

УДК 536.46:532.51

## ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДВУХПОТОЧНЫХ (СДВОЕННЫХ) УГОЛЬНЫХ ГОРЕЛОК

*Шульман В.Л., Курочкин А.В., Шульман-Симаков Д.Л.,  
Горяев Ф.В., Дегтярев М.Б.*

*Инженерный центр энергетики Урала,  
предприятие "УралОРГРЭС", Екатеринбург*

Многообразие технологических и конструктивных способов ограничения выбросов оксидов азота определяется различием свойств топлива, конструкцией топочно-горелочного устройства, задаваемым конечным результатом, располагаемыми инвестиционными возможностями. Взвешенный подход приводит к специфическим решениям в каждом конкретном случае.

В докладе рассматривается опыт разработки и реализации природоохранных мероприятий на котлах БКЗ-420-140 ряда электростанций России и Казахстана, сжигающих экибастузский уголь.

Для котла БКЗ 420-140-5 паропроизводительностью 240 т/ч с пылестемой прямого вдувания существенной отличительной особенностью является оснащение восемью двухпоточными (сдвоенными) пылеугольными горелками с линейной компоновкой. Каждая такая горелка представляет, по существу, комбинацию двух автономных пылеугольных горелок: два концентричных канала аэросмеси, связанных с различными мельницами, два концентричных потока вторичного воздуха (наружный с поворотными лопатками и внутренний с неподвижными лопатками). Предусматривается возможность автономного регулирования расхода и крутки горячего вторичного воздуха по каждому из каналов.

Для котлов указанного типа, установленных на Омской ТЭЦ-5, задача снижения выбросов оксидов азота решалась с учетом ограниченных возможностей реконструкции. Поэтому принято было поэтапное усовершенствование систем сжигания, сводившееся первоначально к малозатратной реконструкции горелок. Исходное значение концентрации оксидов азота до 950–1100 мг/нм<sup>3</sup>. Прогнозировалось снижение выбросов оксидов азота не более 20%. Столь ограниченная эффективность связана с конструктивными особенностями двухпоточной горелки.

В типовых вихревых пылеугольных горелках наиболее распространенным решением является разделение кольцевого канала вторичного воздуха на два канала, разделяемых кольцевой тонкостенной перегородкой по все длине горелки. Такой конструктивный прием уже сам по себе замедляет смесеобразование и способствует снижению выброса оксидов азота. При этом совмещение оптимальных условий выгорания топлива и сниженного выхода окислов азота может быть осуществлено

– поддержанием расхода внутреннего потока вторичного воздуха соответственно оптимальному (по условиям выхода окислов азота) соотношению полных импульсов потока аэросмеси и внутреннего потока вторичного воздуха;

– поддержанием оптимального (по условиям выгорания пылевоздушной смеси) соотношению скорости аэросмеси и основного (периферийного) потока вторичного воздуха, соответствующего нормативному значению скоростей этих потоков.

