

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

(наименование института)

Кафедра теплотехники и гидрогазодинамики

(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ В.А. Кулагин
(подпись) (инициалы, фамилия)

«__» _____ 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ
НАГРЕВА КОТЛОВ П-67»

(название темы магистерской диссертации)

13.04.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

(код и наименование направления)

13.04.01.01 – Энергетика теплотехнологии

(наименование программы)

Научный руководитель _____ профессор, д.т.н. А.П. Скуратов
(подпись, дата)(должность, ученая степень) (инициалы, фамилия)

Выпускник _____ Р.В. Оберман
(подпись, дата)(инициалы, фамилия)

Рецензент _____ профессор, д.т.н. С.В. Беляев
(подпись, дата) (инициалы, фамилия)

Нормоконтролер _____ А.П. Скуратов
(подпись, дата)(инициалы, фамилия)

Красноярск 2019

СОДЕРЖАНИЕ

| | С. |
|--|----|
| Введение..... | 3 |
| 1 Проблемы эффективности работы паровых котлов при сжигании шлакующего пылеугольного топлива..... | 5 |
| 1.1 Сжигание бурых канско-ачинских углей в энергетических котлах..... | 5 |
| 1.2 Особенности работы поверхностей нагрева котлов при сжигании шлакующих углей..... | 10 |
| 1.3 Выводы и постановка задач исследования..... | 15 |
| 2 Исследование топочного процесса в котле П-67 Березовской ГРЭС-1..... | 16 |
| 2.1 Конструкция и принцип работа котла..... | 16 |
| 2.2 Анализ тепловой эффективности поверхностей нагрева котлов П-67..... | 21 |
| 2.3 Выводы по главе 2..... | 31 |
| 3 Повышение тепловой эффективности поверхностей нагрева котла П-67..... | 32 |
| 3.1 Исследование топочного процесса..... | 32 |
| 3.2 Предлагаемая технологическая схема сжигания пылеугольного топлива..... | 41 |
| 3.3 Рекомендации по управлению процессом сжигания шлакующих углей..... | 46 |
| 3.4 Выводы по главе 3..... | 48 |
| Заключение..... | 50 |
| Список использованных источников..... | 51 |

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для оценки тепловосприятости поверхностей нагрева котельных агрегатов при решении проектных задач используется коэффициент тепловой эффективности, обобщенный по результатам стендовых и промышленных тепловых испытаний котельных агрегатов, рекомендации по выбору, которого представлены в нормативном методе «Тепловой расчет котлов». Однако, как показывают исследования, значения коэффициентов тепловой эффективности, полученные на действующих котельных агрегатах, значительно отличаются от рекомендованных нормативных значений. Это, как следствие, приводит к повышению проектных рисков и ограничению номинальной паропроизводительности котлов вследствие превышения температур металла труб поверхностей нагрева.

Одним из основных факторов, ограничивающих несение длительной номинальной нагрузки котлов является локальное шлакование в различных зонах топочных экранов. В этой связи работа по исследованию тепловой эффективности поверхностей нагрева топочной камеры котлов П-67 при сжигании обладающими высокими шлакующими свойствами канско-ачинских углей (КАУ). пылеугольного топлива является актуальной.

Объектом исследования магистерской диссертации является топочная камера котла П-67 Березовской ГРЭС-1.

Предметом исследования является характеристики пылеугольного факела и поверхностей нагрева топочных экранов.

Целью работы является разработка рекомендаций по повышению тепловой эффективности поверхностей нагрева топочных экранов котлов П-67 при сжигании шлакующих КАУ.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Рассмотреть особенности конструкции элементов парового котла П-67 (ПП-2650-255) Березовской ГРЭС-1 с твердым шлакоудалением, имеющего четырехъярусную тангенциальную компоновку горелочных устройств в топке.

2. На основе анализа имеющихся экспериментально-расчетных исследований изучить опыт эксплуатации котла П-67 при сжигании КАУ.

3. Разработать рекомендации по организации топочного процесса, обеспечивающего уменьшение интенсивности шлакования радиационных поверхностей нагрева котлов.

В работе рассмотрено поведение пылеугольного топлива в котлах различных конструкций и его влияние на топочные процессы при сжигании бурых КАУ. Проведен анализ работы поверхностей нагрева котлов при сжигании шлакующих углей.

На основании проведенного анализа имеющегося опыта сжигания КАУ в топках котла П-67 представлены основные принципы организации топочного процесса, обеспечивающие по условиям шлакования надежную и эффективную работу котлов, имеющих многоярусную конструкцию тангенциальной топочной камеры. Установлено влияние режимных параметров работы котла на интенсивность образования золошлаковых отложений при сжигании КАУ.

Установлено, что наилучшие результаты по снижению интенсивности локального шлакования могут быть получены в случае применения комбинированной технологической схемы сжигания пылеугольного топлива – сочетания нижнего дутья и трехступенчатого сжигания.

Приведены рекомендации по управлению процессом сжигания КАУ, позволяющему уменьшить вероятность шлакования поверхностей нагрева за счет поддержания на требуемом уровне расхода воздуха для горения и потока рециркулирующих дымовых газов.

1 Проблемы эффективности работы паровых котлов при сжигании шлакующего пылеугольного топлива

1.1 Сжигание бурых канско-ачинских углей в энергетических котлах

На тепловых электростанциях для сжигания шлакующих углей в настоящее время применяются котлы с жидким и твердым шлакоудалением.

К первому типу относят котлы БКЗ-320, БКЗ-420, П-49 и реконструированные котлы ПК-38. Наиболее удачными и надежными для сжигания бородинского и назаровского углей являются котлы с двумя восьмигранными предтопками БКЗ-320, БКЗ-420, установленные на Красноярских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, Красноярской ГРЭС, Абаканской ТЭЦ, Новосибирской ТЭЦ-3, Иркутской ТЭЦ-6 и других электростанциях. Наличие двухстороннего пережима, отделяющего камеру горения от камеры охлаждения, тангенциальная аэродинамика предтопков обеспечивают эффективное выгорание топлива и высокий уровень температуры, которая в значительной степени влияет на надежность выхода жидкого шлака. Однако и на этих котлах при увеличении зольности угля выше 12 % возникают серьезные проблемы с выходом жидкого шлака и шлакованием поверхностей нагрева.

На котлах П-49 и ПК-38, в связи с нестабильностью химического состава минеральной части назаровского угля, возникает проблема периодического ухудшения выхода жидкого шлака. При удалении накопившегося на поду топки шлака могут возникать взрывы в шлаковом комодке, вызывающие его разрушение. Поверхности нагрева интенсивно шлакуются и загрязняются. Несмотря на регулярное использование средств очистки, паропроизводительность котлов ПК-38 не превышает 240 т/ч, что на 30 т/ч ниже номинальной. Максимальная паропроизводительность двухкорпусного котла П-49 составляет 80 % от номинальной и ограничивается высокой температурой на выходе из топки.

При опытном сжигании малозольного березовского угля ($A^d = 5...7\%$) в котле БКЗ-320 Красноярской ТЭЦ-1 повсеместно образовывались прочные вторичные отложения. По этой причине в течение 22 суток был полностью забит пароперегреватель, что привело к ограничению тяги и к аварийному останову котла [1–13]. Работоспособность топки (камеры охлаждения) обеспечивалась регулярной водяной очисткой. Жидкий шлак из топки выходил в очень малом количестве, при этом проблем с затягиванием леток практически не наблюдалось. При сжигании отсевов березовского угля ($A^d = 6,8...9,8\%$) в котле БКЗ-320 интенсивность шлакования и загрязнения поверхностей нагрева оказалась ниже, увеличился коэффициент шлакоулавливания [14], что объясняется более высоким, по сравнению с малозольным углем, содержанием в золе кислых компонентов.

Двухмесячное сжигание березовского угля повышенной с зольностью $A^d = 6...11\%$ в котле БКЗ-420, проведенное СибВТИ, не вызвало серьезных осложнений по шлакованию поверхностей нагрева. Объясняется это следующими причинами. По сравнению с котлом БКЗ-320 температура перед пароперегревателем котла БКЗ-420 оказалась на 50–100 °С ниже. Третья и четвертая ступени пароперегревателя котла БКЗ-420 имеют увеличенный поперечный шаг ($s_1 / s_2 = 240 / 50$ мм против $s_1 / s_2 = 112 / 73,6$ мм котла БКЗ-320), что положительно сказалось на надежности его работы по условиям загрязнения. При зольности угля $A^d > 10\%$ наблюдалось ухудшение выхода жидкого шлака.

Ко второму типу относят котлы с твердым шлакоудалением, которые можно разделить на две основные группы:

1. С воздушной сушкой топлива, размолем его в молотковых мельницах, с фронтальной компоновкой горелок (котлы ПК-38, ПК-10Ш, БКЗ-75, Б-50).

2. С газовой сушкой и размолем угля в мельницах-вентиляторах и с тангенциальным расположением горелок (котлы КВ-ТК-100, Е-500, П-67).

При использовании воздушной сушки топлива в топке развивается высокая температура газов в зоне активного горения (до 1400 °С), что приводит

к интенсификации шлакования топочных экранов, повышению температуры газов на выходе из топки и шлакованию конвективных поверхностей нагрева.

Котлы ПК-38 и ПК-10Ш оборудованы горелками ОРГРЭС с регулируемой круткой вторичного воздуха. Ряд котлов оснащен системой третичного заднего дутья различного исполнения, что позволяет уменьшить шлакование заднего экрана и снизить концентрацию оксидов азота в дымовых газах. При регулярной водяной очистке топочных экранов и паровой обдувке пароперегревателя длительная бесшлаковочная паропроизводительность котлов при сжигании бородинского угля составляет 0,7...0,9 от номинальной.

Топки котлов БКЗ-75 и Б-50 оборудованы прямоточными эжекционными горелками различного исполнения, а также прямоточно-вихревыми. В результате реконструкций котлы БКЗ-75 были оснащены различными по конструктивному исполнению системами нижнего и заднего дутья. При сжигании бородинского угля и паровой обдувке поверхностей нагрева котлы обеспечивают длительную бесшлаковочную мощность 80...100 % от номинальной.

Особенностью котлов КВ-ТК-100, Е-500 и П-67 является газовая сушка топлива и тангенциальная двух-, трех- и четырехъярусная компоновка прямоточных горелок. В топках котлов КВ-ТК-100 и Е-500 сжигается преимущественно бородинский уголь. Длительная бесшлаковочная мощность соответствует номинальной. Обдувка топки котла КВ-ТК-100 производится паровыми аппаратами, котла Е-500 – водяными и паровыми аппаратами.

Котлы П-67 эксплуатируются только на березовском угле. Бесшлаковочная электрическая мощность энергоблоков составляла 700 МВт (номинальная – 800 МВт). Выполненный комплекс исследовательских, режимно-наладочных и реконструктивных работ позволил поднять бесшлаковочную мощность энергоблоков до 750 МВт.

Вопросы бесшлаковочной работы топочных экранов являются актуальными при сжигании КАУ. В соответствии с данными [15] для уменьшения шлакования топочных экранов температура газов в зоне активного

горения не должна превышать 1250...1270 °С. Это достигается следующими режимными параметрами:

- снижением теплонапряжения зоны активного горения за счет увеличения ее высоты и сечения;
- подачей в зону активного горения низкотемпературных, а также горячих газов рециркуляции.

Аналогичные способы снижения интенсивности шлакования топочных экранов применяются и за рубежом, в частности, в Германии при сжигании рейнских бурых углей [16]. Однако, как показала практика, даже при соблюдении вышеуказанных условий при сжигании КАУ имеет место шлакование топки, что приводит к снижению тепловой производительности котлов.

Процесс шлакования топочных экранов является составной частью топочного процесса, который представляет собой сложную многофакторную задачу, включающую: воспламенение и горение частиц топлива; аэродинамику газового потока; движение твердой фазы; теплообмен между продуктами сгорания и топочными экранами; образование и разрушение золошлаковых отложений на топочных экранах; образование и подавление вредных газообразных выбросов, в частности, оксидов азота.

Передача теплоты от факела к экранам в топках котельных агрегатов осуществляется в основном за счет излучения. Чем выше температура газов, тем, в соответствии с законом Стефана-Больцмана, интенсивнее должен быть теплообмен. Значительная разница в температурах факела и топочных поверхностей нагрева обуславливает наличие неизотермической зоны возле них – термического пограничного слоя. Существование последнего подтверждено экспериментальными исследованиями ТалПИ на пылесланцевых котлах [17]. Интенсивность излучения и температура в этом слое меньше, чем в центральной части топки. Так, результаты исследования сжигания сланцев [17] показали, что по мере удаления от экранов происходит возрастание падающего в сторону экранов полусферического лучистого потока $q_{\text{п}}$ на 30...60 кВт/м²,

температуры газов – на 100...200 °С. Наиболее резкий подъем величины $q_{\text{п}}$ и температуры газов в топках исследованных котлов при сжигании сланцев имел место на расстоянии до 0,2...0,4 м от экрана. В пределах глубины топки 0,5...1,5 м рост указанных величин быстро замедлялся.

Толщина термического пограничного слоя и градиент температуры в нем зависят в основном от оптической плотности среды вблизи экранов и степени тепло- и массообмена в топке. При высокой оптической плотности излучающей среды повысить температуру в термическом пограничном слое можно за счет увеличения массообмена, воздействуя на аэродинамику факела. Однако такой способ интенсификации лучистого теплообмена при сжигании шлакующих топлив может привести к усилению шлакования экранов.

Процесс образования золошлаковых отложений на топочных экранах зависит от состояния золовых частиц, которые соударяются с поверхностью экранных труб. Они характеризуются дисперсным составом, скоростью и направлением движения, температурой, степенью выгорания, химическим и минералогическим составом. Состояние частиц золы вблизи экранов зависит не только от температуры и других условий в пристенном слое, но и от параметров топочного устройства – типа и компоновки горелок, режимных параметров (тепловая нагрузка топки, число работающих горелок, избытки воздуха в горелках и в топке в целом), системы очистки топки и режима ее работы. В связи с тем, что пристенный газовый слой у топочных экранов является последним активным отрезком траектории движения золоугольных частиц в топке, то представляет практический интерес исследование его структуры при разных условиях организации топочного процесса.

Масштабные исследования характеристик КАУ, поведения минеральной части при сжигании, а также опыт эксплуатации котлов показали высокую их шлакующую способность. Особенно этим отличается березовский уголь. Даже соблюдение требований по проектированию топочных устройств зачастую не обеспечивает надежную по условиям шлакования работу топочных экранов. Поэтому возникает необходимость дальнейших исследований в части

детального анализа структуры пристенного газового слоя у топочных экранов с целью оценки влияния его характеристик на шлакование экранных труб, а также влияния конструктивных и режимных параметров топки на показатели пристенного слоя при сжигании КАУ.

