

РГБ ОД

-- ДЕК 1999

На правах рукописи

УДК 621.181.7.001:620.9

WR 24 DEC 99

Кухарский Януш

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНЫХ ВЫБРОСОВ
В ТОПКАХ С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ
ГОРЕЛОК (ИССЛЕДОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ)

Специальность 05.04.01 - Котлы, парогенераторы и камеры сгорания

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 1999

Работа выполнена на кафедре Реакторо-и парогенераторостроения
Санкт-Петербургского технического университета и на ТЭЦ АЗ "Пулавы"
А.О (Польша)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ахмедов Д.Б.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Арефьев К.М.
кандидат технических наук
Филонов А. Ф.

Ведущая организация: ВТИ Москва

Защита состоится в аудитории 251 «14» декабря 1999 г. в
16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета К 063.38.23 Санкт
Петербургского государственного технического университета по адресу:
С.Петербург, Политехническая ул.; д.29, главное здание.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью ор-
ганизации, просим направлять по адресу: С.Петербург, Политехническая
ул., дом 29, Ученый Совет СПбГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГТУ.

Автореферат разослан «4» ноября 1999 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
К.063.38.23
д.т.н., проф.:



А.С.Ласкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из основных и необходимых условий развития цивилизации была и есть возможность удовлетворения растущей потребности в электроэнергии. Энергообеспечение промышленных производств сегодня невозможно без решения проблем рационального использования природных ресурсов и обеспечения экологических требований.

Уголь является главным источником выбросов в атмосферу оксидов азота NO_x , углерода CO и CO_2 , серы SO_2 и SO_3 , бенз/ α /пирена, диоксинов, частиц золы и кокса и др. Большинство потерь, вызванных эмиссией загрязнений в атмосферу, составляют в разных странах несколько процентов общего дохода и зависят, прежде всего, от хозяйственной структуры и технического уровня. Так, в Польше потери, связанные с эмиссией загрязнений, составляют до 10% народного дохода. В настоящее время возможности снижения вредных выбросов полностью не реализованы. В частности необходимость решения этой проблемы для энергетических парогенераторов является чрезвычайно актуальной. Диссертационная работа посвящена решению задачи снижения токсичных выбросов в котлах с тангенциальным расположением горелок.

Цель работы:

- анализ процессов преобразования при горении составляющих твердого топлива в зонах с полувосстановительной средой;
- исследование механизмов преобразования соединений серы топлива в полувосстановительной среде и разработка мероприятий по снижению SO_x ;
- экспериментальное исследование состава продуктов сгорания в вихревой зоне низкоэмиссионной топки;
- разработка мероприятий по снижению токсичных выбросов в окружающую среду при сжигании угля, с учетом минимизации затрат на реконструкцию действующих котельных установок;
- анализ теплотехнических характеристик работы котла при низкоэмиссионном сжигании и разработка мероприятий по повышению надежно-

сти и экономичности работы котла.

При этом были решены следующие задачи:

- выбраны основные направления исследования на основе предложенной схемы горения составляющих твердого топлива в вихревой зоне при низкоэмиссионном сжигании;
- исследованы процессы преобразования горючей массы топлива в полувосстановительной среде и образования оксидов серы в объеме низкоэмиссионной топки, что позволило разработать и испытать систему подачи сорбента в топку и связывания оксидов серы;
- выполнены внутритопочные исследования в котлах с тангенциальным расположением горелок, реконструированных на низкоэмиссионный метод сжигания углей, что позволяет усовершенствовать регулирование котла.

Научная новизна работы:

- на основе проведенного анализа особенностей топочного процесса в вихревой зоне низкоэмиссионной топки выявлены факторы, приводящие к понижению концентрации токсичных компонентов, повышению надежности и экономичности работы котла;
- показано, что в вихревой части топки возможно существование двух обширных областей с полувосстановительной средой, в которых происходят процессы предварительной газификации топлива с образованием горючих газообразных продуктов (C_nH_m , H_2S , CO , и др.);
- экспериментальные исследования топочной среды позволили предложить и оценить роль каждой из реакций газификации и их влияние на решение поставленной задачи.
- экспериментально доказано, что в низкоэмиссионных топках содержание SO_2 может составлять до 30% от общего содержания оксидов серы (вместо 0,5...1% при обычных методах сжигания) и зависит от соотношения первичного, вторичного воздуха и воздуха нижнего дутья;
- значительное количество SO_2 в продуктах сгорания и пониженные температуры в зоне горения позволяют обеспечить достаточно высо-

кую степень связывания SO_2 добавками оксидов щелочных металлов.

