

## Раздел четвертый

**КОМПЛЕКСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТЕПЛОВЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ****4.3. Сжигание твердых топлив****4.3.4. Повышение надежности, маневренности и экологической безопасности котлов К-50-14-250 при сжигании каменного угля путем оптимизации аэродинамики топки**

*А.М. Архипов, В.С. Киричков, В.Б. Прохоров, А.А. Канунников, Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
А.В. Роор, ООО «Южно-Кузбасская энергетическая компания»  
Н.И. Соловьев, ЗАО «ЦКБ Энергоремонт»*

**1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ И ОСНОВНЫЕ НЕДОСТАТКИ РАБОТЫ ПАРОВОГО КОТЛА К-50-14-250 ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕВЫХ ГОРЕЛОК**

В производственно-отопительной котельной г.°Таштагол (Кемеровская обл.), относящейся к ООО «Южно-Кузбасской энергетической компании», установлены пять котлов типа К-50-14-250. Они предназначены для горячего водоснабжения города и отпуска пара руднику по добыче железной руды.

Паровые двухбарабанные вертикально-водотрубные с естественной циркуляцией котлы К-50-14-250 производства Белгородского котельного завода имеют П-образную компоновку и предназначены для сжигания угольной пыли. Изначально котлы были спроектированы для сжигания природного газа и высокосернистого мазута, однако, были реконструированы заводом для сжигания каменных углей. Основные параметры работы котлов следующие: номинальная паропроизводительность  $D_{ном} = 50$  т/ч, температура перегрева пара  $t_{пе} = 250$  °С (температура питательной воды  $t_{пв} = 104$  °С), давление перегретого пара  $p_{пе} = 14$  кгс/см<sup>2</sup>. До реконструкции все котлы имели по четыре вихревые встречно-расположенные горелки улиточного типа, размещенные по две на боковых стенах топочной камеры. Компоновка трубчатого воздухоподогревателя и экономайзера – двухступенчатая. На выходе из топочной камеры находится фестон, в горизонтальном газоходе – пароперегреватель и конвективный пучок, являющийся испарительной поверхностью малого барабана. Для улавливания золы установлены мокрые золоуловители – скрубберы. Котел снабжен одним дымососом и одним дутьевым вентилятором.

Топливом является кузнецкий каменный уголь марок Г, ГР, Д и ДРСШ, добываемых на различных разрезах и отличающихся друг от друга калорийностью, выходом летучих веществ, влажностью, зольностью.

Приготовление угольной пыли осуществляется с помощью двух валковых мельниц и двух мельничных вентиляторов (на каждый котел) при прямом ее вдувании в топку. На котельной приняты следующие значения нормативных величин, характеризующих фракционный состав топлива:  $R_{90} = 18$  %,  $R_{200} = 2$  %.

Котлы работают в режиме твердого шлакоудаления. Скаты холодной воронки расположены вдоль фронтальной и тыльной стен топки. Топка котла полностью экранирована трубами Ø60 мм, расположенными с шагом 70 мм.

Продольный разрез парового котла К-50-14-250 до реконструкции топочно-горелочных устройств приведен на рис. 1.

Основные недостатки работы котлов К-50-14-250 в заводском исполнении (до модернизации) [1]: неустойчивое горение угольной пыли без подсветки факела высокорекреакционным топливом – мазутом на сниженных нагрузках (при работе на одной м е л ь - н и ц е), что приводит к значительному перерасходу дорогостоящего топлива;

- высокая температура продуктов сгорания за котельным пучком, что снижает надежность работы неохлаждаемого потолочного перекрытия над поворотной камерой и верхних трубных досок второй ступени ВЗП;

- высокая температура уходящих газов, которая достигает 165...170 °С, что способствует снижению КПД котлов;

- повышенное значение величины механического недожога топлива, так, содержание горючих в золе уноса достигает 30-40 % при нормативе в 14 %;

- концентрация оксидов азота в уходящих газах составляет 800...850 мг/м<sup>3</sup>, т.е., превышает нормативную величину, установленную ГОСТом (470 мг/м<sup>3</sup> для котлов с твердым удалением шлака) [2] в 1,7...1,8 раза.

В летний период при значительном снижении потребности в горячем теплоносителе городского населения и в условиях неудовлетворительного горения топлива на сниженных нагрузках, персонал котельной был вынужден периодически останавливать котельный агрегат.

Основные причины неустойчивого горения:

- В условиях использования горелок улиточного типа с периферийным потоком вторичного воздуха и центральным потоком аэросмеси имеет место недостаточная для надежного зажигания поверхность непосредственного раннего контакта угольной пыли с топочными газами (можно сказать, что он отсутствует). Зажигание осуществляется за счет наличия зоны обратных токов [3], мощности которой явно недостаточно. При отключении одной мельницы (по режимным условиям или для ее ремонта) величина поверхности указанного контакта уменьшается в два раза, что резко снижает устойчивость зажигания угольной пыли.

- Технологический недостаток зажигания связан со сравнительно низким температурным уровнем топочных газов. Котлы К-50-14-250 работают в режиме твердого шлакоудаления (ТШУ). Они имеют низкое теплонапряжение поперечного сечения топки

(1,343 Гкал/м<sup>2</sup>·ч) и недостаточно высокую температуру газов в ядре горения (1350-1450°С).

- На котле К-50-14-250 отработанный сушильный агент, имеющий температуру порядка 60 °С, вместе с угольной пылью и испаренной влагой топлива поступает непосредственно в зону зажигания и расхолаживает ее.

- Износ проточной части улиток аэросмеси, который имеет место на котлах котельной г. Таштагол, способствует уменьшению угла раскрытия свежей струи аэросмеси, что снижает надежность зажигания

угольной пыли. Это усугубляется тем, что горелки в выходной части каналов аэросмеси не имеют раструбов, т.е. начальный периметр эжекции (зажигания) является сравнительно небольшим.

Указанные выше причины неудовлетворительной работы котлов К-50-14-250 котельной г. Таштагол побудили авторов статьи заняться разработкой и внедрением новой схемы сжигания кузнецкого угля в прямоточно-вихревом факеле.

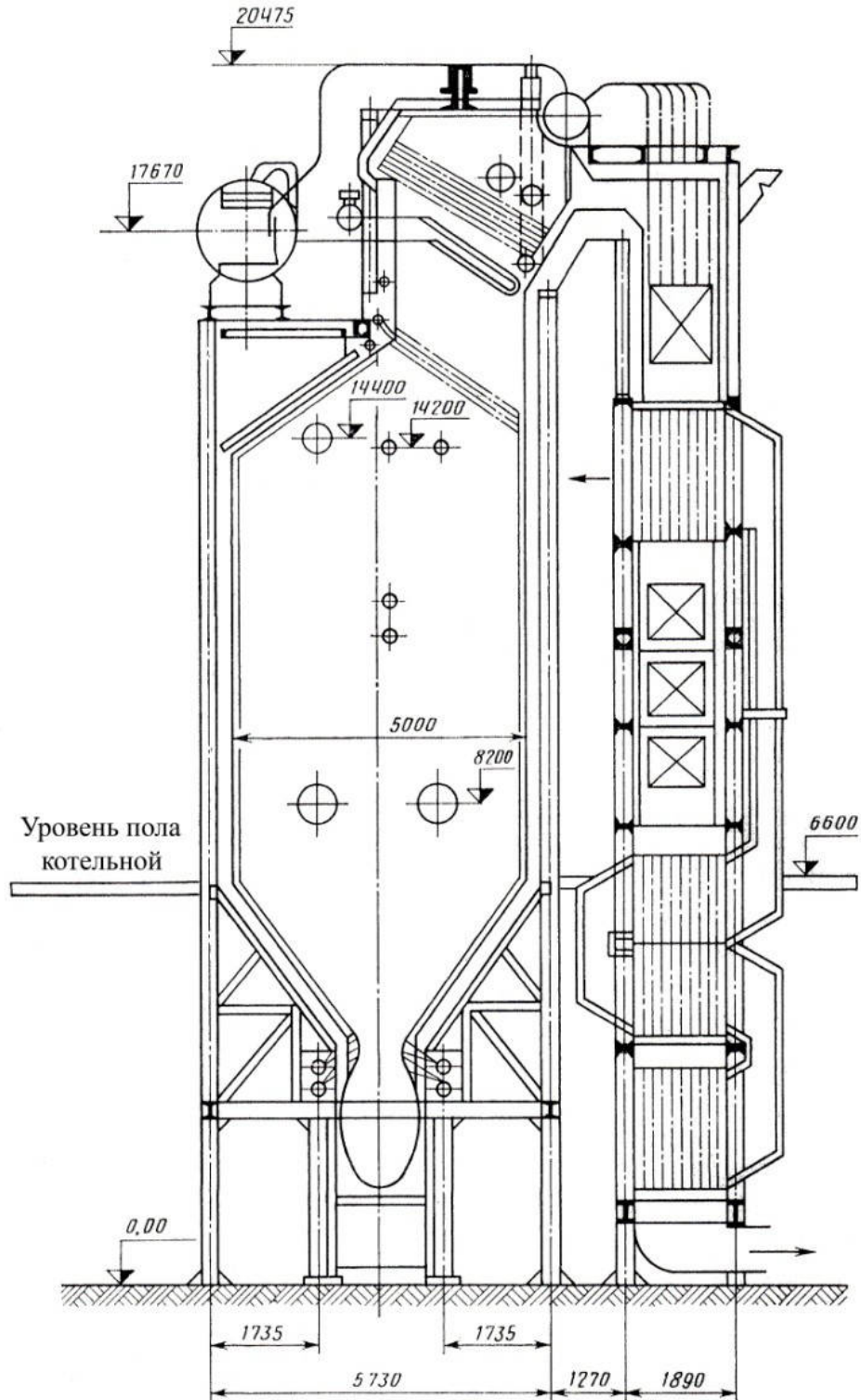


Рис.1. Продольный разрез парового котла К-50-14-250 с вихревыми горелками.

## 2. РАЗРАБОТКА СХЕМ ДЛЯ ПЕРЕХОДА НА СЖИГАНИЕ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ В U-ОБРАЗНОМ ПРЯМОТОЧНО-ВИХРЕВОМ ФАКЕЛЕ

### 2.1. Схема организации аэродинамики топки и ее исследование на модели применительно к котлу №2

Разработанная схема организации аэродинамики топки в условиях прямооточных встречно-смещенных струй, приведенная на рис. 2, является схемой сжигания топлива в системе вертикальных и горизонтальных тангенциальных факелов (ВГТФ). На рисунке приняты следующие условные обозначения: Г – прямооточная горелка, СВВ – сопло вторичного воздуха, СТВ – сопло третичного воздуха, цифрами указаны номера горелок и сопл. По высоте топочной камеры осуществляется ступенчатый подвод окислителя к горячей струе топлива за счет сопл вторичного и третичного дутья. Конструктивно прямооточная горелка выполнена в виде трубы  $\text{Ø}426 \times 7$  мм, имеющей наклон вниз на  $45^\circ$ , во внутренней части которой установлены раскататели пыли. Горелки устанавливаются на отметке 11 м. На противоположной боковой стене топки (в плоскости размещения горелок) установлены сопла вторичного и третичного воздуха. Сопла вторичного воздуха  $\text{Ø}426 \times 7$

мм установлены горизонтально на отметке 7,1 м. Центральный канал сопла вторичного воздуха является трубой установки мазутной форсунки парового распыла. Сопла третичного воздуха  $\text{Ø}219 \times 7$  мм по высоте располагаются между горелкой и соплом вторичного воздуха (отметка 9,5 м) и предназначены для дополнительной турбулизации хвостовых объемов горелочных струй и увеличения концентрации окислителя на стадии догорания топлива. При этом учитывалось, что указанная компоновка должна обеспечить сравнительно низкое положение ядра факела и надежную турбулизацию топливных потоков свежими горелочными струями и свежими струями третичного дутья. Выпадению несгоревшей пыли в холодную воронку должна препятствовать воздушная подушка из струй вторичного воздуха.

Скорость струй на выходе из сопл вторичного воздуха (при полностью открытых шиберях перед ними) и сопл третичного дутья при работе котла на двух мельницах составит порядка 17,5 м/с. Шиберы перед соплами вторичного воздуха могут частично прикрываться для увеличения скорости истечения струй третичного дутья с целью интенсификации турбулизации догорающего факела.