1.2 Особенности работы поверхностей нагрева котлов при сжигании шлакующих углей

Угли Канско-Ачинского бассейна относятся к бурым и обладают той особенностью, что в органической массе этих углей содержатся активные группы, склонные к катионному обмену. Эти группы насыщены катионами, в основном кальция и магния. В результате эти элементы равномерно распределяются по органической массе, причем их концентрация в топливе может быть различной для разных месторождений, но для каждого из них колеблется в сравнительно нешироких пределах. В то же время вмещающие породы имеют состав близкий к составу осадочных пород земной коры, с содержанием кальция 0,4...1%. В зависимости от мощности пласта и технологии добычи угля, в последний могут попадать вмещающие породы (таблица 1.1).

При размолеминеральная часть КАУ хорошо отделяется от органической массы. Так, например, в исследованной пробе березовского угля внешняя зола составляет 10,1, а бородинского – 36,6% общего количества золы, внешняя часть которой состоит в основном из SiO_2 . Оксиды кальция и магния сосредоточены в легких фракциях, т.е. в органической массе. Самые тяжелые фракции ($\rho > 2,86$) обогащены оксидами железа. Внутренняя зольность березовского угля составляет 4,0...5,0, бородинского – 7,5...8,0%.

При исследовании механизма образования отложений при сжигании КАУ было установлено, что на поверхностях нагрева образуются отложения трех типов: первичные, прочно связанные с оксидной пленкой труб; вторичные,

менее прочные, но быстрорастущие, и тыльные. Механизм образования этих отложений различен [1, 7, 12].

Таблица 1.1 – Характеристики углей Бородинского, Березовского и Назаровского месторождений

| Наименование | Значение | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Бородинский | Березовский | Назаровский |
| Уголь | | | |
| Влага, W^r , % | 33,0 | 35,5 | 38,5 |
| Зольность, A^d , % | 10,5 | 7,0 | 12,0 |
| Зольность, A^r , % | 7,0 | 4,5 | 7,4 |
| Выход летучих, V^{daf} , % | 45,2 | 48,0 | 48,0 |
| Теплота сгорания низшая, Q^r_i , кДж/кг (ккал/кг) | 15920 (3800) | 15080 (3600) | 12900 (3080) |
| Содержание серы, S^d , % | 0,30 | 0,31 | 0,81 |
| Химический состав золы, %: | | | |
| оксид кремния SiO_2 | 52,8 | 29,1 | 25,5 |
| оксид алюминия Al_2O_3 | 11,8 | 14,0 | 12,2 |
| оксид железа Fe_2O_3 | 5,5 | 8,7 | 17,6 |
| оксид кальция CaO | 22,1 | 41,1 | 38,1 |
| оксид магния MgO | 3,7 | 4,1 | 3,5 |
| оксид калия K_2O | 0,3 | 0,5 | 0,1 |
| оксид натрия Na_2O | 0,2 | 0,8 | 0,3 |
| оксид титана Ti_2O | 0,8 | 0,6 | 0,4 |
| Температурные характеристики золы, °С: | | | |
| начала деформации t_a | 1130-1280 | 1250-1500 | 1150-1190 |
| плавления t_b | 1170-1250 | 1420-1340 | 1170-1320 |
| жидкоплавкого состояния t_c | 1210-1500 | 1280-1430 | 1190-1380 |

Установлено, что для прочных первичных отложений на конвективных поверхностях нагрева характерно стехиометрически равное содержание кальция и серы. При температуре горения, недостаточной для полного расплавления золowego остатка, по мере выгорания частицы угля остается золовой каркас, в котором при неполном выгорании превалирует восстановительная среда. Кальций, высвобождающийся по мере выгорания органики, обладает высоким сродством к кислороду и окисляется до CaO .

Непрерывное соударение горящих частиц с трубами приводит к постепенному образованию прочных отложений. Высокая прочность связывания последних с трубами, обусловлена взаимодействием сульфидов с оксидной пленкой.

Вторичные отложения образуются в результате соударения с трубами частиц золы, находящихся в полурасплавленном состоянии. Указанный механизм образования вторичных отложений характерен при сжигании топлив всех видов, если зола в топочной камере проходит стадию плавления. Стекловидные частицы золы склонны к налипанию на трубы при температуре газов, при которой вязкость золы составляет не более $1 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Эта предельная температура впоследствии была названа температурой начала шлакования $t_{\text{шл}}$. Существенным является то обстоятельство, что на значение $t_{\text{шл}}$ практически не оказывает влияния скорость омыwania газом поверхности нагрева в пределах $5 \dots 15 \text{ м/с}$, что позволяет определять этот параметр практически в любой зоне котла в области $t_{\text{шл}}$, где скорость газового потока остается в указанных пределах.

Тыльные отложения: образуются в теневой зоне поверхностей нагрева (труб или трубных досок воздухоподогревателей). Такие отложения наблюдаются при сжигании всех видов топлив, только на КАУ они постепенно упрочняются из-за процесса сульфатизации.

Отличительной особенностью минерального состава золы является повышенное содержание оксида кальция, особенно у низкозольных березовских углей (до 60%).

В связи с этим, поведение минеральной части угля в процессе сжигания угольной пыли сильно зависит от зольности. Соответственно изменяются шлакующие свойства угля и плавкостные характеристики шлака. Это основная причина того, что в пылеугольных топках котлов, приспособленных для сжигания бородинского угля, невозможно обеспечить надежное сжигание березовского угля. Поэтому изменение состава минеральной части КАУ необходимо учитывать при оценке пригодности использования той или иной технологии сжигания как с точки зрения обеспечения надежной работы по условиям шлакования и обеспечения выхода жидкого шлака, так и требований по обеспечению нормативных выбросов азота, серы и золы.

Отложения в энергетических установках обычно делятся на шлакование и загрязнение. Под шлакованием обычно понимается образование на топочных экранах и ширмах, под загрязнением – на конвективных поверхностях нагрева: в пароперегревателе, экономайзере, воздухоподогревателе. К шлакованию относится процесс образования отложений при температурных условиях выше указанных критических, а к загрязнению – при более низких температурах газов. Критической температурой газов называют температуру начала шлакования, выше и ниже которой отложения значительно отличаются по составу, свойствам и скорости роста.

Последствия, оказывающие влияние на работу паровых котлов по причине шлакования и загрязнения, зависят не только от рассматриваемых процессов, но и от типа поверхности нагрева, на которые оказываются данные воздействия. Например, интенсивное шлакование топочных экранов приводит к таким последствиям, как падение глыб шлака в холодную воронку с завалом и разрушением шлаковых комодов, нарушению аэродинамики горелочных струй и выгорания угольной пыли из-за затягивания горелочных устройств шлаком, повышению температуры газов на выходе из топки в связи со снижением тепловой эффективности экранов, приводящему к усилению шлакования ширмового пароперегревателя. В свою очередь, шлакование и загрязнение ширмовых и конвективных поверхностей нагрева характеризуется

такими негативными последствиями, как повышение температуры уходящих газов, повышение уровня температурных разверок в пароперегревателях, приводящее к превышению допустимой температуры металла змеевиков (рисунок 1.1).

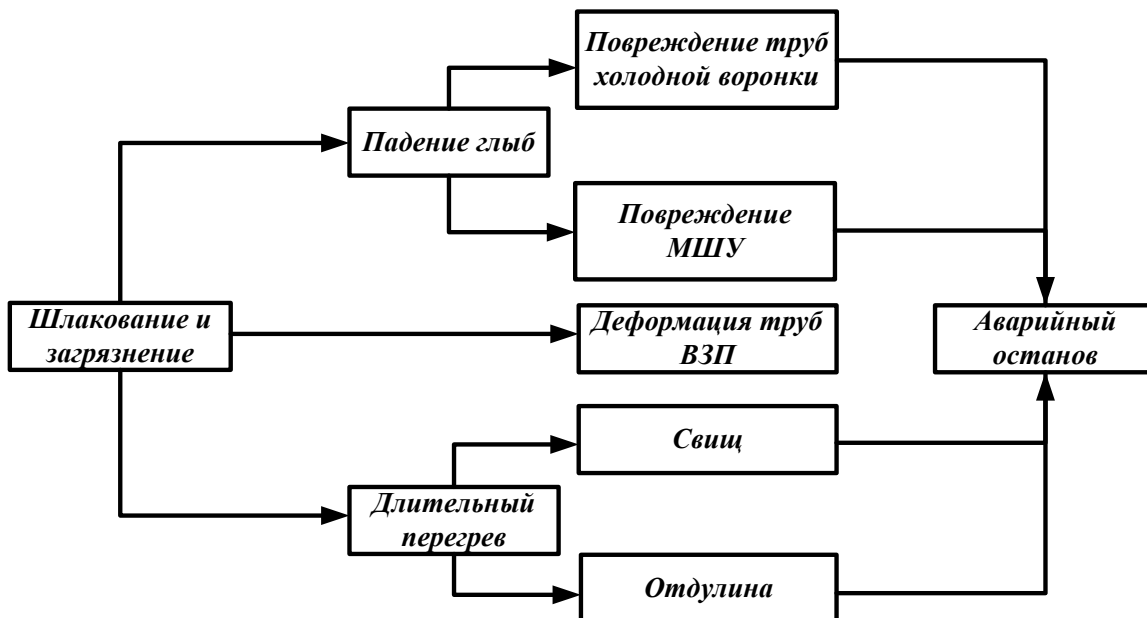


Рисунок 1.1 – Влияние шлакования и загрязнения на надежность работы котельных агрегатов

При интенсивном росте уровня загрязнения конвективных поверхностей нагрева наступает ограничение производительности котельного агрегата по тяге, связанное с возрастающим аэродинамическим сопротивлением конвективных пакетов в связи с перекрытием межтрубного пространства отложениями. В целом, влияние представленных выше отрицательных факторов приводит к перерасходу топлива из-за снижения КПД котлов, снижению бесшлаковочной мощности, увеличению выбросов золы и оксидов азота, снижению надежности и ресурса располагаемого оборудования, а также повышению издержек на ремонт и ручную расшлаковку котлов (рисунок 1.2). Данные обстоятельства могут привести к понижению номинальной производительности котельных агрегатов.

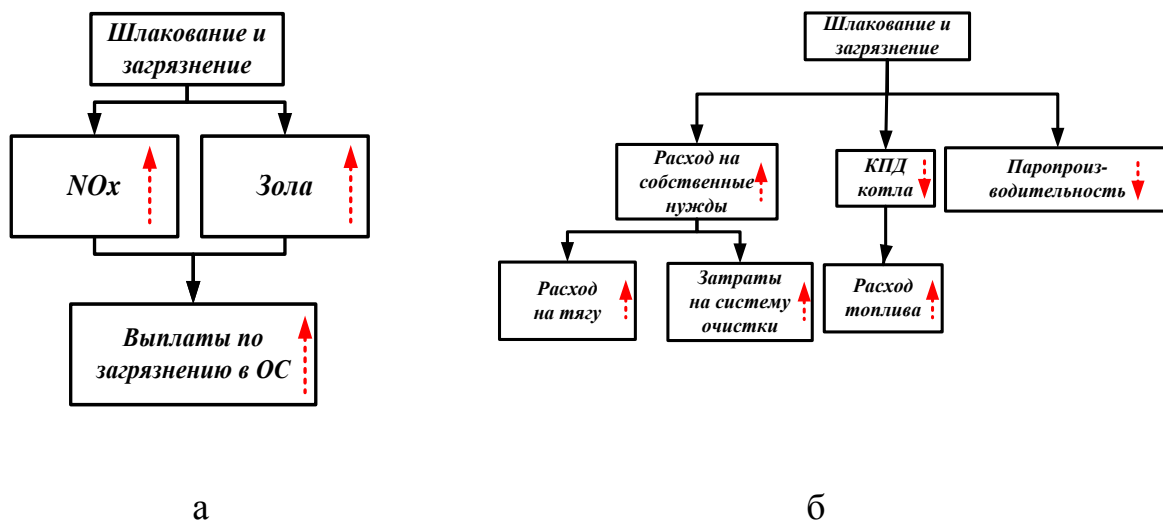


Рисунок 1.2 – Негативное влияние процессов шлакования и загрязнения на показатели работы котла:
а – экологические; б – на технико-экономические

1.3 Выводы и постановка задач исследования

Проведен анализ современного состояния топочных процессов при сжигании в энергетических котельных агрегатах бурых КАУ.

На основе анализа практики работы паровых котлов различных конструкций при сжигании шлакующих бурых КАУ были поставлены следующие задачи исследования:

1. Рассмотреть особенности конструкции элементов парового котла П-67 (ПП-2650-255) Березовской ГРЭС-1 с твердым шлакоудалением, имеющего четырехъярусную тангенциальную компоновку горелочных устройств в топке.

2. На основе анализа имеющихся экспериментально-расчетных исследований изучить опыт эксплуатации котла П-67 при сжигании КАУ.

3. Разработать рекомендации по организации топочного процесса, обеспечивающего уменьшение интенсивности шлакования радиационных поверхностей нагрева котлов.

2 Исследование топочного процесса в котле П-67 Березовской ГРЭС-1

2.1 Конструкция и принцип работы котла

Котельный агрегат П-67 (ПП-2650-255) Березовской ГРЭС-1 изготовлен Подольским машиностроительным заводом (ЗИО) и предназначен для сжигания березовских бурых углей Канско-Ачинского бассейна в блоке с турбиной 800 МВт (рисунок 2.1).

