

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 ПРИСТЕННОГО ГАЗОВОГО СЛОЯ ТОПКИ  
КОТЛА БКЗ-210С ТВЕРДЫМ ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ»  
(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 В.Л. Толкачев  
(подпись, дата) (инициалы, фамилия)

Рецензент профессор, д.т.н. Ю.Л. Липовка  
(подпись, дата) (инициалы, фамилия)

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

Красноярск 2019

## **СОДЕРЖАНИЕ**

	C.
Введение.....	3
1 Проблемы эффективного сжигания бурых канского-ачинских углей .....	5
1.1. Особенности поведения минеральной части углей в котле.....	5
1.2 Процессы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева.....	11
1.3 Выводы и постановка задачи исследования.....	16
2 Сравнительный анализ технологии сжигания пылеугольного топлива в топках котлов с твердым шлакоудалением.....	17
2.1 Топка с фронтальным расположением горелок.....	17
2.2 Топка с встречным расположением горелок.....	23
2.3 Топка с тангенциальным расположением горелок.....	31
2.4 Выводы по главе 2.....	37
3 Исследование топочного процесса в котле БКЗ-140-210Ф при сжигании березовского угля.....	38
3.1 Краткая характеристика котла.....	38
3.2 Исследование структуры пристенного газового слоя у топочных экранов.....	38
3.3 Предложения по регулированию процесса горения.....	48
3.3 Выводы по главе 3.....	51
Заключение.....	53
Список использованных источников.....	54

## **ВВЕДЕНИЕ**

Особое место в энергетике Сибири и России в целом занимают угли Канско-Ачинского бассейна. Запасы бурого угля в нем оцениваются в 670 млрд. т, из которых 166,2 млрд. т пригодны для разработки открытым способом. Одним из наиболее крупных месторождений Канско-Ачинского бассейна является Березовское (20 млрд. т), на базе которого сооружена Березовская ГРЭС-1 мощностью 6,4 млн. кВт.

Энергетическая стратегия России на период до 2020 года отводит Канско-Ачинскому бассейну статус федерального значения в обеспечении энергетической безопасности и социально-экономического развития страны и ее регионов. Роль Канско-Ачинского бассейна определяется огромными запасами, удобным географическим расположением, благоприятным горно-геологическим условиями залегания и строения угольных пластов, кондиционными свойствами угля, высокими экологическими показателями, относительно низкой стоимостью.

Сжигание канского-ачинских углей (КАУ) в топках паровых котлов сопровождается интенсивным шлакованием и загрязнением поверхностей нагрева, что обусловлено особенностями его минеральной части. В результате снижается их паропроизводительность, надежность и экономичность.

Необходимость обеспечения надежной работы топочных экранов по условиям шлакования потребовало создания более совершенных топочных устройств. В связи с этим особую актуальность приобрели вопросы изучения влияния организации топочного процесса и конструктивных особенностей топочно-горелочных устройств на шлакование экранов топок.

Цель магистерской диссертации – организация бесшлаковой работы котельных агрегатов БКЗ-210-140Ф с твердым шлакоудалением на основе изучения топочных процессов при сжигании КАУ.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Изучить особенности влияния минеральной части КАУ на процессы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котлов.
2. Провести сравнительный анализ технологии сжигания пылеугольного топлива в топках котлов с твердым шлакоудалением различных конструкций.
3. Провести анализ влияния организации топочного процесса при сжигании КАУ на энергетическую эффективность котла БКЗ-210-140Ф с одноярусной тангенциальной компоновкой горелочных устройств.

В работе рассмотрено поведение пылеугольного топлива и его влияние на топочные процессы при сжигании бурых углей. Проведен сравнительный анализ различных конструкций котлов и показаны преимущества тангенциальной конструкции топочной камеры при сжигании КАУ.

В результате проведенного анализа имеющегося опыта эксплуатации котла БКЗ-210-140Ф с одноярусной тангенциальной компоновкой прямоточных горелок представлены основные принципы организации топочного процесса, обеспечивающие по условиям шлакования надежную и эффективную их работу.

Показано, что определяющее влияние на состав и скорость образования первичных отложений оказывает температура газов вблизи экранов, предельное значение которой вблизи экранов (на расстоянии до 0,05 м от поверхности) их не должна превышать 1050 °С. При более высоком температурном уровне образуются прочные высокожелезистые отложения, а при более низком – сыпучие, слабосвязанные с поверхностью экранных труб.

Предложен способ регулирования топочного процесса в пылеугольных котлах с твердым шлакоудалением, позволяющий уменьшить шлакование поверхностей нагрева за счет поддержания на требуемом уровне температуру в зоне активного горения.

# **1 Проблемы эффективного сжигания бурых канского-ачинских углей**

## **1.1 Особенности поведения минеральной части углей в котле**

Свойства минеральной части КАУ и особенности ее поведения в котельном агрегате являются одним из важных факторов, определяющих выбор топочного устройства и компоновку поверхностей нагрева.

В таблице 1.1 приведены средние характеристики товарного угля самых крупных месторождений Канско-Ачинского бассейна (Бородинского, Березовского и Назаровского) [1]. Угли этих месторождений имеют малую зольность, высокие влажность и выход летучих. По сравнению с другими отечественными углями канского-ачинские угли имеют лучшие экологические показатели. Однако различия в минеральной части этих углей обуславливают существенные различия их шлакующих свойств, плавкостных характеристик шлака. Это является основной причиной того, что в пылеугольных топках котлов, приспособленных для сжигания, например, бородинского угля практически невозможно обеспечить надежное, по условиям шлакования, сжигание березовского угля. Поэтому особенности минеральной части углей необходимо учитывать для оценки пригодности использования конкретной технологии сжигания по условиям шлакования и выхода жидкого шлака.

Минеральная часть углей представляет собой совокупность минеральных элементов в составе органических соединений и совокупность внешних минералов. В энергетике принято деление минеральной части на внутреннюю и внешнюю. Внутренняя минеральная часть при размоле не отделяется и представляет собой минеральные элементы органических соединений и тонкодисперсные минеральные примеси в углистом веществе. Внутренняя минеральная часть характеризует внутреннюю зольность. Внешняя минеральная часть представлена минералами горных пород, попавших в топливо при разработке месторождения. Их доля в общем количестве примесей зависит от геологии пласта и способа его добычи [2].

Отличительной особенностью КАУ является повышенное содержание в минеральной части оксида кальция ( $\text{CaO}$ ), особенно в малозольном березовском угле – до 60 %. Установлено, что химический состав золы КАУ имеет ярко выраженную зависимость от зольности угля. С уменьшением зольности повышается содержание  $\text{CaO}$ , а содержание оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) снижается. Эта закономерность характерна для всех месторождений Канско-Ачинского бассейна (рисунок 1.1) [3, 4] и обусловлена различным происхождением указанных компонентов.

Оксиды кальция, магния и большинство оксидов железа сосредоточены преимущественно в органической массе и образуют внутреннюю минеральную часть. Внешняя минеральная часть на 70...80 % состоит из кислых компонентов (в основном двуокиси кремния). С уменьшением зольности содержание внешней минеральной массы сокращается. Например, для низкозольного березовского угля с зольностью  $A_d = 4...5\%$  внутренняя минеральная масса составляет около 90 % от всей минеральной части [5, 6].

В органической массе КАУ содержатся активные группы, склонные к катионному обмену. Эти группы насыщены катионами кальция и магния, что обуславливает их равномерное распределение по органической части.

Для разных месторождений концентрация этих элементов различна, однако для конкретного месторождения она изменяется в узких пределах и практически не зависит от зольности (рисунок 1.2). В связи с этим при зольности угля  $A^d = 5...15\%$  содержание кальция в угольном веществе составляет 2,5...2,7 % для березовского угля и 2,2...2,6 % для бородинского угля [7].

Таблица 1.1 – Характеристики углей Бородинского, Березовского и Назаровского месторождений

Наименование	Значение		
Уголь	Бородинский	Березовский	Назаровский
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, $Q_i^r$ , 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 $\text{SiO}_2$	52,8	29,1	25,5
оксид алюминия $\text{Al}_2\text{O}_3$	11,8	14,0	12,2
оксид железа $\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,5	8,7	17,6
оксид кальция $\text{CaO}$	22,1	41,1	38,1
оксид магния $\text{MgO}$	3,7	4,1	3,5
оксид калия $\text{K}_2\text{O}$	0,3	0,5	0,1
оксид натрия $\text{Na}_2\text{O}$	0,2	0,8	0,3
оксид титана $\text{Ti}_2\text{O}$	0,8	0,6	0,4
Температурные характеристики золы, $^{\circ}\text{C}$ :			
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

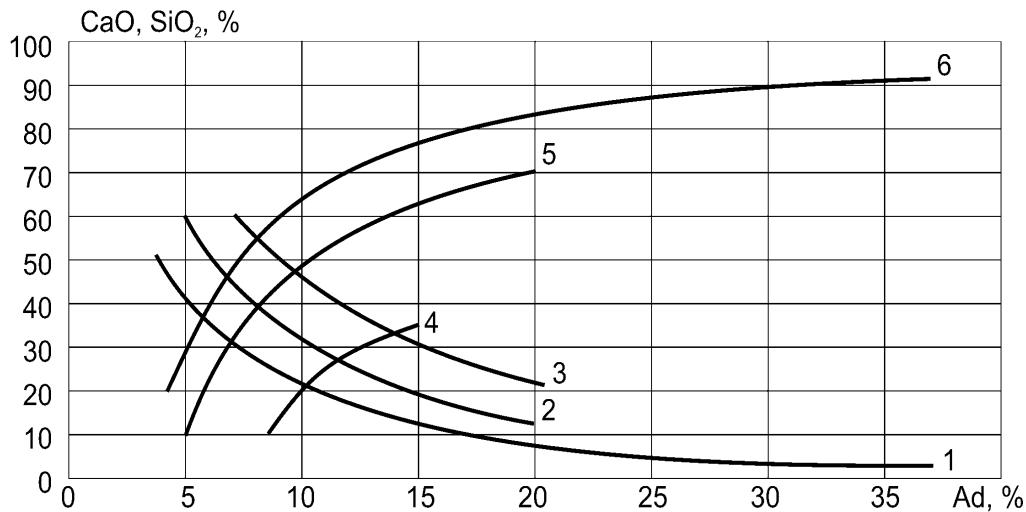


Рисунок 1.1 – Изменение содержания оксида кремния и оксида кальция в золе канского-ачинских углей [3]:

- |                                        |                                        |                                        |
|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 – CaO –<br>бородинский;              | 2 – CaO –<br>березовский;              | 3 – CaO –<br>назаровский;              |
| 4 – SiO <sub>2</sub> –<br>назаровский; | 5 – SiO <sub>2</sub> –<br>березовский; | 6 – SiO <sub>2</sub> –<br>бородинский. |

Канского-ачинские угли относятся к малосернистым ( $S^d = 0,30\ldots0,81\%$ ). При содержании серы 0,2…0,4 % она почти полностью входит в состав органической части топлива. Избыток серы сверх указанного значения обусловлен в основном пиритом ( $FeS_2$ ), 70…90 % которого находится в органической массе топлива, остальная часть присутствует в составе внешних минеральных включений. Сульфатная сера при концентрации 0,05…0,08 % распределена по органической массе, а избыточное количество – во внешней минеральной части [8].

При размоле топлива внешняя минеральная масса отделяется от внутренней, что приводит к раздельному попаданию в топку кислых компонентов (внешние минеральные примеси) и основных, содержащихся в органической массе топлива.

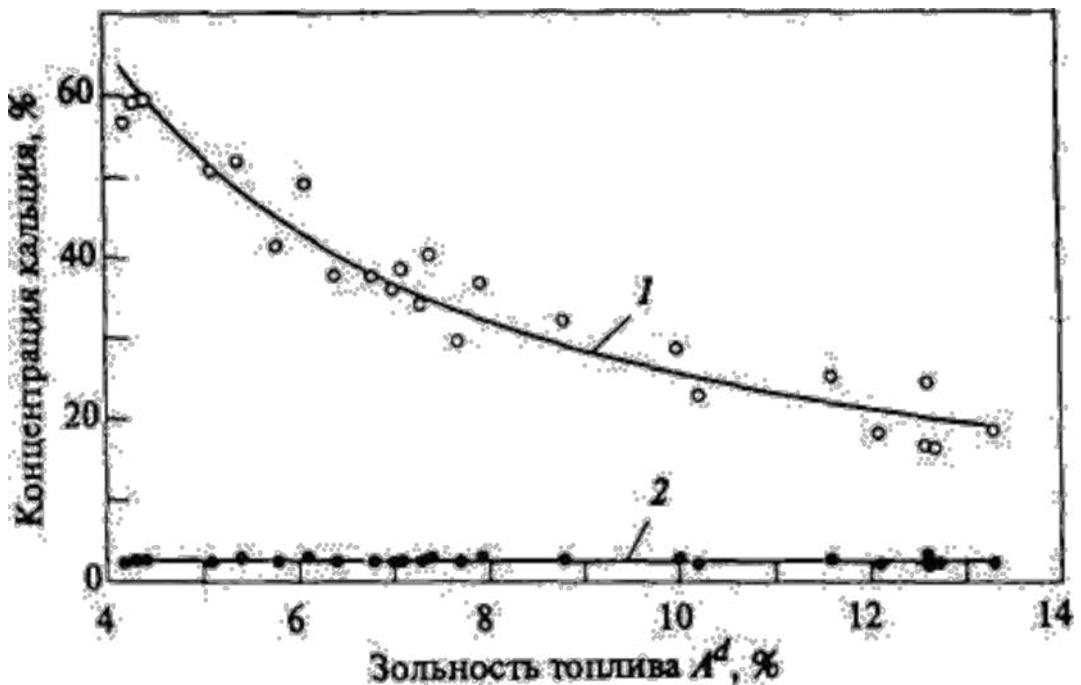


Рисунок 1.2 – Зависимость содержания кальция в топливе (2) и в его золе (1) от зольности березовского угля [7]

Различный состав внутренней и внешней минеральных частей является причиной существенной зависимости поведения ее компонентов в топке от организации топочного процесса. Наиболее отчетливо это проявляется при низко- и высокотемпературном сжигании. При низкотемпературном сжигании практически отсутствует взаимодействие между внутренними и внешними компонентами минеральной части. С одной стороны, непрореагировавшие компоненты остаются весьма тугоплавкими, не вызывают шлакования и оказывают абразивное воздействие на образующиеся загрязнения. С другой стороны, это может приводить к селективному выделению отдельных компонентов на поверхностях нагрева, образованию легкоплавких эвтектик. Например, в опытных сжиганиях березовского угля в топках с твердым шлакоудалением на экранных трубах были обнаружены прочные первичные медленно растущие отложения с содержанием оксидов железа до 80 %. С увеличением их толщины содержание оксидов железа снижалось. Эти шлаковые отложения имели высокую прочность, были сильно просульфатизированы и содержали до 45 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и до 20 %  $\text{CaO}$ . Вторичные отложения имели состав близкий к летучей золе [9]. Прочные отложения на

топочных экранах образовываются и при сжигании бородинского и назаровского углей.