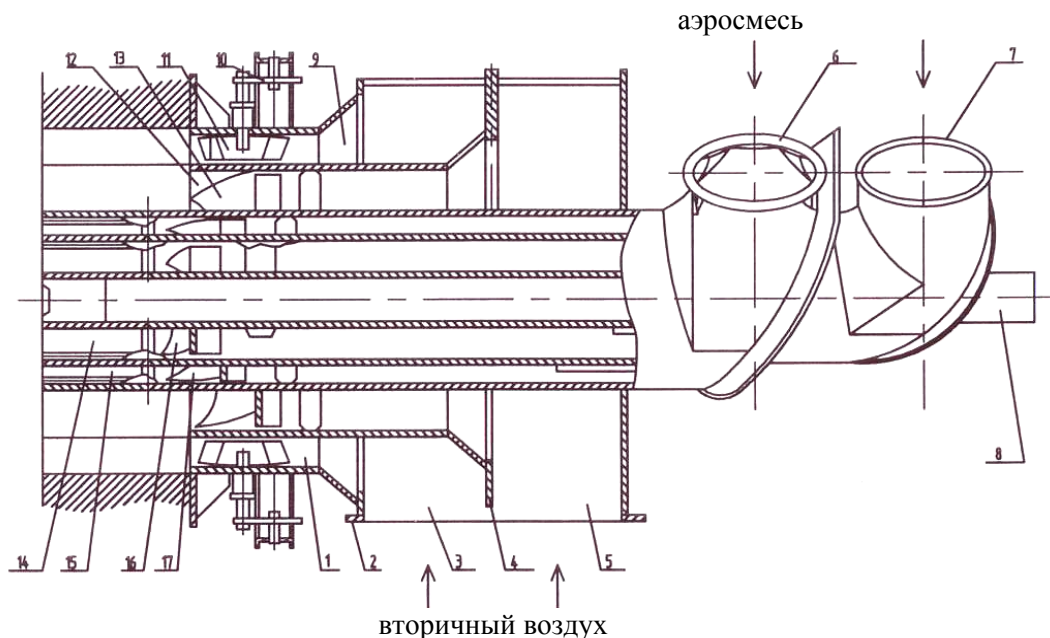


Рис. 1. Двухпоточная пылеугольная горелка котла БКЗ-420-140-5. 1 – корпус горелки; 2 – входной патрубок вторичного воздуха; 3 – входной канал внешнего потока вторичного воздуха; 4 – разделительная перегородка входного патрубка горелки; 5 – входной канал внутреннего потока вторичного воздуха; 6 – входной патрубок внешнего потока аэросмеси; 7 – входной патрубок внутреннего потока аэросмеси; 8 – центральная труба; 9 – внешний канал вторичного воздуха; 10 – устройство регулирования поворота лопаток внешнего канала вторичного воздуха; 11 – поворотные лопатки канала вторичного воздуха; 12 – внутренний канал вторичного воздуха; 13 – лопатки внутреннего канала вторичного воздуха; 14 – внутренний канал аэросмеси; 15 – внешний канал аэросмеси; 16 – лопатки внутреннего канала аэросмеси; 17 – лопатки внешнего канала аэросмеси.

Двухпоточную горелку нельзя рассматривать как обычную вихревую горелку с двумя каналами вторичного воздуха. При выполнении тонкостенной разделительной перегородки между равными по мощности вихревыми потоками последние развиваются на выходе из горелки как единый монолитный поток. Об этом свидетельствует исходная высокая концентрация оксидов азота в топочных газах, характерная для типовых горелок с одним каналом вторичного воздуха. Таким образом, наличие двух равных по мощности потоков воздуха, разделенных тонкостенной перегородкой, не обеспечивает достаточно эффективное торможение смесеобразования. Необходимо более эффективное размежевание этих двух коаксиальных потоков, осуществить пространственный разрыв между ними.

Для этого между двумя кольцевыми каналами вторичного воздуха была установлена кольцевая непроточная полость 18 значительной ширины (рис. 2), связанная с воздушным каналом системой отверстий 19 для ввода вентилирующего воздуха. Этим и ограничилась реконструкция горелок.