Котел сверхкритического давления, с промперегревом, прямоточный однокорпусный, Т-образной компоновки, с уравновешенной тягой, с твердым шлакоудалением, газоплотный. Основные характеристики представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные проектные характеристики котла П-67

| № пп | Наименование | Обозначение | Значение |
|------|---|-------------|----------|
| 1. | Номинальная паропроизводительность, т/ч | $D_{пе}$ | 2650 |
| 2. | Расход пара через промперегреватель, т/ч | $D_{пп}$ | 2186 |
| 3. | Давление пара: | | |
| | - на выходе из пароперегревателя, кгс/см ² | $P_{пе}$ | 255 |
| | - на выходе из промперегревателя, кгс/см ² | $P_{пп}$ | 38 |
| 4. | Температура: | | |
| | - пара высокого давления, °С | $t_{пе}$ | 545 |
| | - пара на выходе из промпароперегревателя, °С | $t_{пп}$ | 545 |
| | - питательной воды, °С | $t_{пит}$ | 274 |
| | - уходящих газов, °С | $T_{ух}$ | 140 |
| | - горячего воздуха, °С | $t_{гв}$ | 335 |

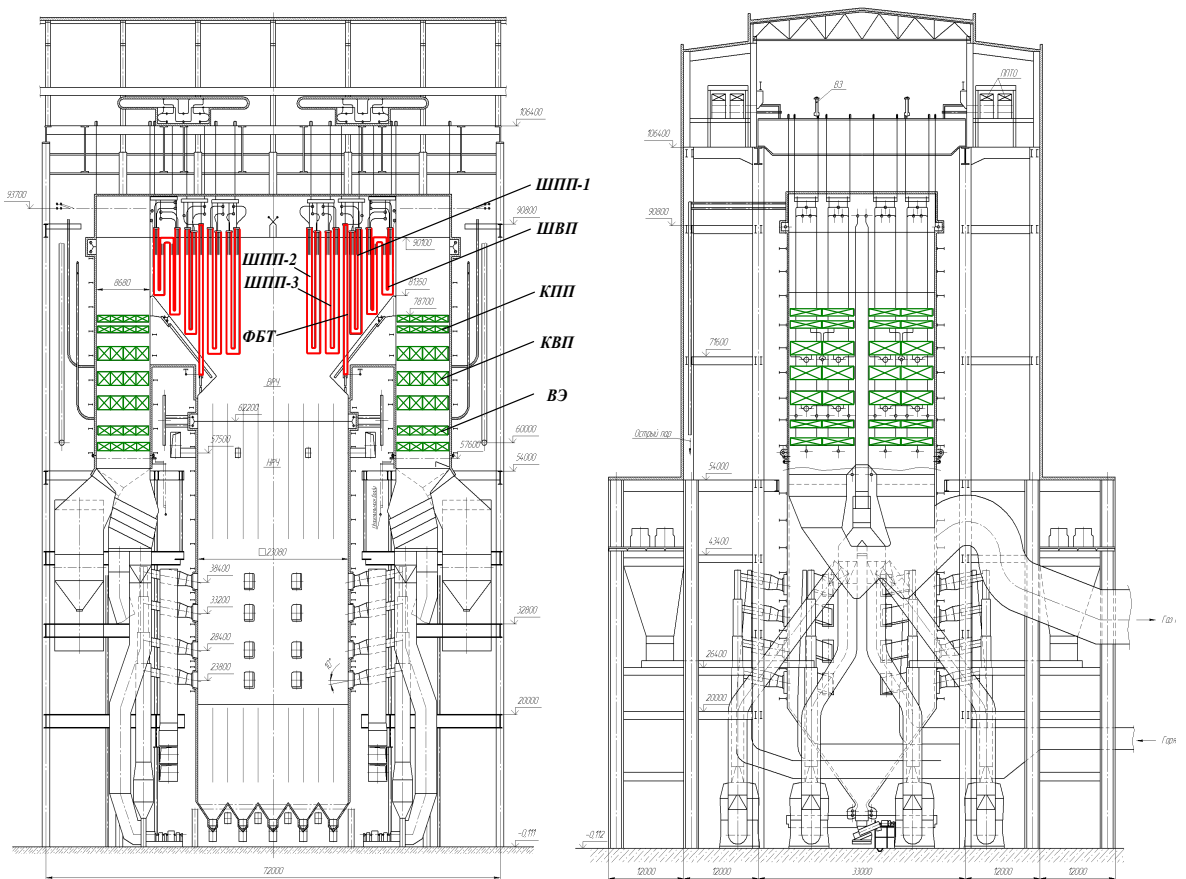


Рисунок 2.1 – Общий вид котла П-67

Котел П-67 подвесной конструкции, с газоплотными экранами, работает с уравновешенной тягой. Паропроизводительность – 2650 т/ч, давление и температура острого пара 25,5 МПа и 545 °С, пара промперегрева – 3,7 МПа и 545 °С. Топочная камера открытая, квадратного сечения с размерами в плане 23,08×23,08 м полностью экранирована вертикальными панелями из плавниковых труб диаметром 32×6 с шагом 48 мм (рисунок 2.2). Теплонапряжение топочного объема $q_v = 60,7$ кВт/м³, сечения $q_F = 3,88$ МВт/м², яруса горелок $q_F^я = 0,97$ МВт/м² и лучевоспринимающей поверхности в зоне активного горения $q_{лг} = 0,82$ МВт/м². Тридцать две тангенциально направленные прямоточные горелки размещены по высоте топки в четыре яруса и наклонены вниз под углом 10° (см. рисунок 2.2).

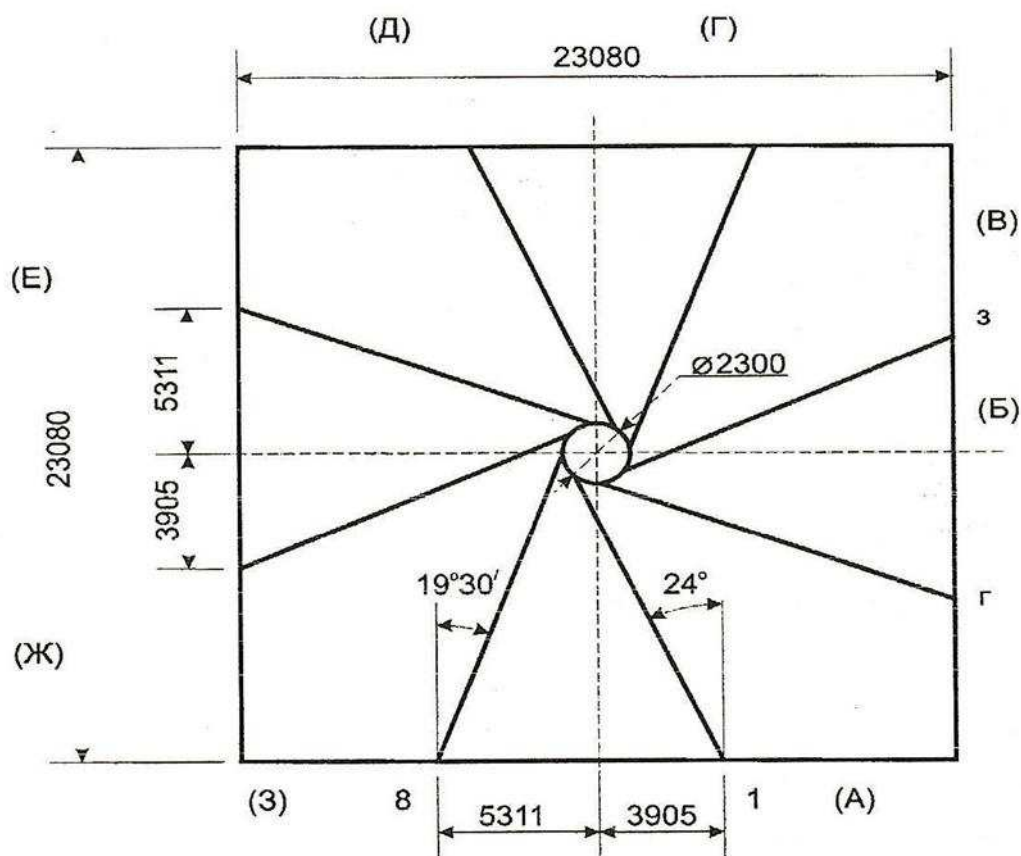


Рисунок 2.2 – Схема установки горелок в топочной камере котла П-67:
 А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З – наименование пылесистем;
 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – номера горелочных устройств

Горелки имеют периферийную рассредоточенную подачу аэросмеси, отдельное сопло для подачи рециркулирующих уходящих газов (до 10 %), делящее горелку по горизонтали на две половины (рисунок 2.3). Скорость аэросмеси на выходе из горелки 18 м/с, вторичного воздуха – 55 м/с, рециркулирующих газов – 35 м/с.

Пылесистема прямого вдувания с газовой сушкой и размолем топлива в восьми мельницах-вентиляторах МВ 3300. Распределение угольной пыли по ярусам горелок производится центробежными пыледелителями.

Очистка топочных экранов осуществлялась водяными аппаратами типа ОВГ и ОВМ.

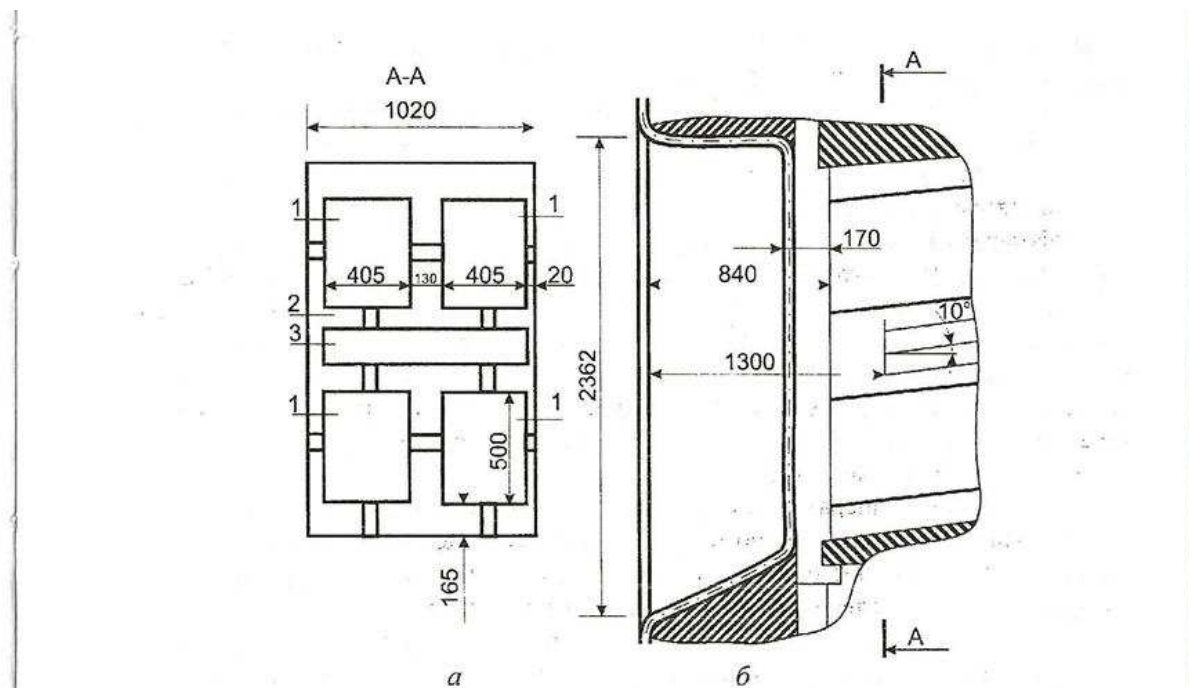


Рисунок 2.3 – Конструкция горелочного устройства котла П-67:
 а – вид на горелку из топки; б – вид на горелку сбоку (в разрезе);
 1 – сопла аэросмеси; 2 – канал вторичного воздуха; 3 – канал газов рециркуляции

Над топкой и в горизонтальном газоходе расположены ширмовые поверхности нагрева, причем первые ширмы по ходу газов цельносварные из плавниковых труб. Конвективные поверхности нагрева расположены в опускном газоходе конвективной шахты. Все конвективные поверхности подвешены на подвесных трубах. Экономайзер мембранного типа.

Регулирование температуры перегрева первичного и вторичного пара производится впрыском.

Для подогрева воздуха применен трубчатый воздухоподогреватель. Для снижения температуры уходящих газов и повышения КПД электрофильтров использована система избыточного воздуха.

Для размола топлива котел оснащен 8-ю мельницами-вентиляторами (МВ 3300/800/490), которые расположены по две с каждой стороны квадратной топки. Номинальная производительность каждой мельницы 70 т/ч при $R_{1000} \leq 1,5$

$\%, R_{90}=55\%$ и вентиляции 200 тыс. м³/ч. Сушка топлива осуществляется дымовыми газами, отбираемыми из поворотных камер через специальные экранированные газоходы, где они охлаждаются до 680°C. Температура аэросмеси регулируется присадкой холодных газов из тракта рециркуляции. Температура за мельницей составляет 140...180°C. Расчетный расход березовского угля 460 т/ч; растопочное топливо – мазут.

Для равномерного распределения по ярусам горелок пылегазовых потоков над сепаратором каждой мельницы-вентилятора установлен вихревой пыледелитель. С целью лучшего заполнения факелом холодной воронки горелки наклонены вниз на 10°. В нижней части топки была предусмотрена подача части горячего воздуха (до 8%) на нижнее дутье вдоль скатов холодной воронки через 16 сопел по встречно-смещенной схеме для снижения механического недожога с провалом, однако они были демонтированы в связи с низкой надежностью.

Для снижения температуры в зоне горения и на выходе из топки применяется рециркуляция дымовых газов из газоходов за водяным экономайзером при температуре 360°C, которые проходят через устройства золоочистки и транспортируются двумя дымососами рециркуляции.

В проекте котла предусматривался тангенциальный ввод в верхнюю часть топки рециркулирующих газов, создающих вращение, противоположное вращению основного факела с целью снижения общего уровня и выравнивания поля температур газов на выходе из топки. Расчетная температура факела 1250...1260°C. Расчетная температура газов на уровне низа ширм второй ступени без учета газов рециркуляции вверх топки составляет 1145°C, а с учетом подачи вверх топки 14 % рециркулирующих газов – 1075°C. Средняя температура газов на выходе из топки при этом равна соответственно 1102 и 1032 °C.

В настоящее время на котле используется комплекс средств очистки от наружных отложений. Для очистки топочных газов используют аппараты водяной обдувки ОБГ, ОБМ, ОБД-2 и WLB[1]. Для очистки

ширмовых пароперегревателей используют аппараты паровой обдувки типа ОГ-12 и RK-SL, конвективных поверхностей нагрева – паровые аппараты RK-SB.

Котел выполнен подвесным к конструкциям здания. На газоплотных стенах котла выполняется тепловая изоляция. Котел поставляется укрупненными блоками. Благодаря значительной высоте топочной камеры, подаче газов рециркуляции через горелки и в верхнюю ее часть снижается температура газов в ядре горения и на выходе из топки. Для уменьшения механического недожога в низ холодной воронки через систему сопел подается горячий воздух. Имеется комбинированная система очистки поверхностей нагрева котла от внешних золовых загрязнений.

2.2 Анализ тепловой эффективности поверхностей нагрева котлов П-67

На котлах П-67 блоков мощностью 800 МВт Березовской ГРЭС-1, специально спроектированных для сжигания березовского угля, за более чем 10 лет эксплуатации не удалось решить проблему шлакования, несмотря на то, что в разработке котла, испытаниях, моделировании его узлов, проектировании, проведении опытных сжиганий, освоении и исследованиях принимали участие многие институты, ЗиО и ряд машиностроительных заводов. Запаздывание ввода угольного разреза «Березовский-1» в 80-х годах прошлого века и опытно-промышленного котла Е-500 привело к тому, что проектирование котла П-67 велось без необходимого длительного опыта работы энергетических котлов на березовском угле.

Первый блок Березовской ГРЭС-1 был пущен в эксплуатацию в марте 1988 года, второй – в апреле 1991 года. Рост прочных наружных отложений на топочных экранах без стабилизации продолжался несколько лет. Это обесценило результаты предпроектных кратковременных опытных сжиганий. Кроме того, при подаче березовского угля ухудшенного качества ($Q_i^f < 3500$ ккал/кг), работе семи мельниц-вентиляторов МВ 3300/800/490 и

среднеэксплуатационном износе рабочих лопаток возникали ограничения нагрузки блока на 10-15% в связи с недостаточной размольной производительностью мельниц.

В эксплуатации котлов П-67 при нагрузках близких к номинальной проектная температура газов на выходе из топки (1032°C) превышалась более, чем на 100°C . Не удалось снизить максимальную температуру факела до рекомендуемой (1250°C) в известной концепции «низкотемпературного» сжигания. Испытания не подтвердили расчеты разработчиков котла на то, что тангенциальная топочная камера в сочетании с газовой сушкой топлива обеспечат образование небольшого количества оксидов азота, допустимого для мощных блоков (370 мг/м^3).