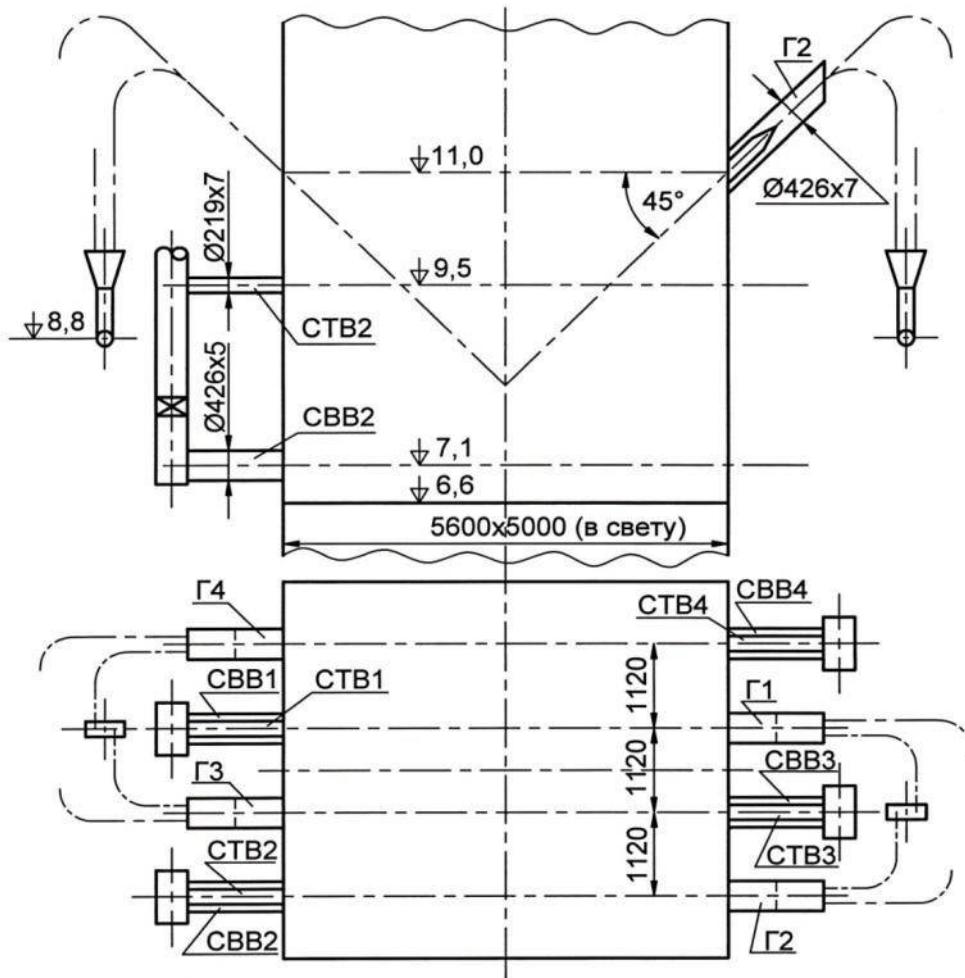


Рис. 2. Схема установки прямооточных горелок, сопл вторичного и третичного воздуха на котле ст. №2.

На выходе из горелок была предусмотрена установка расщепителей потока аэросмеси с размером 192 мм. Это конструкторское решение предназначено для обеспечения зоны обратных токов с целью повышения устойчивости зажигания угольной пыли. За счет этого начальный периметр эжекции был увеличен на 25 % и составил 6,84 м (на четыре горелки). Скорость истечения аэросмеси составит 26,9 м/с ( $D_{\text{ном}} = 50$  т/ч, в работе две мельницы) и 15,9 м/с ( $D = 30$  т/ч, в работе одна мельница).

На рис. 3 приведены эскизы конструкций прямооточных горелок, сопел вторичного и третичного воздуха.

Мазутные форсунки вставляются в сопла вторичного воздуха под небольшим углом к оси сопел. Они имеют короткие стволы (не более 1,2 м) и обслуживаются с прежней площадки (отметка 6,6 м).

Делители пыли спроектированы таким образом, чтобы при работе на одной мельнице во все прямооточные горелки подавалась угольная пыль. До реконструкции при отключении одной из мельниц в работе находились всего две вихревые горелки из четырех, что также являлось одной из причин неустойчивого горения топлива на сниженных нагрузках.

Компоновочная схема обеспечивает нижнебоковой принудительный подвод топочных газов в свежие горелочные струи, что решает проблему устойчивого зажигания. При этом важно, что не потребуется прогревать достаточно большие массы вторичного воздуха, что имеет место в существующих горелках котла К-50-14-250.

Повышенная величина внутренней рециркуляции топочных газов, содержащих продукты недожога, в свежие горелочные струи, а также рассредоточение зоны дожигания факела позволит снизить удельный выброс  $\text{NO}_x$  до нормативного уровня – 470 мг/м<sup>3</sup> [2].

Важная роль третичного дутья состоит в турбулизации факела, поднимающегося вверх. Избыток третичного воздуха должен составлять около 0,1 при номинальной скорости истечения не менее 17,5 м/с. Для обеспечения более высокой скорости потребуются частичное прикрытие воздушных шиберов перед соплами вторичного воздуха.

Основу принятого для дальнейшей проработки варианта составляют следующие положения.

1. Использование прямооточных горелок вместо вихревых позволяет лучше заполнить топочный объем и более надежно контролировать траектории движения их факелов.

2. Подъем на более высокий уровень и наклон горелок вниз обеспечивает увеличение располагаемой длины обобщенного факела. В условиях повышенных расходов первичного воздуха (из-за высоких присосов холодного воздуха в пылесистемы) этот принцип компоновки позволяет более полно использовать кинети-

ческую энергию направленных с наклоном вниз струй аэросмеси для лучшего зажигания и перемешивания реагентов (благодаря встречному движению аэросмесь движется наклонно вниз, а продукты сгорания – вверх).

3. Отдельный (от вторичного и третичного воздуха) ввод в топку струй аэросмеси способствует их более быстрому прогреву, зажиганию и снижению образования  $\text{NO}_x$  [4].

4. Использование четырех делителей пыли позволяет сохранять количество горелок (четыре штуки) независимо от числа работающих мельниц. Это должно повысить устойчивость зажигания угольной пыли при работе на одной мельнице и исключить необходимость включения мазутных форсунок при снижении нагрузки котла. Каждый делитель состоит из нижнего ввода  $\text{Ø}273 \times 7$  мм и двух верхних отводов  $\text{Ø}219 \times 7$  мм. Перед каждой горелкой устанавливаются специальный переходник-смеситель. К нему подходят два пылепровода  $\text{Ø}219 \times 7$  мм – по одному от делителей, относящихся к разным мельницам.

Увеличения сопротивления пылепроводов за счет новых участков не произойдет, т.к. перед горелками не будет улиток. Наоборот, по оценкам, сопротивление пылепроводов снизится на 18 кгс/м<sup>2</sup>. Появится возможность некоторого увеличения вентиляции работающей мельницы и ее дополнительной загрузки топливом.

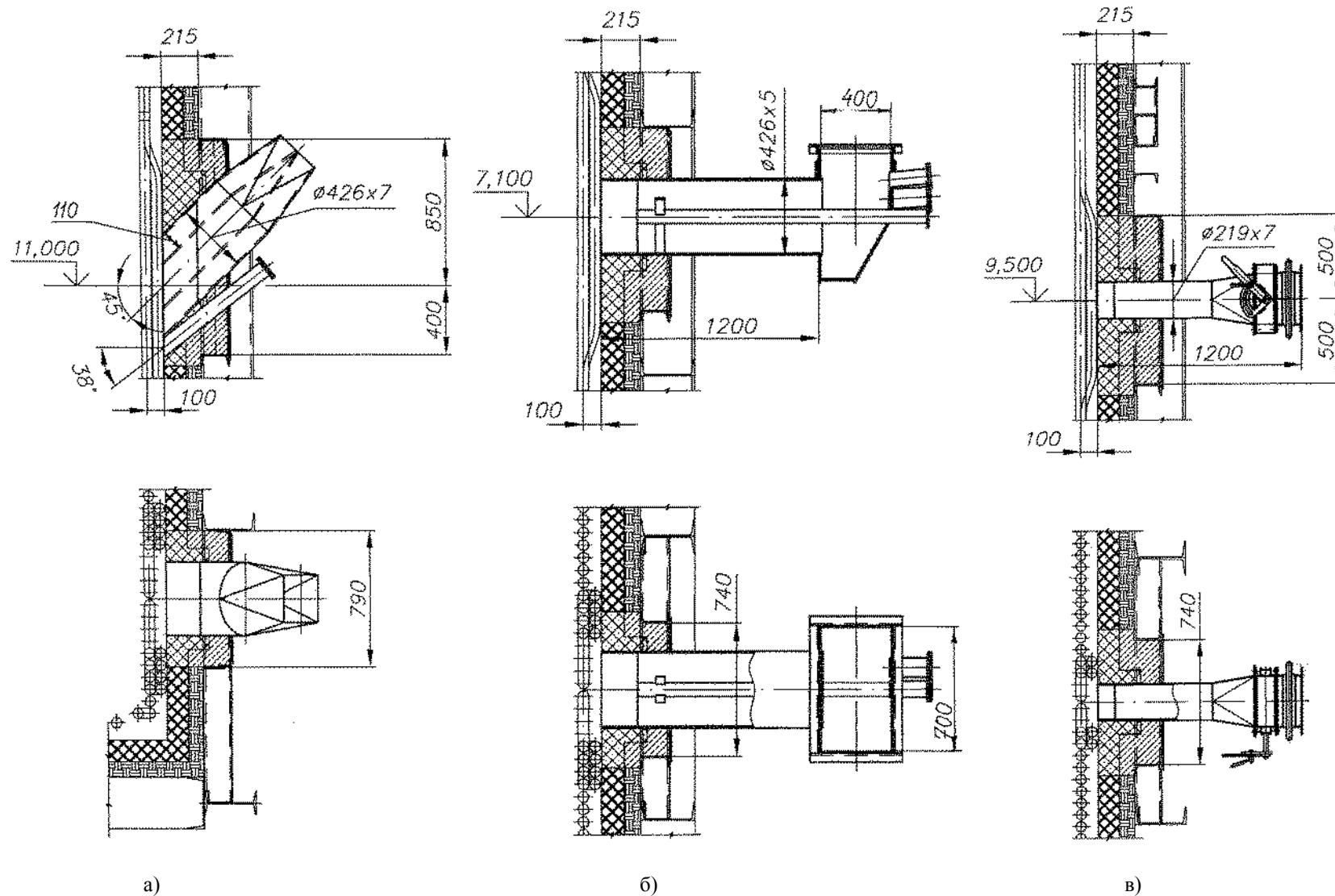
5. Компоновочная схема рис. 2 обеспечивает аэродинамику U-образного факела, которая хорошо себя зарекомендовала на пяти реконструированных котлах БКЗ-210-140ФД ЗСТЭЦ [5 и 6] (на них без подсветки факела в диапазоне нагрузок 210...140 т/ч значительно снизилось содержание горючих в летучей золе и образование оксидов азота). Кроме того, уменьшилось тепловосприятие пароперегревателя.

Применительно к топке с меньшими размерами стен и боковым размещением горелок указанная технология претерпевает изменения. Она может быть реализована в условиях встречно-смещенной компоновки наклонных вниз горелок и сопел (рис. 2).

Для исследования аэродинамики топки котла К-50-14-250 при сжигании топлив в U-образном прямооточновихревом факеле (при встречно смещенной компоновке горелок и сопел) была разработана и создана экспериментальная установка, фотографии которой приведены на рис. 4.

Масштаб модели был принят  $m = 1:23,42$ . Аэродинамическая модель топки повторяет основные особенности конструкции топочной камеры котлоагрегата.