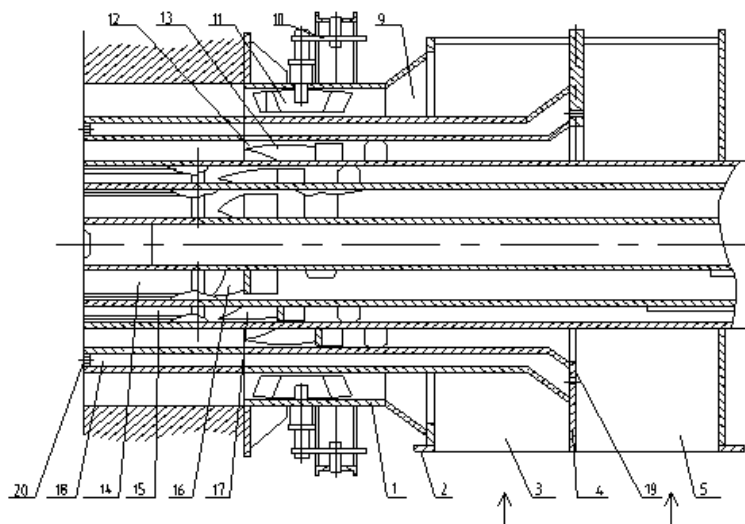


Рис. 2. Двухпоточная горелка с промежуточным непроточным каналом.

При эксплуатации двухпоточной горелки подача вторичного воздуха в горелку осуществляется постоянно в оба канала вторичного воздуха независимо от отключения одного из потоков аэроsmеси. Поэтому во всех режимах работы сдвоенной горелки (при функционировании обоих или одного из каналов аэроsmеси) непроточный промежуточный канала обеспечивает существенный пространственный разрыв между потоками вторичного воздуха на выходе из горелки и на определенном удалении от выходного сечения.

Испытания группы однотипных котлов с реконструированными горелка показали снижение концентрации оксидов азота в топочных газах не менее чем на 27% в среднем до  $800 \text{ мг/нм}^3$ . Такой шаг не обеспечивает выход на уровень нормативных требований для реконструируемых котлов ( $570 \text{ мг/нм}^3$ ), необходимы последующие шаги с использованием внутритопочных мероприятий, например, ступенчатое сжигание, некаталитическое селективное восстановление оксидов азота на выходе из топки.

## **Организация трехступенчатого сжигания на реконструированном котле БКЗ-420 (460)**

### **Исходное состояние котла**

Иным образом решались подобные проблемы на котле аналогичного типа, но реконструированного ранее. Котел ст.№8 типа БКЗ 420-140-5 был реконструирован в 2006 году по проекту Барнаульской проектной организации ООО «БСББКУ» с целью увеличения паропроизводительности котла до 460 т/ч и снижения  $\text{NO}_x$ . В ходе этой реконструкции была существенно изменена организация топочного процесса:

- организована система нижнего дутья (с подачей через холодную воронку до 20% всего расчетного расхода вторичного воздуха со встречно смешенными потоками, поступающими через прямоугольные сопла на наклонных скатах холодной воронки);

– все пылеугольные горелки заменены новыми горелками, в которых уменьшены проходные сечения каналов вторичного воздуха с учетом подачи части вторичного воздуха в топку через систему нижнего дутья.

Определяющим фактором в реорганизации топочного процесса при реконструкции котла служит нижнее дутьё. Струйные потоки горячего воздуха создают вихревые течения в холодной воронке, которые захватывают часть пылевоздушных потоков из горелок, осуществляя их воспламенение и выгорание, а так же крупные частицы угольной пыли, выпадающие из основного факела, в объеме холодной воронки. Сюда же вовлекаются высокотемпературные топочные газы. В результате в теплообменные процессы более активно включается НРЧ и экраны холодной воронки.

При нижнем дутье ввод значительной части вторичного воздуха (до 30% – 35%) осуществляется непосредственно в топку, минуя горелочные устройства, без сопровождения потоков аэросмеси. Эта часть горячего воздуха рассредоточивается по всему сечению топочной камеры, затрудняя смешение с аэросмесью и формирование пылеугольного факела.

В результате этих процессов на котле выявлено:

- 1) зона горения угольной пыли растягивается по высоте;
- 2) в целом, при достаточной высоте топки повышается эффективность выгорания угольной пыли, снижается недожог  $C_V^T$ ;
- 3) снижается максимальная температура в топке, соответственно, падает излучательная способность пылеугольного факела и растет температура дымовых газов на выходе из топки, способствуя нерасчетному перегреву пара.
- 4) низкая экологическая эффективность системы нижнего дутья.