При высокотемпературном сжигании назаровского, бородинского и высокозольного березовского углей ( $7\% < A^d < 12\%$ ) проплавляется значительная масса золы, создаются благоприятные условия для связывания основных и кислых компонентов, удаления в шлак легкоплавких эвтектик, способных вызывать шлакование топочных экранов. При таком способе сжигания в летучей золе почти отсутствуют крупные фракции, способные оказывать абразивное воздействие на отложения. Поэтому образуются рыхлые первичные отложения из мелкодисперсных фракций летучей золы. С течением времени этот слой может уплотняться в результате спекания, сопровождающегося процессами сульфатизации и кристаллизации.

Кроме шлакования поверхностей нагрева важным условием надежности работы топок с жидким шлакоудалением является обеспечение бесперебойного выхода жидкого шлака. Это также обусловлено составом и свойствами минеральной части угля. Например, при увеличении зольности бородинского и назаровского угля свыше 12 % появляются серьезные затруднения с выходом жидкого шлака [10].

При снижении зольности березовского угля поведение его минеральной части и процесс загрязнения поверхностей нагрева резко изменяются. Так, с понижением зольности топлива на сухую массу от 8 до 5 % коэффициент шлакоулавливания снижается от 30 до 10 % [11]. Выход жидкого шлака не прекращается, хотя количество его существенно снижается. Это является одной из закономерностей поведения минеральной части березовского угля и объясняется уменьшением кварцевых частиц внешней золы при постоянном содержании CaO в органической массе топлива. Ввиду недостатка кислых компонентов основные оксиды остаются несвязанными в алюмосиликаты и не удаляются в шлак. Значительная часть CaO остается в свободном виде, что и является причиной образования прочных сульфатносвязанных отложений на поверхностях нагрева. При этом в уносе общее содержание CaO повышается от

34 до 50 %, а его содержание в свободном виде – от 12 до 23 % [3, 12]. Таким образом, при выборе топочных устройств для сжигания КАУ необходимо учитывать особенности и поведение их минеральной части в топочном процессе.

## **1.2 Процессы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева**

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 комоде, 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 ( $A^d = 5\dots7\%$ ) 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, 7, 12, 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 ( $A^d = 6,8\dots9,8\%$ ) 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 сольностью  $A^d = 6\dots11\%$  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 надежность 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, размолом его в молотковых мельницах, с фронтальной компоновкой горелок (котлы ПК-38, ПК-10Ш, БКЗ-75, Б-50).
2. С газовой сушкой и размолом 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 °C), 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 °C. 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.

Были определены зависимости падающего в сторону экранов полусферического лучистого потока  $q_{\text{п}}$  и температуры газов от расстояния от экранов при сжигании сланцев [17]. Установлено, что по мере удаления от экранов происходит возрастание  $q_{\text{п}}$  на  $30\dots60 \text{ кВт}/\text{м}^2$ , температуры газов – на  $100\dots200^\circ\text{C}$ . Наиболее резкий подъем  $q_{\text{п}}$  и температуры газов в топках исследованных котлов при сжигании сланцев имел место на расстоянии до  $0,2\dots0,4 \text{ м}$  от экрана. В пределах глубины топки  $0,5\dots1,5 \text{ м}$  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 шлакование 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.

### **1.3 Выводы и постановка задачи исследования**

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

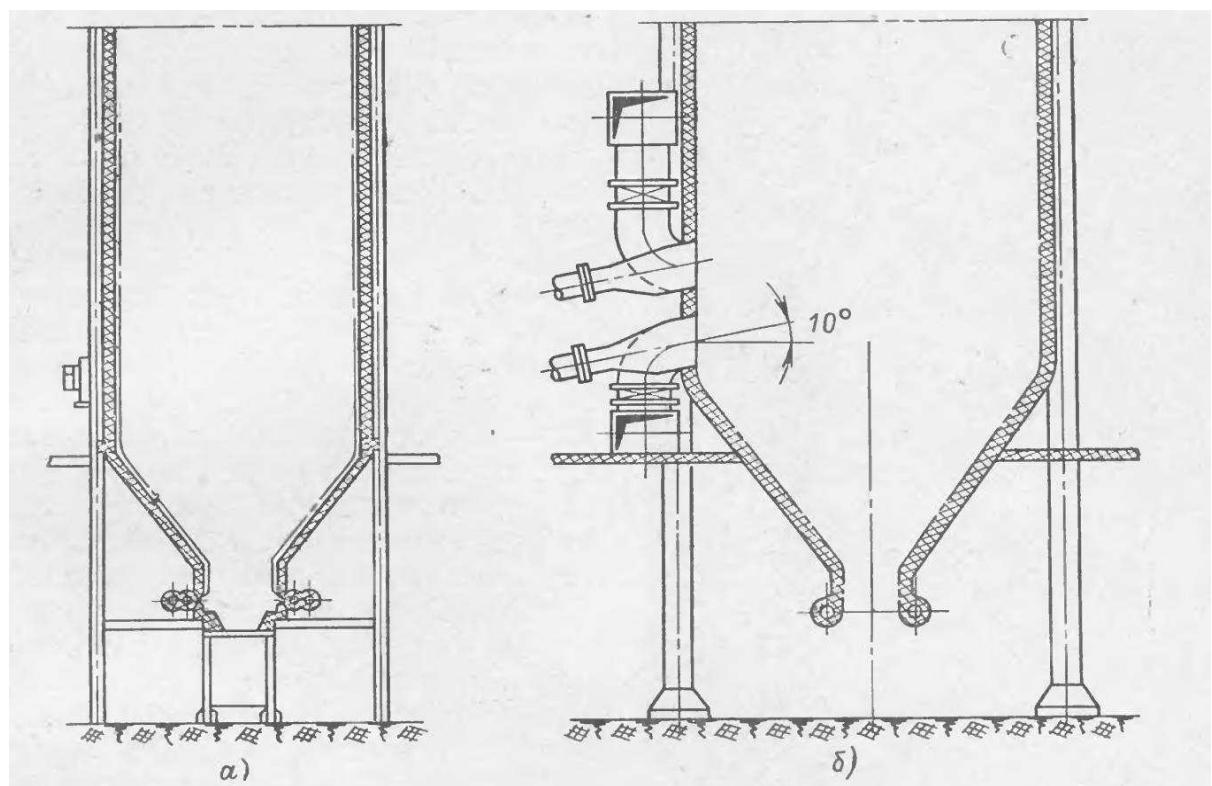
На основе анализа практики работы паровых котлов различных конструкций при сжигании шлакующих углей были поставлены следующие задачи исследования:

1. Изучить особенности влияния минеральной части КАУ на процессы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котлов.
2. Провести сравнительный анализ технологии сжигания пылеугольного топлива в топках котлов с твердым шлакоудалением различных конструкций.
3. Провести анализ влияния организации топочного процесса при сжигании КАУ на энергетическую эффективность котла БКЗ-210-140Ф с одноярусной тангенциальной компоновкой горелочных устройств.

## **2 Сравнительный анализ технологии сжигания пылеугольного топлива в топках котлов с твердым шлакоудалением**

### **2.1 Топка с фронтальным расположением горелок**

При обычно применяемом расположении среднеходных и молотковых мельниц перед фронтом парогенераторов, а также в случае топок с прямым вдуванием и шаровыми барабанными мельницами наиболее конструктивной и удобной в эксплуатации является фронтальная компоновка вихревых или прямоточных горелок (рисунок 2.1, а и б).



**Рисунок 2.1 – Топка с фронтальными горелками:**  
**а – с вихревыми горелками; б – с прямоточными горелками.**

При такой компоновке пылепроводы получаются короткими, одинаковой длины и однотипными. При однотипных пылепроводах облегчается равномерное распределение пылевоздушной смеси по отдельным горелкам. Отсутствие крутых сгибов способствует более равномерному распределению пыли по сечению пылепроводов. Воздуховоды к горелкам получаются короткими и простой конструкции. Горелки, воздухопроводы к ним и их

органы управления более доступны для ремонта и обслуживания. В парогенераторном цехе у всех парогенераторов горелки выносятся на единый, открытый фронт обслуживания, боковые и задняя стены не загромождены пылепроводами и воздухопроводами. Значительно упрощается общая компоновка системы пылеприготовления с молотковыми и среднеходными мельницами и мельницами-вентиляторами.

Однако по совершенству организации топочного процесса фронтовая компоновка горелок значительно уступает встречной, а также и угловой компоновкам. В топках с фронтальными горелками плохо используется топочный объем, зажигание недостаточно устойчиво, горение протекает менее интенсивно. Эти топки более подвержены шлакованию.

Недостатки в работе топок с фронтальными горелками проистекают из неудовлетворительной аэродинамической организации топочного процесса. Аэродинамика топки с фронтальными щелевыми горелками, исследованная на воздушных моделях, представлена на рисунке 2.2.

Фотографический снимок (рисунок 2.2), сделанный со стороны прозрачной боковой стенки модели при искровом моделировании, позволяет составить представление об общей аэродинамике топки. От горелок «факел» движется горизонтально, ударяется в заднюю стенку и делится на два потока. Один из них опускается вниз, образуя вихрь, занимающий всю холодную воронку, и вновь поступает в факел вблизи передней стены. Второй поток вдоль задней стены поднимается вверх. На начальном участке, факел эжектирует газы из окружающей среды, создавая некоторое разрежение. Под действием появляющегося перепада давления избыточное количество газа отделяется от потока и направляется к фронтовой стене, компенсируя расход газа из окружающей среды в факел.

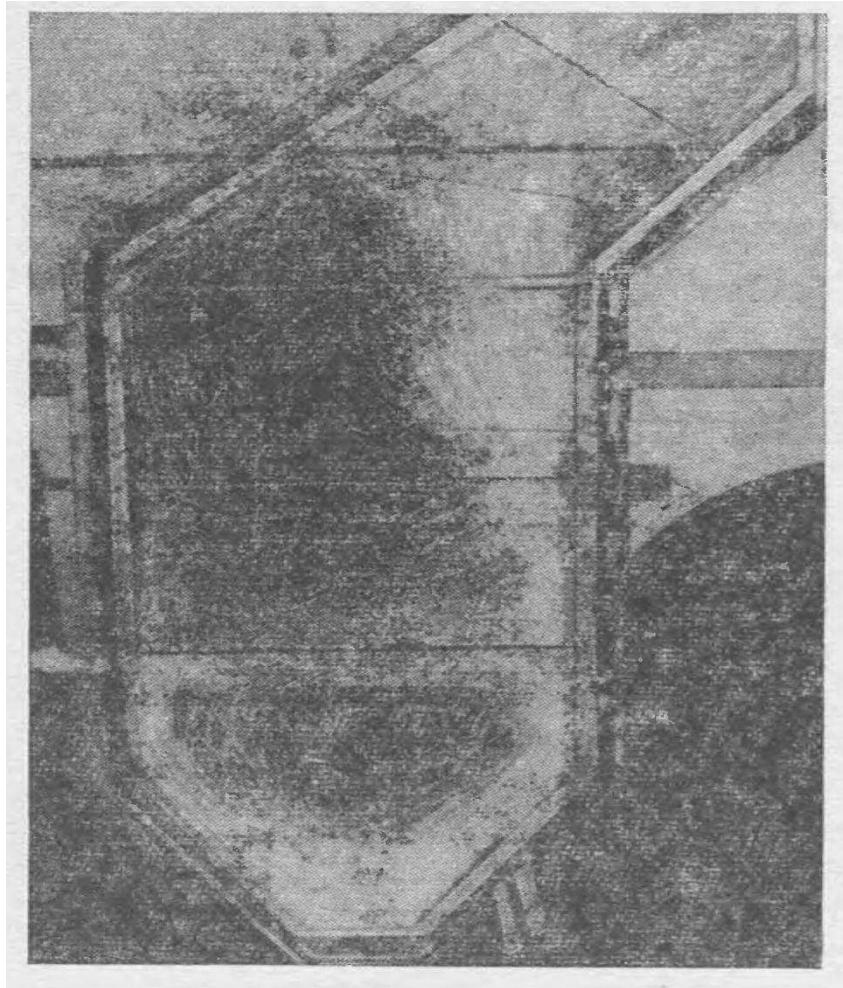


Рисунок 2.2 – Аэродинамика топки с фронтальными прямоточными горелками (фотоснимок через боковую стенку топки при искровом моделировании)

Так образуется второй вихрь в топке над факелом в области, примыкающей к фронтовой стене. Основное количество газа, соответствующее расходу через горелки, из восходящего потока направляется на выход из топки. Таким образом, в аэродинамике топки с фронтальным расположением горелок можно выделить три ярко выраженные зоны: большой верхний вялый вихрь, примыкающий к фронтовой стене, нижний активный вихрь, занимающий холодную воронку, и узкая полоса шириной примерно в одну треть глубины топки, по которой вверх движется основной поток. При установке горелок под некоторым углом вверх аэродинамика топки качественно не изменяется, только вихрь в холодной воронке становится менее мощным.