Практическая ценность работы:

- На основе разработанных рекомендаций повышена эффективность снижения токсичных выбросов NO_x и SO_x , а также использования ввода дополнительного сорбента для связывания оксидов серы;
- выявленные особенности теплообмена в топке позволили разработать технологии и конструкции для повышения маневренности котла в диапазоне 110...55%.

Результаты исследований внедрены на четырех котлах ОП-215 ТЭЦ АЗ „Пулавы” А.О., ТЭЦ „Явжно-2” на котлах ПК-10. В результате использования упрощенного метода сероочистки концентрация SO_2 в уходящих газах снижена на 30-40%, что дает возможность работы котлов с соблюдением существующих норм эмиссии. Дополнительный экономический и экологический эффект заключается в том, что в золе содержатся в основном ионы SO_4 , не приводящие к повышению кислотности воды.

Личный вклад автора заключается:

- В разработке программ и руководстве исследованиями внутритопочных процессов;
- в выполнении аналитических и экспериментальных исследований процессов горения в вихревой зоне низкоэмиссионных топок и процессов преобразования сернистых соединений, содержащихся в золе;
- в проведении анализа и обобщений результатов внутритопочных, внутрикотловых исследований, а также исследований газообразных и твердых выбросов из котла;
- в определении способов и количества подаваемого сорбента в активную зону горения для эффективного связывания оксидов серы.

Апробация работы и публикации.

Результаты работы докладывались на семи международных конференциях в 1994 – 1998 годах (в Брно, Вроцлав и др.). По результатам выполненных исследований опубликованы 7 статей и тезисов докладов на

конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, списка использованной литературы, включающей наименования и Приложения. Работа содержит 162 страницы машинописного текста, иллюстрирована 84 рисунками и 37 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации показана актуальность работы, дана общая характеристика проблемы влияния эмиссии загрязнений ТЭС на окружающую среду, сформулированы цели работы.

В первой главе выполнен критический анализ литературных данных по теме диссертации, обоснована актуальность диссертационной работы, поставлена задача исследования.

Наиболее известные из низкоэмиссионных топочных процессов – сброс части воздуха в надфакельное пространство (OFA), горизонтальное распределение воздуха по ступеням горения (LNB) и ряд других – предусматривают рассредоточенную по длине факела подачу воздуха, осуществляемую различными методами.

Замена существующих горелок на низкоэмиссионные является самой простой и малозатратной. В то же время, применение низкоэмиссионных горелок обычно приводит к ухудшению экономических показателей работы котла из-за увеличения концентрации коксовых частиц в уходящих газах, а также повышения температуры уходящих газов.

Показано, что наиболее эффективными методами очистки продуктов сгорания от соединений серы считаются "мокрые" методы. Однако сложность и высокие капитальные и эксплуатационные расходы, практически равные стоимости всей котельной установки, препятствуют их широкому применению при модернизации действующего оборудования. Поэтому в диссертации основное внимание уделено анализу методов внутритопочной десульфуризации продуктов сгорания.

Проведенный анализ показал, что применение низкоэмиссионных горелок требует значительных материальных затрат на модернизацию горелочных устройств и системы регулирования температуры перегрева пара

при не очень значительном снижении концентрации NO_x и SO_x . Следует отметить, что в топках с тангенциальным расположением горелок практически не удается получить эффект от применения низкоэмиссионных горелок, а также нераспределения топлива и воздуха по ярусам горелок. Эффект снижения выбросов NO_x и SO_x в топках с тангенциальным расположением горелок практически не отмечается.