Наиболее существенные недостатки режима работы реконструированного котла связаны с повышением температуры перегретого пара свыше  $550^{\circ}\text{C}$  и температуры металла ширм до  $530^{\circ}\text{C}$  при полностью открытых впрысках первой и второй ступени пароохладителя, а также при полностью открытом растопочном пароохладителе, в который поступает питательная вода.

Трехлетний опыт эксплуатации реконструированного котла в течение 2008 – 2010 годов показал, что на практике эффективность указанного способа снижения выхода оксидов азота не реализуется. По данным эксплуатационной системы контроля концентрация  $\text{NO}_x$  в дымовых газах за указанный период составляла при номинальной нагрузке 950 – 1050 мг/м<sup>3</sup>.

Для устранения и компенсации выявленных недостатков системы нижнего дутья была выполнена перестройка воздушного режима горелок:

- расход воздуха нижнего дутья при номинальной нагрузке свыше 100 тыс. м<sup>3</sup>/ч (при расчетном значении 64,55 тыс. м<sup>3</sup>/ч);
- оптимальный избыток воздуха за котлом при нагрузке, близкой к номинальной, составляет 1,16 – 1,17;
- положение лопаток завихрителя вторичного воздуха:
  - в наружном канале горелок №№ 2,3,6,7 –  $\alpha_{\text{лоп.}} \approx 50^{\circ} - 55^{\circ}$ ;
  - в наружном канале горелок № 1,4,5,8 –  $\alpha_{\text{лоп.}} \approx 20^{\circ} - 25^{\circ}$ ;
- положение шиберов на каналах вторичного воздуха:
  - внутренние каналы всех горелок –  $\text{УП}_{\text{внутр.}} = 0\%$ ,

- наружные каналы всех горелок –  $УП_{\text{наруж.}} = 100\%$ ,
- при номинальной нагрузке распределение организованно подаваемого воздуха составляет:
    - доля вторичного воздуха 0,57;
    - доля первичного воздуха 0,309;
    - доля воздуха на систему нижнего дутья  $\sim 0,277$ .

### Особенности реализации системы трехступенчатого

Система трехступенчатого сжигания на котле БКЗ-460 выполнена по традиционной схеме (рис. 3): при установке горелок на отметке 11.350 сопла восстановительной зоны размещаются на отметке 14.250; оси дожигательных сопел установлены на отметке 16.850. Таким образом, протяженность по высоте каждой из трех зон топочной камеры составляет:

- I зона – зона развития основного факела – 2900 мм;
- II зона – восстановительная зона – 2600 мм;
- III зона – зона дожигания около 3.5 м до оси поворотной камеры.

В схеме сжигания для котла БКЗ-460 (как и во всех других разработках схемы трехступенчатого сжигания, выполняемых предприятием УралОРГРЭС) в качестве топлива, генерирующего восстановительную среду, используется основное топливо в виде пылевоздушной смеси с избытком воздуха 0,30...0,32. Для этого часть потока аэросмеси, поступающей от сепаратора мельницы на горелку по пылепроводу диаметром 420 мм, отводится в восстановительную зону. По проекту разделение потока аэросмеси осуществляется пыледелителем (рис. 3.2), выполненном в виде циклонного аппарата с верхним и нижним стоком пылевоздушного потока.