На основании приведенных результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы относительно влияния аэродинамики топки с фронтальными горелками на процесс горения. Из вихрей горячие газы увлекаются в факел, нагревают горючую смесь и подготавливают ее к воспламенению. По количеству газов, поступающих в корень факела, основным для обеспечения зажигания является нижний вихрь. Однако вследствие охлаждения газов при омывании ими скатов холодной воронки температура газов до поступления в корень факела может значительно понизиться.

Так, например, при сжигании подмосковных бурых углей температура топочных газов у корня факела находится в пределах 850...900 °C, а при сжигании фреэторфа – 750...800°C, тогда как в ядре факела температура соответственно колеблется в пределах 1300...1450 и 1100...1300°C.

Отрицательно влияют также присосы воздуха в холодную воронку и практикуемая в некоторых системах подача части вторичного воздуха через устье холодной воронки. Эти потоки воздуха, поступая в нижний вихрь, понижают температуру поджигающих газов.

Вследствие недостаточно высоких температур в очагах зажигания, в особенности при применяемой в этих случаях замкнутой схеме сушки топлива со сбросом водяных паров в зону воспламенения, в факеле устанавливаются недостаточно благоприятные температурные и концентрационные условия для воспламенения и горения. В таких условиях зажигание можно усилить за счет уменьшения теплоотвода из зоны реагирования, уменьшения скорости первичного воздуха до 20...25 м/с и ее поперечных градиентов, а также ограничения количества первичного воздуха. С этой целью для топки, изображенной на рисунок 2.1,б, прямоточные горелки выполнены с внешней подачей первичного воздуха и с плавно раскрывающимся раструбом, при котором зажигание усиливается аэродинамическим торможением периферийных слоев факела.

При недостаточно устойчивом зажигании приходится снижать скорость на выходе из горелок. Это приводит, с одной стороны, к увеличению их выходного сечения, а с другой – уменьшению скорости турбулентного распространения пламени. В результате увеличивается длина зоны воспламенения. Это вместе с понижением интенсивности горения, которое вызвано увеличением теплоотвода, обусловливает расположение ядра горения у задней стены топки при несколько пониженных температурах в нем.

Ухудшены условия реагирования и в зоне догорания. Развивающиеся в топке мощные вихри занимают значительную часть топочного пространства, стесняют основной поток, уменьшая его сечение, и существенно уменьшают заполнение топочного пространства факелом. При этом рециркуляция продуктов сгорания увеличивается, что уменьшает действующую концентрацию кислорода. В потоке с пониженной концентрацией кислорода и с несколько пониженной турбулентностью из-за отсутствия вторичной турбулизации и успокоения потока по мере падения скорости выгорание кокса в основном участке факела протекает замедленно, что приводит к повышенным механическому и химическому недожогу.

Выгорание основной массы топлива происходит в узкой полосе восходящего потока, примыкающего к задней стене и занимающего примерно треть глубины топки. Сравнительно высокие скорости в этом потоке сокращают время пребывания топлива в топочном пространстве и используемый объем топки. Таким образом, высота, а следовательно, и объем топки с точки зрения организации сжигания определяются условиями горения в этой узкой полосе. С учетом выгорания в нижнем вихре используемый объем топки составляет примерно 55...65% ее общего объема.

Недостаточно интенсивное протекание процесса горения в ядре факела и его растянутость приводят к тому, что температуры в факеле недостаточно высоки, вследствие чего уменьшается теплоотдача в нижней части топки. Уменьшение теплоотвода от факела в нижней части топки, а также увеличение доли топлива, сгорающего в зоне догорания, приводят к повышению

температуры на выходе из топки. Это создает опасные условия шлакования верха топки и первых по ходу газов конвективных поверхностей. Имеется также опасность шлакования задней стены топки под динамическим воздействием факела.

В топках с фронтальной компоновкой горелок ограничены возможности интенсификации процесса выгорания. Все воздействие на аэродинамику факела ограничивается выбором соответствующей конструкции горелок, направления струй и величины выходной скорости. По мере распространения струй в топке указанное воздействие ослабевает. Зона зажигания факела становится практически неуправляемой. Расположение ядра факела у задней стены и направление основного газового потока вдоль нее приводят к неравномерному обогреву стен топки. Наибольшему обогреву подвержена задняя стена, а меньшему – фронтовая.

При использовании молотковых мельниц, мельниц-вентиляторов и среднеходных мельниц целесообразно применять прямоточные горелки, обладающие меньшим сопротивлением. В случае использования ШБМ благодаря высокому располагаемому напору мельничных вентиляторов чаще применяют вихревые горелки.

Топки с фронтальным расположением горелок применяются ограниченно. Из-за недостаточно устойчивого зажигания эти топки не рекомендуются для работы на слабореакционных топливах с малым выходом летучих, полуантрацитах, тощих и каменных углях, для размола которых преимущественно применяют шаровые барабанные мельницы. В случае топок с шаровыми барабанными мельницами применение фронтальной компоновки горелок может быть связано с принятием нового метода организации топочного процесса или с отдельным конкретным случаем. Топки с молотковыми мельницами при фронтальном расположении горелок применяются редко. Они используются при сжигании высоковлажных топлив для обеспечения достаточной их подсушки или при необходимости получения высоких температур в нижней части топки с жидким шлакоудалением. Следует

отметить, что фронтальную компоновку широко применяют на парогенераторах, работающих на газовом топливе и мазуте.

## 2.2 Топка с встречным расположением горелок

Для сжигания бурых и каменных углей в топках с твердым и жидким шлакоудалением на парогенераторах производительностью до 64 кг/с (230 т/ч) как более совершенную широко применяют компоновку вихревых или прямоточных горелок на боковых стенах топки, а в парогенераторах большей мощности – на фронтовой и задней стенах. В парогенераторах производительностью до 64 кг/с в последние годы нашла распространение встречная компоновка вихревых горелок на боковых стенах треугольником, направленным на одной стене вершиной вверх, а на другой - вниз (рисунок 2.3).

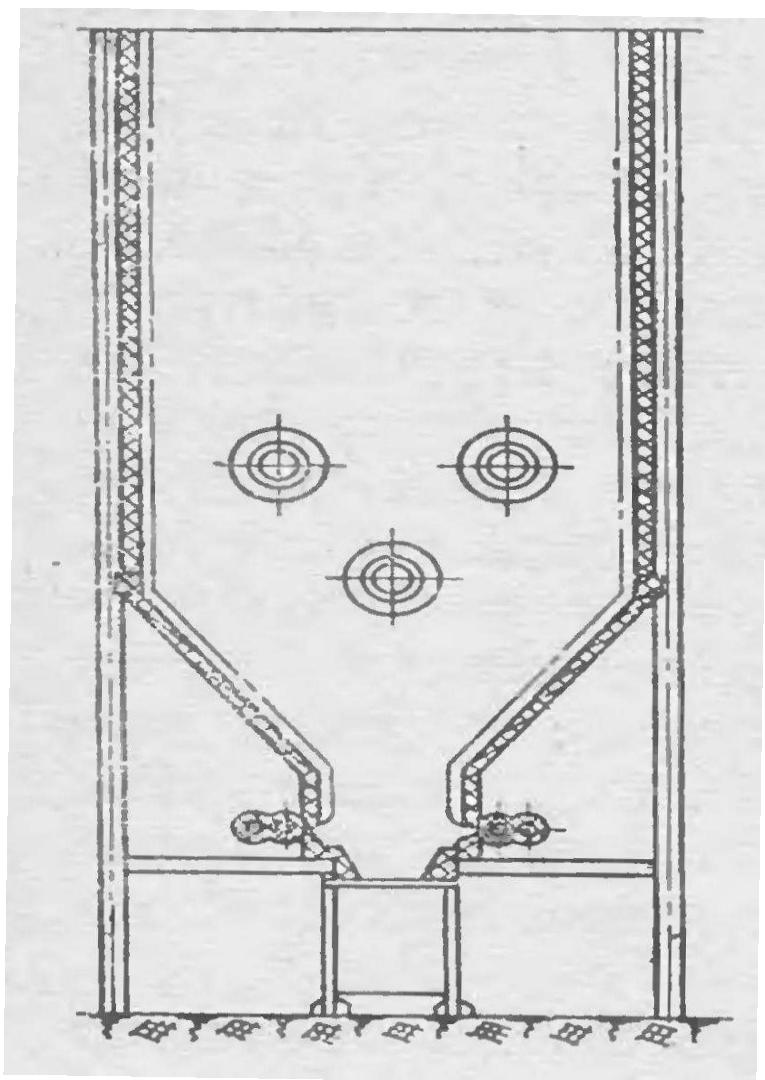


Рисунок 2.3 – Топка с встречным расположением вихревых

горелок треугольником на боковых стенах.

При компоновке по треугольнику получается более просторное расположение горелок по сравнению с расположением их в один ряд, что позволяет создать лучшие условия для зажигания и выгорания в вихревом факеле.

Рисунки 2.4 и 2.5 дают представление об аэродинамике топки с встречным расположением прямоточных горелок на фронтовой и задней стенах. Изображенные на них поля скоростей получены в экспериментальных исследованиях на воздушной модели.

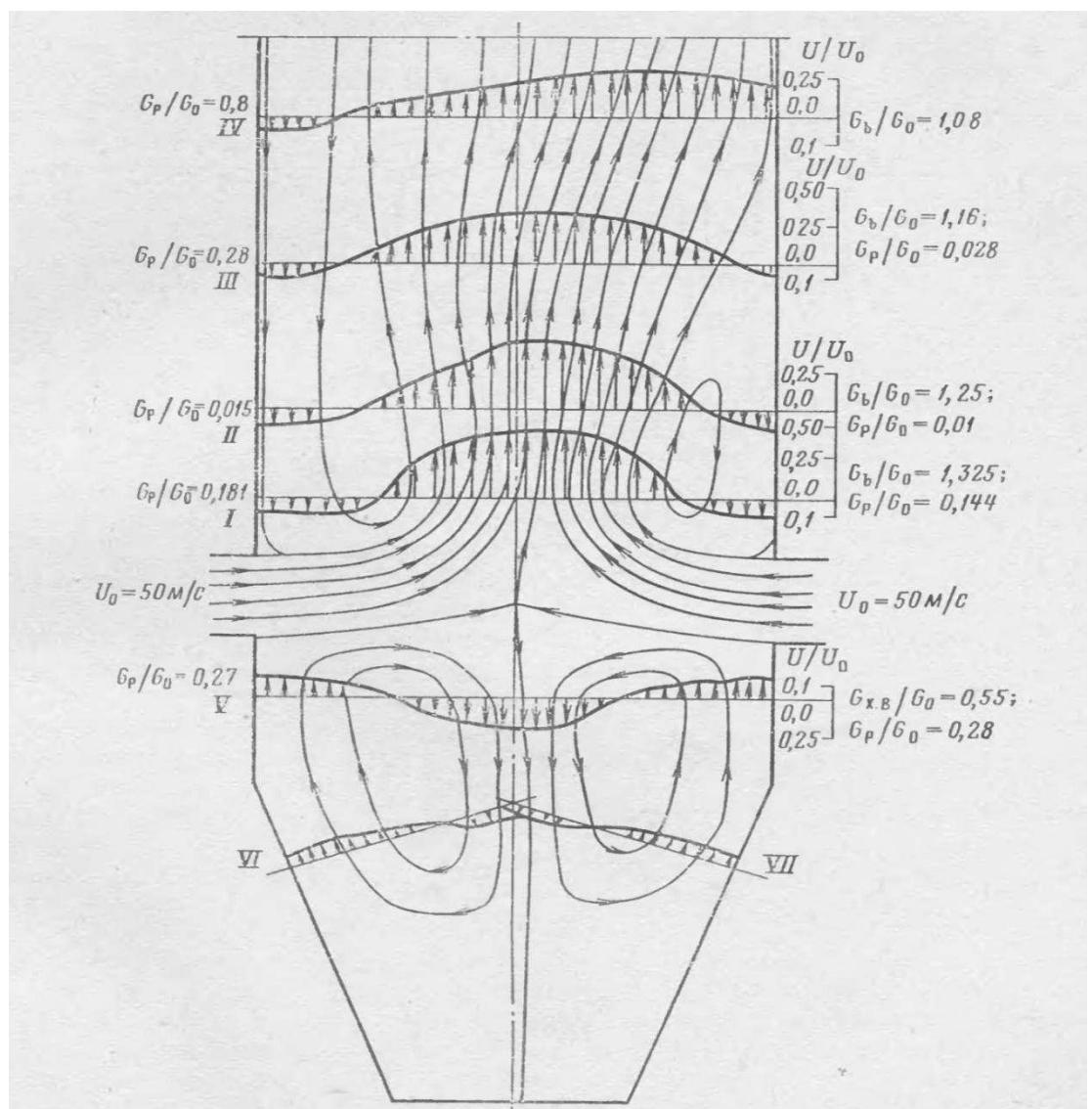


Рисунок 2.4 – Аэродинамика топки с встречными щелевыми горелками при равенстве количеств движения встречных струй