В СПбГТУ в 1980 годах под руководством профессора В.В. Померанцева был разработан и испытан новый процесс сжигания с многократной циркуляцией частиц топлива. Эта технология основана на вихревой аэродинамике, создаваемой в обычной камерной топке двумя потоками: наклонным вниз горелочным потоком с фронта и встречно-смещенным потоком нижнего дутья, подаваемым через устье холодной воронки.

Благоприятные экономические характеристики таких топок, особенно в отношении образования NO_x , привлекли внимание польских специалистов, по чьей инициативе в 1991 году были начаты совместные работы по применению низкоэмиссионной вихревой технологии сжигания (ПТВ) каменных углей в топках с тангенциальным расположением горелок.

Этот способ был применен в Польше путем последовательной модернизации 20 котлов производительностью от 140 т/ч до 230 т/ч на каменных углях в 1993-1998 г.г. Естественно на первое место поставлена задача сжигания углей с низким выходом NO_x , а также повышение экономичности сжигания углей. На ТЭЦ АЗ «Пулавы» АО к настоящему времени модернизировано 4 котла ОР-215. Положительные результаты по снижению выбросов NO_x при одновременном повышении экономичности котлов, полученные в результате реконструкции, требуют более подробного теоретического анализа и экспериментального исследования этого процесса с целью дальнейшего совершенствования этой технологии.

На основании проведенного обзора сформулирована цель и поставлены основные задачи исследования.

Во второй главе представлен предварительный анализ процессов выгорания топливных частиц и состава образующихся продуктов сгорания в полувосстановительной среде.

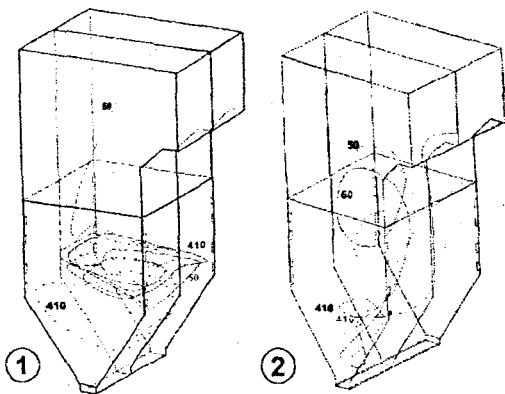


Рис. 1. Траектории движения частиц угля
 1 – до модернизации
 2 – после модернизации
 (диаметр частиц в микронах)

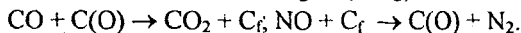
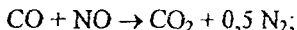
На рис. 1 показаны рассчитанные программой Флуэнт траектории движения частиц двух фракций в обычной топке с тангенциальным расположением горелок (1) и в реконструированной на НТВ сжигание (2). Из них видно, что в первом случае все частицы циркулируют только в зоне горелок. При

низкоэмиссионном процессе все крупные и большинство мелких частиц вовлекаются в вихревое движение и заполняют объем топки от горелок до нижнего дутья. При этом расстояние между вводом первичного воздуха (из горелок) и вторичного воздуха (нижнего дутья) составляет не десятки сантиметров (как в низкоэмиссионных горелках), а несколько метров. Результаты расчетов показали, что при этом практически весь кислород, попавший в нисходящий поток, расходуется на первых метрах. Далее идут восстановительные реакции с образованием значительного количества CO , H_2 и других газообразных продуктов газификации. Вводимый нижним дутьем кислород в основной массе расходуется на дожигание газообразных продуктов и только частично - на сжигание кокса. Из-за снижения температуры и недостаточной концентрации кислорода расчетное время выгорания наиболее крупной частицы увеличивается с 5...10 сек при прямоточном сжигании до 20...60 сек - при низкоэмиссионном сжигании, т.е. кратность циркуляции топлива в вихре составляет 5...10.