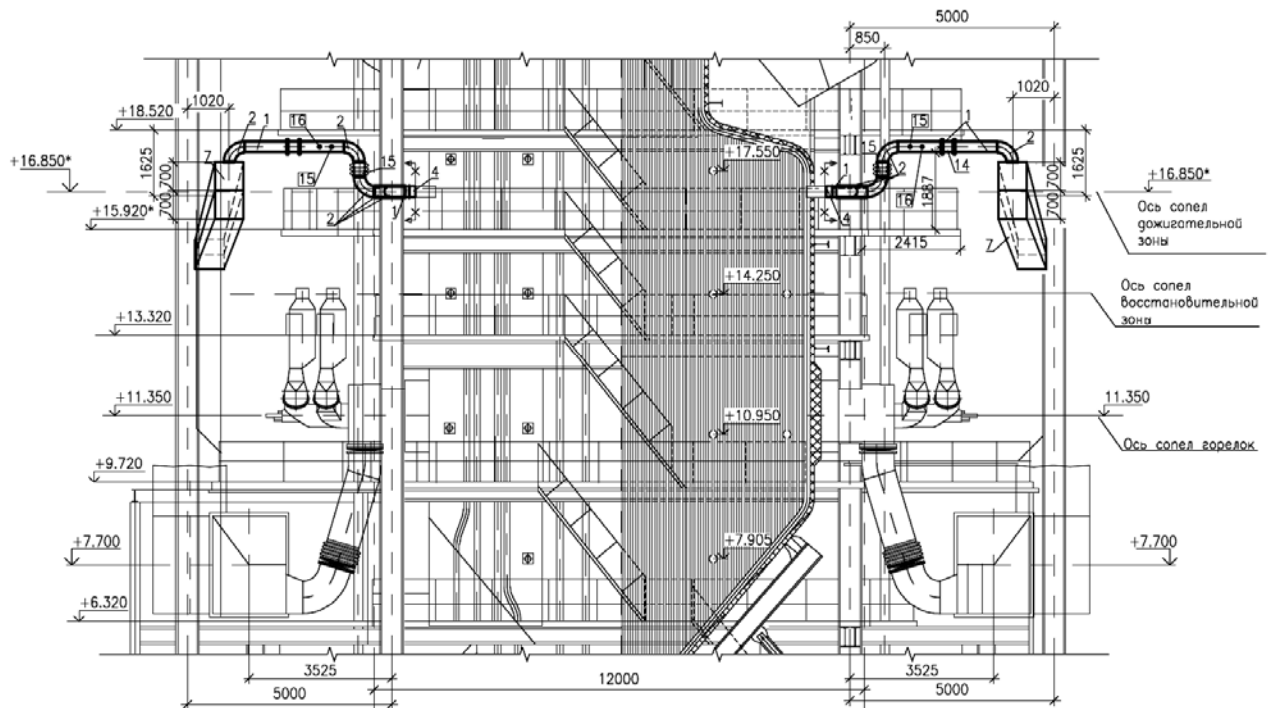


Рис. 3. Схема выполнения системы трехступенчатого сжигания на котле БКЗ-460-150 ст.№ 8.

## Оценка возможности совмещения технологии трехступенчатого сжигания с рассмотренными альтернативными способами совершенствования топочного процесса

Основные проблемы заключались не столько к повышению эффективности системы трехступенчатого сжигания, сколько к определению совместимости этой технологии с реализованными уже на котлах БКЗ-460-140-5 мероприятиями и устранению нежелательного наложения их воздействия.

### Характеристика режима работы котла с наложением трехступенчатого сжигания и нижнего дутья

Структура потоков в топочной камере в режиме нижнего дутья создает заведомо неблагоприятные для эффективности системы трехступенчатого сжигания. В результате замедленного смесеобразования в восстановительную зону поступают топочные газы с большим избытком свободного кислорода. Продукты неполного сгорания топлива, подаваемого через восстановительные сопла, являющиеся высокоактивными восстановителями, перехватывают свободный кислород, теряя свою восстановительную способность по отношению к оксидам азота. Происходит деградация восстановительной среды.

Сравнивая выход оксидов азота в режиме совмещения нижнего дутья и трехступенчатого сжигания (рис. 4), с автономным режимом работы трехступенчатого сжигания (нижнее дутье перекрыто), можно убедиться, что влияние нижнего дутья на выход оксидов азота негативно. Это особенно сказывается при повышенных нагрузках – 420–460 т/ч.

