по топливу;
- простота реализации на действующих котлах без проведения их реконструкции и замены тягодутьевых машин;
- отсутствие необходимости дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат на реализацию;
- быстрая адаптация оперативного персонала к данному нетрадиционному способу сжигания топлива.

В табл. 1.5 приведены результаты внедрения нестехиометрического сжигания на различных котлах.

Для дальнейшего снижения выхода  $\text{NO}_x$  (если при реализации нестехиометрического сжигания снижение составит менее 40 %) могут быть дополнительно применены рециркуляция продуктов сгорания в общий короб горячего воздуха или зону дожигания (верхний ярус горелок) в количестве 10...20 % объема уходящих газов или ввод влаги в ядро горения в количестве 5...8% массы сжигаемого топлива. На котлах ТГМЕ-464 при сжигании природного газа организация фиксированного нестехиометрического сжигания снизила концентрацию  $\text{NO}_x$  с

400 до 200  $\text{мг/м}^3$  при нагрузках, близких к номинальной (рис. 1.9). При нестехиометрическом сжигании в сочетании с рециркуляцией дымовых газов и со ступенчатым вводом воздуха, на котле ТГМЕ-464 Липецкой ТЭЦ-2 концентрацию  $\text{NO}_x$  удалось снизить до 80...90  $\text{мг/м}^3$  [8].

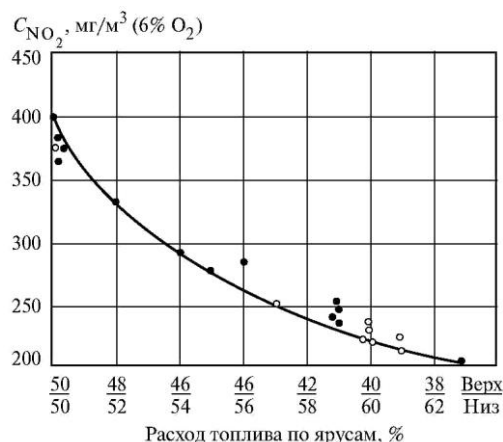


Рис. 1.9. Зависимость концентрации  $\text{NO}_x$  от степени перераспределения газа по ярусам горелок котла ТГМЕ-464:

$D = 500...510$  т/ч;  $a''_{\text{эк}} = 1,04...1,06$ ; • — первый этап испытаний; о — второй этап испытаний

Таблица 1.5. Эффективность снижения выбросов оксидов азота при реализации метода нестехиометрического сжигания [6, 7]

Тип котла, ТЭС	Топливо	Выбросы $\text{NO}_x$ , $\text{мг/м}^3$		Снижение выбросов $\text{NO}_x$ , %
		при обычном сжигании	при нестехиометрическом сжигании	
ПТВМ-100, ТЭЦ г. Глазова	Мазут	250	170...175	30 ... 32
ТГМЕ-464, Липецкая ТЭЦ-2	Природный газ	400	200	50
БКЗ-320-140ГМ, Камчатская ТЭЦ-2	Мазут	510...530	280...300	43...45
ТГМ-151, Салаватская ТЭЦ	Природный газ	330	260	20
ТГМ-84Б, Казанская ТЭЦ-3	Мазут	430	260	40
	Природный газ	250	135	45
	Газ/мазут	340	220	35
БКЗ-75-35ГМ, ТЭЦ г. Глазова	Мазут	330...350	150...155	50...55
ТП-230-2, Безымянская ТЭЦ	Природный газ	460...485	310...350	28... 32
ЦКТИ-75-39Ф, ТЭЦ г. Глазова	Кизеловский уголь	390...400	290...310	22... 34