Подача воздуха в нижние горелки с избытком $\alpha_r = 0,6...0,7$ приводит к снижению выхода «топливных» оксидов азота. Именно в этой зоне повышенной концентрации горящего кокса и инертных газов (зона редукации) происходит активная реакция окислов азота ($\text{NO}_{\text{топл}}$), уже образовавшихся

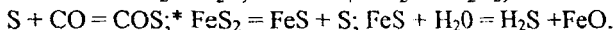
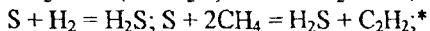
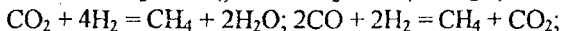
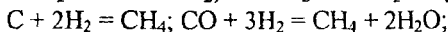
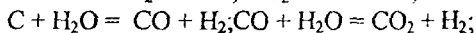
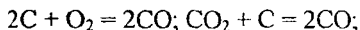
на начальном участке факела.

Редукция NO происходит в газовой фазе и при химической сорбции NO на поверхности кокса по реакциям:



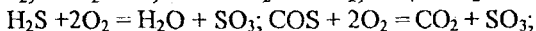
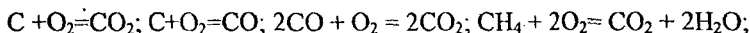
где C(O) обозначает адсорбированный кислород, и C_f - свободные активные центры углерода.

При вихревой аэродинамике, в нижней части топки образуются обширные зоны с недостатком кислорода ($\alpha < 1$) и повышенной концентрацией рециркулирующих частиц топлива. При этом могут протекать реакции *неполного сгорания*.



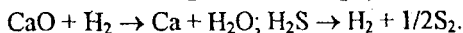
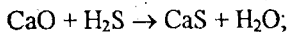
**) Результаты термодинамических расчетов этих реакций показали, что при температурах 1300... 1600 К, $\alpha = 0,37 \dots 0,55$, и атмосферном давлении соединения серы состоят из 90% H₂S и 7... 9 % COS.*

При попадании продуктов этих реакций в зоны с избытком кислорода (сопла нижнего дутья или зона горелок) происходит гетерогенное сгорание кокса и гомогенное сгорание газообразных:



В связи с тем, что скорость гетерогенных реакций значительно меньше, чем гомогенных, основная доля кислорода нижнего дутья расходуется на гомогенные реакции. Следовательно, и в восходящем потоке продуктов сгорания топочная среда может вновь переходить в полувосстановительную.

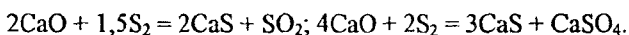
При отмеченном уровне температур с термодинамической точки зрения определяющими реакциями в топочном газе, содержащем H₂S и COS, можно считать следующие:



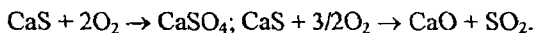
При этом реакция разложения H_2S происходит лишь при температурах более 1500...1600 К. До температуры 1400 К равновесная степень превращения при термическом разложении сероводорода не превышает 10%.

Эффект реакции восстановления окиси кальция в диапазоне температур 1000...1700 К также невелик.

В процессе выгорания твердого топлива, содержащего серу и соединения кальция, появляется активная свободная окись кальция. Последняя соединяется с элементарной серой с образованием сульфида кальция:

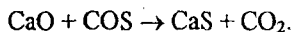


Обе эти реакции в диапазоне температур 1173...1273 К характеризуются достаточно большой отрицательной величиной изобарно-изотермического потенциала. Содержащий серу продукт CaS попадает затем в верхнюю часть топки (выше горелок), где избытки воздуха $\alpha > 1$. В этих условиях возможно окисление сульфида кальция CaS:



Однако, сравнивая значения термодинамических потенциалов этих реакций, можно сказать, что предпочтительнее в зоне температур 1000...1700 К идет реакция образования $CaSO_4$.

Сероокись углерода COS является нестабильным соединением при нормальных условиях. В условиях недостатка кислорода этот продукт будет реагировать с CaO:



В окислительной зоне CaS соединяется с кислородом, образуя $CaSO_4$.

Таким образом, рассмотренные процессы превращения продуктов сгорания топлива показывают, что в этой зоне образование SO_2 практически отсутствует. Сера топлива после ряда превращений переходит в гипс $CaSO_4$ и серный ангидрид SO_3 .