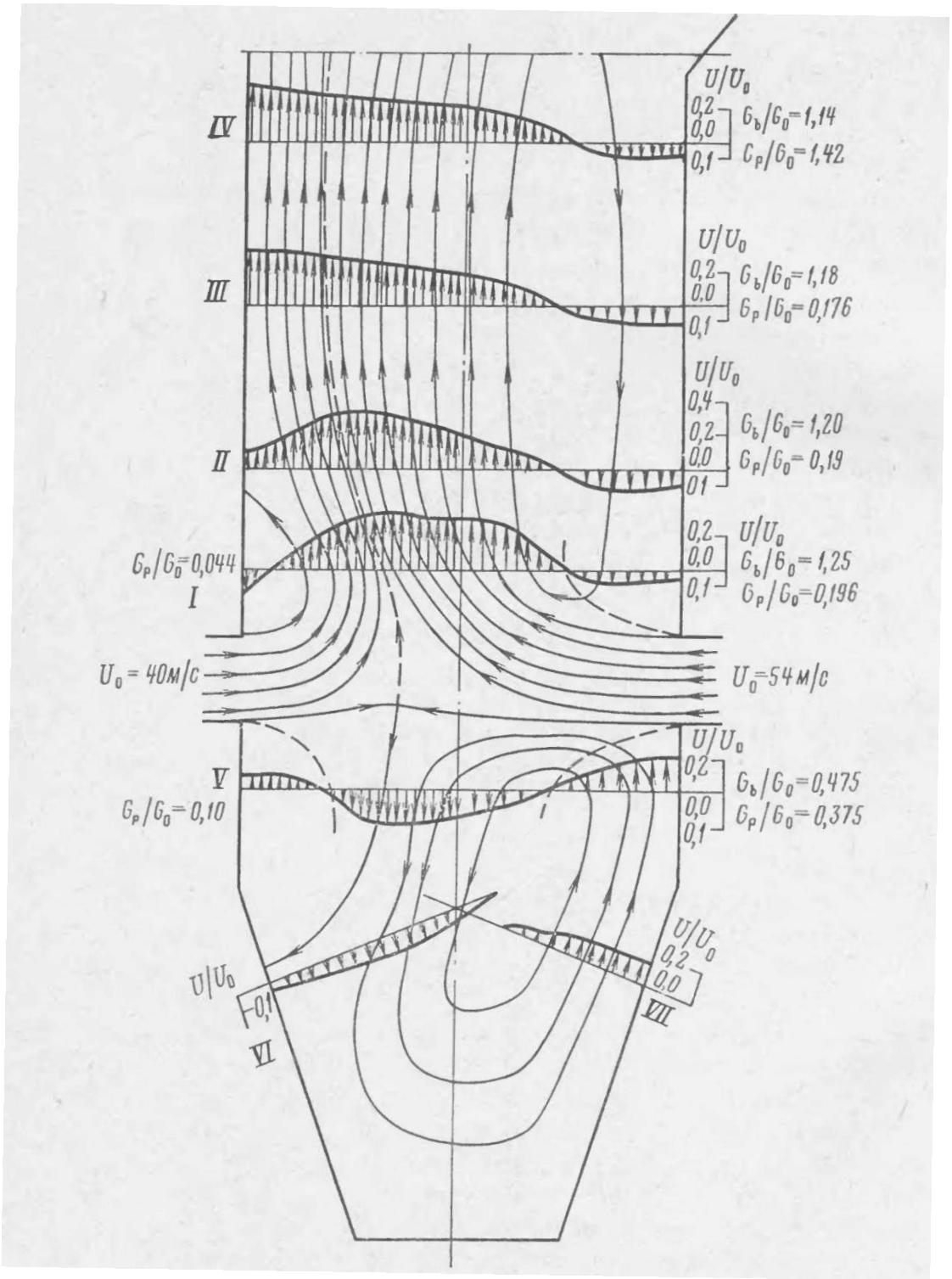


Рисунок 2.5 – Аэродинамика топки при неравенстве количеств движения встречных струй.

По истечении из горелок струи эжектируют газ из окружающей среды, в результате чего расход в них увеличивается. При равенстве начальных количеств движения встречные потоки соударяются в центре топки (см. рисунок 2.5) при практически одинаковых скоростях в них и суммарном

расходе, равном в рассматриваемом случае  $1,88G_0$  ( $G_0$  – начальный расход газа через горелки). В месте соударения в результате торможения динамический напор трансформируется в статическое давление. Под действием образовавшегося перепада давления общий поток растекается вверх и вниз с повышенными скоростями и вследствие этого с малым заполнением сечения топки: восходящий поток занимает 0,57 сечения топки, где 0,37 сечения топки занимает основной поток. В месте разветвления расход в восходящем потоке  $G_v$  составляет  $1,325G_0$ , а в нисходящем  $G_{xv} = 0,55G_0$ . По мере движения восходящий поток расширяется. Однако полного заполнения топки не достигается. На уровне перехода в горизонтальный газоход степень заполнения сечения топки восходящим потоком составляет 0,86, где основной поток приходится 0,68 сечения топки. Максимальная скорость в этом сечении составляет  $0,36W_0$ .

Вследствие неполного заполнения сечения камеры над горелками у фронтовой и задней стен развиваются вихри. Часть восходящего потока с расходом  $G_0$  направляется на выход из топки. Избыточный расход рециркулирует, образуя у стен в области над горелками два больших вихря, каждый из которых занимает до 0,3…0,35 глубины топки и распространяется почти по всей высоте топки. Расход в них соответственно составляет  $0,181G_0$  и  $0,144G_0$ .

Движение восходящего потока по вертикальной оси топки является неустойчивым. Под действием возмущений, связанных с пульсацией давления газов, изменением соотношения импульсов встречных потоков и других возмущений восходящий поток смещается к одной из стен. При расположении горелок на фронтовой и задней стенах наиболее вероятно отклонение восходящего потока к одной из них, а при боковом расположении горелок – к одной из боковых стен.

Нисходящий поток с повышенными скоростями и сравнительно небольшим сечением проникает глубоко в холодную воронку, далее под действием удара и разрежения, создаваемого истекающими струями,

разделяется на две ветви, которые вдоль скатов холодной воронки направляются вверх в корневую область горелочных струй. Так, в холодной воронке образуются два низкоопущенных энергичных вихря с расходом  $0,28G_o$  в каждом. Количество газов, втекающих в горелочные струи из нижних вихрей, обычно превышает эжекционную способность струй на их начальном участке.

Вихри оказывают значительное динамическое воздействие на стены, а также на горелочные струи, несколько искривляя их оси. Часть газа из восходящих ветвей нижних вихрей растекается вдоль стен, на которых расположены горелки, и находит выход в верхнюю часть топки в ее углах на уровне горелок, оказывая одновременно динамическое воздействие на экраны прилежащих стен. В случае неравенства количества движения (см. рисунок 5) поток с большим расходом и большим количеством движения подавляет противоположный поток с меньшим расходом. Место соударения потоков смещается к стене с меньшим количеством движения горелочных струй. После соударения происходит растечка газов вверх и вниз вдоль этой стены. Восходящий поток с расходом  $1,25G_o$  прижимается к указанной стене, а со стороны стены с большим количеством движения горелочных струй устанавливается вялый вихрь большой протяженности с расходом  $0,196G_o$ . Степень заполнения восходящим потоком поперечного сечения топки в среднем по ее высоте составляет 0,71, где на долю основного потока приходится 0,54 сечения топки.

В холодной воронке нисходящий поток образует у стены с большим количеством движения мощный вихрь с расходом  $0,375G_o$  и малый вихрь с расходом  $0,10G_o$  у противоположной стены. Аэродинамическая картина в этом случае напоминает аэродинамику топки с фронтальным расположением горелок.

В топках с встречным расположением горелок зажигание более устойчиво, а горение протекает более интенсивно, чем в топке с фронтальными горелками. Вытекающие из горелок пылевоздушные струи эжектируют более горячие продукты сгорания из вихревых зон, что обеспечивает быстрый нагрев

и воспламенение смеси. Усиление зажигания в особенности необходимо при сжигании слабореакционных топлив типов АШ, ПА и тощих углей. Расстояние между горелками и их взаимное расположение следует выбирать таким образом, чтобы способствовать поступлению к корню факела более горячих газов. В этом отношении более благоприятным является расположение вихревых горелок треугольником с вершиной, обращенной на одной боковой стене вверх, а на другой – вниз.

При соударении встречных факелов и турбулизации потока ускоряется массо- и теплообмен, а усиливающиеся при этом смесеобразование и нагрев интенсифицируют процесс горения. Однако в дальнейшем поток распространяется при недостаточно полном заполнении сечения топочной камеры и вследствие неустойчивости отклоняется к одной из стен. Турбулентность потока все уменьшается, ослабляя массообмен и смесеобразование, что затягивает выгорание угольной пыли. Более сильное затягивание процесса догоорания имеет место при встречной компоновке прямоточных горелок, при которых аэродинамическая неустойчивость наблюдается не только в восходящем потоке, но и в горизонтальном сечении по малой оси горелок.

Вследствие аэродинамической неустойчивости и отклонения основного потока к одной из боковых стен, с возможным его перебросом от одной к другой стене, перед пароперегревателем наблюдается большая разверка температур газов, что отрицательно влияет на его работу. По этой же причине на парогенераторах с встречным расположением горелок с твердым шлакоудалением наблюдалось значительное шлакование стен топки и фестона, которое ограничивало производительность и длительность рабочей кампании. На парогенераторах большой производительности топки с вытянутым в плане сечением при расположении горелок на боковых стенах удовлетворительно работать не могут вследствие значительного усиления аэродинамической неустойчивости. В этом случае удовлетворительные результаты получаются

при расположении горелок на длинных гранях топки, т. е. на ее фронтовой и задней стенах.

На устойчивость зажигания и интенсивность протекания процесса горения сильно влияет технологическая схема сжигания. При схеме сжигания с промбункером в системе пылеприготовления и подачей пыли частью отработанного сушильного агента имеется возможность сбросом неиспользуемой его части через сбросные горелки изменять концентрацию пыли во влажной первичной смеси и скорость ее выхода из горелок. Уменьшение количества отработанного сушильного агента, используемого для подачи угольной пыли в горелке, улучшает концентрационные и температурные условия зажигания и горения. Наиболее благоприятные условия для сжигания имеют место в топках с разомкнутой схемой сушки и подачей пыли горячим воздухом. Однако эта схема широко не распространилась из-за отсутствия эффективного метода полного улавливания пыли из отработанного сушильного агента и очистки его перед сбросом в атмосферу.

При применении разомкнутой схемы при сжигании топлив с легкоплавкой золой затруднительным является обеспечение достаточно низкой температуры на выходе из топки, исключающей опасность шлакования конвективных поверхностей нагрева и образования на них отложений. Поэтому для топлив с легкоплавкой золой целесообразной является схема с прямым вдуванием, для каменных и бурых углей с тугоплавкой золой – схема с промбункером и подачей пыли частью отработанного сушильного агента, а для слабореакционных топлив – преимущественно схема с подачей пыли горячим воздухом. Разомкнутая схема с центральной системой пылеприготовления из-за сложности и громоздкости установки получила небольшое распространение для блоков мощностью 500 и 800 МВт на влажных углях.

Оптимальное количество первичного воздуха следует определять для каждого конкретного случая в зависимости от технологической схемы сжигания, сорта топлива, конструкции топки и горелок.

Для слабореакционных топлив – антрацитов, полуантрацитов и тощих углей – рекомендуется схема с подачей пыли горячим воздухом и сбросом отработанного сушильного агента в топку через сбросные сопла. При этой схеме повышением температуры газов в области корня факела повышается устойчивость зажигания.

Вводом отработанного сушильного агента в область за ядром горения факела расширяется область с повышенными температурами с включением в нее зоны выгорания основной массы топлива. Эта схема, называемая полуразомкнутой, применяется также для влажных топлив при сушке их продуктами сгорания, отобранными из верхней части топочной камеры. В области до смешения отработанного сушильного агента с продуктами сгорания в процесс горения вступает подсушенная угольная пыль, горение которой вследствие повышения адиабатической температуры протекает при более высоком температурном уровне. Зона горения освобождается от инертных газов, используемых в качестве сушильного агента, и водяных паров, выделяющихся при подсушке топлива. При этом повышается действующая концентрация кислорода и уменьшается объем и, следовательно, суммарная теплоемкость газов, что ускоряет рост температур за счет тепла химического реагирования. Все это способствует интенсификации процесса горения.

В топках с встречным расположением горелок, благодаря лучшему перемешиванию в факеле потоков из различных горелок, горение может протекать практически при отсутствии химического недожога и с минимальными потерями от механического недожога при меньшем избытке воздуха по сравнению с топками с фронтальной компоновкой горелок.

При сжигании бурых углей с большим выходом летучих, воспламенение которых наступает легче, количество первичного воздуха можно увеличить до 40...50% для улучшения смесеобразования и обеспечения интенсивного горения кокса, находящегося после воспламенения в раскаленном активном состоянии. Увеличение количества первичного воздуха необходимо также для подсушки влажных углей в системе пылеприготовления, в которой часто в

качестве сушильного агента используется горячий воздух. Бурые угли, имеющие большой выход летучих, сжигают при грубом размоле ( $R_{90} = 50\ldots60\%$ ), химический недожог при этом практически отсутствует, а механический – не превышает  $0,5\ldots1,0\%$ .

При сжигании каменных углей рекомендуется уменьшать количество первичного воздуха до  $25\ldots35\%$ , а при сжигании АШ, производимом обычно при тонком размоле ( $R_{90}=8\%$ ) и избытке воздуха  $\alpha_t = 1,25$ , – до  $20\ldots25\%$ . При таких условиях горение протекает с механическим недожогом  $3\ldots5\%$ .

### 2.3 Топка с тангенциальным расположением горелок

На парогенераторах производительностью от 33 до 66 кг/с (120…240 т/ч) для сжигания бурых и каменных углей нашли применение однокамерные топки с угловой компоновкой горелок, которые располагаются на боковых стенах вблизи углов топки. При угловой компоновке горелки размещают в один, два или большее число ярусов по одной из следующих схем: с направлением осей тангенциально к воображаемому кругу в центре топки (рисунок 6,а), с диагональным (рисунок 6,б) и с блочным (рисунок 6,в) направлением осей.