На основании результатов балансовых испытаний котлов было подтверждено снижение бесшлаковочной мощности котлов и тепловой эффективности топочных экранов за длительный период эксплуатации. Этот процесс продолжался, несмотря на модернизацию горелок с установкой рассекателей, наладку и увеличение числа маловыдвижных аппаратов водяной обдувки типа ОВМ, сокращение межобдувочного периода, повышение ремонтных и эксплуатационных затрат на систему очистки.

В результате в 2000 году энергоблоки были перемаркированы на 700 МВт. Основаниями для ограничения мощности энергоблоков явились низкая интенсивность теплообмена в топке, прогрессирующее шлакование топочной камеры, сопровождающееся ростом максимальных температур газов в поворотной камере, образование глыб шлака, которые при падении повреждали шнеки и комоды холодной воронки. Локальное шлакование скатов холодной воронки приводило к перекрытию шнеков и вынужденным остановам котлов.

Таким образом, анализ результатов исследований и длительной эксплуатации показал, что основными причинами ошибочных расчетов суммарного теплообмена в топке котла П-67 с тангенциальным четырехъярусным расположением горелок явились:

– завышенный расчетный коэффициент тепловой эффективности топки в связи с тем, что при проектировании кроме норм теплового расчета специалисты опирались только на результаты стендовых исследований и недостаточных по длительности опытных сжиганий березовского угля на котлах малой мощности; не было данных о медленной (в течение нескольких лет) стабилизации прочных отложений на топочных экранах; значительную роль сыграл масштабный фактор;

– неравномерное шлакование экранов, отсутствие эффективной системы водяной обдувки и наличие значительных по площади неочищаемых зон.

Кроме того, неожиданным оказалось шлакование в низкотемпературных неочищаемых зонах на выходе из топки (ВРЧ), где локальные коэффициенты тепловой эффективности снизились до 0,1. Это опровергало часто применяемое понятие «критического» по условиям шлакования падающего теплового потока для березовского угля. Не оправдались надежды на частичную саморасшлаковку экранов в период сброса нагрузок и остановов котлов, что обычно наблюдается при сжигании других углей Канско-Ачинского бассейна (бородинского, назаровского и др.).

Крупные энергетические предприятия на угле – это основной источник эмиссии экологически опасных веществ в атмосферу. Результаты исследований котельных агрегатов, газоочистного оборудования, действующих электростанций, сжигающих бурые КАУ, и расчеты выбросов золы показывают, что эти выбросы в случае применения механических золоуловителей в 3...10 раз превышают нормативы удельных выбросов, установленные действующим ГОСТ Р 50831-95.

Выбросы оксидов серы (<0,5%) от всех типов котлов действующих ТЭС при сжигании КАУ не превышают нормативы удельных выбросов.

Выбросы оксидов азота для большинства действующих котельных агрегатов превышают на 50...100% нормативные значения. 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 °С. Скорость образования термических NO_x зависит экспоненциально от температуры в степени 0,5 от концентрации кислорода в зоне максимальных температур. Из основных химических реакций следует, что минимизация термических 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».

Исследования показали, что при температуре факела до 1500 °С оксиды азота при сжигании углей образуются в основном из азота топлива. На долю термических и быстрых NO_x приходится около 5 %, поэтому роль их весьма незначительна, особенно при сжигании бурых углей в топках с твердым шлакоудалением[12].

Топливные NO_x образуются в результате взаимодействия кислорода с азотсодержащими компонентами органической массы топлива в процессе его сжигания. Топливный азот содержится в основном в летучих (до 80 %).

Степень газификации азота топлива возрастает при увеличении температуры. Например, для бородинского угля при 1200 °С степень газификации топливного азота составила 80 %, а при 1000 °С – 60 %. В газовой фазе топливный азот находится в виде HCN или NH_3 и преобразуется в результате комплекса реакций в NO_x или N_2 . Увеличение концентрации кислорода интенсифицирует образование NO_x . Установлено, что для минимизации образования оксидов азота выход летучих из угля должен осуществляться при максимально возможной температуре в зоне, обогащенной топливом. В этом случае выход азота в составе летучих будет максимальным, а в восстановительной среде будут преобладать реакции с образованием N_2 по отношению к NO_x .

Часть топливного азота (около 20 %) выделяется при горении коксового остатка. Этот азот наиболее трудно выделить в восстановительной среде, обеспечив хорошее выгорание. Поэтому необходимо добиваться максимального выхода азота топлива в составе летучих.

С учетом изложенного, можно утверждать, что в пылеугольных низкотемпературных топочных устройствах при горении образуются преимущественно топливные оксиды азота. Воздействуя на топочный процесс, т.е. применяя технологические методы, можно существенно уменьшить концентрацию NO_x в уходящих газах котлов.

В целом, основаниями для ограничения мощности энергоблоков явились низкая интенсивность теплообмена в топке, прогрессирующее шлакование топочной камеры, сопровождающееся ростом максимальных температур газов в поворотной камере, образование глыб шлака, которые при падении повреждали шнеки и комоды холодной воронки. Локальное шлакование скатов холодной воронки приводило к перекрытию шнеков и вынужденным остановам котлов.

Высокие температурные напряжения в зоне лючков цельносварных экранов, наличие исходных дефектов (трещин), неравномерность локального шлакования и частая, не всегда обоснованная водяная обдувка, в том числе при низких нагрузках, привели к интенсификации повреждений труб НРЧ (нижняя радиационная часть топочных экранов) с образованием сквозных коррозионно-усталостных трещин, чего ранее не наблюдалось на других мощных блоках при очистке водой за более длительный период эксплуатации (блоки 300 МВт Рязанской ГРЭС). Это противоречило известным выводам о стабилизации глубины трещин в поверхностном слое металла труб при автоматизированной водяной обдувке.

Таким образом, анализ результатов исследований и длительной эксплуатации показал, что основными причинами ошибочных расчетов суммарного теплообмена в топке котла П-67 с тангенциальным многоярусным расположением горелок явились [1, 12, 18-20]:

– завышенный расчетный коэффициент тепловой эффективности топки, поскольку при проектировании кроме норм теплового расчета специалисты опирались только на результаты стендовых исследований и недостаточных по длительности опытных сжиганий березовского угля на котлах малой мощности; не было данных о медленной (в течение нескольких лет) стабилизации прочных отложений на топочных экранах; значительную роль также сыграл масштабный фактор;

– неравномерное шлакование экранов, отсутствие эффективной системы водяной обдувки и наличие значительных по площади неочищаемых зон.

Кроме того, неожиданным оказалось шлакование в низкотемпературных неочищаемых зонах на выходе из топки (ВРЧ верхняя радиационная часть топочных экранов), т. к. локальные коэффициенты тепловой эффективности снизились до 0,1. Это опровергало часто применяемое понятие “критическое” по условиям шлакования падающего теплового потока для березовского угля.

Не произошла частичная саморасшлаковка экранов в период сброса нагрузок и остановов котлов, что обычно наблюдается при сжигании других углей Канско-Ачинского бассейна (Бородинского, Назаровского и др.).

Ниже представлены показатели состояния поверхностей нагрева (далее - показатели) котла П-67 ст. № 2, полученные в результате обработки данных штатной системы контроля, зафиксированных в период его 10-дневной непрерывной кампании после текущего ремонта и выполнения реконструктивных работ на топочно-горелочном устройстве. К этим показателям относятся: коэффициент эффективности экранов топочной камеры ψ_T и коэффициенты загрязнения ζ ширмовых поверхностей нагрева котла.

В период короткой рабочей кампании котла П-67 ст. № 2 были зафиксированы параметры режимов работы котла, по которым рассчитывались показатели состояния поверхностей нагрева. Перед этим была проведена реконструкция горелок и тракта рециркуляции газов к ним с целью уменьшения шлакования экранов топочной камеры и снижения выбросов NOx. Средняя нагрузка при указанной работе котла составляла примерно 750 МВт при

температуре питательной воды $t_{пв} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует доли тепловой производительности от номинальной $\delta Q_{ка(н)} = 0,95 \dots 0,99$.

Из рисунка 2.4 видно, что значения коэффициента ψ_T в течение 10-дневной непрерывной кампании котла П-67 ст. № 2 в мае 2001 года изменялись в диапазоне $0,19 \dots 0,27$ (среднее значение $0,214$) и при среднем значении $\delta Q_{ка(н)} = 0,978$. К концу этой кампании $\psi_T = 0,191$, который сразу после остановки котла в конце мая возрос до значений $0,224 \dots 0,27$.

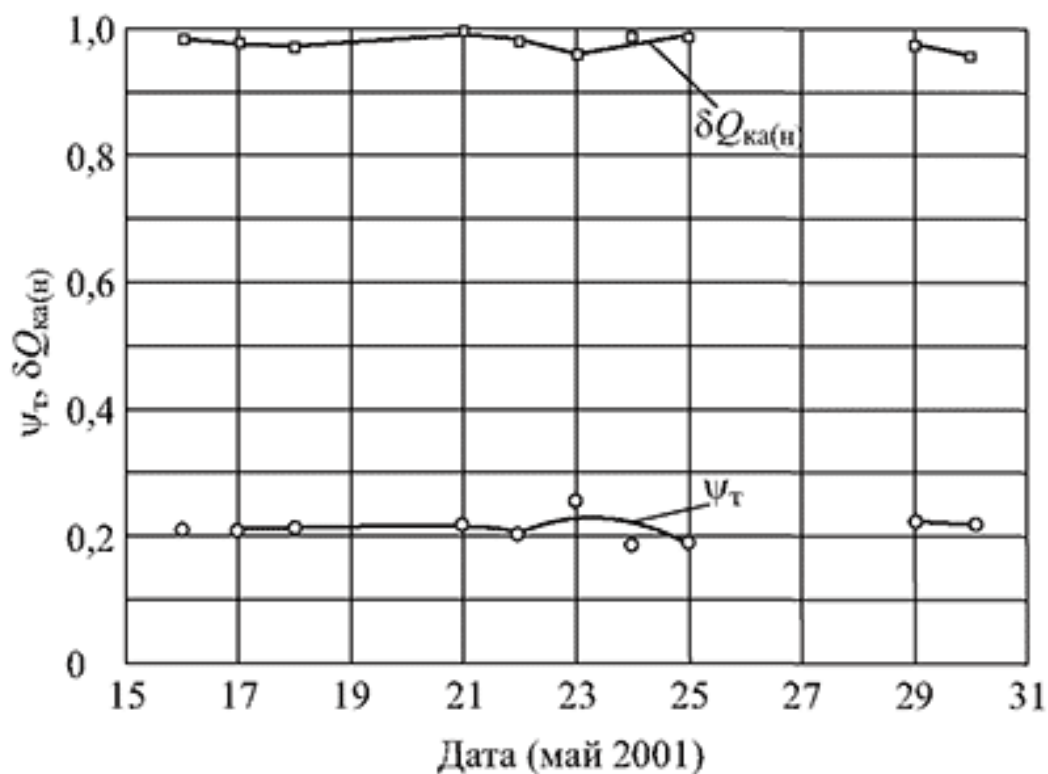


Рисунок 2.4 – Коэффициенты эффективности экранов топки ψ_T и доля от номинальной теплопроизводительности $\delta Q_{ка(н)}$ котла П-67 ст. № 2

Из рисунка 2.5 видно, что значения всех коэффициентов загрязнения ширмовых поверхностей стабилизируются в течение 10-дневной рабочей кампании на базовой нагрузке 750 МВт на значительно более низком уровне по отношению к одному-двум дням сразу после пуска.

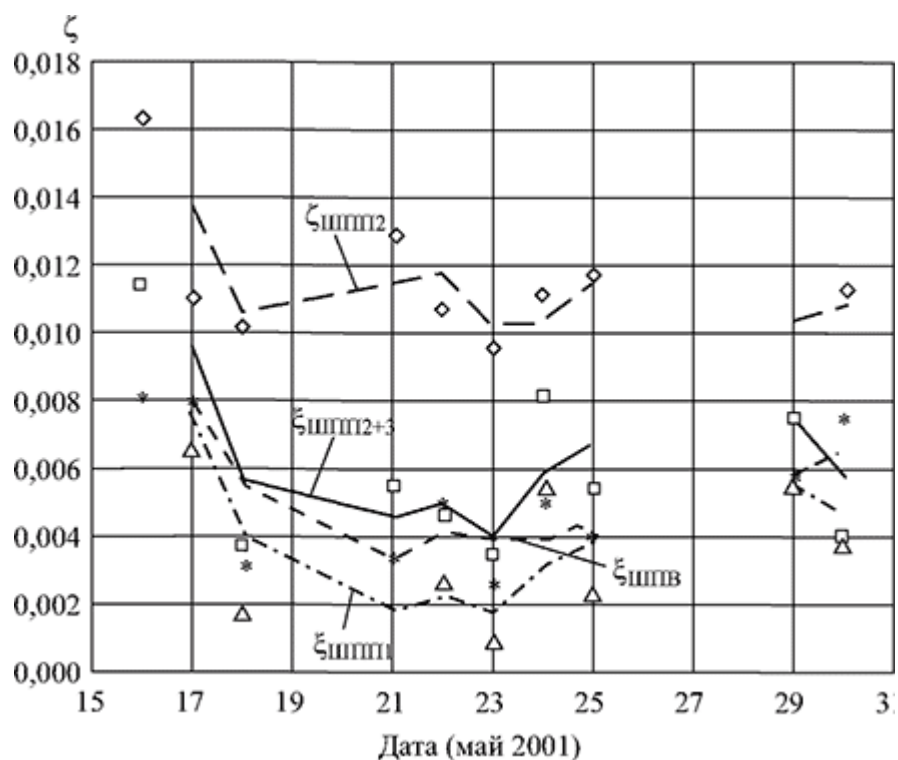


Рисунок 2.5 – Коэффициенты загрязнения ζ ширмовых пароперегревателей котла П-67 ст. № 2

Отметим, что определение значения ψ_T , основанное на нормативном методе [15], в действительности может иметь существенную погрешность применительно к топочной камере и к топочному процессу котла П-67. Об этом свидетельствуют и многочисленные существенные «нестыковки» между расчетными и фактическими теплосъемами экранов топки и температурами газов на выходе из нее, которые встречаются и на ряде других головных котлов, спроектированных в соответствии с [15]. Например, влияние такой величины толщины излучающего слоя, соответствующей топке котла П-67, не могло быть исследовано до появления норм в 1973 г. Возможно, этим объясняется расхождение «интегрального», рассчитанного по значения ψ , от замеренных непосредственно «точечных» значений ψ [21].

Измерить температуру, скорость газа и другие параметры топочного процесса в таком крупногабаритном котельном агрегате обычными средствами достаточно трудно. Современные математические модели, позволяют

рассчитать необходимые параметры, значительно облегчая задачу исследователям и проектировщикам.

В качестве примера, на рисунках 2.6 и 2.7 показано рассчитанное с помощью пакета программ «SigmaFlow» поле температур в центральном сечении котла П-67 и на его стенках.