В третьей главе приведены результаты экологических и экономических испытаний котлов OP-215 после их модернизации на НТВ сжигание, а также результаты экспериментальных исследований температур и состава газовой среды в разных зонах топки (рис. 2). Выявлено, что эмиссия NO_x в дымовых газах снижена до 300...400 мг/м³ (120...140 г/ГДж) и не превышает норму 170 г/ГДж в широком диапазоне изменения избытка воз-

духа и нагрузок котлов (рис. 3), поэтому эксплуатационные колебания режима работы котла слабо влияют на эмиссию NO_x .

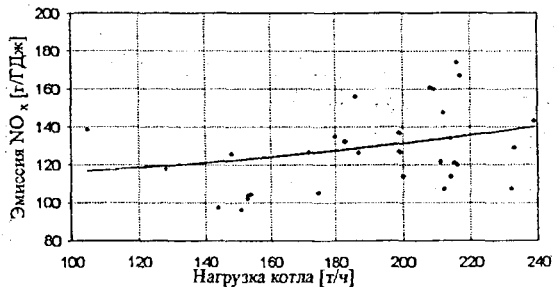
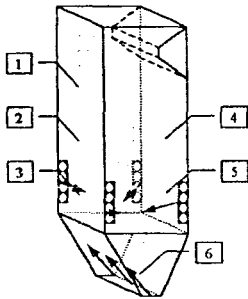


Рис. 2. Схема расположения зон измерений в топке котла ОР-215

Рис. 3. Эмиссия NO_x с котлов ОР-215

В результате модернизации к.п.д. котла брутто вырос на 1,0...1,5% (рис. 4) и на нагрузках близких номинальным, достиг 91...91,5%.

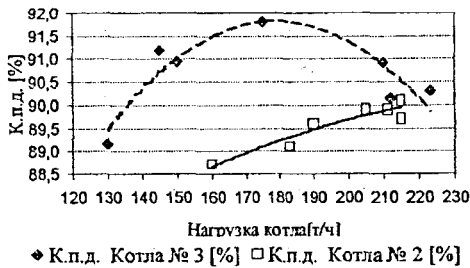


Рис. 4. К.п.д. котлов ОР-215 до и после модернизации

Измерения состава газов в вихревой зоне при $\alpha > 1$ (восходящий поток от устройств нижнего дутья) и при $\alpha < 1$ (нисходящий поток над соплами нижнего дутья), подтверждают наличие значительного количества продуктов газификации и SO_3 в восстановительной зоне. Таким

образом, характерной особенностью НТВ сжигания является образование серного ангидрида (SO_3), в отличие от образования сернистого ангидрида (SO_2) при традиционных методах сжигания. Результаты измерений состава топочных газов представлены в табл. 1. Проведенные исследования доказали существование в районе ниже горелок зоны восстановительного горения, с высоким содержанием H_2S , CO и других горючих газов, (рис. 5) которые участвуют в восстановлении образовавшихся ранее оксидов азота до N_2 .

Результаты замеров состава газов в топке

Табл. 1

		№ зоны измерения (высота топки)								
		1	2	3	4	5	6	6	6	
		19 м	12 м	9 м	12 м	9 м	4 м	6 м	7 м	8 м
Температура (расстояние от стены)	0,5 м	895	1163	950	915	1010				
	2,0 м	1008	1310	1300	1230	1292				
	4,0 м	1162	1325	1390	1325	1390	930	990	1128	1274
Состав газов		Зона горелок					Холодная воронка (4 м)			
CO ₂	%	11,5	8,0	8,4	12,8	10,6	12,0	13,2	10,4	10,4
O ₂	%	2,5	4,6	2,8	2,4	0,4	1,6	0,8	2,8	0,4
CO	%	—	7,2	9,2	2,8	6,0	5,2	2,0	4,0	6,0
CH ₄	%	0	0	0	2,4	3,2	5,6	6,0	5,2	2,2
горючие газы	%	0	0	0	1,4	3,2	6,6	8,0	6,6	9,0
H ₂ S	мг/м ³	0	0	0	110	550	800	1000	500	400
SO ₂	мг/м ³	1130	1460		1179		1043			
SO ₃	мг/м ³	124	100		320		490			
COS	мг/м ³	—	—	—	—	—	8,5		4,2	
CS ₂	мг/м ³	—	—	—	—	—	24,5		25,0	
CH ₃ -SH	мг/м ³	—	—	—	—	—	98,5		26,4	
NO _x	мг/м ³	350	300...350				20...40			