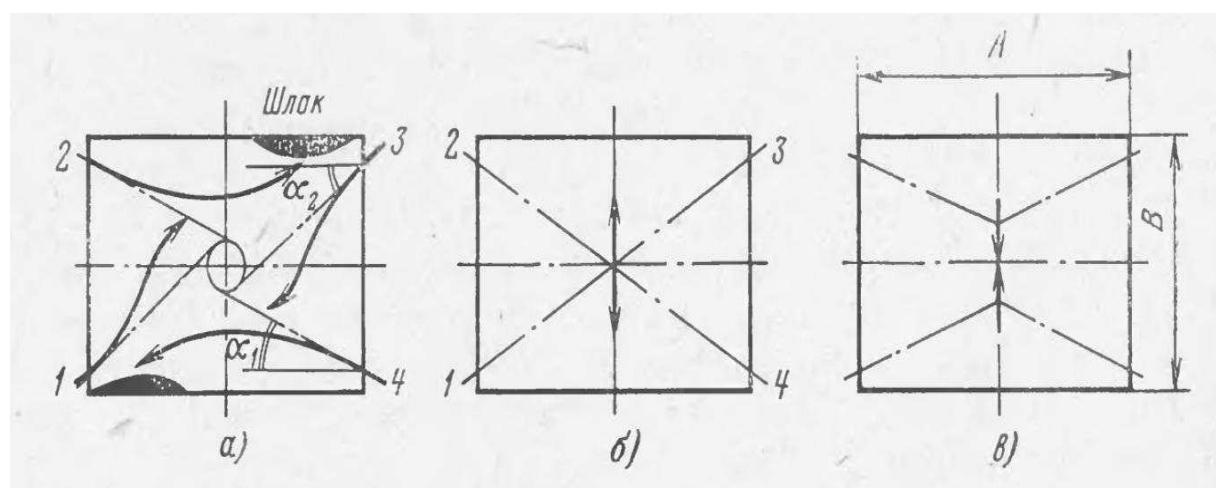


Рисунок 2.6 – Схема компоновки угловых горелок:  
а – тангенциальная; б – диагональная; в - блочная.

Угловая тангенциальная компоновка испытана и на более мощных парогенераторах с разделением топки двусветными экранами на несколько параллельных отсеков, а также в топке, выполненной в виде двухвихревой камеры.

Ниже дано описание аэродинамики топки с угловыми горелками при указанных трех способах компоновки горелок на основании результатов экспериментальных исследований на изотермических моделях и приведены основные характеристики их работы.

Тангенциальная компоновка. Ось горелок образует с прилегающими стенами неравные углы с тем большей разницей, чем сильнее вытянута топка в плане(рисунок 7).

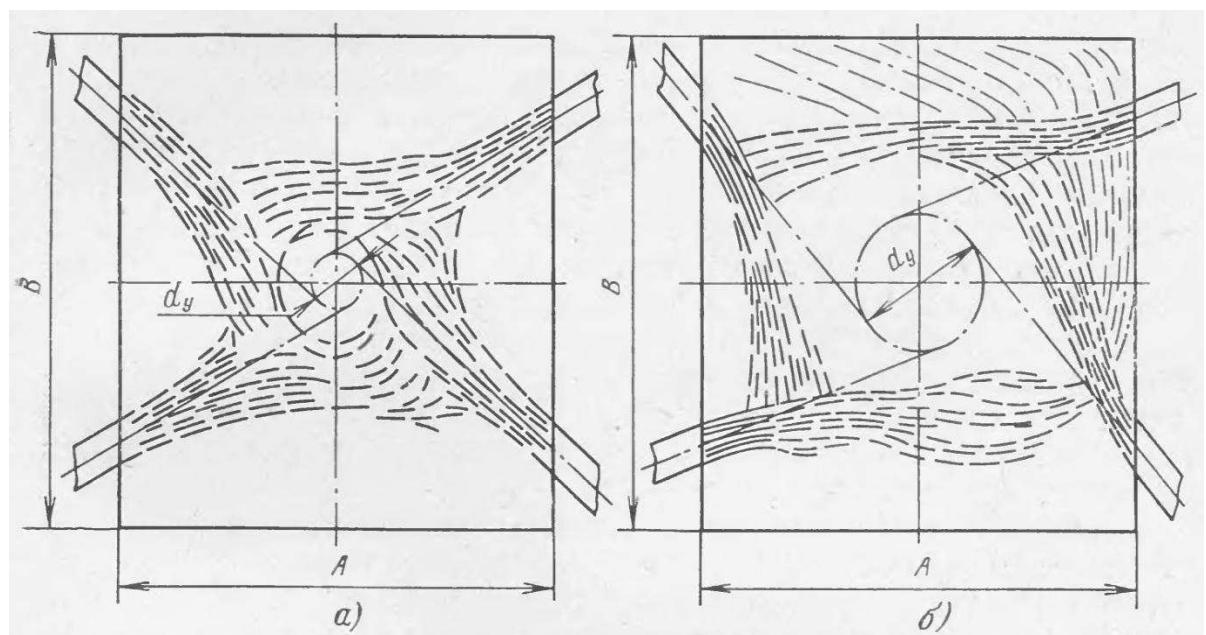


Рисунок 2.7 – Аэродинамика тангенциальной топки в поперечном сечении по оси горелок:  
а –  $A/B=1,06$ ;  $d_y/B=0,12$ ; б –  $A/B=1,06$ ;  $d_y/B=0,29$ .

В топках с сечением (отношением сторон) близким к квадратному  $A/B=1\dots1,2$  при расположении осей горелок, показанных на рисунок 7,а, струи, втекающие в камеру, образуют условную окружность диаметром  $d_y$ .Струи отклоняются от направления осей горелок в сторону прилегающих стен, с

которыми оси составляют меньший угол. Отношение  $d_y/B$  (к которой по касательной направлены оси горелок) составляет величину  $d_y/B \geq 0,12$ .

Сливаясь в общий поток, струи образуют вихрь с вертикальной осью вращения, который по мере подъема раскручивается и далее движется вдоль стен. В области горелок поток движется почти горизонтально, а по мере движения вверх угол подъема увеличивается и достигает примерно  $30^\circ$ . В углах топки вследствие прямого удара в стену поток растекается и угол подъема его увеличивается. Часть потока под небольшим углом направляется вниз, развиваясь также в виде вихря.

Выше горелок центральная часть топки занята опускным вялым потоком, скорость которого равняется примерно 0,2 скорости истечения из горелок, а ниже горелок – восходящим осевым потоком. Опускной и восходящий осевой потоки под действием основного потока по периферии слегка закручены.

При отношении суммарной высоты горелок, установленных в одном углу, к ширине горелки  $\sum h/2B_0 \leq 4$  и  $d_y/B = 0,08 \dots 0,12$  не наблюдается активного динамического воздействия факелов на стены топки, что является благоприятным для бесшлаковочной работы топок с твердым шлакоудалением.

С увеличением  $d_y$  и  $\sum h/2B_0$  (рисунок 7,б) отклонение от осей горелок увеличивается. При этом увеличивается протяженность нисходящего осевого потока, а восходящий осевой поток в нижней части уменьшается и, наконец, по всей высоте центральной части камеры, устанавливается нисходящее течение. Изменяется и аэродинамика потоков на уровне горелок.

Факелы, вытекающие из горелок, имеющих меньший угол  $\alpha_1$  между осью и нормалью к боковой стене, на которой установлена горелка (см. рисунок 6), отклоняются и набегают на фронтовую и заднюю стены под углом атаки, доходящим до  $60^\circ$ , создавая опасные условия по шлакованию. Факелы, вытекающие из горелок, установленных под большим углом  $\alpha_2$ , с отрицательным углом атаки прилипают к стенам, на которых установлены горелки.

С точки зрения описанной аэродинамики становится понятным наблюдающийся характер шлакования при тангенциальной схеме установки горелок (рисунок 6,а). При топочном вихре газов по часовой стрелке шлак налипает на левом крае фронтовой стены и на правом крае задней стены. При вращении топочного вихря против движения часовой стрелки налипание шлака имеет место на правом крае фронтовой и левом крае задней стен топки.

Чем сильнее вытянута топка в плане, т. е. чем больше она отклоняется от квадратной формы, тем больше разница между углами, образованными осью горелки и прилегающими стенами. Вследствие этого отклонение струй под действием удара и перепада давления увеличивается, увеличивая опасность шлакования.

При *диагональной компоновке* оси всех горелок пересекаются в центре топки, факелы образуют две эффективно действующие друг на друга две группы струй.. Взаимодействие этих групп струй определяет характеристику аэродинамики топки. В квадратной топке при одинаковом количестве движения вытекающие из сопл струи распространяются вдоль своих осей и соударяются в центре топки. В топке, имеющей в плане прямоугольное сечение, струи каждой группы до столкновения в центре топки сливаются в единый поток. Под действием повышенного давления в центре топки, образующегося в результате удара струй, от места столкновения вверх и вниз устремляются потоки с большой скоростью. Область у стенок непосредственно над факелами занята значительными вихревыми зонами.

Основная масса газов движется вверх. Вначале сечение этого потока несколько уменьшается. Затем в процессе турбулентного расширения по свободным границам, сопровождающегося тормозящим эффектом, оказываемым вихревыми зонами, скорость в восходящем потоке падает. Поток расширяется и на выходе из топки занимает почти все ее сечение. Нижний поток разделяется на две ветви, которые в холодной воронке образуют вихри и вновь поступают в факел у боковых стен.

Однако такой режим неустойчив. При увеличении расхода в одной из групп струй аэродинамика изменяется. Место соударения смещается к стене, горелочные струи которой имеют меньшее количество движения. К той же стене перебрасывается подъемный поток. С другой стороны устанавливается опускной поток, который стекает к факелу, образуя огромный, но вялый вихрь. Нижний поток также отклоняется к стене, расход смеси через горелки которой меньше, и, омыв холодную воронку, втекает в корень противоположных факелов, образуя в холодной воронке энергичный вихрь.

В топке с *угловой блочной компоновкой* горелок при равных количествах движения струи из горелок противоположных боковых стен образуют два потока, которые затем устремляются друг к другу. После соударения газы направляются в центральный неустойчивый восходящий поток. При превышении количества движения с какой-либо стороны или при каком-либо случайному возмущению поток смещается к противоположной стене, у которой стабилизируется восходящий поток. При прямоугольной топке наиболее вероятно прижатие потока к одной из широких стен.

Благодаря описанному характеру аэродинамики в топках с угловыми горелками зажигание устойчивое. Основными недостатками их являются недостаточно интенсивное протекание процесса горения и сравнительно сильное шлакование, в особенности имеющее место при твердом шлакоудалении из топки. На уровне горелок наблюдается местное шлакование. Выше горелок имеет место сравнительно равномерное общее шлакование всех стен вследствие омывания их газами.

Топки с угловым тангенциальным расположением горелок работают более эффективно при выполнении их с поперечным сечением, близким к квадратному, с отношением сторон не более 1...1,2. В этом случае уменьшается динамическое воздействие факелов на стены, что снижает опасность шлакования, уменьшается также центральный вихрь продуктов сгорания. В топках с диагональной и блочной компоновкой горелок наблюдается шлакование фронтовой и задней стен, в особенности в гибах скатов холодной

воронки. Неустойчивая аэродинамика этих топок усиливает опасность шлакования.

С целью использования газового регулирования температуры перегрева пара, изменением положения факела по высоте топки в ряде случаев применяются угловые прямоточные горелки, сопла первичного и вторичного воздуха которых поворачиваются вокруг горизонтальной оси. Это одновременно расширяет возможности по наладке и предотвращению шлакования в топке.

Топки с угловыми горелками имеют повышенную эжекцию газов из окружающей среды в основной поток и повышенную интенсивность теплоотдачи из него. В результате этого в реагирующем потоке уменьшается аккумуляция тепла, выделяющегося при горении топлива, и температуры в факеле стабилизируются на недостаточно высоком уровне, что обуславливает недостаточно интенсивное протекание процесса горения. Эти неблагоприятные условия в топке с тангенциальной компоновкой связаны с разобщенным распространением факелов горелок, расположенных в разных углах топки, и движением газового потока, образующегося после слияния струй, вдоль экранированных стен, а в топках с диагональной или блочной компоновкой – с движением основного потока на значительной высоте с неполным заполнением сечения топочной камеры.

При недостаточно интенсивном горении и сравнительно невысоких температурах уменьшается доля топлива, сгорающего в ядре факела, и увеличивается его доля, выгорающая в зоне дожигания факела. Это приводит к уменьшению радиационной теплопередачи в топочной камере и к повышению температуры газов на выходе из топки, что часто вызывает шлакование фестона и первых по ходу газов конвективных поверхностей нагрева.

При жидкому шлакоудалении горение в этих топках интенсифицируется, а опасность шлакования уменьшается.

Во избежание чрезмерной интенсивности вращения вихря скорости пылевоздушной смеси и вторичного воздуха на выходе из угловых горелок в

тангенциальной топке рекомендуются не выше 30...40 м/с. Такие же скорости рекомендуются при диагональной и блочной компоновке горелок.

В топке с тангенциальным расположением горелок обогрев стен равномерен. В топках с угловым расположением горелок схема пылепроводов и воздухопроводов сложнее, пылепроводы получаются более длинными и имеют больше гибов. Повороты нарушают равномерное распределение пыли, повышают износ пылепроводов и потерю напора в них. Размещение горелок в углах задней стены часто затруднено из-за близости конвективной шахты.

## 2.4 Выводы по главе

1. Рассмотрены конструкции и проведен сравнительный анализ технологии сжигания пылеугольного топлива в котлах с твердым шлакоудалением, топочные камеры которых имеют фронтальное, встречное и тангенциальное расположение горелок.