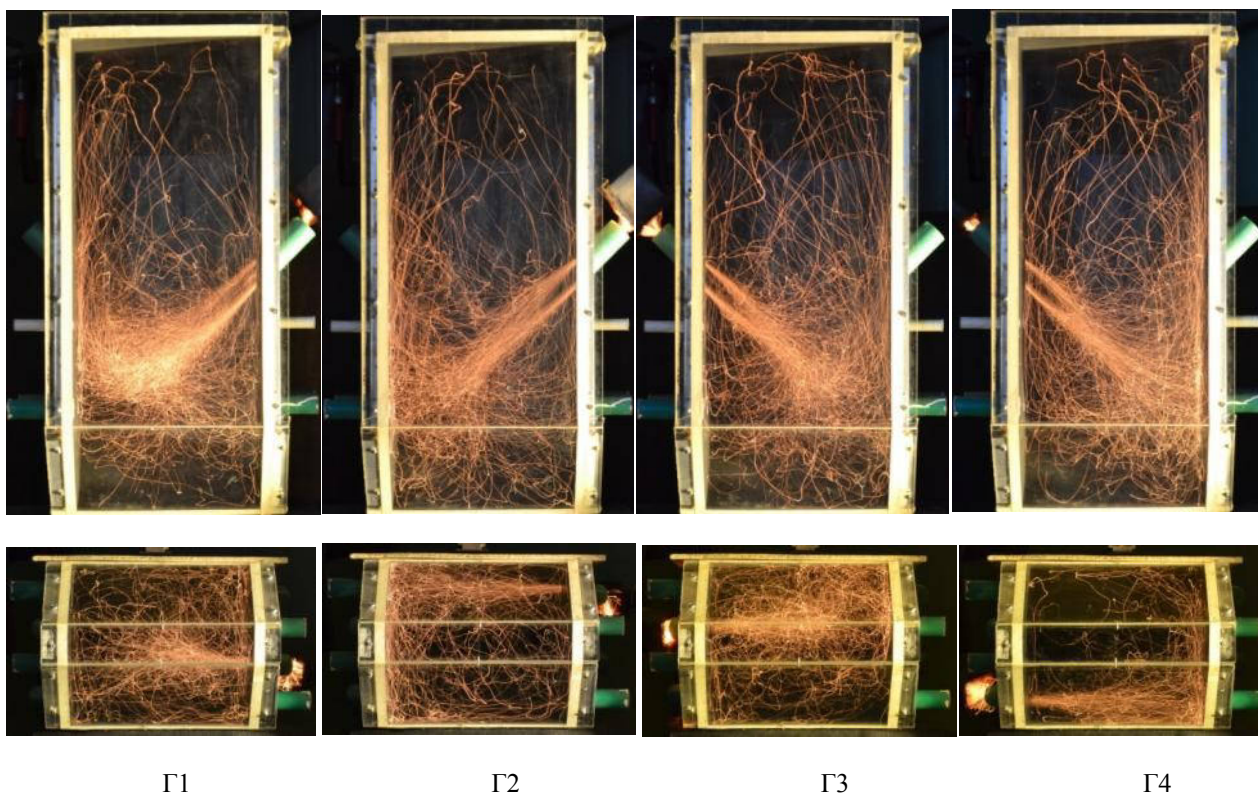
Результаты искровых продувок горелок, сопел третичного и вторичного воздуха приведены на рисунках 5-7.



а) б) в)  
 Рис. 3. Эскизный проект горелок и сопла: а) горелка; б) сопло вторичного воздуха; в) сопло третичного воздуха.



Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки по изучению аэродинамики топки котла №2



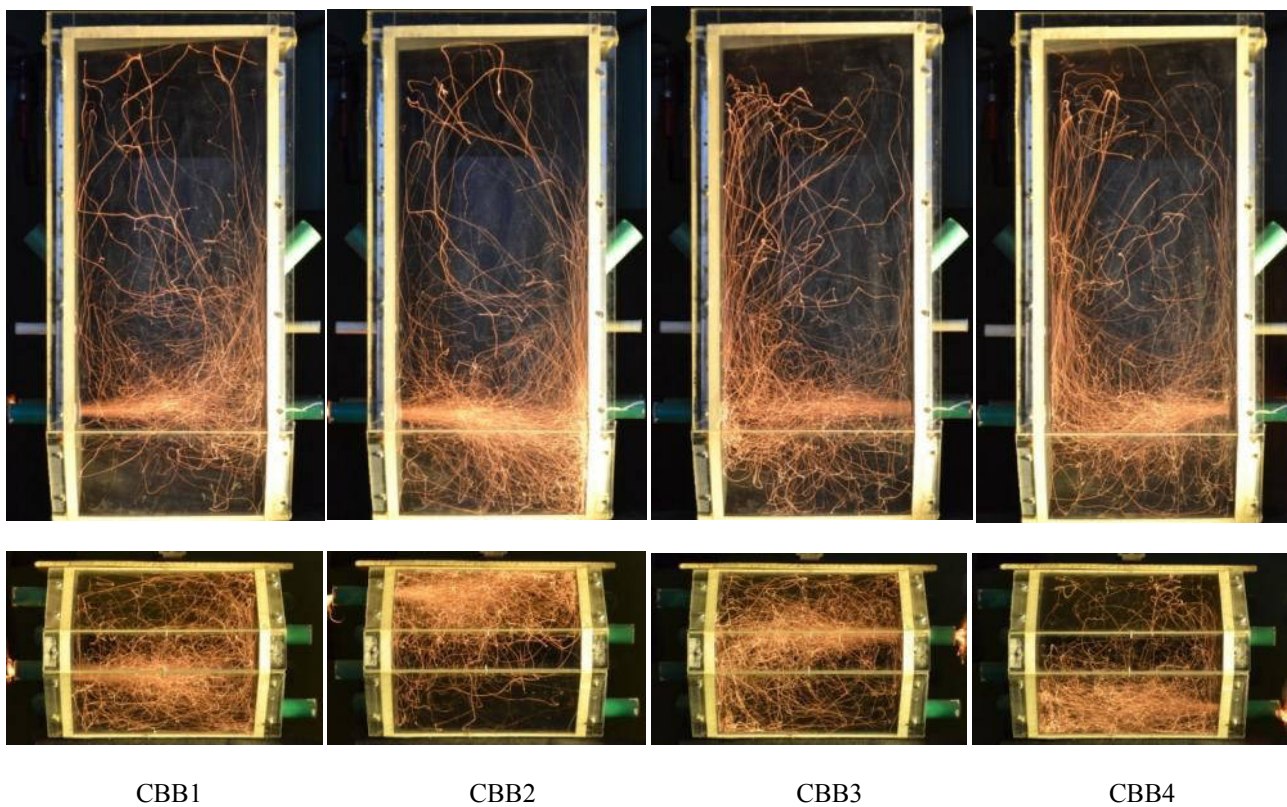
Г1

Г2

Г3

Г4

Рис. 5. Характер движения струй из горелок при искровых продувках (вид через фронтальную стенку и холодную воронку).



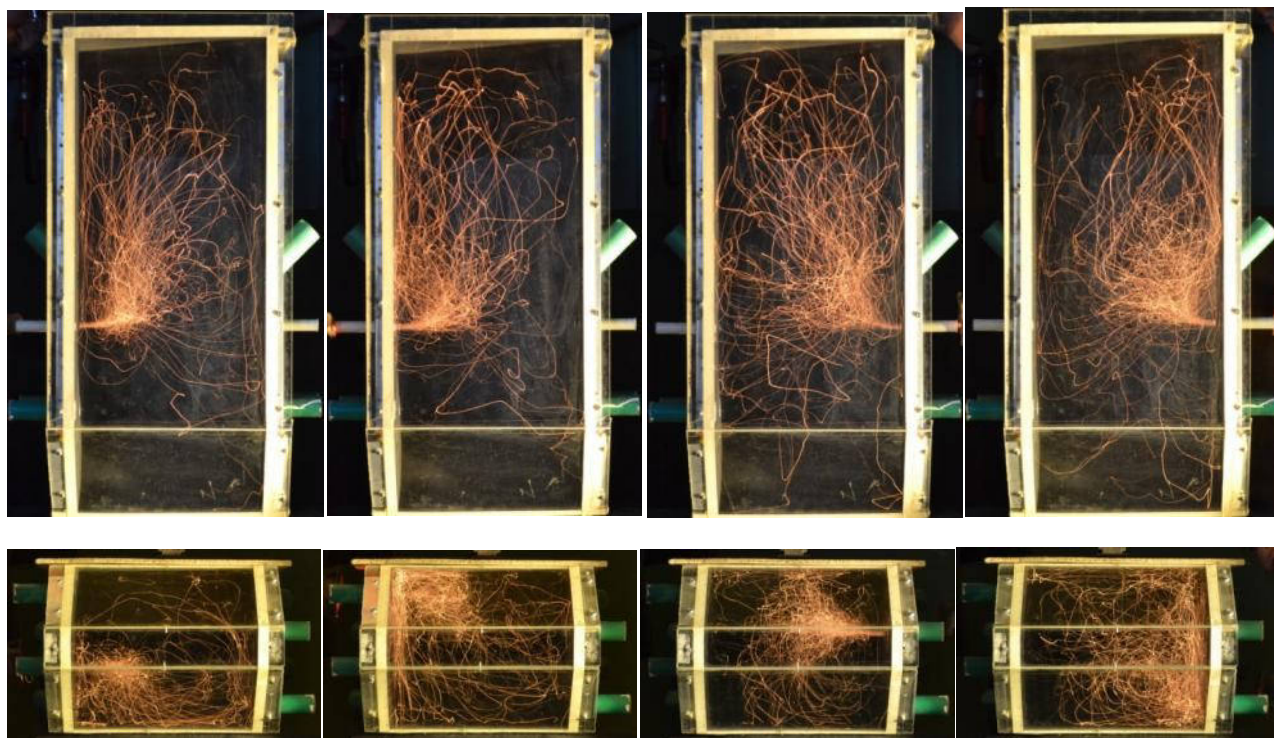
CBV1

CBV2

CBV3

CBV4

Рис. 6. Характер движения струй из сопл вторичного воздуха при искровых продувках (вид через фронтную стенку и холодную воронку).



СТВ1

СТВ2

СТВ3

СТВ4

Рис. 7. Характер движения струй из сопл третичного воздуха при искровых продувках (вид через фронтную стенку и холодную воронку).

Топливоздушная струя (рис. 5) до середины объема модели топки движется вниз с углом близким к углу установки горелок и с небольшим расширением. Примерно с середины ширины модели топки прослеживается значительное расширение и торможение горелочной струи, что свидетельствует о ее активном взаимодействии со струей вторичного воздуха. Таким образом, можно сделать вывод о прогреве струи, возгорании летучих и внешнем выгорании топлива на участке до середины топки. Активное горение топлива по всему сечению топливоздушной струи при увеличении избытка воздуха и значительной ее турбулизации имеет место на участке струи начиная со второй половины ширины топки. Наличие рассекателя угольной пыли в горелке способствует более равномерному ее распределению в выходной части амбразуры и прогреву струи изнутри (между двумя параллельными струями топливоздушной смеси) за счет эжекции на начальном участке ее движения.

Относительно высокое расположение прямооточных горелок и большой угол наклона вниз способствуют быстрому прогреву струй и снижению температуры продуктов сгорания сверху топки за счет более длинного пути частиц горящего топлива.

Если сопоставить одновременно характер движения всех горелочных струй, то можно составить представление о том, как ядро горения рассредоточивается по ширине и глубине топки, а его местоположение находится где-то посередине между уровнями СВВ и СТВ.

Помимо подвода вторичного воздуха к горелочной струе СВВ выполняет функцию экранирования боковой стены от прямого проскока топливоздушной струи. За счет этого происходит снижение и выравнивание локальных тепловых нагрузок на экранные поверхности топки, что снижает вероятность шлакования топочных экранов. Воздушная подушка, возникающая при движении вторичного воздуха, в значительной мере препятствует выпадению (сепарации) частиц угольной пыли в холодную воронку топки котла за счет центробежных сил (рис.6).

Третичный воздух (рис. 7) подходит к топливной струе на более поздних этапах горения и дополнительно ее турбулизует. При догорании частиц топлива важно обеспечить необходимый избыток воздуха для максимально полного выгорания частиц топлива.

По продувкам можно сделать вывод о значительной внутритопочной рециркуляции раскаленных топочных газов в свежую топливную струю, раннем прогреве топлива и активном его выгорании при контакте со струями вторичного и третичного воздуха.