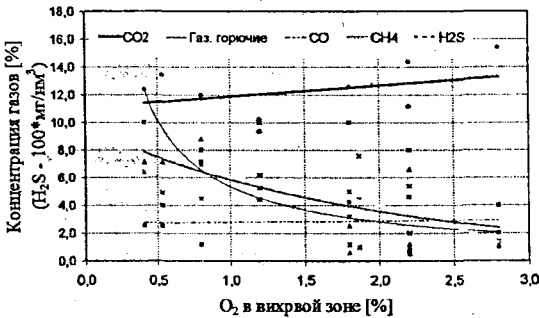
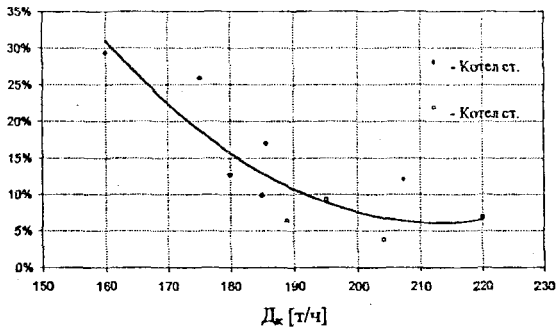


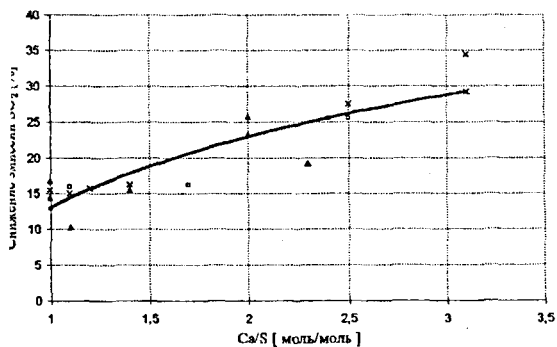
Рис. 5. Концентрация компонентов газа в вихревой зоне

Повышенные концентрации SO₃ (до 30% всех оксидов серы - рис. 6) в сочетании с пониженными температурами в зоне горения предполагают эффективность связывания оксидов серы оксидами щелочных металлов. Для проверки этого была разработана

упрощенная схема подачи сорбента в топку вместе с топливом и проведена серия исследований внутритопочной среды и состава золы. В качестве сорбента использовался крупнодробленый природный известняк с содержанием CaCO₃ 95...97 %, который смешивался на угольном складе с топливом. Степень связывания серы в диапазоне Ca/S=2,5...3,5 моль/моль составила 25...35 % (рис. 7) и позволила снизить концентрацию SO₂ в дымовых газах с 3000...3200 мг/м³ (при O₂=6%) до 2000...2300 мг/м³.

Рис. 6. Концентрация SO_3 в дымовых газах

схемы сероулавливания и внедрить эту технологию на нескольких котлах для работы в постоянном режиме. Результаты химического анализа показали существенное изменение состава золы, в которой были обнаружены только сульфаты (соли серной кислоты). Сульфитов (солей сернистой кислоты) обнаружено не было.

Рис. 7. Влияние подачи сорбента на редукцию SO_x

Образующийся при этом, главным образом, $CaSO_4$ и непрореагировавший сорбент удаляются вместе с летучей золой. Опыты позволили сделать вывод о достаточно высокой эффективности такой

Большая концентрация кокса в вихревой зоне приводит к изменению эмиссионных характеристик факела. Наличие значительной массы горящих частиц кокса, циркулирующих в вихревой зоне топки и имеющих сплошной спектр излучения, а также

повышенная концентрация трех- и четырехатомных газов, приводит к повышению излучательной способности факела. К тому же, в работу включается практически вся поверхность топочной воронки. Поэтому, несмотря на снижение средней температуры факела, лучистое тепловосприятие топочных поверхностей нагрева возрастает. Кроме того, повышенные скорости газов вблизи стен топки увеличивают конвективную составляющую теплообмена. В результате, как видно из результатов сравнения темпера-

турных полей в топке до и после модернизации, максимальные температуры в топке снижаются на 100...200°C, а на выходе из нее - на 80...150°C.