Векторное поле скорости газов (пламени) в топке котла П-67, рассчитанное с помощью пакета программ «SigmaFlow» показано на рисунке 2.8:

а) – восемь горелок первого яруса создают вихревое течение, улучшающее условия горения пылеугольной смеси;

б) в углу топки образуется мертвая зона, в которой вихри менее интенсивны, чем в центре; в) между ярусами горелок есть зоны, в которых происходит наброс потока на стенку камеры котла.

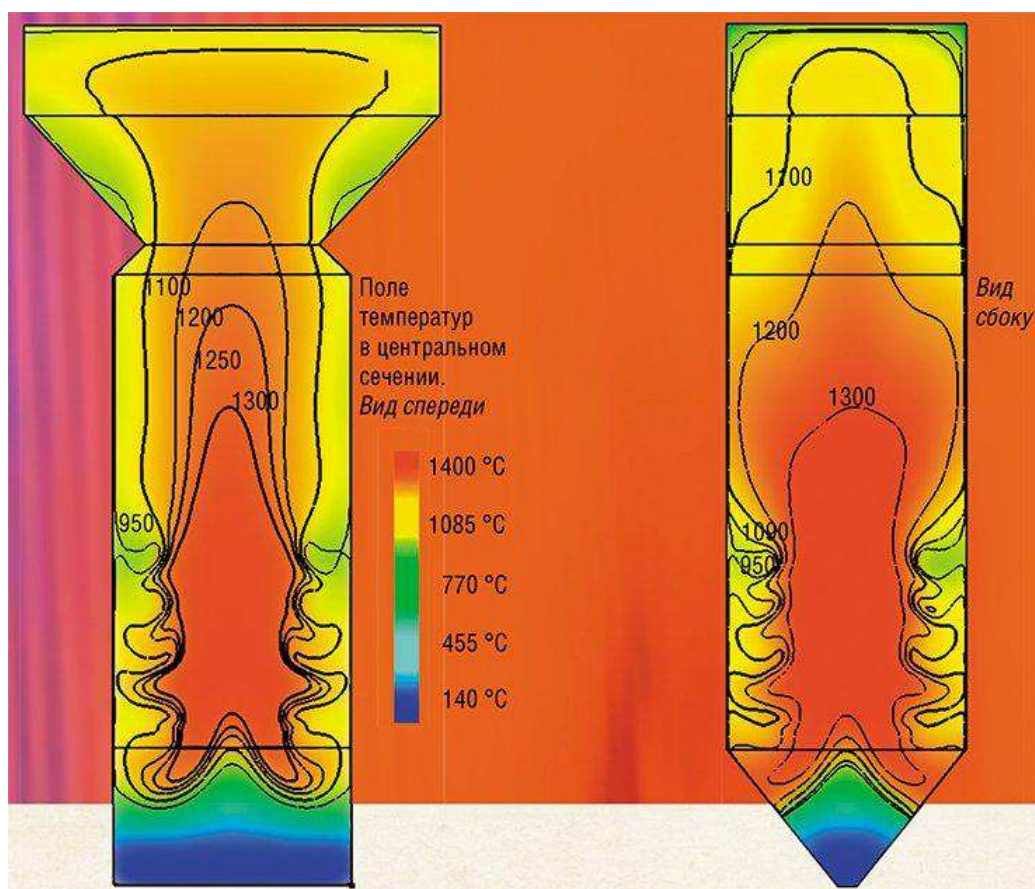


Рисунок 2.6 – Распределение температур в центральном сечении

топки котла П-67

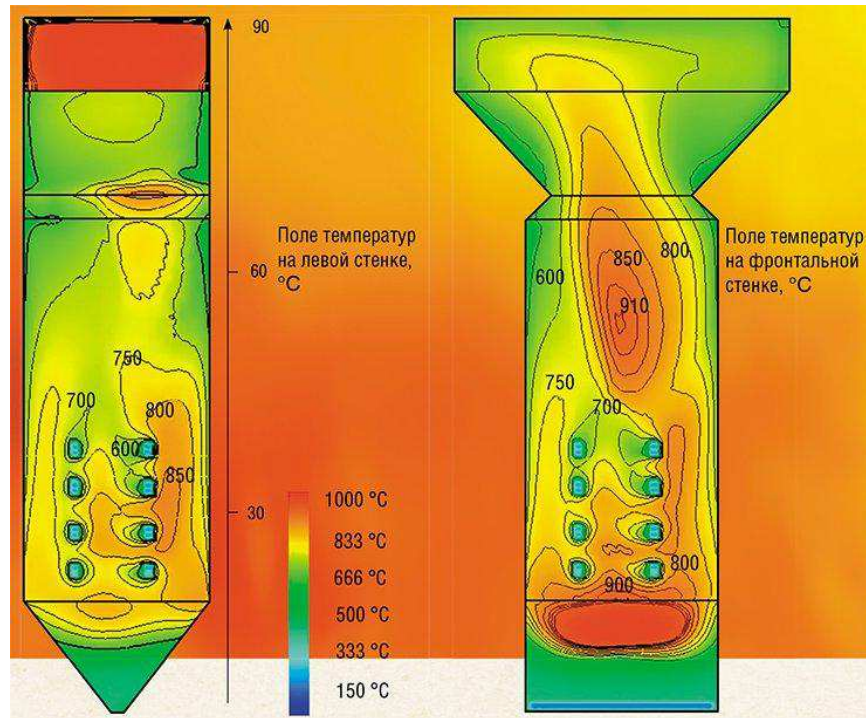


Рисунок 2.7 – Распределение температур на стенках топке котла П-67

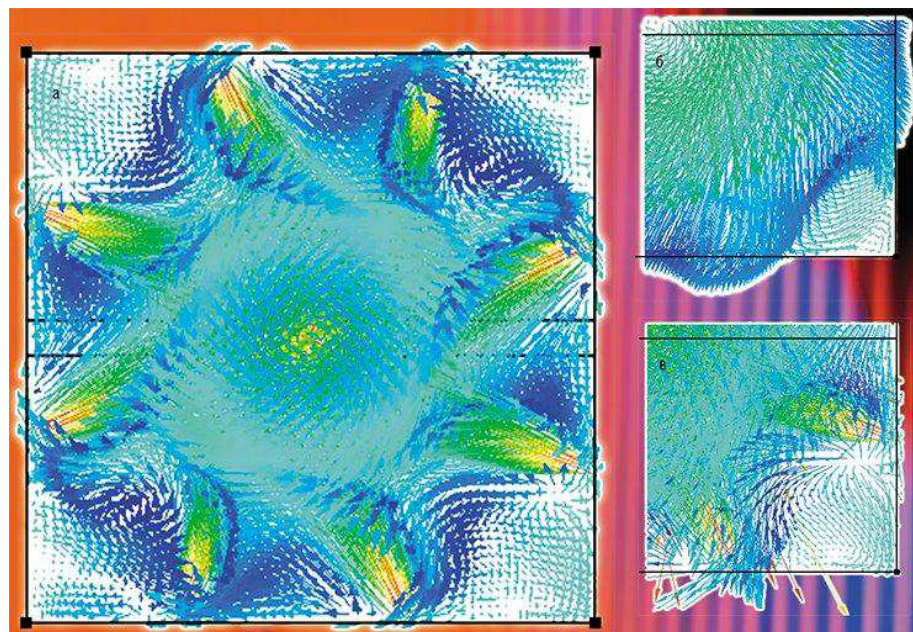


Рисунок 2.8 – Векторное поле скорости газов (пламени) в топке котла П-67

2.3 Выводы по главе 2

1. Установлено, что аэродинамическая структура газовых потоков в топочной камере обладает высокой неравномерностью: крупномасштабный центральный вихрь инициирует вторичные вихри в углах топочной камеры, которые приводят к набросу потока на стенку топки, температура которой начинает повышаться. На этой перегретой поверхности образуются шлаковые отложения.

2. Определены места интенсивного шлакования которые находится на фронтальной и задней стенках котла выше зоны активного горения – на высоте 45...65 м, а также около горелок.

3. Основная причина шлакования – осаждение мелкой фракции золы, частицы которой вовлекаются в движение вторичными вихрями в углах топочной камеры. Обладая достаточно высокой температурой, они достигают экрана, где и образуют шлаковые отложения.

4. На основе анализа имеющихся результатов проведенного численного моделирования и ряда других исследовательских работ было предложено несколько способов решения проблемы шлакования:

- с организацией нижнего дутья с подводом воздуха в холодную воронку;
- с концентрической ориентацией горелок; с комбинацией нижнего дутья и концентрического сжигания;
- с организацией воздушного дутья выше зоны активного горения.

Показано, что максимальный эффект по снижению шлакования поверхностей нагрева относительно проектного варианта котла достигается при использовании блоков воздушных завес и нижнего дутья, а максимальный эффект по снижению выбросов NO_x – двух ярусов сопел дутья, расположенных на высотах 45 и 65 м.

3 Повышение тепловой эффективности поверхностей нагрева котла П-67

3.1 Исследование топочного процесса

Первый период эксплуатации котла П-67 Березовской ГРЭС-1 (около 1000 ч) характеризовался частыми остановами (непрерывная длительная работа не превышала семи суток). Нагрузка блока составила 60...90 % от номинальной. Березовский уголь, сожженный в котле в 1988 году (первый этап исследований), характеризовался нестабильным качеством. Так, зольность, влажность, теплота сгорания и содержание серы изменялись в следующих пределах: $A^d = 5,1...13,7 \%$, влажность $W^r = 33,8...36,0 \%$, $Q_1^r = 13,06...15,07$ МДж/кг, $S^d = 0,7...1,3 \%$ (см. таблица 1.1).

Топочные экраны имели локальные отложения гребневидной и пикообразной формы. Слой толщиной 1...3 мм, прилегающий к поверхности трубы, имел высокую прочность и отличался повышенным содержанием оксидов железа (71,6...78,0 % в пересчете на Fe_2O_3). Промежуточный слой тоже прочный, содержание оксидов железа в нем составило 50,7...69,9 %. Наружный слой представлял собой вторичные слабоспекшиеся отложения пористой структуры. В целом топочные экраны находились в удовлетворительном состоянии. Из средств очистки в этот период были задействованы только восемь аппаратов водяной очистки топки типа ОВГ.

В лючки № 28 и 42 устанавливались тепломеры (рисунок 3.1). В процессе опытов производилась обдувка топки водяными аппаратами ОВГ с частотой 2–3 раза в смену. Со стороны набегания потока газов на тепломерах в течении 20...40 часов образовались прочные отложения серого цвета толщиной более 1 мм с шероховатой поверхностью. Такие отложения типичны для топочных экранов при сжигании КАУ.

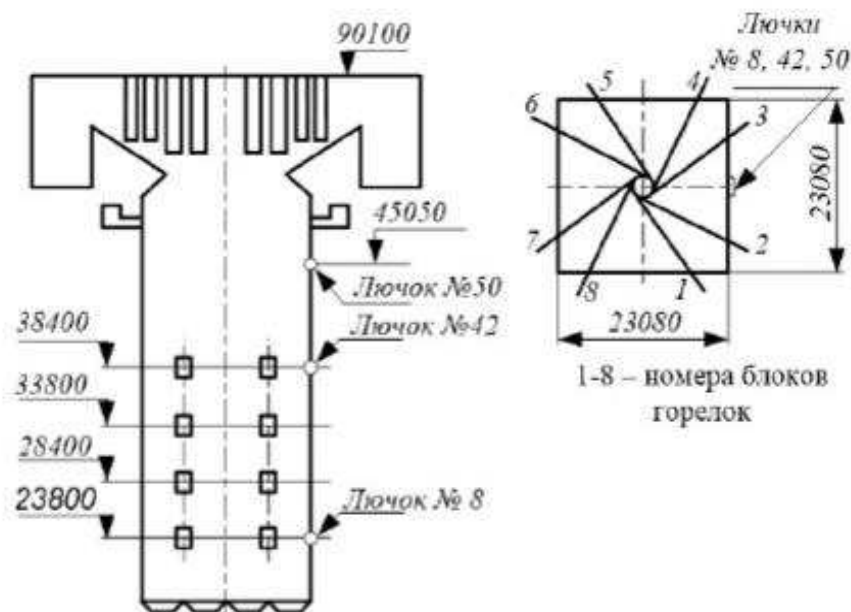


Рисунок 3.1 – Схема топки котла П-67

Установлено, что степень сульфатизации отложений с тепломеров зависит от продолжительности их формирования. Так, при увеличении времени опытов от 20 до 80 часов степень сульфатизации отложений возрастала от 20 до 40...50 % [23]. Отложения с топочных экранов характеризовались более высокой степенью сульфатизации ($K_{SO_3} = 47,5...73,0\%$) по причине более длительного времени их формирования.

За первые 20...40 часов коэффициент тепловой эффективности тепломеров снижался от 0,8 до 0,6...0,7 [28]. При этом стабилизация не наступала. Интенсивность образования первичных отложений на тепломерах оценивалась в 1,2...3,5 г/(м²·ч), что в 10...15 раз ниже, чем в топке котлов БКЗ-210-140Ф и Е-500 [9].

Второй этап исследований на котле П-67 проводился в следующем 1989 году после 5500 часов его эксплуатации. Работа котла в этот период отличалась

стабильностью и несением нагрузок, близких к номинальной. Сжигалось топливо лучшего качества: содержание серы снизилось в 1,5...2 раза, теплота сгорания возросла, примерно, на 1 МДж/кг. Характеристика режима работы котла в опытах приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристика режима работы котла П-67

| Наименование | Обозначение | Размерность | Значение |
|---|---------------------|-------------|-------------|
| Число работающих пылесистем | - | - | 7–8 |
| Электрическая нагрузка энерго-блока | $N_э$ | МВт | 630–800 |
| Избыток воздуха в топке | α_T | - | 1,16–1,44 |
| То же в горелках | $\alpha_{гор}$ | - | |
| Доля воздуха на нижнее дутье | $\Delta\alpha_{нд}$ | - | 0,05–0,07 |
| Доля рециркулирующих низкотемпературных газов, подаваемых в горелку | $r_{рц}^{гор}$ | - | 0,07–0,10 |
| То же вверх топки | $r_{рц}^{верх}$ | - | 0,10–0,19 |
| Максимальная температура факела, измеренная оптическим пирометром | ϑ_{max} | °С | 1370–1380 |
| Характеристики березовского угля: | | | |
| - теплота сгорания низшая | Q_i^r | кДж/кг | 14200–15830 |
| - зольность | A^d | % | 5,5–9,9 |
| - влажность | W^r | % | 31,6–36,6 |
| - содержание серы | S^d | % | 0,40–0,76 |
| Тонкость угольной пыли: | | | |
| | R_{1000} | % | 0,3–0,8 |
| | R_{200} | % | 15–17 |
| | R_{90} | % | 40–45 |
| Потери тепла с механическим недожогом: | | | |
| - в шлаке | $q_4^{шл}$ | % | 0,5–0,8 |
| - с уносом | $q_4^{ун}$ | % | 0,1–0,2 |

Измерения в топке осуществлялись через лючки № 8, 42 и 50. Обдувка топочных экранов производилась два раза в смену водяными аппаратами ОВГ и ОВМ. Отметим, что лючок № 50 находился вне зоны очистки, лючок № 42 – в зоне негарантированной очистки, лючок № 8 – в зоне очистки.