Как известно большую долю в общем количестве оксидов азота при горении угольной пыли при твердом шлакоудалении составляют топливные  $\text{NO}_x$ , образующиеся из азотосодержащих компонентов топлива. Их выход сильно зависит от избытка воздуха в свежих горелочных струях [7] и снижается при уменьшении концентрации окислителя. В работах [4 и 8] отмечено, что ранний прогрев и зажигание при увеличенной поверхности контакта струи топлива с раскаленными топочными газами также способствует снижению генерации топливных  $\text{NO}_x$ .

Интенсивное омывание свежей струи топлива и наличие восстановительной среды на начальном участке горения (прогрева, зажигания и горения летучих веществ) в значительной мере способствует снижению интенсивности образования топливных оксидов азота. В [4] отмечено, что при использовании горелок ухудшенного перемешивания существенное снижение образования  $\text{NO}_x$  достижимо в только том случае, если избыток первичного воздуха в топливоздушной струе не превышает доли летучих в сжигаемом угле, определенной на рабочую массу топлива. Однако, снижение избытка воздуха в топливоздушной струе невозможно ниже значений, соответствующих устойчивой транспортировке угольной пыли по пылепроводам.

## 2.2. Различия в схемах установки прямооточных горелок и сопел на котлах №№2-5

По приведенным выше разработкам и проектам ЗАО «ЦКБ Энергоремонт» в производственно-отопительной котельной г. Таштагол в период с 2009г. по 2011г. были успешно реконструированы четыре котла (№2, 4, 5 и 3 – по хронологии их реконструкции) указанного типа с целью повышения надежности, экономичности и экологической эффективности их работы [9]. На каждом из реконструированных котлов осуществлены незначительные изменения компоновки и конструкции горелок и сопел, однако принципиальные особенности внедренной технологии ступенчатого сжигания кузнецкого угля марок Г, ГР и Д остались без изменения. К ним следует отнести:

- использование высокорасположенных и наклонных вниз четырех прямооточных горелок, подающих в топку прямым вдуванием первичный воздух в смеси с угольной пылью, которая размалывается в валковых мельницах;
- вторичный воздух поступает в топку через четыре сопла вторичного дутья, расположенные ниже горелок и являющиеся при растопках котлов мазутными растопочными горелками;
- для турбулизации хвостовой части факелов горелок используется динамический напор струй третичного воздуха, вытекающего из четырех сопел;
- горелки, сопла вторичного и третичного воздуха установлены по встречно-смещенной схеме ВГТФ на боковых стенах топки.

На рис. 8 приведены схемы, по которым реконструировались эти котлы, в табл. 1 – основные конструктивные особенности горелок и сопел.



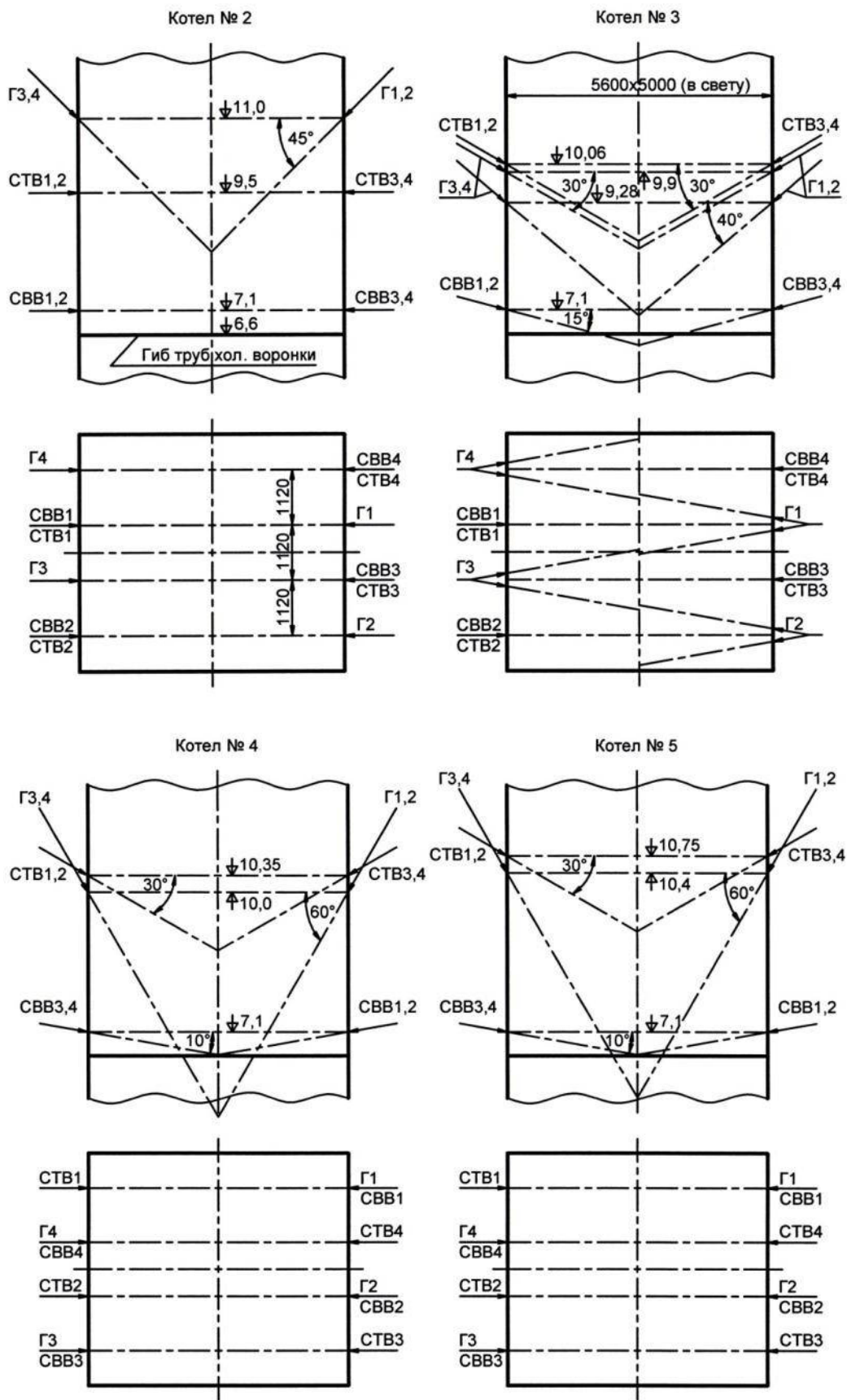


Рис. 8. Схемы установки прямоточных горелок и сопел на котлах К-50-14-250

Таблица 1. Основные конструктивные особенности горелок и сопел реконструированных котлов.

Котлы №	2	3	4	5
Отметка установки горелок, м	11,000	9,590 – средняя (9,280/9,900)	10,00 0	10,400
Сечение в амбразу-ре	Ø426x7 мм с горизонтальным рассекателем	Вертикальные и горизонтальные рассекатели. 4 канала 80x210 мм	Прямоугольное 450x120 мм	Прямоугольное 450x150 мм
Угол наклона горелок	45°	30°/40°	60°	60°
Периметр воспламенения (суммарный по топке), м	6,84	14,512	8,16	8,4
Диаметр и число подводящих пылепроводов к горелке	Ø219x6 мм, два	Ø193,7x6 мм, два	Ø219x6 мм, два	Ø325x8 мм, один
Расположение горелок	Над СВВ противоположной стены	Над СВВ противоположной стены	Над СВВ	Над СВВ
Количество мельниц на нагрузке $D_{ном}$	2	2	2	1 (всего две)
Количество и диаметр пылепроводов от мельницы	2, Ø273x6 мм	2, Ø273x6 мм	2, Ø273x6 мм	4, Ø325x8 мм
Отметка СВВ Угол наклона Сечение СВВ	7,100 Горизонтально Ø426x5 мм	7,100 15° Ø377x6 мм	7,100 10° Ø478x5 мм, внутри – Ø377x5 мм	7,100 10° Ø478x5 мм, внутри – Ø377x5 мм
Отметка СТВ Угол наклона Сечение СТВ Расположение	9,500 Горизонтально Ø219x7 мм Над СВВ	10,000 30° Ø159x5 мм Над СВВ	10,350 30° Ø159x5 мм Встречно горелкам	10,750 30° Ø159x5 мм Встречно горелкам
Минимальная нагрузка без подсветки мазутом в процентах от $D_{ном}$	30	40	42-45	85...90 % (по условиям надежного транспорта пыли к горелкам)

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ КОТЛОВ К-50-14-250

Испытания проводились совместной бригадой сотрудников МЭИ и персонала котельной в соответствии с рекомендациями, приведенными в [10], приборами, прошедшими своевременную поверку. На котлах №2 и 4 наладочные испытания были проведены в 2012г., на котле №2 испытания проводились в 2009г., на котле №3 — в 2013г.

Основные параметры работы котла снимались по показаниям щитовых приборов. Давление пылевоздушной смеси оценивалось по показаниям переносного напоромера. Влажность и зольность сырого угля, тонина помола угольной пыли и содержание горючих в золе уноса определялись в хим. лаборатории котельной. Несколько средних проб сырого угля, характеризующие периоды испытаний, были переданы ООО «ЮКЭК» в отраслевую лабораторию

г.Новокузнецка для определения его характеристик, включая теплотворную способность и содержание летучих веществ.

Измерения концентраций O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания за пароперегревателем, в уходящих газах и перед дымососом проводились поверенным переносным прибором «Testo-342-3». Термопарой, встроенной в этот прибор в каждом опыте дублировалось измерение температуры уходящих газов.

Оценка температур факела через гляделки на соплах вторичного воздуха и через фронтальные лючки наличия пламени в топке (в свежих горелочных струях) осуществлялась оптическим пирометром с исчезающей нитью накаливания типа «Проминь-КХ1».

Проведенные наладочные работы на котле К-50-14-250 (№2) [1] выявили положительные результаты модернизации, в процессе которой были использованы прямоточные горелки, а также сопла вторичного и

третичного воздуха, установленные по четыре на боковых стенах топки по встречно-смещенной схеме. Эти результаты следующие:

- повышена до 50 т/ч длительная располагаемая максимальная нагрузка котла, которая до реконструкции ограничивалась дефицитом тяги;
- снижена с 32 до 15...20 т/ч минимальная располагаемая нагрузка котла при его работе на одной мельнице по условию надежности горения кузнецкого угля марок ГР-ГРОК без подсветки факела дорогостоящим мазутом;
- уменьшен на 2,5...3 % мехнедожог, который стал удовлетворять нормативной величине 2...3 % [11] (в зависимости от зольности топлива);
- сокращены с 800...850 до 460...465 мг/м<sup>3</sup> удельные выбросы оксидов азота с уходящими газами при  $D_{\text{ном}}$ , т.е. до нормативного уровня [2].

В то же время в [1] были указаны нерешенные проблемы работы модернизированного котла:

- значительные присосы холодного воздуха в топку и конвективные поверхности нагрева котла, которые снижают надежность и экономичность его работы;
- низкие скорости третичного воздуха (на номинальной нагрузке не более 16...18 м/с), что ухудшает процесс перемешивания реагентов в топке;
- повышенные температуры газов за котельным пучком и за котлом по сравнению с их расчетными величинами.

Для увеличения полноты дожига угольной пыли, снижения температуры газов на выходе из топки и из котла, по согласованию с заказчиком – ООО «Южно-Кузбасской энергетической компанией», в проекты второго этапа модернизации котлов К-50-14-250 (№№5 и 4), которые были модернизированы в 2010 и 2011 гг., были внесены следующие изменения:

- горелки на котлах №№5 и 4 были установлены на отметках (по осям экранных труб) 10,4 и 10,0 м с углом наклона вниз на 60° и выполнены прямоугольным сечением с высотой в косом срезе 900 мм и шириной 150 мм и 120 мм соответственно, тогда как на котле №2 они размещены на отметке 11,0 м, наклонены вниз на угол 45°, выполнены из труб Ø426x7 мм и снабжены рассекателями, расположенными по горизонтали;
- сопла вторичного воздуха, которые на котле №2 выполнены из труб Ø426x5 мм, направлены горизонтально и установлены на отметке 7,1 м в плоскости горелок на противоположных стенах, на котлах №№5 и 4 были размещены на отметке 7,1 м под своими горелками (на тех же стенах) и наклонены вниз на 10°, причем корпуса сопел вторичного воздуха выполнены из труб Ø478x5 мм и снабжены центральными каналами Ø377x5 мм с возможностью их отключения по воздуху за счет закрытия соответствующих шиберов;
- сопла третичного воздуха установлены на отметке 10,75 (котел №5) и 10,35 м (котел №4), наклонены вниз на угол 30° и выполнены из труб Ø159x5 мм, тогда как на котле №2 они были размещены на отметке 9,5 м, направлены горизонтально и выполнены из труб Ø219x7 мм.