В отсутствие нижнего дутья при всех прочих равных условиях выход оксидов азота снижается на 28% – 30%. Исключение нижнего дутья позволило:

- восстановить проектный воздушный режим горелки (полное открытие обоих каналов вторичного воздуха, расчетная крутка внешнего потока вторичного воздуха с углом установки лопаток  $25^\circ$ , расчетные значения скорости истечения вторичного воздуха из горелок);

- поддержать при этом расчетный температурный режим поверхностей нагрева и острого пара при ограниченном использовании впрысков.

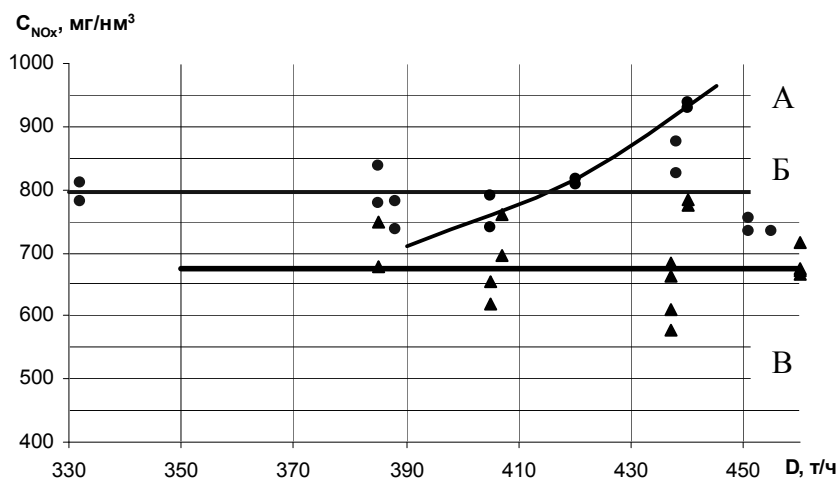


Рис. 4. Выход оксидов азота в режиме наложения трехступенчатого сжигания и нижнего дутья –А, в режиме трехступенчатого сжигания при избытке воздуха  $\alpha = 1,21-1,26$  Б, в режиме трехступенчатого сжигания при избытке воздуха  $\alpha = 1,14-1,20$  –В.

## О возможности совмещения трехступенчатого сжигания и работы горелок с замедленным смесеобразованием

Аналогичная ситуация складывается при сочетании одного из эффективных превентивных методов подавления оксидов азота (горелка с замедленным смесеобразованием) и эффективного метода подавления уже образовавшихся оксидов азота (восстановления их в системе трехступенчатого сжигания).

Замедление смесеобразования может достигаться различными методами:

- закрытие внутреннего канала вторичного воздуха;
- ввод части вторичного воздуха в топку помимо горелок;
- замедление смешения смежных потоков аэросмеси и вторичного воздуха выравниванием крутки обоих потоков.

Все эти мероприятия способствуют предотвращению образования оксидов азота. В обычных топках это не вызывает существенных побочных эффектов. Однако при трехступенчатой схеме сжигания это обстоятельство приводит к смещению процесса смесеобразования в восстановительную зону. Непременным условием эффективности трехступенчатого сжигания является минимальное содержание свободного кислорода в потоке дымовых газов, поступающих в зону восстановления. Вторжение свободного кислорода (как и в случае совмещения с нижним дутьем) ослабляет активность восстановительной среды.

В то же время горелка с замедленным смесеобразованием обладает собственным значительным экологическим потенциалом. Прогнозировать итоговый эффект взаимодействия столь разнонаправленных процессов невозможно. Испытания показали (рис. 5; табл. 1), что ослабление восстановительной эффективности трехступенчатого сжигания не компенсируется влиянием указанных превентивных методов воздействия на образование оксидов азота. Испытания показали, что рассмотренные технологии подавления оксидов азота, высокоэффективные при автономном их применении, не могут быть взаимодополняющими при совместном их использовании в топке котла БКЗ-460.