2. В результате анализа влияния конструктивных и режимных параметров топок с твердым шлакоудалением на характеристики топочного процесса установлено, что для энергетических паровых котельных агрегатов большой единичной мощности наиболее рационально при сжигании КАУ, обладающих высокой шлакующей способностью, использовать многоярусную конструкцию топочной камеры с тангенциальной компоновкой прямоточных горелок.

### **3 Исследование топочного процесса в котле БКЗ-140-210Ф при сжигании березовского угля**

#### **3.1 Краткая характеристика котла**

Котлоагрегат БКЗ-210-140Ф Владивостокской ТЭЦ-2 спроектирован для сжигания чихезского бурого угля с твердым шлакоудалением (рисунок 3.1). Паропроизводительность – 210 т/ч. Давление и температура перегретого пара соответственно 13,7 МПа и 540 °С. Призматическая топочная камера с размерами в плане  $7,808 \times 7,424$  и высотой 22,636 м экранирована трубами диаметром 60 мм с шагом 64 мм. Теплонапряжение топочного объема  $q_v = 147$  кВт/м<sup>3</sup>, сечения  $q_F = 2,78$  МВт/м<sup>2</sup> и лучистой поверхности в зоне активного горения  $q_{lg} = 1,52$  МВт/м<sup>2</sup>. Угловые пылеугольные прямоточные горелки с вертикально чередующимися соплами вторичного воздуха и аэросмеси расположены в один ярус и направлены тангенциально к воображаемой окружности диаметром  $0,114a_t$  в центре топки. Пылесистема прямого вдувания с газовой сушкой и размолом топлива в четырех мельницах-вентиляторах МВ1600/600/970. Сушильным агентом является смесь дымовых газов, отбираемых на выходе из топки и за дымососом. Котел оборудован 12 паровыми обдувочными аппаратами ОПР-5 и шестью аппаратами ОГ-7 для очистки пароперегревателя.

#### **3.2 Исследование структуры пристенного газового слоя у топочных экранов**

Березовский уголь, сжигавшийся в топке котла БКЗ-210-140Ф, имел следующие характеристики:  $W^r = 33,2\text{--}34,9\%$ ,  $A^d = 6,5\text{--}9,8\%$ ,  $Q_i^r = 15200\text{--}15650$  кДж/кг,  $S^d = 0,38\text{--}0,45\%$ .

Исследование пристенной области топочной камеры проводилось в двух режимах, отличавшихся в основном сочетанием работающих мельниц [9, 12]. Характеристика режимов приведена в таблице 3.1.

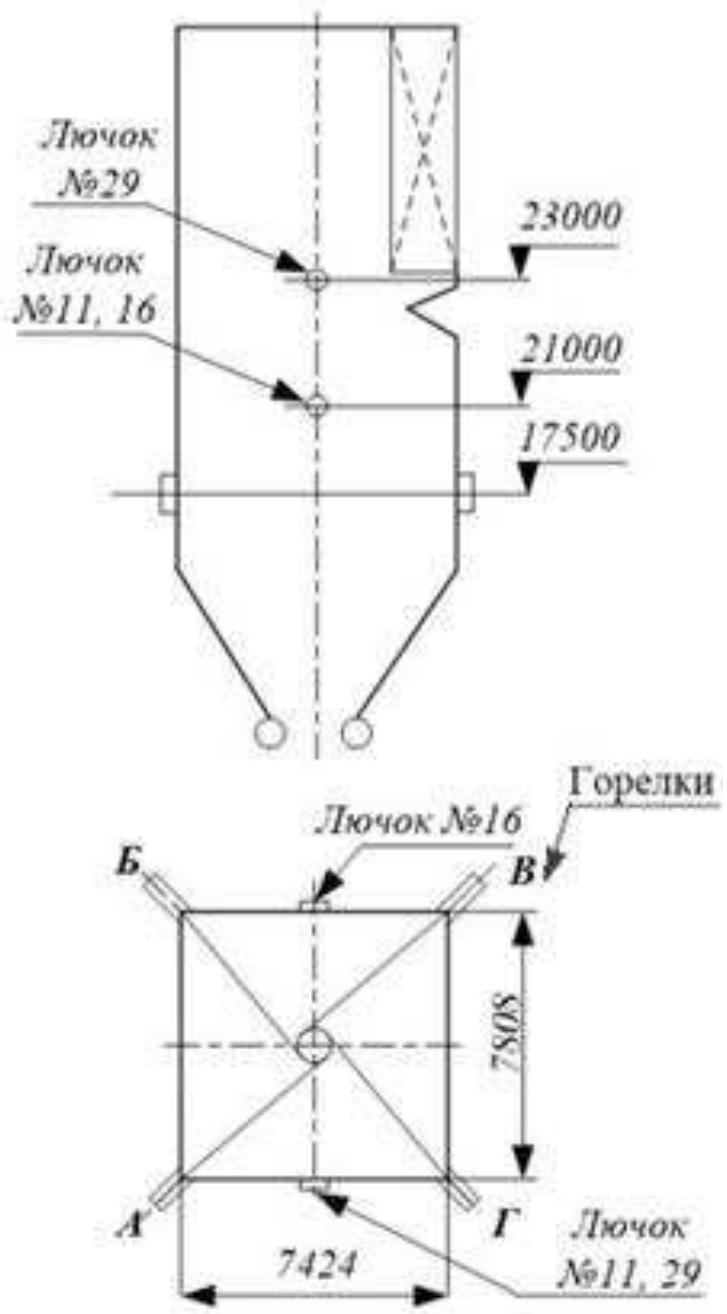


Рисунок 3.1 – Схема топки котла БКЗ-210-140Ф

Таблица 3.1 – Характеристика режимных параметров котла

Наименование	Обозна- чение	Размер- ность	Режим 1	Режим 2
Работающие мельницы	-	-	Б,В,Г	А,Б,В
Относительная паропроизводительность котла	$\bar{D}/D_{\text{ном}}$	-	0,87–0,94	0,99–1,01
Расход топлива расчетный	$B_p$	т/ч	32,6–34,1	37,8–38,2
Коэффициент избытка воздуха в топке	$\alpha_t$	-	1,26–1,32	1,17–1,21
То же в горелках	$\alpha_{\text{гор}}$	-	0,98–1,03	0,80–0,83
Подача вторичного воздуха в неработающий блок горелок	-	-	То же, что и в работающие горелки	
Скорость аэросмеси на выходе из горелок	$W_1$	м/с	20,9–26,7	16,9–22,3
То же вторичного воздуха	$W_2$	м/с	39,0–45,2	39,0–45,2
Тонкость пыли	$R_{1000}$	%	1,0–1,1	0,9
Тонкость пыли	$R_{200}$	%	19,0–22,0	18,5–20,5
Тонкость пыли	$R_{90}$	%	39,6–42,7	30,9–39,0
Температура аэросмеси	$t_{\text{аэр}}$	°C	160–230	130–167
Температура горячего воздуха	$t_{\text{гв}}$	°C	290–300	310–330
Доля газов, отбираемых из топки на сушку	$r_{\text{отб}}$	-	0,18–0,21	0,16
Доля рециркулирующих уходящих газов	$r_{\text{рц}}$	-	0,13–0,14	0,13–0,14

Температура в зоне активного горения поддерживалась на уровне 1250–1270 °C за счет подачи в пылесистему рециркулирующих уходящих газов в количестве 13...14 %, вместо воздуха. Около 2 % газов рециркуляции подавалось в холодную воронку. Часть горячего воздуха (0,18...0,29) от теоретически необходимого подавалась через амбразуры мазутных горелок.

На рисунках 3.2 и 3.13 показан характер изменения в пристенном слое температуры газов, падающих тепловых потоков, состава газов, концентрации фракционного состава золы, содержания в ней горючих, аксиальной и тангенциальной скорости газов в обоих режимах работы котла. При одинаковой тепловой нагрузке и режиме работы горелок определяющее влияние на

структуре пристенного слоя в исследованной тангенциальной топке оказывает сочетание работающих горелок. Результаты измерений и визуальные наблюдения указывают на несимметричное заполнение факелом топочного пространства при работе трех мельниц (горелок). Факел смещается к неработающему блоку горелок даже при подаче в него полного расхода вторичного воздуха, формируя пограничный слой с разными параметрами для каждой экранной стены. Так, в зоне двух взаимнопротивоположных лючков № 11 и 16, расположенных на боковых стенках над зоной активного горения (см. рисунок 3.1), уровень температуры газов различается на 120...150 °C (режим № 1, сочетание работающих горелок, А, Б, В, см. рисунок 3.2); во втором режиме – на 50-100 °C (в работе горелки Б, В, Г, см. рисунок 3.3). Максимальные температуры при этом наблюдаются со стороны неработающей горелки.

По мере удаления от экранов температура газов возрастала на 50...100 °C, стабилизируясь на расстоянии 0,3...0,5 мм от лобовой образующей экранных труб. В непосредственной близости от экрана (0,05 м) наблюдался довольно высокий пиromетрический уровень: 1050...1180 °C для режима № 1, 1020...1120 °C для режима № 2 (лючки № 11 и 16), в сечении по обрезу ширм (лючок № 29) 940 °C для режима № 1 и 1030 °C для режима № 2.

По аналогии с температурой газов наиболее интенсивный рост плотности падающего теплового потока в пристенном слое наблюдался на расстоянии от 0 до 0,3...0,5 м от экрана. В конце зоны активного горения наибольшее значение  $q_{\text{п}}$  в плоскости экранов отмечалось со стороны неработающих горелок, что особенно заметно в режиме № 1. По мере удаления от экранов  $q_{\text{п}}$  возрастала на 6...11 %. В конце топки в результате теплообмена газов с менее загрязненными экранами разность плотностей падающего теплового потока в пристенном слое увеличивалась до 20 %. Максимальная разница температуры газов составляла  $(9''_{\text{пс}} - 9'_{\text{пс}})/9''_{\text{пс}} = 5...10 \%$ , где  $9'_{\text{пс}}$  и  $9''_{\text{пс}}$  температура газов на расстоянии 0,05 и 0,3 м от лобовой образующей экранных труб.

Тангенциальная скорость газов вблизи экранов в конце зоны активного горения со стороны работающих горелок составляла 6–10 м/с, а со стороны неработающих – 9…10 м/с. У топочных экранов, к которым смешался факел, вектор скорости был направлен горизонтально. В конце топочной камеры в пристенном слое тангенциальная скорость газов составляла 8…9 м/с, аксиальная 4…5 м/с. Направление вектора скорости подтверждалось характером отложений на неохлаждаемых зондах и трубах ширмового пароперегревателя.

Из рисунков 3.2 и 3.3 можно видеть, что в пристенном слое наблюдается рост концентрации золы по мере приближения к экранам. Такой характер зависимости сохранялся до конца топочной камеры, что обусловлено тангенциальным движением факела.

У экранов в пристенном слое концентрируются и более крупные фракции пыли, имеющие повышенное содержание горючих. Различие концентрации летучей золы в конце топки в режимах № 1 и № 2 объясняется в основном разным сочетанием работающих мельниц и связанных с ними горелок, а также некоторой разницей топочных режимов. Этим же объясняется и различие в лючке № 29 температуры,  $q_{\text{п}}$  и скорости газов.

Значение механического недожога в пристенном слое в конце зоны активного горения составило в обоих режимах 3,2…5,1 %, а в конце топочной камеры перед нижним срезом ширм – 1,4…2,3 %.

Химический состав летучей золы в пристенной области топочной камеры близок к составу уноса за котлом. Наблюдалась тенденция к обогащению пристенного слоя частицами  $\text{SiO}_2$  и обеднению оксидом кальция.

Минералогические исследования состава проб летучей золы показали, что углистое вещество представлено обломками серовато-бурого цвета неправильной формы, образующимися в результате поверхностного озоления. Внутри углистые образования черно-стального цвета. Аморфизованное глинистое вещество встречается в виде агрегативных скоплений оплавленных глинистых частиц бурого цвета.