При проведении наладочных работ на модернизированных котлах №№5 и 4 в нижних частях горелок

для исключения шлакования холодных воронок были установлены отбойные козырьки длиной 550 мм, уменьшающие угол наклона нижних стенок горелок, при этом их высота в косом срезе сократилась до 600 мм.

По инициативе ООО «ЮКЭК», на котле №5, а затем и на котле №2 поверхности нагрева второй ступени водяного экономайзера были увеличены в два раза. В результате этих мероприятий, как показали испытания, произошло снижение температуры уходящих газов и был создан запас по тяге. При этом в качестве сопутствующего нежелательного результата было зафиксировано снижение температуры горячего воздуха на 80...85 °С.

Это привело к некоторому увеличению мехнедожога из-за снижения температуры факела. Так, на котле №2 мехнедожог увеличился на 0,5...1 %, а минимальная располагаемая нагрузка без подсветки факела мазутом повысилась до 21...23 т/ч (с 15...20 т/ч, когда температура горячего воздуха была относительно высокой).

Испытания модернизированного котла №5 показали повышение надежности и экономичности его работы: располагаемая нагрузка котла возросла до 50...52 т/ч, а температура уходящих газов снизилась до 185 °С. Мехнедожог, который существенно уменьшился по сравнению с периодом до реконструкции, оказался несколько больше, чем на котле №2, и составил 4,5...6 % – в зависимости от качества сжигаемого угля.

Следует отметить, что результаты испытаний реконструированных котлов по экономичности их работы зависят не только от внедренных технических решений по горелочным устройствам, а также соплам вторичного и третичного воздуха. Результаты работы реконструированных котлов ухудшаются из-за некоторых эксплуатационных факторов. Негативное влияние присосов холодного воздуха в топку реконструированных котлов (до 30...35 %) заключается в расхолаживании факела и затыжке дожига угольной пыли. В ряде случаев для увеличения скоростей третичного воздуха и снижения мехнедожога коэффициент избытка воздуха в уходящих газах приходилось увеличивать до 2,0 и более, что приводило к повышенным потерям тепла с уходящими газами, перерасходу электроэнергии на тягу и дутье и было связано с нерасчетными присосами воздуха в конвективные шахты котлов.

Сотрудникам МЭИ, а также вахтенному и ремонтному персоналу котельной из-за изношенности мельничного стола и недостаточного прижима к нему валков не удалось за счет прикрытия створок сепаратора снизить величину остатка угольной пыли на сите 200 мкм ниже 15...21 % на одной из мельниц котла №4 (при принятом допустимом уровне 2 %). В результате величина мехнедожога на этом котле при работе двух мельниц составила 4...6 %. Причем она уменьшалась до величины около 1 % лишь при отключении указанной мельницы (в том числе на минимальной зафиксированной нагрузке котла 24 т/ч).

Полное закрытие шиберов перед центральными каналами сопел вторичного воздуха на котлах №№5 и 4 при сохранении расхода сушильного агента приводит

до к уменьшению удельных выбросов  $\text{NO}_x$  до  $430 \text{ мг/м}^3$  и  $370 \text{ мг/м}^3$  соответственно при  $D_{\text{ном}}$ . Это свидетельствует о том, что процесс генерации топливных оксидов растянут по траектории, которая больше траектории движения аэросмеси до места встречи (перемешивания) со вторичным воздухом.

В процессе разработки технических решений по реконструкции котла №3 было признано целесообразным выполнить горелку (Г) в виде четырех плоских каналов каждый сечением  $210 \times 80 \text{ мм}$  за счет использования горизонтального и вертикального расщепителей амбразуры. По опыту наладки горелок котлов №№5 и 4 в указанные каналы были сварены нижние козырьки длиной  $220 \text{ мм}$  до первой растопки реконструированного котла. При этом предполагалось, что повышенные скорости первичного воздуха будут способствовать подосу топочных газов в корни топливоздушных струй с учетом увеличения числа каналов. Таким образом, горелка реконструированного котла №3 приняла окончательный вид в соответствии с рис. 9, а тракт топливоздушной смеси до горелок содержит четыре вертикальных делителя (как и на других реконструированных котлах) и четыре смесителя перчаточного типа.

Сопла вторичного воздуха (СВВ) были выполнены из труб  $\text{Ø}377 \times 6 \text{ мм}$ , т.е. меньшего сечения, чем на котле №2, установлены на отметке  $7,1 \text{ м}$  на противоположных стенах по отношению к горелкам (как и на котле №2) с углом наклона вниз  $15^\circ$ . Отметка наклонных вниз на  $30^\circ$  сопел третичного воздуха (СТВ)  $\text{Ø}159 \times 5 \text{ мм}$  составила  $10 \text{ м}$  (по оси экрана). В результате компоновочная схема горелок и сопел реконструированного котла №3 стала соответствовать рис. 10, причем на этом рисунке отметки каналов горелок и сопел даны по обмуровке.

Следует также отметить, что в длительный период модернизации котла №3 по инициативе ООО «ЮКЭК» был выполнен большой объем работ по конвективной шахте котла: удвоена поверхность нагрева второй ступени водяного экономайзера, заменены две ступени воздушного подогревателя, осуществлены уплотнительные и другие работы.

Наладочные испытания на модернизированном котле №3 проведены в феврале и марте 2013 г. Была выявлена целесообразность прикрытия шиберов вторичного воздуха до  $\text{УП} = 20 \%$  во всем эксплуатационном диапазоне нагрузок котла  $20 \dots 50 \text{ т/ч}$ , т.к. в этом случае скорость третичного воздуха становится максимальной, особенно с учетом уменьшения проходного сечения сопел вторичного воздуха (по сравнению с котлом №2 на  $22 \%$ ). При этом во всем указанном диапазоне нагрузок появилась возможность работы топки с коэффициентом избытка организованный воздуха, приближающемся к  $1,0$  или даже больше этой величины, в том числе на номинальной нагрузке котла (из-за обеспечения запаса по тяге).

Следует отметить, что на номинальной нагрузке в режимную карту работы котла было рекомендовано более высокое давление холодного воздуха ( $235 \dots 240 \text{ кгс/м}^2$ ), тогда как на других котлах этот показатель не превышает  $90 \dots 95 \text{ кгс/м}^2$ . Присосы (перетечки) воздуха в газовый тракт конвективной шахты котла №3 сокращены в  $2,5 \dots 3$  раза по сравнению с

другими котлами, но, несмотря на повышенный расход организованного воздуха и увеличение поверхности второй ступени водяного экономайзера, обеспечен достаточный запас по тяге. Скорость истечения третичного воздуха (в опытах с положением шиберов вторичного воздуха  $20 \%$ ) составила на номинальной нагрузке около  $45 \text{ м/с}$ , вместо  $16,1 \text{ м/с}$  на котле №2 – при одинаковой принятой доле первичного воздуха  $0,45$  (с учетом повышенных присосов холодного воздуха в мельницы).

На рис. 11 приведены экспериментальные данные работы модернизированного котла №3 в зависимости от нагрузки в диапазоне  $20 \dots 50 \text{ т/ч}$  в оптимальных опытах, когда шиберы вторичного воздуха были открыты на  $20 \%$ .

На основании данных, полученных при испытаниях котла №3 (рис. 12), построена экспериментальная зависимость содержания горючих в летучей золе от величины избытка организованного воздуха в топке. Его оценка выполнена в соответствии с [11] на основе измерений присосов холодного воздуха на участке: топка – горизонтальный газоход ( $0,35$  при номинальной нагрузке).

Можно видеть, что при уменьшении избытка организованного воздуха от  $1,45$  до  $0,9$  содержание горючих в уносе на котле №3 плавно снижается от  $2$  до  $1,4 \%$ . При критическом значении  $\alpha_{\text{орг}} = 0,885$  происходит резкое увеличение  $\Gamma_{\text{ун}}$  до значений  $9,0$  и более.

На модернизированном котле №3 в эксплуатационном диапазоне нагрузок уровень мехнедожога в  $5 \dots 6$  раз меньше нормативных величин [11]. Следует отметить, что низкие величины мехнедожога имеют место при пониженной температуре горячего воздуха, в том числе на минимальной нагрузке котла  $20 \text{ т/ч}$ , когда эта температура составляла, по данным испытаний, около  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Согласно рекомендациям [11], чем меньше мощность котла, тем больше нормативный показатель мехнедожога. Если при  $D = 50 \text{ т/ч}$  он составляет  $2 \dots 3 \%$ , то при  $D = 25 \text{ т/ч}$  –  $5 \%$ . На модернизированном котле №3 при средней нагрузке  $20,3 \text{ т/ч}$  величина мехнедожога в среднем по четырем опытам равна  $0,3 \%$ . Таким образом, можно считать что в результате реконструкции котла №3 достигнуто многократное уменьшение мехнедожога по сравнению с нормативными показателями [11].

Объяснить указанные низкие значения мехнедожога на котле №3 на данном этапе исследования можно лишь предположительно. Не исключено, что компоновка горелок и сопел в соответствии с рис. 10 в совокупности с принципиальной конструкцией горелок согласно рис. 9 обеспечили не только раннее зажигание угольной пыли, но и повышенную интенсификацию ее дожигания. В результате этот процесс оптимизации дожигания угольной пыли происходит с существенно более высокой интенсивностью.

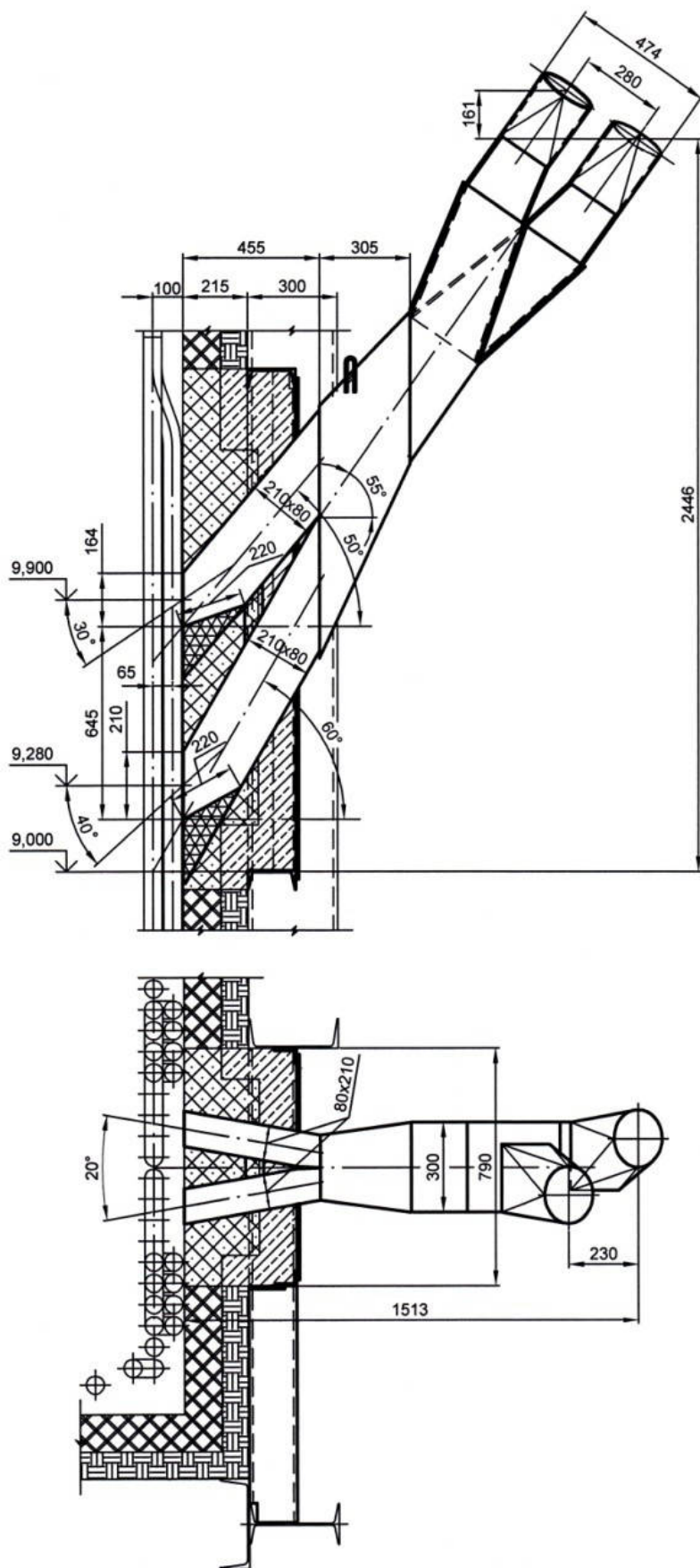


Рис. 9. Принципиальная конструкция прямооточной горелки модернизированного котла №3 после установки в каналах нижних козырьков.