Характер температурных полей в пристенной области топки оказался традиционным – по мере удаления от экрана температура газов резко возрастала (рисунок 3.2). При этом максимальный температурный градиент наблюдался на расстоянии от 0,05 до 0,25 м от экрана и достигал 370 °С/м. В диапазоне нагрузок энергоблока 660...730 МВт и при различном сочетании работающих пылесистем (горелок) температура газов у экранов различалась на 20...70 °С, что еще раз свидетельствует о довольно устойчивой аэродинамике топки. На расстоянии 0,05 м от экрана температура газов $\vartheta'_{гс}$ составила: в зоне лючков № 8, 42 и 50 соответственно 990...1030, 1090...1160 и 1110...1150 °С. При снижении нагрузки блока до 500 МВт эта температура не превышала 1050 °С.

Аэродинамические исследования показали отсутствие в пристенном слое радиальной составляющей скорости, направленной на топочный экран. В зоне лючков № 8 и 42 тангенциальная составляющая скорости невелика – 1,6...4,8 м/с (рисунок 3.3), вектор скорости направлен под углом 20...30° к вертикали, что свидетельствует о слабой крутке в пристенном слое зоны активного горения. Аналогичная картина наблюдалась и при измерении скоростных полей у фронтальной стены топки [24].

Выше зоны активного горения (лючок № 50) преобладала тангенциальная составляющая скорости (7,5...9,6 м/с), вектор которой был направлен под углом 80° к вертикали. Такая картина течения характерна для локальной зоны, где оказывают большое влияние струи горелок четвертого яруса. Зондирование на глубину до 6 м у фронтальной стены показало вырождение тангенциального движения газов [24].

Оценка влияния на аэродинамику топки отключения блока горелок показала, что в зоне отключенной по топливу горелки температура газов в пристенном слое отличалась всего на 20...40 °С от аналогичных зон с работающими горелками. Это обстоятельство позволяет утверждать о слабом смещении факела при работе семи блоков горелок из восьми.

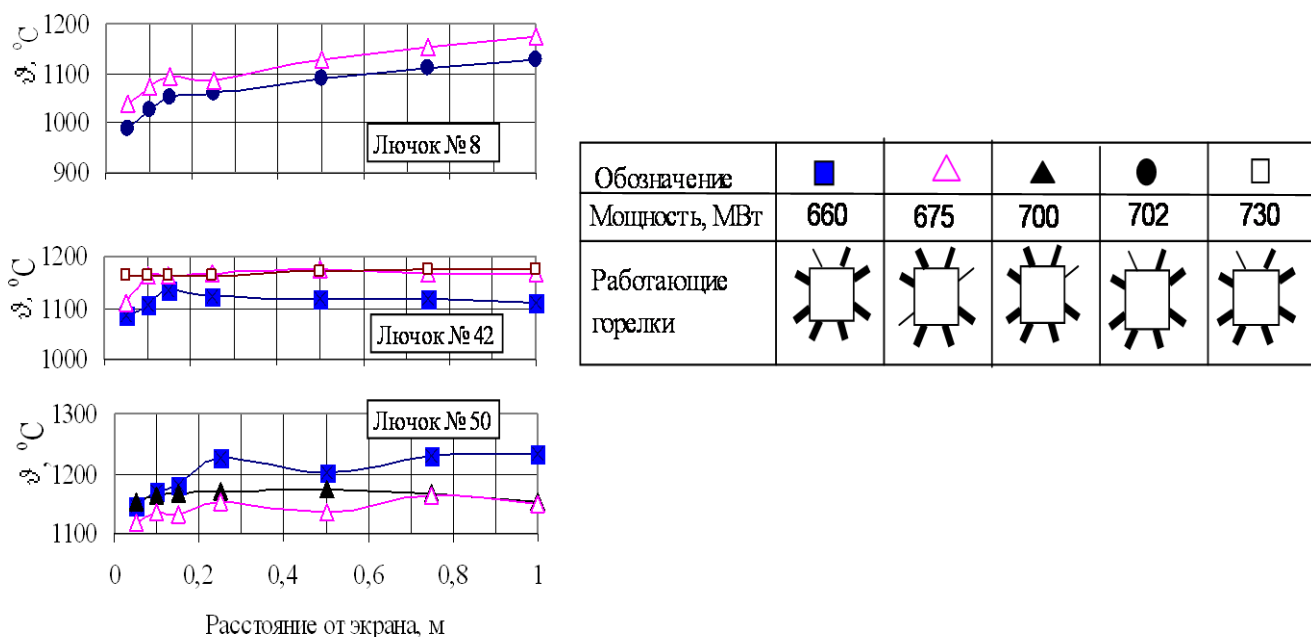


Рисунок 3.2 – Температура газов (θ) в пристенной области топки котла П-67 при разном сочетании работающих горелок

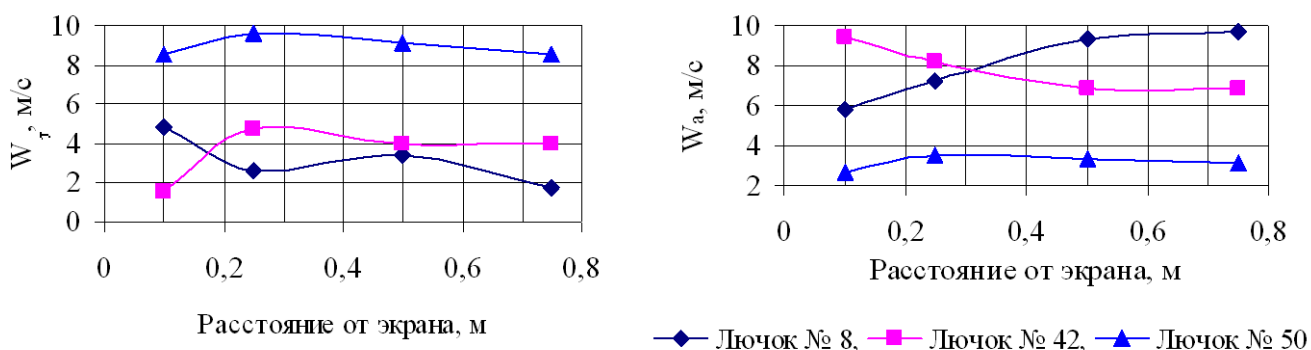


Рисунок 3.3 – Тангенциальная (w_τ) и аксиальная (w_a) составляющие скорости газов в пристенной области топки котла П-67:
($N = 600$ МВт, в работе горелки № 1–4, 6–8)

Аналогичное заключение было сделано по результатам исследования аэродинамики топки котла П-67 на огневой модели [25, 26]. Для сравнения отметим, что в топках котлов БКЗ-210-140Ф и Е-500 с четырьмя угловыми горелочными блоками эта разница достигала 150...300 °С.

Содержание горючих в летучей золе из пристенного слоя составило 2,8...7,8 %. Более выгоревшие частицы наблюдались в зоне нижнего яруса

горелок, что обусловлено особенностями аэродинамики (опускное движение горелочных струй нижнего яруса и преимущественно подъемное движение газов в пристенном слое).

Содержание кислорода по глубине зондирования практически не менялось. Более низкие избытки воздуха наблюдались в районе первого яруса горелок (лючок № 8): при $\alpha_T = 1,23$ содержание кислорода в зоне этого лючка составило 4,0...4,8 %, в зоне лючков № 42 и 50 – 6,4...7,8 %; при $\alpha_T = 1,1$ эти цифры соответственно составили – 1,4...1,8 и 3,4...7,2 %. Более низкий избыток воздуха в пристенном слое на отметке первого яруса горелок объясняется неравномерным распределением топлива по ярусам горелок [27, 28].

Фракционный состав летучей золы, отобранной на расстоянии 0,25 м от экрана, указывает на некоторое ее угрубление в верхних зонах топки по сравнению с нижней. В зоне первого и четвертого ярусов горелок (отметки 23,8 и 38,4 м) остаток на сите 90 мкм составил 14,1...16,4 %, на отметке – 45,0...33,0 %.

Содержание горючих в летучей золе из пристенного слоя составило 2,8...7,8 %. Более выгоревшие частицы наблюдались в зоне нижнего яруса горелок, что обусловлено особенностями аэродинамики (опускное движение горелочных струй нижнего яруса и преимущественно подъемное движение газов в пристенном слое). По сравнению с котлом Е-500 дисперсный состав частиц в пристенном слое топки котла П-67 оказался более тонким, а содержание в них горючих более низким (на котле Е-500 – $R_{90} = 25...61$ %, $\Gamma_i = 10,3...34,0$ %).

Концентрация частиц летучей золы на расстоянии 0,25 м от правого экрана составила 0,44...0,93 г/м³ (на котле Е-500 – 1,0...1,8 г/м³). Однако плотность сепарации частиц оказалась в несколько раз ниже, чем на котле Е-500 (0,25...0,48 кг/(м²·ч), против 0,72...3,40 кг/(м²·ч) для П-67).

По сравнению с опытами на первом этапе исследований интенсивность образования первичных отложений на тепломерах повысилась, примерно, в два раза. Так, в зоне лючков № 42 и 50 она составила 1,5...7,4 г/(м²·ч). По нашему мнению, причиной является более высокая температура в пристенном слое и в топке в целом, что связано с повышением нагрузки энергоблока до номинальной в период исследований.

Первичные отложения на тепломерах отличались высокой прочностью. Их толщина не превышала 1 мм. При длительности опыта менее девяти часов они представляли собой, как правило, прочный серый налет. Вторичные отложения, обычно слабоспекшиеся, имели пористую структуру. По химическому составу они близки к золе топлива. Первичные отложения отличались повышенным содержанием оксидов железа – 31,6...63,7 %.

Аналогичный химический состав имели и прочные притрубные отложения с топочных экранов. Однако степень сульфатизации их значительно выше по сравнению с отложениями с тепломеров, что обусловлено разной продолжительностью формирования тех и других отложений.

Минералогические исследования отложений с топочных экранов котла П-67 показали, что основными компонентами в них являются стеклофаза, ангидрит и гематит. Ангидрит играет связующую роль. В упрочнении пристенного слоя активную роль играет гематит. Повышенное содержание железа в отложениях обусловлено в основном гематитом.

В структурном отношении снятые с топочных экранов отложения котлов П-67 и Е-500 сходны между собой. Однако отложения с котла П-67 оказались более обогащены ангидритом, что обусловлено, вероятно, пониженной селективной способностью железосодержащих минералов к осаждению на поверхность экранных труб. Это можно объяснить более низкой сепарацией частиц на стены топки по сравнению с котлом Е-500 и более высокой степенью выгорания частиц, движущихся вблизи экранов.

С тепломера, установленного в лючке № 8, отложений снять не удалось, так как во всех опытах он практически не загрязнялся, Об этом свидетельствует и слабая зависимость коэффициента тепловой эффективности от продолжительности опытов. Это обусловлено относительно невысокой температурой газов в пристенном слое ($\vartheta_{\text{пс}} < 1030 \text{ }^\circ\text{C}$), а также установкой тепломера в зону гарантированной очистки аппаратом ОВМ. Включение обдувочных аппаратов производилось 2–3 раза в смену. Очевидно, что для таких зон целесообразно сократить число обдувок.

Тепломеры в лючках № 42 и 50 загрязнялись более интенсивно, особенно в лючке № 50, который находился вне зоны очистки [23]. Температура газов у экранов здесь на 100...120 $^\circ\text{C}$ выше, чем в зоне лючка № 8.

В период проведения опытов водяной очистке подвергалось не более 40 % площади нижней радиационной части топки. Следует учесть, что часть аппаратов работала неэффективно из-за неудовлетворительного состояния сопловых головок. Поэтому на топочных экранах образовывались локальные наросты. Характер загрязнения топочных экранов иллюстрирует фотография, сделанная после останова котла (рисунке 3.4). Видно, что в зонах работы аппаратов водяной очистки экран чистый. В не очищаемых зонах имеют место наросты шлака.

Вторичные отложения с экранов в зоне лючков № 42 и 50 имели пористую структуру, обладали высокой прочностью. По химическому составу они близки к аналогичным отложениям с неохлаждаемого зонда. Качественная регулярная 1–2 раза в смену обдувка топочных экранов обеспечила бы их эффективную работу. Однако недостатки проектной системы очистки не позволили в этот период добиться желаемого результата. Коэффициент тепловой эффективности топочных экранов составил 0,3 при проектном значении – 0,45 [20].

Максимальная температура в топке достигала 1370...1420 $^\circ\text{C}$ несмотря на то, что значения теплонапряжения зоны активного горения в сечениях топки по ярусам горелок были приняты в соответствии с рекомендациями [15].

Первичные отложения на топочных экранах имели высокую прочность, содержали 60...80 % оксидов железа и обладали высокой степенью сульфатизации ($K_{SO_3} = 50...70\%$). Повышенное содержание железа в отложениях обусловлено в основном гематитом.



Рисунок 3.4 – Характер шлакования топочных экранов котла П-67
(зона третьего и четвертого ярусов горелок и выше)

В упрочнении притрубного слоя активную роль играет гематит. Первичные отложения с тепломеров содержали 32...64 % оксидов железа. Степень сульфатизации их ниже ($K_{\text{SO}_3} = 16...30\%$) по причине ограниченного времени их формирования. Вторичные отложения с экранов, как правило, прочные пористые с меньшей степенью сульфатизации ($K_{\text{SO}_3} = 5...15\%$). Отложения, особенно в первые часы их формирования, способны удаляться водяной обдувкой.

В последние годы на котле П-67 разработаны и внедрены технические решения по улучшению топочного процесса. Положительно зарекомендовала себя система нижнего дутья через шлаковые комоды, позволившая углубить помол топлива, не ухудшая показатели по механическому недожогу, снизить вероятность шлакования скатов холодной воронки. С целью снижения выбросов оксидов азота внедрена двухступенчатая схема сжигания, реализованная путем подачи в четвертый ярус горелок только вторичного воздуха и газов рециркуляции [21].

3.2 Предлагаемая технологическая схема сжигания пылеугольного топлива

Наиболее перспективными способами повышения тепловой эффективности поверхностей нагрева в настоящее время являются различные методы стадийного сжигания.

При ступенчатом сжигании топлива горелки в топке котла размещают в несколько ярусов (обычно три - четыре яруса). Подача воздуха (избыток воздуха) изменяется тоже поярусно. Например, при двухступенчатом сжигании нижний ряд горелок получает недостаточное для стехиометрического горения количества воздуха, а верхние ряды горелок, наоборот, получают избыточное его количество.

Наилучший эффект дает трехступенчатое сжигание, прежде всего, на котлах с топками с твердым шлакоудалением, и особенно сжигание высокосернистых топлив при обеспечении минимальной газовой коррозии экранных труб.

В ВТИ была разработана и успешно реализована на ряде крупных энергетических котлов так называемая упрощенная схема трехступенчатого сжигания, которая предполагает использование существующих горелок верхнего яруса для создания восстановительной зоны.