Таблица 1

Организация топочного режима (Во всех опытах подача воздуха на нижнее дутье перекрыта)		Нагрузка, т/ч	Избыток воздуха $\alpha$	Концентрации в дымовых газах $\text{NO}_x$ , мг/нм <sup>3</sup>
Режим трехступенчатого сжигания в сочетании с повышением экологичности горелок	Угол установки поворотных лопаток внешнего канала вторичного воздуха от 25 до 55	405,0	1276	740 / 789
		440,0	1,235	937 / 930
		420,0	1,292	808 / 816
		370,0	1,25	851 / 801
Прикрытием внутреннего канала вторичного воздуха всех горелок (около 50%)		409,0	1,21	779 / 838
		390,0	1,18	736 / 781
		438	1,21	825 / 876
Режим трехступенчатого сжигания без воздействия на свойства горелок	Выравнивание крутки обоих потоков при открытых каналах вторичного воздуха (проектный режим работы горелок)	440,7	1,12	663 / 685
		387,0	1,14	679 / 749
		466,0	1,19	717 / 675
		466,9	1,15	667 / 673
		413,0	1,25	760 / 697
		405,0	1,19	618 / 653

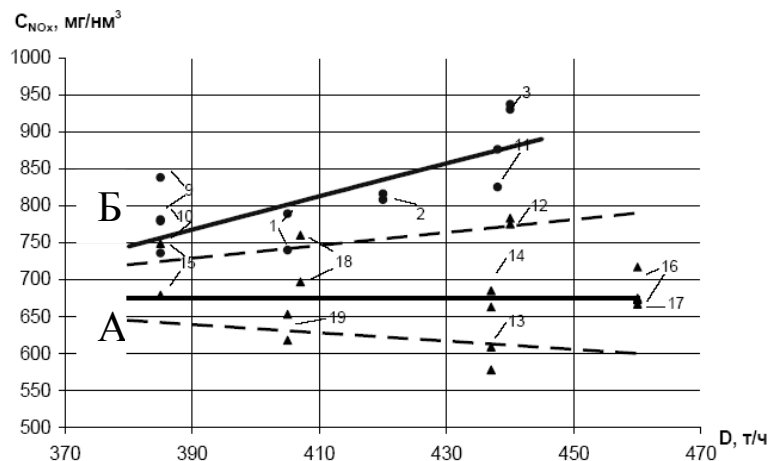


Рис. 5. Выход оксидов азота в режиме трехступенчатого сжигания (А) и при наложении различных изменений режима работы горелки, направленных на повышение экологической эффективности горелок (Б).

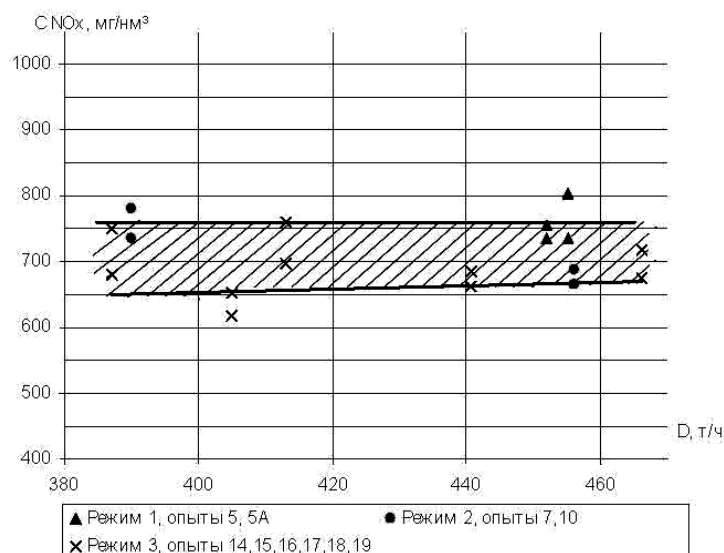


Рис. 6. Содержание азота в дымовых газах при трехступенчатом сжигании при изменении избытка воздуха в диапазоне  $\alpha = 1,17-1,20$ .