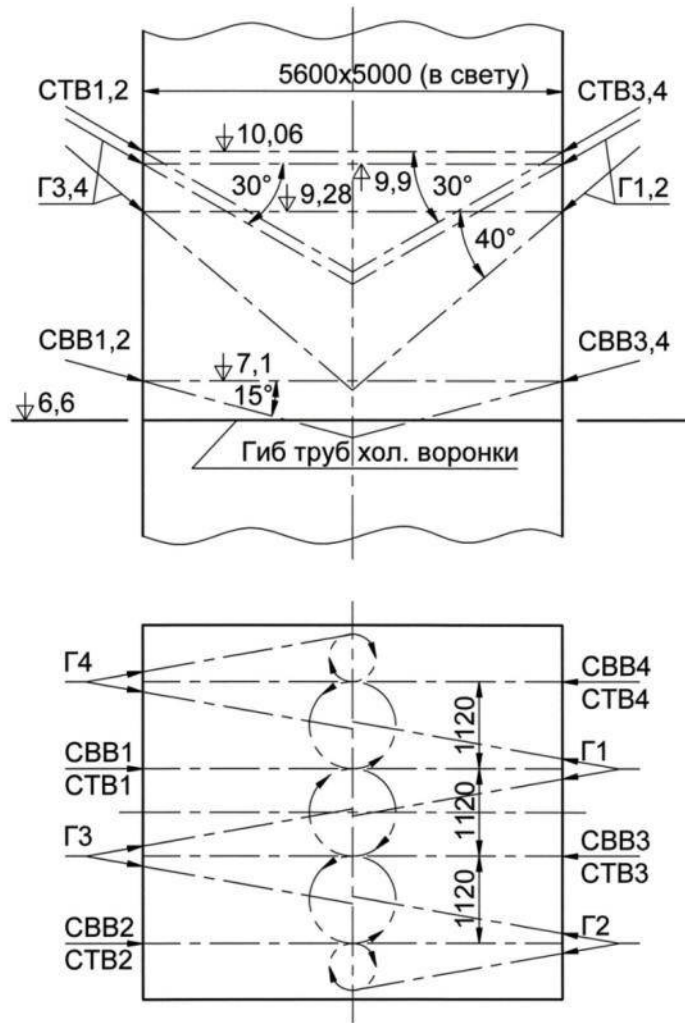


Рис. 10. Компоновочная схема прямооточных горелок и сопел модернизированного котла №3.

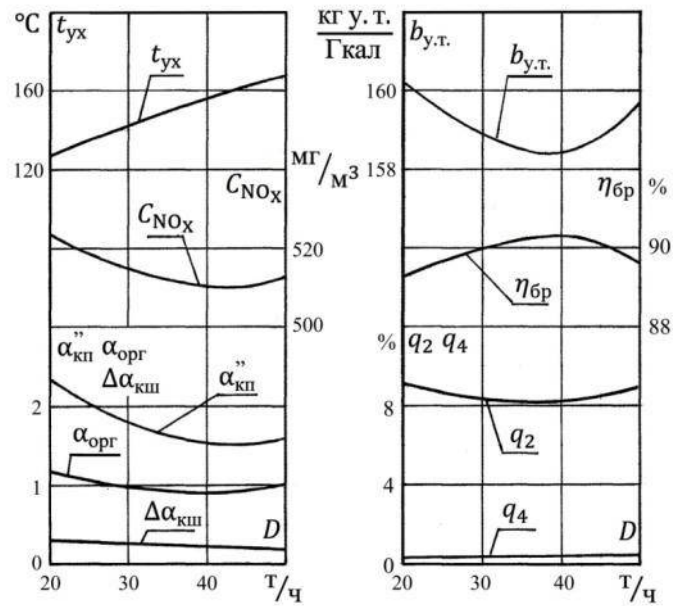


Рис. 11. Экспериментальные данные работы котла №3 в зависимости от нагрузки ( $D$ ).

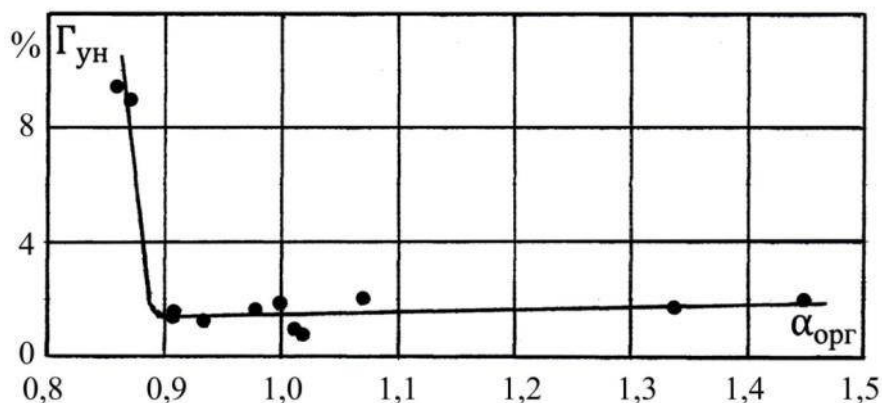


Рис. 12. Содержание горючих веществ в летучей золе ( $\Gamma_{ун}$ ) на котле №3 в зависимости от избытка организованный воздуха в топке ( $\alpha_{орг}$ )

Об аэродинамике факела можно сказать следующее. Согласно нижней проекции (рис. 10), в топке формируется система из трех больших горизонтальных вихрей и двух крайних малых. Продукты сгорания в любых двух соседних вихрях вращаются в противоположных направлениях. Этим поддерживается, во-первых, сравнительно большая крутка в вихрях, во-вторых, стабильное положение ядра факела и, в-третьих, скользящее движение горящих горелочных струй относительно фронтальной и задней стен топки. Можно также видеть, что загоревшиеся пылевоздушные струи, например, правых двух каналов горелки 1 ( $\Gamma_1$ ) и правых двух каналов горелки 4 ( $\Gamma_4$ ) попадают в задний большой вихрь, перемешиваются в нем с третичным воздухом и способствуют опускному движению продуктов сгорания в этом вихре. Поэтому в малой плоскости симметрии топки имеет место опускное движение факела, по крайней мере, на уровне отметок 9...7 м. Затем продукты сгорания перемешиваются с вторичным воздухом, образуя вертикальные

вихри под корнями пылевоздушных струй и поджигая их.

Продукты сгорания, содержащие все более догоревшую угольную пыль, в процессе рециркуляции выталкиваются более «свежими» их порциями в межструйные пространства горелок и сопел третичного воздуха с выходом вверх из зоны активного горения преимущественно вдоль боковых стен топки.

Большая роль в обеспечении низкого мехнедожога принадлежит горелочным струям и струям третичного воздуха, которые находятся на пути движения вверх продуктов сгорания и эжектируют их, т.е. создают внутреннюю рециркуляцию продуктов сгорания. Сравним эжектирующую силу этих струй приблизительно по параметру  $\Pi \cdot \rho \cdot W^2$ , где  $\Pi$  – периметр эжекции на выходе горелки (сопла) в перпендикулярном потоке сечения,  $\rho$  – плотность среды истечения,  $W$  – скорость истечения. Приближенная сравнительная оценка указанного параметра для горелок и сопел третичного воздуха на реконструированных котлах №№2 и 3 приведена в табл. 2.

Таблица 2. Оценка указанного параметра для горелок и сопел третичного воздуха на реконструированных котлах №№2 и 3.

Параметр, единица измерения	Котел К-50-14-250 в заводском исполнении	Котел №2 после реконструкции с увеличением в два раза поверхности второй ступени водяного экономайзера	Котел №3 после реконструкции с увеличением в два раза поверхности второй ступени водяного экономайзера
Количество горелок, шт., тип горелок	4, вихревые	4, прямоточные [1]	4 горелки по 4 канала, прямоточные (рис. 9, 10)
Количество сопел, шт.	нет	4 сопла вторичного и 4 сопла третичного воздуха [1]	4 сопла вторичного и 4 сопла третичного воздуха (рис. 10)
Длительная располагаемая максимальная нагрузка по тяге, т/ч	31-35	48-50	50
Минимальная располагаемая нагрузка без подсветки факела мазутом, (количество работающих мельниц)	31-32, (2 мельницы)	21-23, (1 мельница)	18-21, (1 мельница)
Содержание горючих в золе уноса, %, (нагрузка, т/ч)	10...12, (31...35)	7...9, (48...50)	0,8...2,1, (20...50)
КПД котла «брутто», %, (нагрузка, т/ч)	86,0-86,5, (31-35)	88,6-89,0, (48-50)	88,7-90,5, (20-50)

Коэффициент избытка организованного воздуха в топке на номинальной нагрузке	0,9	0,9	1,0
Доля первичного воздуха	0,45	0,45	0,45
Плотность аэросмеси ( $\rho_1$ ), кг/м <sup>3</sup>	1,357	1,357	1,357
Скорость аэросмеси ( $W_1$ ), м/с, без учета водяных паров	10,7	24,88	29
Периметр эжекции топочных газов струями аэросмеси с периферии горелок ( $\Pi_1$ ), м	- (эжектируется вторичный воздух)	6,84	7,406
Произведение: $\Pi_1 \rho_1 W_1^2$ , кг/с <sup>2</sup>	- (эжектируется вторичный воздух)	5746	8452
Плотность горячего воздуха ( $\rho_{гв} = \rho_2 = \rho_3$ ), кг/м <sup>3</sup>	0,529	0,529	0,612
Скорость вторичного воздуха ( $W_2$ ), м/с, на номинальной нагрузке	11,2	16,1	20
Периметр эжекции топочных газов вторичным воздухом ( $\Pi_2$ ), м	$\pi \times 0,7 \times 4 = 8,796$	5,228	4,587
Произведение: $\Pi_2 \rho_2 W_2^2$ , кг/с <sup>2</sup>	584	717	1123
Скорость третичного воздуха ( $W_3$ ), м/с	-	16,1	44,9
Периметр эжекции топочных газов струями третичного воздуха ( $\Pi_3$ ), м	-	2,576	1,872
Произведение: $\Pi_3 \rho_3 W_3^2$ , кг/с <sup>2</sup>	-	353	2310
Сумма: $\Pi_1 \rho_1 W_1^2 + \Pi_2 \rho_2 W_2^2 + \Pi_3 \rho_3 W_3^2$ , кг/с <sup>2</sup>	584	6816	11885
Расход условного топлива на выработанную Гкал, кг у.т./Гкал (нагрузка, т/ч)	166,3-165,3 (31-35)	161,4-160,7 (48-50)	160,2-158,4-159,7 (20-40-50)

Таким образом, на модернизированном котле №3 процессы эжекции продуктов сгорания корнями струй происходят в 20,3 раза с большей интенсивностью, чем на немодернизированных котлах, и в 1,74 раза с большей интенсивностью, чем на модернизированном котле №2. По-видимому, это и является одной из причин указанного значительного снижения мехнедожога на котле №3, особенно на низкой нагрузке.