Суть трехступенчатого сжигания состоит в том, что по высоте топочной камеры организуют три зоны (рисунок 3.5). В первой (нижней) зоне топки сжигается основное количество топлива (70...85%) при избытке воздуха близком к единице. На выход из зоны активного горения подается оставшая часть топлива (15...30%) и соответствующее количество воздуха с таким расчетом, что бы суммарный избыток воздуха в ней составлял 0,39...0,95 (т.е. небольшой недостаток для полного сжигания топлива), благодаря чему в этой части топки создается зона с восстановительной средой, в которой продукты неполного горения (CO , H_2 , C_N , H_M) восстанавливают уже образовавшиеся окислы азота NO до N_2 .

Выше этой зоны в верхней части топки организуется зона дожигания оставшихся продуктов неполного сгорания с участием третичного воздуха, подаваемого под повышенным давлением через специальные сопла.

Уменьшение выбросов оксидов азота при ступенчатом сжигании топлива в среднем составляет: при сжигании угля - до 40 %, при сжигании мазута – до 35%, при сжигании природного газа – до 45%.

В топке одновременно происходят горение топлива и сложный радиационный и конвективный теплообмен между заполняющей ее средой и поверхностями нагрева. Источниками излучения в топках при слоевом сжигании топлива являются поверхность раскаленного слоя топлива, пламя горения летучих веществ, выделившихся из топлива, и трехатомные продукты сгорания CO_2 , SO_2 , H_2O . При факельном сжигании пыли твердого топлива и мазута источниками излучения являются центры пламени, образующиеся вблизи поверхности частиц топлива от горения летучих, распределенных в факеле, раскаленные частицы кокса и золы, а также трехатомные продукты сгорания. При горении в факеле распыленного жидкого топлива излучение частиц топлива незначительно. При сжигании газа источниками излучения являются объем его горящего факела и трехатомные продукты сгорания. При этом интенсивность излучения факела зависит от состава газа и условий протекания процесса горения. Наиболее интенсивно излучает теплоту пламя горящих летучих веществ, выделяющихся при горении твердого и жидкого топлива [108].

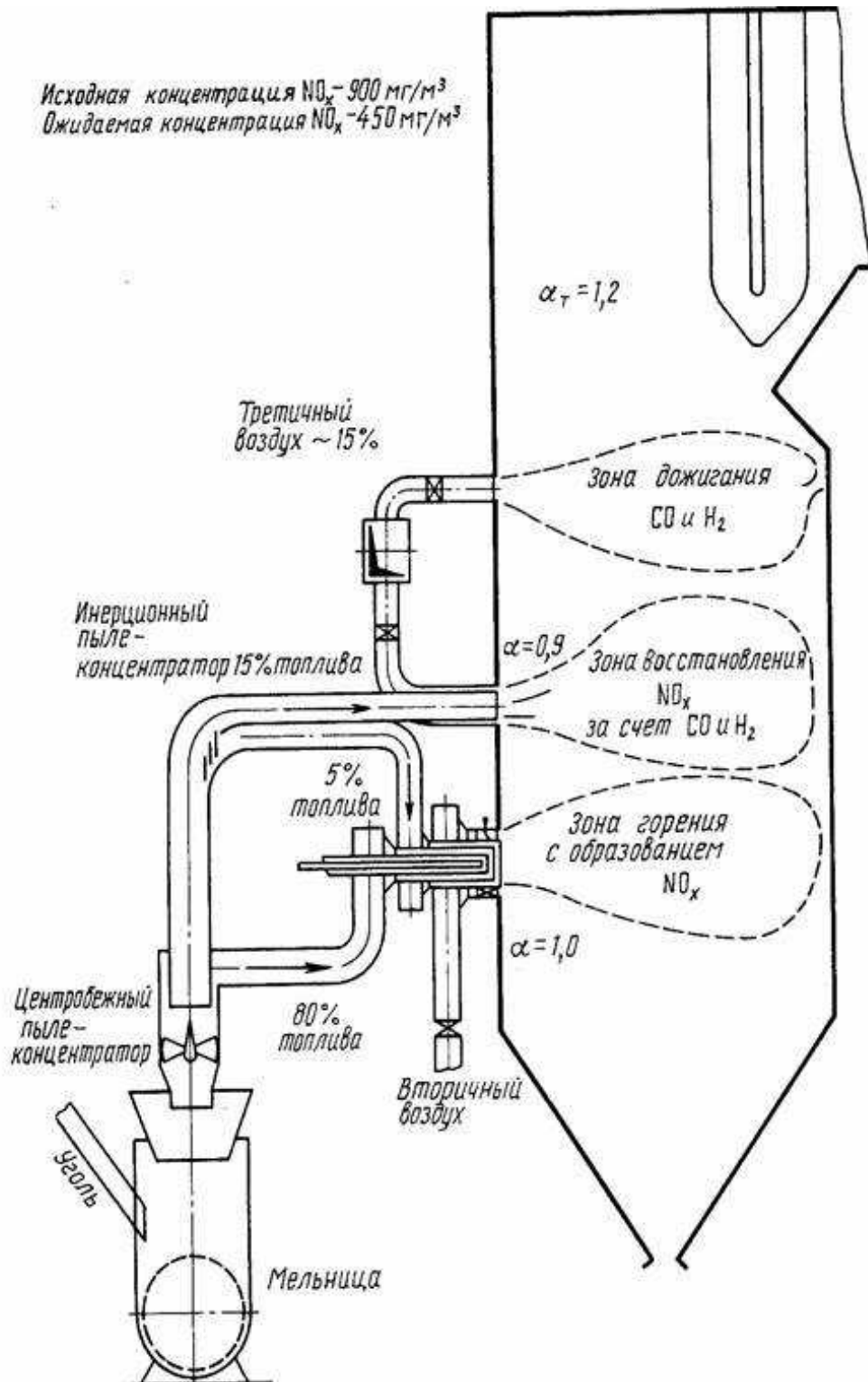


Рисунок 3.5 – Схема трехступенчатого сжигания

Сравнительный анализ проводился с использованием программного комплекса «SigmaFlow»[22] Проводилась оценка эффективности топочного процесса по следующим критериям: интенсивность наброса факела (максимальная скорость газов по нормали к экрану); интенсивность сепарации частиц на экраны; максимальная температура факела; максимальные объемные и пристенные температуры газов; температура газов на выходе из топки и ее неравномерность; падающие тепловые потоки; выгорание; концентрация оксидов азота; изменение провала в холодную воронку.

Аэродинамическая структура газовых потоков в топочной камере размером 23×23×90 м обладает в базовом варианте высокой неравномерностью. Наблюдается наброс факела в верхней части холодной воронки и между ярусами горелок с ростом температур газов в пристенной зоне (рисунок 3.4, а). Велики скорости газов (12...20 м/с) в центральной части топки выше зоны активного горения (рисунок 3.4, б). Без нижнего дутья малы подъемные скорости в холодной воронке. Избытки кислорода формируются в угловых зонах (рисунок 3.4, с), однако выгорание топлива в основном заканчивается до аэродинамического пережима топки (рисунок 3.4, d).

Вариант поворота четных блоков горелок к центру несколько снижает интенсивность наброса факела на нечетный блок горелок и скорость роста отложений, но радикально проблема локального шлакования не решается. При повороте только двух верхних ярусов горелок эффект снижается.

Вариант с увеличенным диаметром крутки существенно не меняет исходную картину сепарации частиц на экраны. Скорость роста отложений может возрасти из-за повышения температур газов в пристенной области. Увеличение наклона горелок с целью заполнения холодной воронки и снижения температуры газов на выходе из топки приводит к росту сепарации частиц на скаты холодной воронки. Сокращение или увеличение диаметров крутки третичного воздуха сопел трехступенчатого сжигания по горизонтали снижает эффект защиты от шлакования нечетных блоков горелок.

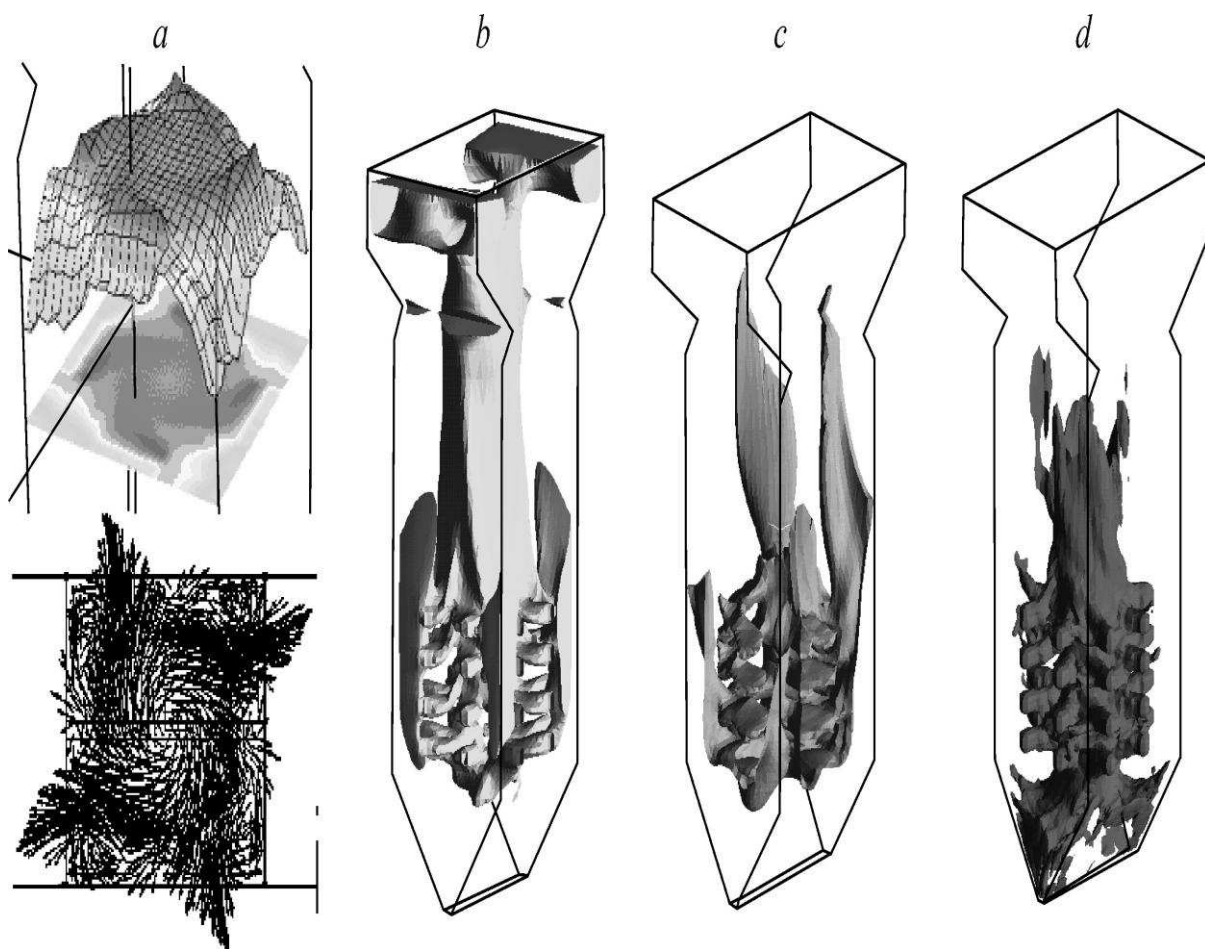


Рисунок 3.6– Результаты математического моделирования топочного процесса.

Для основных вариантов возможной реконструкции представлены изоповерхности интенсивной сепарации (условной скорости роста отложений) для монофракций частиц размером от 100 до 1000 мкм, соударяющихся с топочными экранами. Установлено, что доля фракций размером 1000 мкм превышает 1,5 %. Эти фракции, в силу своих инерционных свойств и химического состава золы, играют существенную роль в процессах локального шлакования скатов холодной воронки и увеличении механического недожога.

Анализ показывает, что сугрублением пыли увеличивается сепарация в холодную воронку, она также наблюдалась на реальном котле с образованием монолитных отложений, сползающих в шнеки холодной воронки. Разворот

горелок нецелесообразен, поскольку не сокращает существенно зоны локального шлакования.

Увеличение наклона горелок с целью заполнения холодной воронки и снижения температуры газов на выходе из топки приводит к росту сепарации частиц на скаты холодной воронки.

Для котла П-67 трехступенчатое сжигание может быть реализовано как при сохранении четырех ярусов горелок, так и при установке пятого восстановительного яруса горелок[1].

В первом случае в качестве восстановительных предполагается применение горелок четвертого яруса с подачей в них около 20 % топлива с недостатком кислорода. С целью уменьшения шлакования в зоне активного горения предлагается трехступенчатое сжигание с установкой дополнительного пятого яруса горелок, в который подается около 15 % топлива с избытком воздуха $\alpha_T = 0,6 \dots 0,8$. Пятый ярус располагается примерно на 5 м выше четвертого яруса (см. рисунок 3.1). При этом в 1, 2,3 и 4-м ярусах топливо распределяется равномерно.

Применение же в топочной камере дополнительных сопел нижнего дутья, как показал опыт, позволяет дополнительно углубить помол топлива и повысить резерв по размольной производительности мельниц-вентиляторов при максимальных нагрузках котла [30, 31].

3.3 Рекомендации по управлению процессом сжигания шлакующих углей

Для снижения интенсивности шлакования топочных экранов предлагается управлять процессом сжигания шлакующих углей путем регулирования подачи воздуха для горения по минимальному значению избытка кислорода в дымовых газах, а температуры в ядре – изменением потока рециркулирующих дымовых газов. При этом с целью снижения интенсивности шлакования топочных экранов, в случае достижения потоком

рециркулирующих газов предельного значения отключается регулирование подачи воздуха по минимуму избытка кислорода, а регулирование температуры в ядре дополнительно осуществляется увеличением подачи воздуха на горение.

На рисунке 3.7 изображена установка, иллюстрирующая предлагаемый способ управлению процессом сжигания шлакующих углей.

Установка содержит течку 1 для подачи сырого угля в газозаборную шахту 2, где он предварительно подсушивается, охлаждая топочные газы, и вместе с ними поступает в мельницу – вентилятор 3. После размолы готовая пыль вместе с охлажденными топочными газами и влагой топлива поступает в горелки 4. Дымосос 5 с газоходом 6 служит для подачи рециркулирующих газов в горелки 4, а вентилятор 7 с воздухоподогревателем 8 и воздуховодом 9 – для подачи воздуха на горение. Шибер 10 регулирует подачу рециркулирующих газов, он через логическое устройство 11 подключен к регулятору 12, получающему сигнал от датчика 13 температуры газов в ядре горения. Регулятор 14 получает сигнал от датчика 15 содержания кислорода в дымовых газах. Выход логического устройства 11 соединен через интегратор 16 с регулятором 17 подачи воздуха на горение.

Работа установки осуществляется следующим образом.