### Определение эффективности системы трехступенчатого сжигания без наложения других технологий

Экологические характеристики системы трехступенчатого сжигания фиксированы в узкой полосе значений NOx при нагрузках 380–460 т/ч (коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,17-1,20$ ), ширина этой полосы соответствует различию значений  $\Delta NOx$  не более 100 мг/м<sup>3</sup> (рис. 6). При этом точки на графике, относящиеся к режиму, который рассматривается в качестве оптимального (без увеличения крутки наружного потока вторичного воздуха, без регулирования расхода вторичного воздуха по обоим каналам), тяготеют к нижней границе указанной полосы значений NOx. Это означает, что мобилизация экологических свойств горелки негативно сказывается на эффективности системы трехступенчатого сжигания.



Существенны побочные следствия реализации трехступенчатого сжигания:

1) Температура наиболее термонапряженных ширм существенно снижена по сравнению с режимом нижнего дутья и не достигает критического уровня.

2) Температура пара выдерживается на расчетном уровне при ограничении системы охлаждения пара, впрыски уменьшены. Отпадает необходимость использования других способов ограничения перегрева пара, изменять воздушный режим горелок (как это требовалось в режиме нижнего дутья).

3) Шлакование, наблюдаемое при низких избытках воздуха в топке ( $\alpha$  менее 1,14–1,15), носит локальный характер и не сказывается на функционировании самой топочной камеры. Однако оно приводит к нарушению транспорта золошлаков. Для предотвращения локального шлакования необходимо поддерживать избыток воздуха в топке – не менее 1,16 – 1,17 во всем диапазоне рабочих нагрузок

4) Значение  $q_4$  при избытке воздуха в режимном сечении 1,17 – 1,20 изменяется в зависимости от избытка воздуха в пределах 4,5% – 3,4% (рис. 7).

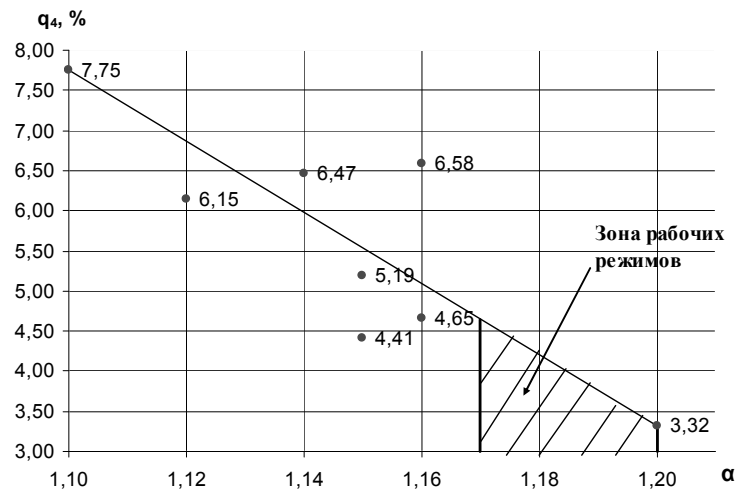


Рис. 7. Потери тепла с механическим недожогом  $q_4$  в режиме трехступенчатого сжигания

### Сопоставление эффективности различных способов подавления оксидов азота при использовании двухпоточных горелок

Про результатам испытаний и эксплуатации котлов можно констатировать несколько большую эффективность восстановительного режима трехступенчатого сжигания по сравнению с организацией превентивного способа воздействием на воздушный режим двухпоточной горелки – в первом случае снижение концентрации оксидов азота составляет 30–40%, во втором около 27%. В целом, с учетом всех факторов (условия эксплуатации, затраты на реконструкцию, надежность конструктивных узлов) обе технологии снижения выбросов оксидов азота конкурентоспособны. Этот вывод ограничивается конкретными условиями – двухпоточные горелки, сжигание экибастузского угля.