Следует также учитывать, что на модернизированном котле №2 в горизонтальной проекции топки происходит по существу удар встречно направленных струй третичного воздуха и горелочных струй, тогда как на модернизированном котле №3 корни струй горелок эжектируют хвостовые массы струй третичного воздуха (см. нижнюю проекцию рис. 10). Таким образом, на котле №3 увеличению эжекции топочных газов корнями горелочных струй и зажиганию аэросмеси способствует компоновочная схема горелок и сопел, т.е. аэродинамика факела.

Измерения температуры факела на нагрузке, близкой к номинальной, выполненные оптическим пирометром с исчезающей нитью накаливания через гляделки сопел вторичного воздуха (отметка 7,1 м), показали, что она составила в среднем 1255 °С. В то же время температура факела в зоне зажигания, измеренная через два фронтальных лючка (отметка 8,7 м), была существенно выше и составила 1470 °С.

Удельные выбросы оксидов азота на повышенных нагрузках котла №3 находятся в пределах 480...535 мг/м<sup>3</sup>. На котле №2 в соответствии с [1] он удовлетворяет нормативу – 470 мг/м<sup>3</sup>. В процессе выполнения наладочных работ на котле №3 была выявлена принципиальная возможность снижения удельных выбросов NO<sub>x</sub> вплоть до нормативного уровня за счет уменьшения доли первичного воздуха (с 0,45 до 0,4...0,35). Однако при этом снижалась надежность работы пылесистем из-за увеличения вероятности их завала, в то же время известно, что эксплуатационный персонал предпочитает работать с запасом по надежности работы оборудования.

Для повышения экологической безопасности работы котла №3 целесообразно перейти на газовую (газовоздушную) сушку угольной пыли, поскольку в этом случае удельные выбросы NO<sub>x</sub> снизятся из-за уменьшения доли первичного воздуха. При увеличении скорости истечения третичного воздуха возрастет в квадратичной зависимости эжектирование его струями продуктов сгорания. В результате интенсивность перемешивания реагентов увеличится, что компенсирует фактор снижения температуры в топке из-за внешней рециркуляции газов. К тому же на модернизированном котле №3, как было установлено при испытаниях и при анализе расчетных данных (рис. 11, табл. 2), фактор увеличения скоростей истечения третичного воздуха является преобладающим по своему влиянию на мехнедожог.



#### 4. ПРЕДЛАГАЕМАЯ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ СХЕМА СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ НА КОТЛЕ №1

При разработке новой схемы было принято решение отказаться от выполнения на котле №1 сопл третичного воздуха по следующим причинам:

- топка котла №1 имеет высоту на 1,4 м меньше, чем на остальных котлах котельной г.°Таштагол, поэтому располагаемая длина траектории факела для перемешивания его хвостовой части с третичным воздухом недостаточна, что подтверждается наиболее высокой температурой газов за котельным пучком на этом котле;

- в [1] отмечено, что в связи с малой мощностью котлов К-50-14-250 и отсутствием узла механизированного удаления шлака с гидрозатвором, не удастся снизить присосы на участке топка – пароперегреватель до величин менее 0,3...0,35 в связи с чем, расход организованного воздуха ограничен, а скорости вторичного и третичного воздуха являются слишком низкими, чтобы обеспечить интенсивное перемешивание реагентов;

- попытка повысить скорость истечения третичного воздуха на котлах №№4 и 5 за счет усложнения сопл вторичного воздуха (использования отключаемых центральных каналов) не одобряется эксплуатационным персоналом, т.к. при работе на одной мель-

нице в случае погасания факела, либо прекращения подачи угля, нет времени для открывания соответствующих шиберов, когда необходимо осуществить быструю подсветку факела мазутом.

На рис. 13 представлена компоновочная схема горелок и сопл, которая будет внедрена на котле №1. Основные расчетные параметры этой компоновочной схемы приведены в табл. 3.

При выборе расчетных избытков воздуха на выходе из горелок и сопл учитывались результаты испытаний котлов №№2, 4 и 5, реконструированных по рекомендациям МЭИ [9]. Было выявлено, что при поступлении на котлы качественного угля марок Г и ГР (с умеренными влажностью и зольностью) избыток воздуха за пароперегревателем может быть снижен до 1,15...1,2, даже при уровне присосов в топку и пароперегреватель равном 0,35. При этом некоторое количество присосанного воздуха через нижнюю часть топки (например, через шлаковый комод) своевременно вовлекается в процесс горения, благодаря эффективной аэродинамической организации процесса горения. В результате этого содержание горючих в летучей золе не превышает нормативного уровня (14 %), если не происходит резкого ухудшения качества сжигаемого угля.

Таблица 3. Основные расчетные параметры компоновочная схема горелок и сопл, которая будет внедрена на котле №1

Наименование параметра	Ед. изм.	Горелка	Сопло
Количество	шт.	4	4
Отметка размещения	м	10,0	7,1
Угол наклона вниз	град.	40 (средний по высоте)	15
Расчетный избыток воздуха на выходе при: $\alpha_{\text{гп}} = 1,2$ ; $\Delta\alpha_{\text{т+гп}} = 0,35$	–	0,4	0,45
Суммарный расход воздуха	м <sup>3</sup> /с	35,2	10,32
Температура среды	°С	60	356
Вид выходного сечения	–	Вытянутый по вертикали прямоугольник (высота 750 мм, ширина 60 мм)	Эллипс (труба с внутренним диаметром 341 мм в косом срезе)
Суммарное условно-перпендикулярное сечение	м	0,138	0,365
Скорость на выходе	м/с	35,2	28,3

Рекомендуемый вариант принципиальной конструкции горелки представлен на рис. 14. На нижней проекции видно, что два пылепровода Ø194×7 мм (один от делителя, относящегося к мельнице А, а другой – от делителя мельницы Б) соединяются с помощью переходов в собирающий тройник. Выходное сечение этого тройника составляет: высота 300 мм и ширина 150 мм, как это видно на верхней проекции рис.°14.

Далее установлен корпус горелки, который сужается до ширины 60 мм и высоты 750 мм в выходном ее

сечении в косом срезе. По высоте корпус разделен наклоненной вниз перегородкой на два отсека с одинаковым проходным сечением. Продолжение перегородки образует угол 40° относительно горизонтальной плоскости, проведенной к разводке экранных труб под горелку на отметке 10 м. Всего в разводке труб под одну горелку задействовано восемь экранных труб.

На рис. 15 представлен общий вид модели для изучения топочной аэродинамики котла № 1. Модель выполнена в масштабе 1:19,5.

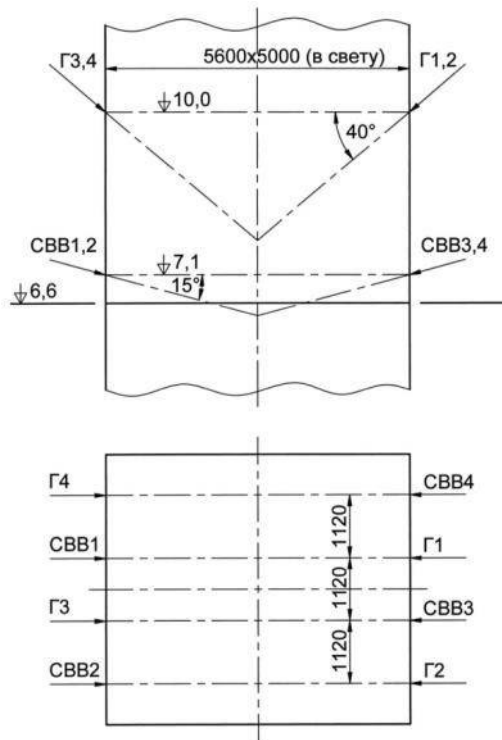


Рис. 13. Предлагаемая схема установки прямо-точечных горелок и сопел на котле №1.

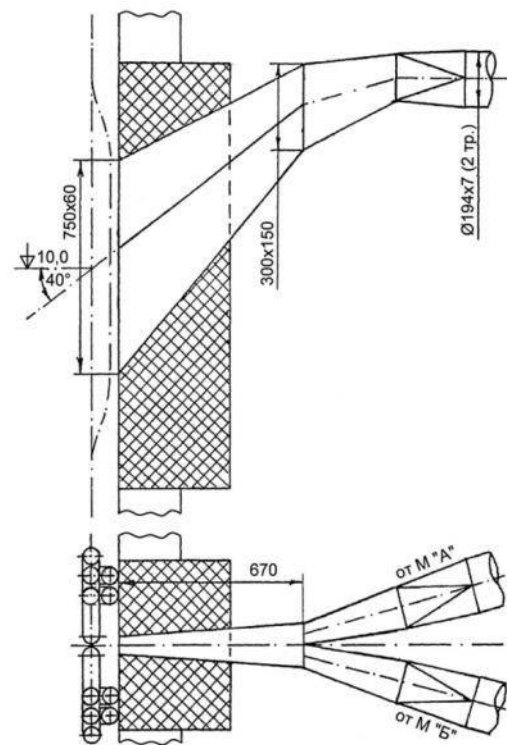


Рис. 14. Принципиальная конструкция прямо-точечной пылеугольной горелки для котла № 1.



Рис. 15. Общий вид экспериментальной установки по изучению топочной аэродинамики котла № 1.

На рис. 16 представлен характер движения горелочных струй в объеме модели с видом через фронтальную стенку и холодную воронку при искровых продувках каналов. Можно видеть, что горелочные струи движутся сначала слабо расширяющимися потоками. В центральной части модели расширение горелочных струй увеличивается, особенно после взаимодействия со струями встречно-смещенных горелок и сопел, установленных в одних вертикальных плоскостях с соответствующими горелками. Это происходит примерно на 1 м выше уровня стыка вертикальных экранов со скатами холодной воронки. После указанного взаимодействия хвостовые объемы двух центральных горелочных струй (Г 1 и Г 3 на рис. 16) заходят по

центру в холодную воронку и практически равномерно заполняют левую и правые части модели на подъемных участках движения. В то же время крайние горелочные струи (Г 2 и Г 4 на рис 16) в большей степени заполняют объем модели по ходу их первоначального движения, что объясняется тормозящим движением соседних встречных струй только с одной стороны.

Характер движения горелочных струй с видом через скаты холодной воронки (рис. 16) подтверждает вывод о равномерной и безопасной с точки зрения возможного шлакования экранов аэродинамики факела.

На рис. 17 с видом через фронтальную стенку и

через скаты холодной воронки представлен характер движения струй, вытекающих в объем модели через сопла. Можно видеть хорошее заполнение поперечных сечений модели.

Локальные объемы топливных и воздушных струй поднимаются в верхнюю часть модели по примерно аналогичным траекториям в достаточно равномерной пропорции. Это свидетельствует о надежном перемешивании первичного (в смеси с угольной пылью) и вторичного воздуха.