Измерения, проведенные термоэлементом показали, что зона горения (высоких температур) затянута в нижнюю часть топки (в холодную воронку),

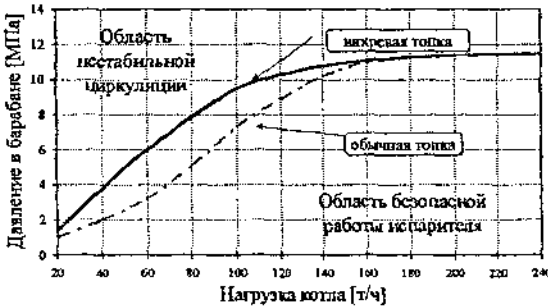


Рис. 8. Зоны безопасной работы котла

топки позволяет увеличить маневренность котла. Максимально допустимая нагрузка котла увеличена до 110%, а также снижена безопасная минимальная нагрузка. Измерения циркуляции в испарительных поверхностях котлов ОР-215 в ТЭЦ Пулавы (скорость течения) физически показали возможность безопасной работы котла с нагрузкой равной 50% номинальной — рис. 8.

Выводы

В результате проведенных расчетного анализа и экспериментальных исследований выявлены следующие основные особенности низкоэмиссионного сжигания твердых топлив.

- Экспериментально подтверждено наличие в топке обширных зон с полувосстановительной средой, содержащей продукты частичной газификации угля и значительное содержание недогоревшего топлива.
- Экспериментально подтверждено, что в зонах с полувосстановительной средой сера топлива сгорает в основном до H_2S и COS , а при попадании в окислительную среду — до SO_3 .
- Процессы превращения серы при наличии соединений кальция показывают, что сера после ряда превращений переходит в гипс $CaSO_4$.
- Модернизация котлов на НЭВ сжигание позволяет без значительных

которая слабо работает в пылеугольном котле при прямо-точном сжигании. Соответственно снижаются максимальные температуры в топке (в растянутом ядре факела) и на выходе из топки. Большое тепловое напряжение в нижней части

капитальных затрат снизить концентрации NO_x с 600...900 мг/м^3 , до 300...450 мг/м^3 (110...150 г/ГДж), т.е. в среднем на 40 - 50% при одновременном повышении экономичности работы котла, в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха.

- Применение низкоэмиссионной технологии позволяет снизить эмиссию пыли до величин менее нормы (130 г/ГДж) за счет изменения резистивности золы уноса.
- Выравнивание полей тепловых потоков по высоте топки и снижение максимальных температур позволили увеличить рабочий диапазон нагрузок от 70...100% до 50...110% при допустимых температурах металла труб и надежности циркуляции.

Основное содержание диссертации опубликовано в 7 печатных работах, в том числе.

1. Politechnika Śląska Zeszyty Naukowe – Energetyka, zeszyt 120, str 187-197, Gliwice 1994
2. «Spalanie w wirze niskotemperaturowym w kotłach energetycznych», Kultura i Ekologia, lipiec/sierpień 1995, nr 7/8 (11/12) str. 24-25.
3. «Technika i technologia w ochronie środowiska», I Forum Inżynierii Ekologicznej str 237 – 244, W. Ekoinżynieria, Lublin 1996.
4. «Badanie charakteru przebiegu spalania w kotłach OP-215 zmodernizowanych na niskoemisyjne palenisko wirowe», VIII Konferencja Kotlewa'98, tom III, str. 331-335.
5. «New Technological Solutions on a Complex Decrease of NO_x - SO_2 - CO - Ro_x Emissions in Boiler with Tangential Supply of an Aeromixture» Dny Plamene'97 „Spalovani a zivotni prostredi” Brno 28-29.04.1997.

ИИД № 69-378 от 09.06.99.

Ротапринт. Подписано в печать 02.11.99. Формат бум. 60x84 1/16
Объем 1 уч. изд. л. Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Заказ 391

АООТ "НПО ЦКТИ", 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 24