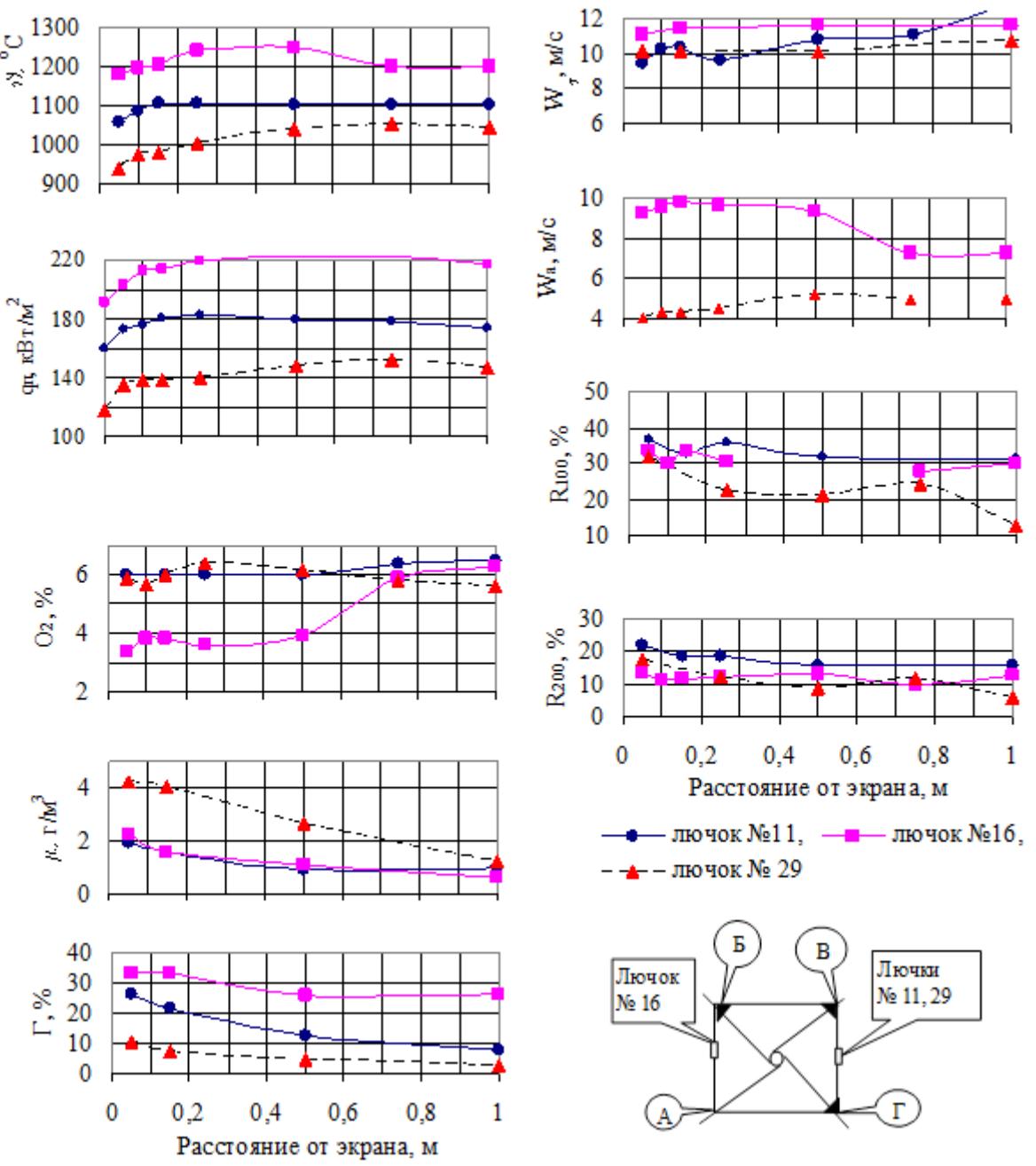


Рисунок 3.2 – Температура газов ( $\vartheta$ ), плотность падающего теплового потока ( $q_{\text{п}}$ ), содержание кислорода ( $O_2$ ), концентрация частиц ( $\mu$ ), содержание горючих ( $\Gamma$ ), тангенциальная и аксиальная составляющие скорости газов ( $W_t$ ,  $W_a$ ) в пристенной области топки котла БКЗ-210-140Ф при работающих горелках БВГ (режим № 1)

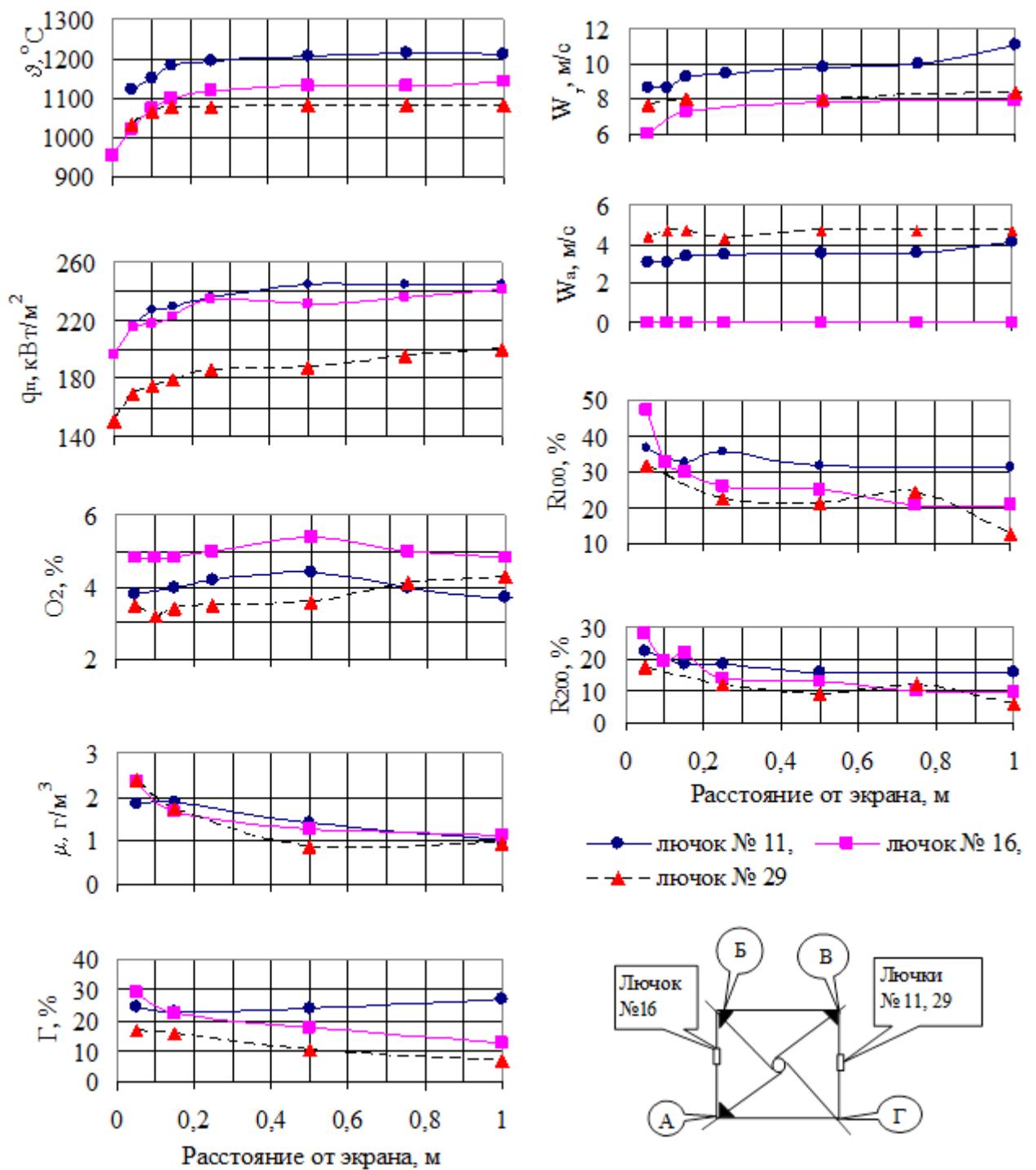


Рисунок 3.3. Температура газов ( $\vartheta$ ), плотность падающего теплового потока ( $q_n$ ), содержание кислорода ( $O_2$ ), концентрация частиц ( $\mu$ ), содержание горючих ( $\Gamma$ ), тангенциальная и аксиальная составляющие скорости газов ( $W_t$ ,  $W_a$ ), фракционный состав частиц ( $R_{100}$ ,  $R_{200}$ ) в пристенной области топки котла БКЗ-210-140Ф при работающих горелках АБВ (режим № 2)

Стеклофаза  $\text{SiO}_2$ , изотропное стекло представлены сферическими образованиями различной окраски – от бесцветных до коричневато-бурых, вследствие присутствия оксидов железа. Поверхность шариков стеклофазы шагреневая, что свидетельствует об их интенсивной муллитизации. Более крупные образования стеклофазы содержали агрегативные скрытокристаллические скопления свободного оксида кальция. Кроме того, более крупные шарики стеклофазы имеют оболочку из ангидрита  $\text{CaSO}_4$ . Кварц  $\text{SiO}_2$  представлен самостоятельными минеральными образованиями в виде неправильных зерен, образующих микровключения в стеклофазе. Оксиды железа представлены магнетитом и гематитом, которые присутствуют в виде зерен неправильной или сфероидальной формы соответственно черно-стального или красновато-бурового цвета. Анортит  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$  наблюдается в виде неправильных зерен. Кальцит  $\text{CaCO}_3$  присутствует в пробах в весьма незначительном количестве – до 1,5 %.

В конце зоны активного горения (лучки № 11 и 16) на зондах со стороны набегания газового потока (слева) в течение 0,5…45 часов возникали темные прочные отложения толщиной до 1 мм. В аэродинамической тени зонда (справа) образовались сыпучие отложения светло-коричневого цвета. Наибольшая скорость роста прочных первичных отложений со стороны неработающих горелок за первые 1…2 часа опыта составила 27…33 г/(м<sup>2</sup>·ч) и была в 3…4 раза больше, чем скорость образования рыхлых сыпучих отложений. Отложения со стороны неработающих горелок в конце зоны активного горения росли в 5 раз быстрее (режим № 2), чем со стороны работающих.

Рассмотрим, какие из параметров пристенного слоя оказывают наибольшее влияние на интенсивность образования отложений в районе лучков № 11 и 16. Из рисунков 3.2 и 3.3 видно, что смещение факела в сторону отключенной горелки вызывает существенное повышение здесь, главным образом, температуры газов по сравнению с противолежащей зоной. Отмечается также некоторое повышение концентрации и угрубление частиц

летучей золы, а также содержания в них горючих. На 10...20 % возрастает тангенциальная скорость газов, на 1,2 % снижается содержание кислорода. Химический состав летучей золы из пристенного слоя практически не меняется.

Таким образом, видно, что за исключением температуры газов все остальные параметры пристенного слоя в зоне лючка № 11 мало отличались от таковых в лючке № 16. Учитывая то, что интенсивность образования отложений и их характер в этих зонах резко отличаются, можно сделать вывод об определяющем влиянии на них температуры газов в пристенном слое. Так, при температуре газов непосредственно у экранов (на расстоянии 50 мм) менее 1030 °С образовывались рыхлые отложения. Скорость их роста составляла 3–7 г/(м<sup>2</sup>·ч). При  $\theta'_{pc} > 1030\ldots1060$  °С скорость их роста увеличивалась в 3...4 раза. При этом прочность отложений значительно возрастила. Такие отложения имели высокое содержание оксидов железа 57...78 % в пересчете на Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Наиболее высокое содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> отмечалось в прочных первичных отложениях, образующихся со стороны тангенциального движения факела.

Минералогический состав отложений существенно отличался от состава летучей золы. Изменения наблюдались, прежде всего, в стеклофазе: резко сокращалось содержание светлых шариков стеклофазы с одновременным увеличением образований темного цвета, которые обладают сильными магнитными свойствами и высокими показателями светопреломления, что свидетельствует о высоком содержании в них оксидов железа. Наблюдалось резкое снижение содержания свободного оксида кальция. В ряде проб он вообще не обнаруживался. Характерным являлось повышенное содержание в отложениях ангидрита CaSO<sub>4</sub> и высокая степень сульфатизации (36...75 %) по сравнению с летучей золой (5...12 %). Ангидрит содержался не только в виде оболочек вокруг шариков стеклофазы, как в пробах летучей золы, но и в виде цементирующей массы.

Прочные первичные отложения с топочных экранов и тепломеров имели практически одинаковый химический состав. То же самое можно

констатировать и о вторичных отложениях с экранов и неохлаждаемых зондов. Это свидетельствует о достоверности результатов, полученных при изучении процесса загрязнения топочных экранов с использованием водоохлаждаемых и неохлаждаемых зондов. Аналогичный вывод был сформулирован и сотрудниками Таллинского политехнического института при работе с воздухоохлаждаемыми зондами [19].

Полученные данные исследований свидетельствуют о совпадении содержания общей серы и степени сульфатизации отложений с экранов и зондов, несмотря на то, что зонды выдерживались в топке 0,5...2 часа, а на экранах отложения формировались в течение десятков часов. Этот факт позволяет сделать вывод, что основная масса серы наносится на топочные экраны совместно с частицами летучей золы.

Несмотря на то, что содержание оксидов железа в летучей золе из пристенной области такое же, как в золе топлива, отложения на топочных экранах обогащаются железом. Наиболее вероятной причиной образования высокожелезистых отложений является наличие пирита в исходном топливе. В сожженной партии угля около половины железа, присутствовавшего во внутренней зоне, находилось в виде колчедана [11]. Попадая в топку, пирит распадается при температуре около 600°C по реакции  $2\text{FeS}_2 = 2\text{FeS} + \text{S}_2$ . Далее окисление сульфида FeS может идти двумя путями: либо до  $\text{FeSO}_4$  с последующим разложением сульфата железа до  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , либо до  $\text{FeO}$  в присутствии водяных паров с образованием промежуточной эвтектики  $\text{FeS}-\text{FeO}$  с температурой плавления 920...940 °C [7, 12, 25]. При попадании на поверхность нагрева FeS окисляется, и одновременно повышается температура плавления расплава – он загустевает. Освобождающиеся оксиды серы здесь же реагируют с оксидами щелочных и щелочноземельных металлов, чем и объясняется практически одинаковая и высокая степень сульфатизации отложений с охлаждаемых зондов и топочных экранов. При этом образовавшийся ангидрит играет роль цементирующей массы, что было отмечено в исследованиях под микроскопом. Частицы, имеющие слабую связь

с поверхностью экранной трубы, сбиваются с нее под воздействием эрозионного износа и, возможно, за счет пульсаций факела. Таким образом, на поверхности нагрева остаются богатые железом первичные отложения.