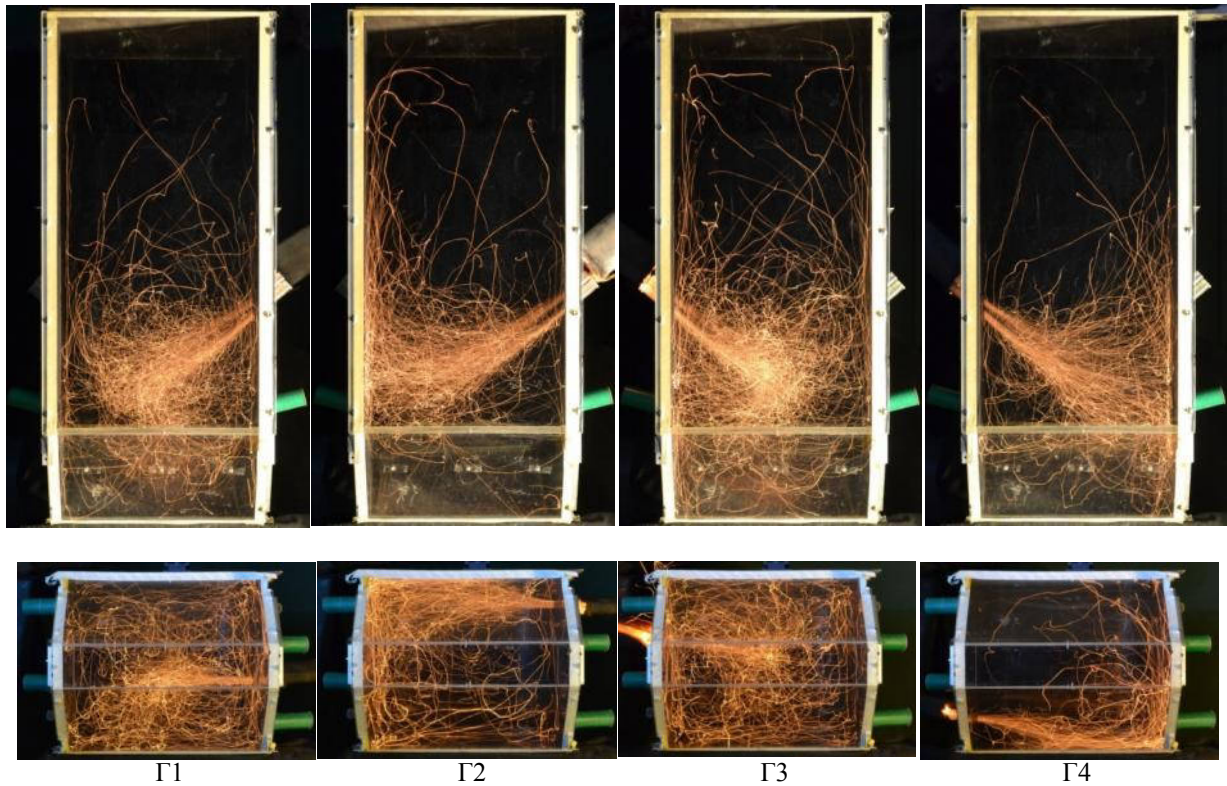


Рис. 16. Характер движения горелочных струй при искровых продувках (вид через фронтальную стенку и холодную воронку)

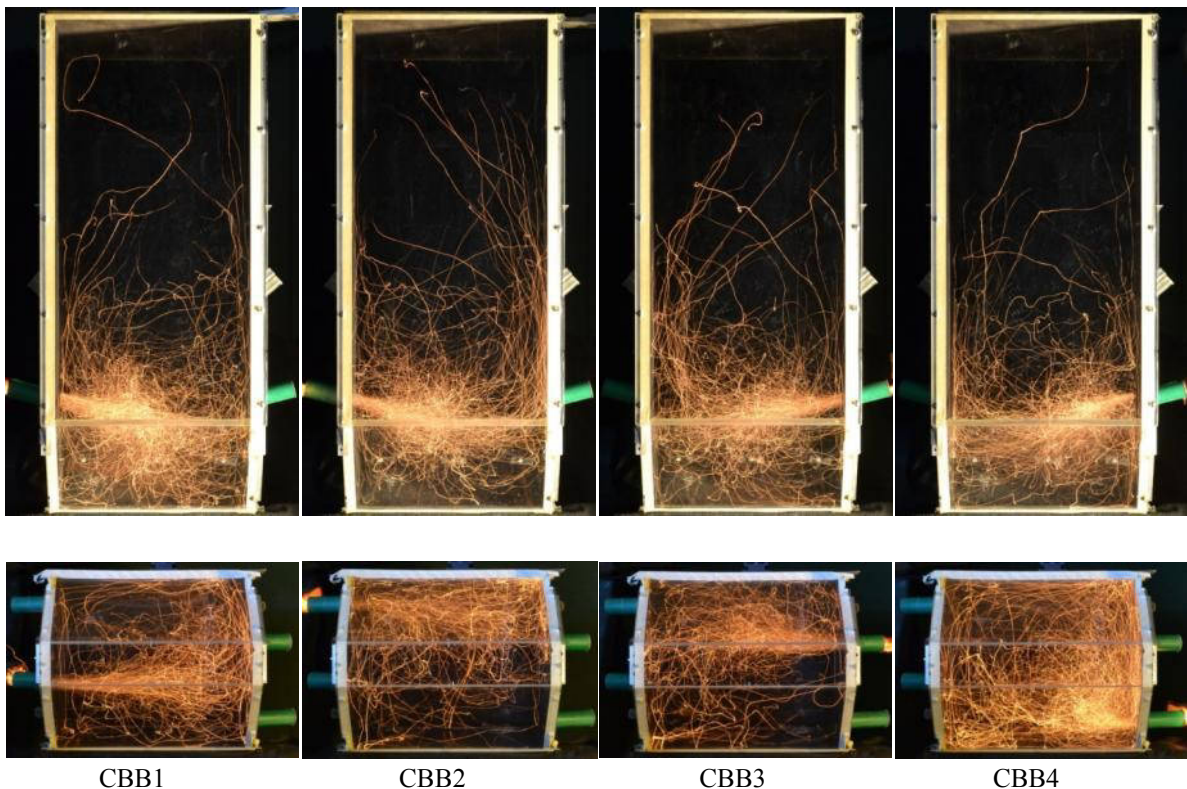


Рис. 17. Характер движения струй вторичного дутья при искровых продувках (вид через фронтальную стенку и холодную воронку)

## ВЫВОДЫ

1. По разработанным рекомендациям модернизированы четыре паровых котла К-50-14-250 производственно-отопительной котельной г. Таштагол, для которых была разработана и внедрена технология сжигания топлив в прямоточно-вихревом факеле в системе вертикальных и горизонтальных тангенциальных факелов (ВГТФ) при прямом вдувании угольной пыли в топку. В результате испытаний модернизированных котлов №№2-5 была установлена высокая эффективность разработанной технологии, а именно:

- после реконструкции значительно расширен маневренный диапазон котлов (минимальная нагрузка составила 30...40 % номинала);
- повышена до номинальной длительная максимальная располагаемая паровая нагрузка (за счет уменьшения загрязнения поверхностей нагрева конвективных шахт при повышении экономичности горения);
- на 2,5...4,5 % повышен КПД котлов (в основном за счет снижения величины механического недожога топлив на 2,5...3 % и уменьшения коэффициента избытка воздуха в уходящих газах);
- более чем на 400 мг/м<sup>3</sup> снижена концентрация удельных выбросов оксидов азота в дымовых газах;
- достигнута высокая устойчивость горения пылеугольного факела и, как следствие, снижен расход мазута на его подсветку;
- в результате реконструкции котел №3 стал иметь уникально-низкую для котлов с ТШУ величину мехнедожога (не более 0,5 % во всем эксплуатационном диапазоне нагрузок), что связано с оптимальной компоновкой на этом котле горелок, сопл вторичного и третичного дутья.

2. Технология сжигания в ВГТФ реализуется за счет установки на боковых стенах топки по встречно-смещенной схеме четырех наклоненных вниз прямоточных горелок, четырех сопл вторичного и четырех сопл третичного воздуха. На реконструированных котлах №№2-5 горелки отличаются формой выходных сечений, отметками размещения и углами наклона вниз. Сопла вторичного воздуха на всех котлах установлены ниже горелок, имеют различные углы наклона вниз и выполнены цилиндрическими. При растопках котлов они играют роль мазутных горелок. Сопла третичного воздуха на этих котлах также выполнены цилиндрическими и отличаются отметками их размещения и углами наклона вниз. Различия в компоновках и конструкциях топочно-горелочных устройств (прямоточных горелок и сопл) были обусловлены поиском оптимальных решений для повышения надежности, экологической безопасности и экономичности работы модернизированных котлов.

3. Аэродинамика струй горелок на всех модернизированных котлах характеризуется наличием трех тангенциальных горизонтальных факелов в проекциях на горизонтальное сечение топки, причем соседние факелы вращаются в противоположных направлениях, что способствует лучшему перемешиванию дымовых газов и выравниванию температур в объеме топки. В вертикальных плоскостях установки горелок их струи и струи вторичного и третичного воздуха на-

правлены тангенциально к вертикальным условным окружностям, образуя вертикальные факельные образования (зоны перемешивания).

4. Аэродинамические особенности факела, разработанные с помощью исследований на физических моделях, обеспечивают:

- рассредоточение ядра факела по ширине, глубине и высоте топки;
- высокую степень перемешивания реагентов, что обусловлено встречным характером взаимного движения соседних струй, а также продуктов сгорания в соседних вертикальных вихревых образованиях;
- интенсивный принудительный подвод топочных газов к корням горелочных струй, т.е. осуществление раннего зажигания угольной пыли;
- защиту боковых экранов топки от динамического давления факелов горелок противоположных стен за счет аэродинамического воздействия на них свежих струй ответных горелок и сопл;
- использование для горения значительного количества подсосанного в нижние части топок холодного воздуха в свежие струи горелок и сопл за счет эжекции (по оценкам, проведенным при наладочных испытаниях, величина присосов холодного воздуха на участке топка – котельный пучок на котлах К-50-14-250 составляет 30...35 %).

5. Наилучшие показатели по удельным выбросам оксидов азота на номинальной нагрузке имеют модернизированные котлы №№4 и 5 ( $\text{NO}_x = 370$  и  $430 \text{ мг/м}^3$  соответственно) в режимах с полным закрытием шиберов перед центральными каналами СВВ. Величина снижения удельных концентраций  $\text{NO}_x$  при закрытии шиберов составляет 75...140 мг/м<sup>3</sup> и относится к снижению генерации топливных оксидов азота, поскольку, по данным пирометрии факела, в зоне зажигания температура на 200...220 °С выше, чем в центральной зоне топки (в традиционных топках с вихревыми горелками разница температур обратная). В то же время температур газов в зоне зажигания не превышают 1450...1470 °С, т.е. они несколько ниже уровня, характерного для начала образования термических  $\text{NO}_x$ . Отмеченное снижение генерации топливных  $\text{NO}_x$  при уменьшении концентрации кислорода в зоне слияния горелочных струй и струй вторичного воздуха показывает, что процесс образования топливных  $\text{NO}_x$  является растянутым по времени и по траектории топливной струи. На первом из модернизированных котлов – котле №2 удельные выбросы оксидов азота были снижены с 800...850 до 460...465 мг/м<sup>3</sup>.

6. При проведении тепловых испытаний модернизированных котлов №№2-5 были определены оптимальные режимы сжигания топлив и разработаны режимные карты работы котлов.

7. Испытания реконструированного котла №1 по разработанным рекомендациям будут проведены в ноябре-декабре 2014 г.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. А.М. Архипов, А.А. Канунников, Ю.М. Липов и др.  
Оптимизация технологии сжигания кузнецкого угля на

- паровом котле К-50-14-250 отопительной котельной – Теплоэнергетика, 2010, № 12, с. 60-65.
2. **ГОСТ Р 50831-95.** Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования – М.: Издательство стандартов, 1996, 24 с.
  3. **В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.** Основы практической теории горения – Л.: Энергия, 1973, 264 с.
  4. **А.М. Архипов, В.Я. Путилов.** Влияние максимально быстрого прогрева и зажигания пыли кузнецких углей на комплексную эффективность работы энергетических котлов – Теплоэнергетика, 2010, № 6, с. 12-19.
  5. **Современные природоохранные технологии в электроэнергетике:** Информационный сборник / Под общей ред. В.Я. Путилова – М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 388 с.
  6. **А.М. Архипов, Ю.М. Липов, В.Б. Прохоров.** Использование прямоточных горелок и сопел в топках котлов: инновационный опыт МЭИ – М.: Издательство МЭИ, 2013, 240 с.
  7. **В.Р. Котлер.** Оксиды азота в дымовых газах котлов – М.: Энергоатомиздат, 1987, 144 с.
  8. **А.М. Архипов, В.Я. Путилов.** Влияние организации ступенчатого факельного сжигания кузнецких углей на удельные выбросы NOx – Главный энергетик, 2010, № 6, с. 31-40.
  9. **А.М. Архипов, А.А. Канунников, В.С. Киричков и др.** Влияние аэродинамики факела и эксплуатационных факторов на уровень мехнедожога на реконструированных котлах К-50-14-250 – Энергосбережение и водоподготовка, 2013, № 6, с. 38-43.
  10. **В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева.** Тепло-технические испытания котельных установок – М.: Энергоатомиздат, 1991, 416 с.
  11. **Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод)** / Под ред. Н.В. Кузнецова и др. – М.: Энергия, 1973, 296 с.