Когда шибер 10 рециркуляции газов находится в диапазоне регулирования, логическое устройство 11 подключает сигнал от регулятора 14 через интегратор 16 к входу регулятора 17, обеспечивающего необходимый поток воздуха по условиям полного выгорания топлива, а сигнал от регулятора 12 – к шиберу 10, поддерживающему температуру в ядре горения изменением потока рециркулирующих газов.

При исчерпании диапазона регулирования шибера 10 регулятор 12 переключается логическим устройством 11 на вход интегратора 16, а выход регулятора 14 отключается. Регулятор 12 и интегратор 16 формируют сигнал коррекции регулятору 17 в сторону увеличения подачи воздуха в горелки, способствуя этим снижению температуры газов в ядре горения.

При снижении нагрузки, когда подача воздуха на горелки и избыток кислорода в дымовых газах снижаются до минимального значения, необходимого по условиям полного выгорания топлива, логическое устройство 11 по сигналу от регулятора 14 переключается в исходное состояние.

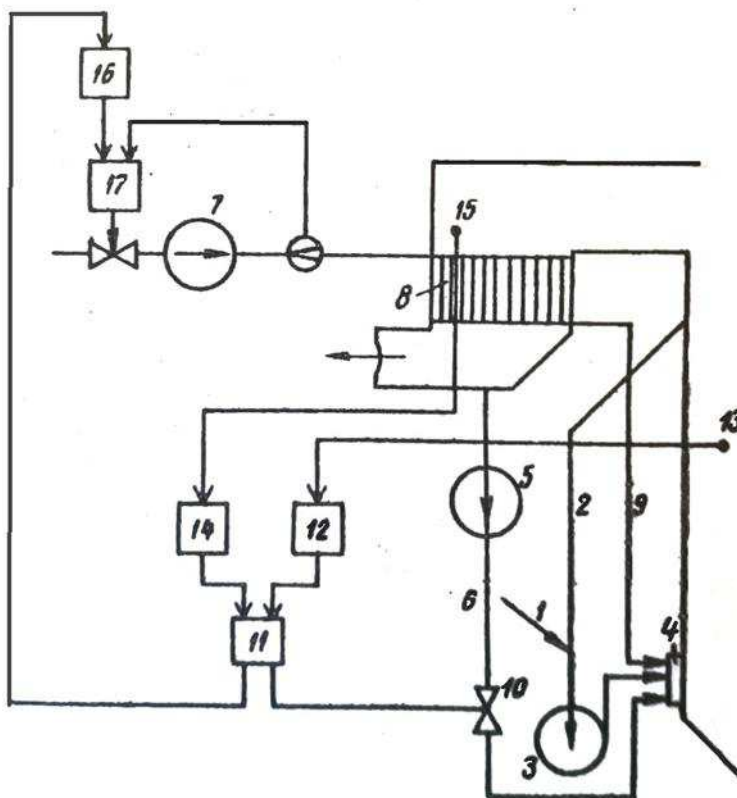


Рисунок 3.7 – Блок-схема регулирования процесса сжигания

3.4 Выводы по главе 3

1. Установлено влияние конструктивных и режимных параметров топки котла П-67 на характеристики топочного процесса: плотность падающего лучистого потока, температуру и вектор скорости газов, содержание кислорода, концентрацию золоугольных частиц и содержание в них горючих, плотность сепарации частиц на экраны.

2. Исследования топок с твердым шлакоудалением с тангенциальной одно и многоярусной компоновкой прямоточных горелок выявили наличие

существенной неизотермичности пристенного газового слоя у экранов: при удалении от экранов температура газов возрастает на 50...100 °С, стабилизируясь на расстоянии 0,3...0,5 м от экрана.

3. Выявлено существование предельной температуры газов на расстоянии 0,05 м от экрана равной 1050 °С, выше которой образуются прочные высокожелезистые отложения с содержанием $Fe_2O_3 = 40...80 \%$, а при более низкой – сыпучие, слабосвязанные с поверхностью экранных труб.

4. Показано, что наиболее перспективной организацией топочного процесса и обеспечение длительной работоспособности радиационных поверхностей нагрева котла П-67 является применение трехступенчатой технологии сжигания пылеугольного топлива. При этом наилучшие результаты по снижению интенсивности локального шлакования и повышению КПД котла (за счет снижения величины q_4) могут быть достигнуты при использовании комбинированной схемы – трехступенчатого сжигания топлива и нижнего дутья.

5. Предложен способ управления процессом сжигания шлакующих углей в пылеугольных топках котлов с твердым шлакоудалением, позволяющий уменьшить шлакование поверхностей нагрева за счет поддержания на требуемом уровне расхода воздуха для горения и потока рециркулирующих дымовых газов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магистерская диссертация посвящена вопросам организации бесшлаковочной эксплуатации котельных агрегатов П-67 с твердым шлакоудалением, сжигающим КАУ, на основе изучения топочных процессов.

В работе рассмотрено поведение пылеугольного топлива в котлах различных конструкций и его влияние на топочные процессы при сжигании бурых КАУ. На основании имеющихся научно-технических данных установлен механизм шлакования и загрязнения поверхностей нагрева в топке котла П-67 при сжигания КАУ. Проведен анализ работы поверхностей нагрева котлов при сжигании шлакующих углей и установлено влияние режимных параметров работы котла на интенсивность образования золошлаковых отложений при сжигании КАУ.

На основании анализа имеющегося опыта сжигания КАУ в котлах П-67 определены общие закономерности образования золошлаковых отложений на топочных экранах котлов, имеющих одну- и многоярусную конструкцию тангенциальной топочной камеры. Представлены основные принципы организации топочного процесса, обеспечивающие по условиям шлакования надежную и эффективную работу котлов этой конструкции.

Показано, что наилучшие результаты по снижению интенсивности локального шлакования радиационных поверхностей нагрева котла П-67 могут быть получены с комбинированной схемой нижнего дутья и трехступенчатого сжигания.

Приведены рекомендации по управлению процессом сжигания КАУ, позволяющему уменьшить вероятность шлакования поверхностей нагрева за счет поддержания на требуемом уровне расхода воздуха для горения и потока рециркулирующих дымовых газов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пронин, М.С. Совершенствование технологий пылеугольного сжигания канско-ачинских углей с учетом особенностей поведения их органической и минеральной массы: монография / М.С. Пронин. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – 224 с.
2. Залкинд, И.Я. Зола и шлаки в котельных топках / И.Я. Залкинд, В.С.Вдовченко, Э.П. Дик. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 79 с.
3. Пронин, М.С. Особенности сжигания канско-ачинских углей в пылеугольных топках / М.С. Пронин, В.Г. Мещеряков, С.Г. Козлов [и др.] // Сб. науч. тр.: Повышение эффективности и экологической безопасности сжигания углей на электростанциях Сибири. – Красноярск, 1995. – С. 5-13.
4. Клейменова, И.И. Характеристика углей Канско-Ачинского бассейна как энергетического топлива / И.И. Клейменова // Материалы научно-технического совещания по экономическому сжиганию бурых углей Канско-Ачинского бассейна. – Красноярск, 1967. – С. 14-29.
5. Лебедев, И.К. Состав минеральной части березовского угля / И.К. Лебедев, С.К. Карякин, А.С. Загорин // Краткие тезисы докладов: Расширение добычи и использования канско-ачинских углей. – Красноярск, 1972. – Ч. 1. – С. 156-161.
6. Шарловская, М.С. Влияние минеральной части сибирских углей на загрязнение поверхностей нагрева парогенераторов / М.С. Шарловская, А.С. Ривкин. – Новосибирск: Наука, 1973. – 242 с.
7. Дик, Э.П. Шлакующие свойства ирша-бородинского и березовского углей Канско-Ачинского бассейна / Э.П. Дик, А.Н. Соболева // Теплоэнергетика. – 2004. – № 9. – С. 34-39.
8. Дик, Э.П. Особенности поведения минеральной части канско-ачинских углей в топках котлов и задачи исследований / Э.П. Дик, И.Я. Залкинд, М.Я. Процайло, В.С. Вдовиченко [и др.] // Тез. Докл. к краевому науч.-техн.

совещанию: Вопросы сжигания канско-ачинских углей в мощных парогенераторах. – Красноярск, 1978. – Ч.2. – С. 234-238.

9. Маршак, Ю.Л. Шлакование топочной камеры при сжигании березовского угля / Ю.Л. Маршак, С.Г. Козлов, Э.П. Дик, С.И. Сучков [и др.] // Теплоэнергетика. – 1980. – № 1. – С. 16-22.

10. Пронин, М.С. О надежности жидкого шлакоудаления при сжигании углей Канско-Ачинского бассейна / М.С. Пронин, М.Я. Процайло, Ю.Л. Маршак // Теплоэнергетика. – 1982. – № 3. – С. 58-59.

11. Маршак, Ю.Л. Основные вопросы сжигания углей Канско-Ачинского бассейна на тепловых электростанциях / Ю.Л. Маршак, М.Я. Процайло, В.М. Иванников, О.Н. Кучерявый // Электрические станции. – 1981. – № 1. – С. 18-24.

12. Козлов, С.Г. Повышение эффективности сжигания углей Канско-Ачинского бассейна в топках с твердым шлакоудалением: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 17.06.09 / Козлов Сергей Георгиевич. – Красноярск, 2009. – 20 с.

13. Маршак, Ю.Л. Опытное сжигание березовского угля в полуоткрытой вихревой топке с жидким шлакоудалением котлов БКЗ-320-140 ПТ / Ю.Л. Маршак, М.С. Пронин, М.Я. Процайло, В.В. Васильев [и др.] // Теплоэнергетика. – 1982. – № 5. – С. 35-44.

14. Пронин, М.С. Результаты опытного сжигания отсевов березовского угля в котле БКЗ-320-140 Ачинской ТЭЦ / М.С. Пронин, А.И. Новиков, С.Г. Козлов [и др.] // Сб. науч. тр.: «Повышение эффективности и экологической безопасности сжигания углей на электростанциях Сибири». – Красноярск, 1995. – С. 109-112.

15. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / Под ред. Э.Х. Вербовецкого и Н.Г. Жмерика. – Санкт-Петербург, 1996. – 270 с.

16. Ленкевиц, Г. Развитие пылеугольных котлов для бурого угля. Паровые котлы западноевропейских стран / Г. Ленкевиц. – М-Л.: ГЭИ, 1957. – С. 3-12.

17. Отс, А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей / А.А. Отс. – М.: Энергия, 1977. – С. 312.
18. Алехнович, А.Н. Прогнозирование и контроль шлакования котлов: Дис. ...докт. техн. наук: 04.04.95 / А.Н. Алехнович. Челябинск: УралВТИ, 1995. 68 с.
19. Отс, А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей / А.А. Отс. – М.: Энергия, 1977. – 312 с.
20. Дик, Э.П. Шлакующие свойства березовского угля при сжигании его в топках с твердым и жидким шлакоудалением / Э.П. Дик, Б.В. Цедров, С.Г. Козлов, М.С. Пронин // Сб. тр. науч.-практ. конф.: Оборудование ГРЭС и передача электроэнергии КАТЭКа. – Красноярск, 1983. – С. 123-126.
21. Белый, В.В. Исследование теплообмена и модернизация топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт / В.В. Белый, С.В. Порозов, В.В. Васильев, А.А. Дектерев, Е.С. Тэпфер // Теплофизика и аэромеханика, 2007, Т. 14, № 2.
22. Тэпфер, Е.С. Совершенствование топочного процесса пылеугольных котельных агрегатов П-67 на основе численного моделирования: Дис. ...канд. техн. наук: 07.04.10 / Е.С. Тэпфер. – Красноярск: СФУ, 2010. – 124 с.
23. Козлов, С.Г. Шлакование топки котла П-67 Березовской ГРЭС-1 / С.Г. Козлов // Электрические станции. – 1992. – № 11. – С. 31-33.
24. Верзаков, В.Н. Исследование аэродинамики, воспламенения и выгорания топлива по длине факела с определением оптимальных режимов работы, обеспечивающих минимальное количество вредных выбросов и шлакования поверхностей нагрева / В.Н. Верзаков, С.Г. Козлов, С.В. Срывков и др. // Отчет СибВТИ, арх. № 625. Красноярск, 1989. – 92 с.
25. Вербовецкий, Э.Х. Исследование на огневой модели аэродинамики и рециркуляции газов вверх топочной камеры котла П-67 / Э.Х. Вербовецкий, В.Н. Точилкин, В.В. Осинцев, П.И. Матюхин [и др.] // Теплоэнергетика. – 1981. – № 7. – С. 18-22.
26. Авторское свидетельство СССР 1710938. Топка. / С.В. Срывков, Ю.Л. Маршак, О.Г. Шишканов, С.Г. Козлов [и др.] // Бюл. № 5. опубл. 07.02.1992.

27. Корнейчук, С.И. Исследование распределения по ярусам и сечению каналов пылеугольных горелок, участие в определении рабочих характеристик МВ 3300/800/490 / С.И. Корнейчук, М.С. Пронин, А.А. Фелькер // Отчет СибВТИ, арх. № 594. – Красноярск, 1989. – 62 с.

28. Скуратов, А.П. Методика расчета теплообмена в пристенном слое топочных камер / А.П. Скуратов, С.Г. Козлов, Ю.Л. Маршак // Теплообмен и гидродинамика. Красноярск: КПИ, 1984. – С. 83-93.

29. Скуратов, А.П. Повышение эффективности работы высокотемпературных теплотехнологических установок на основе математического моделирования процессов сложного теплообмена / Дисс. ...докт. техн. наук: 20.12.01 / А.П. Скуратов. – Красноярск: КГТУ, 2001. – 430 с.

30. Васильев, В.В. Результаты испытаний котла П-67 при нагрузках свыше 700 МВт / В.В. Васильев, В.В.Белый., С.В. Порозов [и др.] // Электрические станции. – 2003, – № 7, – С. 8-12.

31. Дектерев, А.А. Программный комплекс «AEROCHEM» для численного исследования аэродинамики, теплообмена и горения в технологических установках / А.А. Дектерев, Л.П. Каменщиков, А.М. Ковалевский // Использование методов математического моделирования в котельной технике. – Красноярск, 1996. – С. 15-16ю

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

(наименование института)

Кафедра теплотехники и гидрогазодинамики

(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой


(подпись)

В.А. Кулагин
(инициалы, фамилия)

«__» _____ 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ
НАГРЕВА КОТЛОВ П-67»

(название темы магистерской диссертации)

13.04.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

(код и наименование направления)

13.04.01.01 – Энергетика теплотехнологии

(наименование программы)

| | | | |
|----------------------|--|-------------------|---|
| Научный руководитель |  (подпись, дата) 27.06.19 | профессор, д.т.н. | <u>А.П. Скуратов</u> (инициалы, фамилия) |
| Выпускник |  (подпись, дата) | | <u>Р.В. Оберман</u> (инициалы, фамилия) |
| Рецензент |  (подпись, дата) | профессор, д.т.н. | <u>С.В. Беляев</u> (инициалы, фамилия) |
| Нормоконтролер |  (подпись, дата) 27.06.19 | | <u>А.П. Скуратов</u> (инициалы, фамилия) |

Красноярск 2019