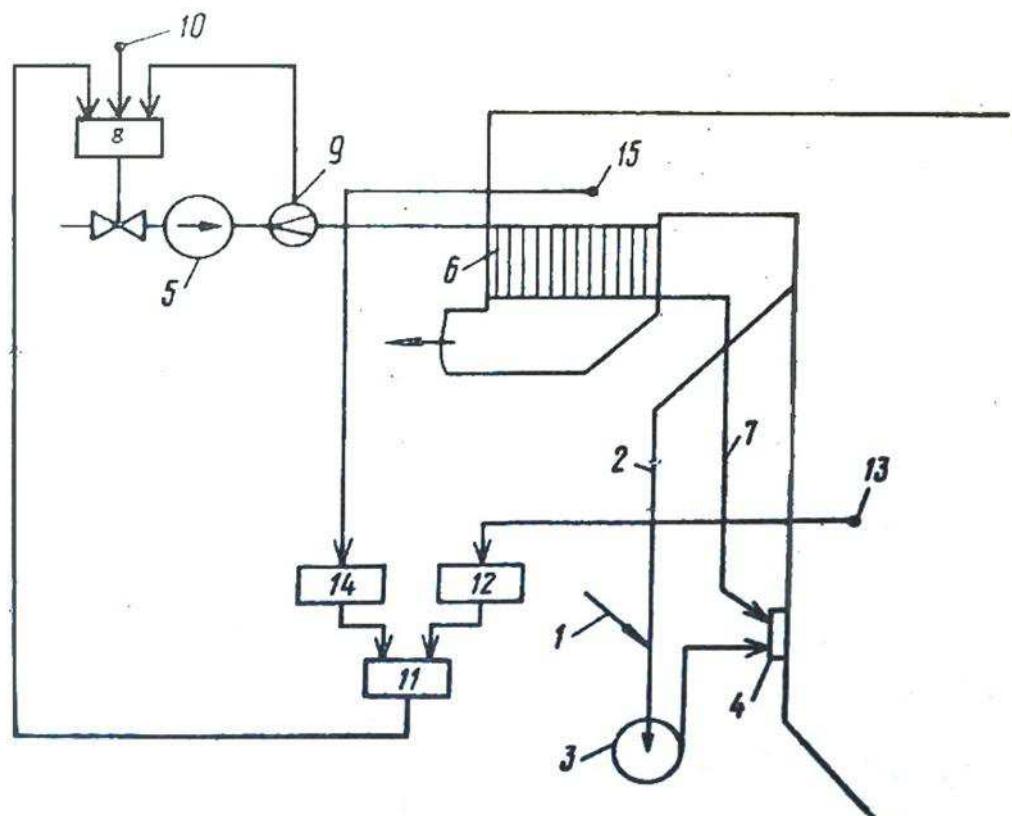
При снижении температуры газов в пристенном слое до температуры кристаллизации эвтектики FeS–FeO интенсивность закрепления частиц на топочных экранах должна снижаться. В нашем случае со стороны отключенной горелки на выходе из зоны активного горения температура газов в пристенном слое на расстоянии 0,05 м от экрана составила 1030...1060 °C, а непосредственно у поверхности труб – 940...960 °C (см. рисунок 3.2 и 3.3), т.е. была близка к температуре кристаллизации эвтектики FeS–FeO. Этим и можно объяснить резкое различие в характере и скорости роста первичных отложений в зонах лючков № 11 и 16.

### **3.2 Предложения по регулированию процесса горения**

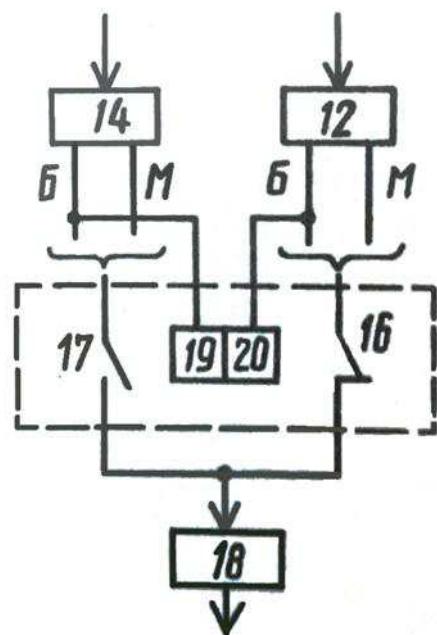
Для уменьшения шлакования поверхностей нагрева при сжигании шлакующих углей предложено применить систему автоматического регулирования процесса горения путем ограничения температуры в зоне активного горения топок пылеугольных котлов с твердым шлакоудалением.

На рисунке 3.4,а показана схема регулирования с применением корректирующих регуляторов с аналоговым выходом, на рисунке 3.4,б – схема реализации выбора максимального из двух сигналов при применении корректирующих регуляторов с импульсным выходом.

Схема на 3.4,а содержит течку 1, по которой сырой уголь поступает в газообразную шахту 2, где предварительно подсушивается, охлаждая топочные газы, и вместе с ними поступает в мельницу вентилятора 3. После размола готовая пыль вместе с охлажденным топочным газом поступает в горелки 4. Сюда же с помощью вентилятора 5 через воздухоподогреватель 6 и воздуховод 7 подводится горячий воздух. Расход воздуха поддерживается регулятором 8 по соотношению расходов воздуха (импульс 9) и топлива (импульс 10).



а



б

Рисунок 3.4 – Блок-схема регулирования процесса горения:  
а – схема регулирования; б – схема выбора корректирующего сигнала

На третий вход регулятора общего воздуха поступает корректирующий сигнал с блока 11 выбора максимального сигнала, на один вход которого поступает аналоговый сигнал с выхода корректирующего регулятора 12, реагирующего на изменение температуры газов в зоне активного горения (импульс 13), а на другой вход – сигнал с выхода корректирующего регулятора 14, реагирующего на изменение содержания кислорода в продуктах сгорания (импульс 15).

Схема на рисунке 3.4,б содержит группы контактов – нормально замкнутых 16 и нормально разомкнутых 17, интегратор 18 и обмотки 19 и 20 двухпозиционного реле.

Регулирование топочным процессом осуществляется следующим образом.

При возникновении тенденции к повышению температуры в зоне горения, сигнал с выхода регулятора 12 увеличивается и корректирует соотношение топливо-воздух, поддерживаемое регулятором 8 общего воздуха, в сторону увеличения подачи воздуха в котел до тех пор, пока новое значение избытка воздуха не будет соответствовать поддержанию заданной температуры в зоне горения. Сигнал с выхода регулятора 14 при этом уменьшается вследствие увеличения содержания кислорода в продуктах сгорания.

При возникновении тенденции к понижению температуры в зоне горения (например, вследствие снижения нагрузки котла или повышения влажности топлива) сигнал с регулятора 12 уменьшается, корректируя соотношение топливо-воздух в сторону уменьшения подачи воздуха в котел до тех пор, пока сигнал с регулятора 14, возрастающий вследствие уменьшения содержания кислорода в продуктах сгорания, не станет больше, чем сигнал с регулятора 12.

Регулятор 14 получает сигнал по содержанию кислорода в дымовых газах, а регулятор 12 – по температуре топочных газов. Выходы регулятора 14 и 12 через группы нормально замкнутых 16 и нормально разомкнутых 17 (показаны условно) контактов двухпозиционного реле подключены на вход интегралов 18, формирующего сигнал коррекции для регулятора 8. Выходы «Больше»

регуляторов 14 и 12 подключены к обмоткам 19 и 20 двухпозиционного реле. Реле срабатывает, замыкая группы контактов 16 или 17, в зависимости от того, с какого регулятора пришел большой сигнал. При этом, к входу интегратора 18 подключается выход регулятора 12 или 14 пылеугольных котлов с твердым шлакоудалением путем подачи воздуха в топку по импульсу, характеризующему соотношение расходов топлива и воздуха с коррекцией по содержанию кислорода в дымовых газах. При этом с целью уменьшения шлакования поверхностей нагрева при сжигании шлакующих углей, дополнительно измеряют температуру газов в зоне активного горения и формируют корректирующий сигнал, характеризующий температурный режим топки, сравнивают с корректирующим сигналом по кислороду и корректируют по большему из них соотношение топливо-воздух.

### **3.3 Выводы по главе 3**

1. Проведен анализ влияния структуры пристенного газового слоя у топочных экранов на интенсивность золошлаковых отложений. При этом установлено наличие существенной неизотермичности пристенного газового слоя у экранов. При сжигании березовского угля показано, что:

- в пристенной области тангенциальной топки на характер распределения температуры, газового состава, концентрации летучей золы и содержание в ней горючих оказывает существенное влияние аэродинамика топки. Последняя зависит от сочетания трех работающих горелок из четырех установленных;
- на топочных экранах образуются как прочные высокожелезистые отложения, так и сыпучие тонкодисперсные, близкие по составу к летучей золе;
- прочные первичные высокожелезистые отложения формируются со стороны набегания газового потока при температуре вблизи экранных труб  $\vartheta'_{nc} > 1050$  °C;
- при температуре газов вблизи экранных труб  $\vartheta'_{nc} < 1050$  °C образуются рыхлые слабосвязанные отложения;

– прочные высокожелезистые отложения с охлаждаемых зондов и топочных экранов имеют высокую степень сульфатизации ( $K_{SO_3} = 36\dots70\%$ ) в отличие от летучей золы ( $K_{SO_3} = 5\dots11\%$ ). Это свидетельствует о роли эвтектики FeS–FeO в формировании прочных высокожелезистых отложений.

2. Предложен способ регулирования топочного процесса в пылеугольных котлах с твердым шлакоудалением, позволяющий уменьшить шлакование поверхностей нагрева за счет поддержания на требуемом уровне температуру в зоне активного горения.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Магистерская диссертация посвящена вопросам организации бесшлаковочной эксплуатации котельных агрегатов БКЗ-210-140Ф 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 анализа данных по теоретическим и экспериментальным исследованиям установлен механизм шлакования и загрязнения поверхностей нагрева в топке котлов при сжигания КАУ.

В результате обобщения имеющегося опыта эксплуатации котла БКЗ-210-140Ф с одноярусной тангенциальной компоновкой прямоточных горелок представлены основные принципы организации топочного процесса, обеспечивающие по условиям шлакования надежную и эффективную их работу.

Изучено влияние параметров пристенного газового слоя у топочных экранов котла на интенсивность образования золошлаковых отложений.

Показано, что определяющее влияние на состав и скорость образования первичных отложений оказывает температура газов вблизи экранов, предельное значение которой вблизи экранов (на расстоянии до 0,05 м от поверхности) их не должна превышать 1050 °С. При более высоком температурном уровне образуются прочные высокожелезистые отложения, а при более низком – сыпучие, слабосвязанные с поверхностью экранных труб.

Предложен способ регулирования топочного процесса в пылеугольных котлах с твердым шлакоудалением, позволяющий уменьшить шлакование поверхностей нагрева за счет поддержания на требуемом уровне температуру в зоне активного горения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пронин, М.С. Совершенствование технологий пылеугольного сжигания канского-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 канского-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. Заворин // Краткие тезисы докладов: Расширение добычи и использования канского-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 канского-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 канского-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. – 35-44.
14. Пронин, М.С. Результаты опытного сжигания отсевов березовского угля в кotle 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. Ленкевич, Г. Развитие пылеугольных котлов для бурого угля. Паровые котлы западноевропейских стран / Г. Ленкевич. – М-Л.: ГЭИ, 1957. – С. 3-12.
17. Отс, А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канского-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 канского-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. Процайло, М.Я. Освоение и исследование опытно-промышленного котла БКЗ-500-140-1 с тангенциальной топкой для низкотемпературного сжигания канского-ачинских углей / М.Я. Процайло, Ю.Л. Маршак, С.Г. Козлов и др. // Теплоэнергетика. 1988. № 1. С. 5-12.
22. Процайло, М.Я. Первые результаты освоения котла Е-500 на Красноярской ТЭЦ-2 / М.Я. Процайло, С.Г. Козлов, Г.В. Лобов // Тезисы докладов IV краевого совещания: Проблемы сжигания канского-ачинских углей в котлах мощных энергоблоков. Красноярск, 1985. С. 100-101.
23. Верзаков, В.Н. Исследование топки котла БКЗ-500-140-1 / В.Н. Верзаков, Ю.Л. Маршак, С.Г. Козлов, В.Г. Мещеряков // Тезисы докладов IV краевого совещания: Проблемы сжигания канского-ачинских углей в котлах мощных энергоблоков. Красноярск, 1985. С. 48-49.
24. Козлов, С.Г. О загрязнении поверхностей нагрева котла Е-500 Красноярской ТЭЦ-2 / С.Г. Козлов, М.Я. Процайло, О.Н. Едемский // Тезисы докладов IV краевого совещания: Проблемы сжигания канского-ачинских углей в котлах мощных энергоблоков. Красноярск, 1985. С. 98-100.
25. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян // М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 352 с.

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

**Политехнический институт**

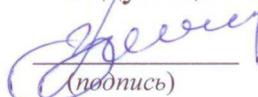
(наименование института)

**Кафедра теплотехники и гидрогазодинамики**

(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

  
(подпись)

**В.А. Кулагин**  
(инициалы, фамилия)

«\_\_» 2019 г.

## **МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

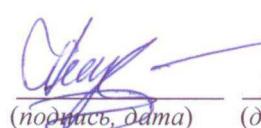
**«ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИСТЕННОГО ГАЗОВОГО СЛОЯ ТОПКИ  
КОТЛА БКЗ-210 С ТВЕРДЫМ ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ»**

(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)  
26.06.19

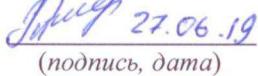
профессор, д.т.н.

**А.П. Скуратов**

(должность, ученая степень)

(инициалы, фамилия)

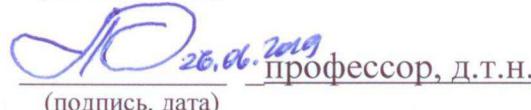
Выпускник

  
(подпись, дата)  
27.06.19

**В.Л. Толкаев**

(инициалы, фамилия)

Рецензент

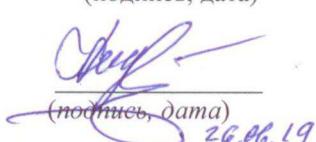
  
(подпись, дата)  
26.06.2019

профессор, д.т.н.

**Ю.Л. Липовка**

(инициалы, фамилия)

Нормоконтролер

  
(подпись, дата)  
26.06.19

**А.П. Скуратов**

(инициалы, фамилия)

Красноярск 2019