

УДК 621.182.243.4

## ДВУХСТУПЕНЧАТОЕ СЖИГАНИЕ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО ЭКИБАСТУЗСКОГО УГЛЯ НА МОДЕРНИЗИРОВАННОМ КОТЛЕ ПК-39-2М ЭНЕРГОБЛОКА 325 МВт (СТ. № 2) ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ АО «ЕЭК» Г. АКСУ (КАЗАХСТАН)

Серант Ф. А.<sup>1</sup>, Гордеев В. В.<sup>2</sup>, Саломасов Ю. М.<sup>2</sup>, **Коняшкин В. Ф.**,  
Квривишвили А. Р.<sup>1</sup>, Барташук Е. Г.<sup>1</sup>, Шихотинов А. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «ЗиО-КОТЭС» г. Новосибирск,

<sup>2</sup>ОАО «Подольский машиностроительный завод» (ЗиО) г. Подольск

### 1. Краткое описание котла

Новый модернизированный котел ПК-39-2М, установленный в 2011 году на Аксуской ЭС АО «ЕЭК» (Республика Казахстан), производства ОАО «Подольский машиностроительный завод» (ЗиО) предназначен для работы в блоке мощностью 325 МВт с паровой турбиной К-325-23,5-1 производства НПО «Турбоатом» (г. Харьков, Украина) и рассчитан на сжигание высокозольного экибастузского каменного угля. Общий вид котла представлен на рис. 1.

ПК-39-2М – это прямоточный котел сверхкритического давления, с промперегревом, двухкорпусный, Т-образной компоновки, с уравновешенной тягой, с твердым шлакоудалением. Подогрев воздуха осуществлен в трубчатом воздухоподогревателе.

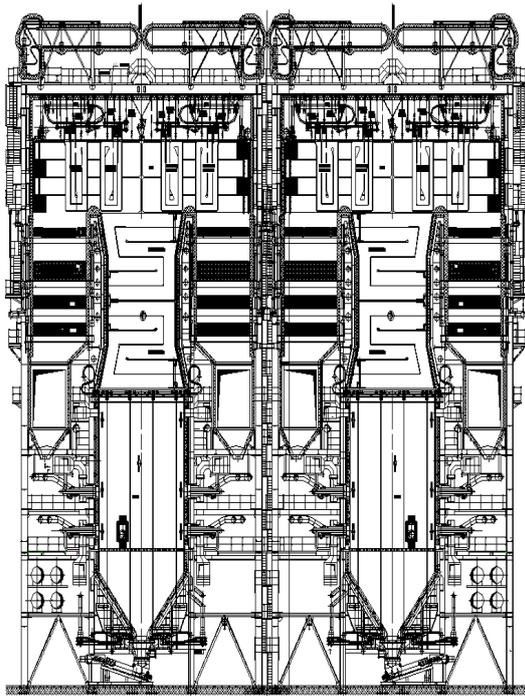
В системе золоулавливания установлены 5-типольные электрофильтры фирмы «ALSTOM».

Система пылеприготовления котла ПК-39-2М (рис. 2) выполнена по схеме прямого вдувания с 8-ю (по 4 на корпус) валковыми среднеходными мельницами МВС-195 производства ОАО «Тяжмаш».

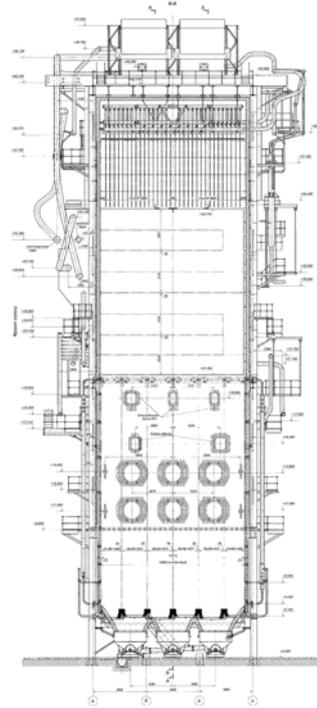
Основные технические характеристики котла представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Наименование параметров	Обозначение	Значения параметров
1.	Номинальная паропроизводительность котла, т/ч	$D_{\text{ном}}$	1050
2.	Расход вторичного пара, т/ч	$D_{\text{вт}}$	873,5
3.	Температура первичного пара за котлом, °С	$t_{\text{пе}}$	545
4.	Температура перегрева вторичного пара, °С	$t_{\text{вт}}$	545
5.	Давление первичного пара за котлом, кгс/см <sup>2</sup>	$P_{\text{пе}}$	255
6.	Давление вторичного пара на выходе из котла, кгс/см <sup>2</sup>	$P_{\text{вт}}$	40,5
7.	Температура вторичного пара перед котлом, °С	$t_{\text{хпп}}$	295
8.	Температура питательной воды, °С	$t_{\text{пв}}$	275
9.	КПД котла (брутто) расчетный при 100% $D_{\text{ном}}$ (по российским нормам), %	$\eta_{\text{к}}^{\text{бр}}$	92,5±0,5



а)



б)

Рис. 1 – Общий вид котла ПК-39-2М. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы.

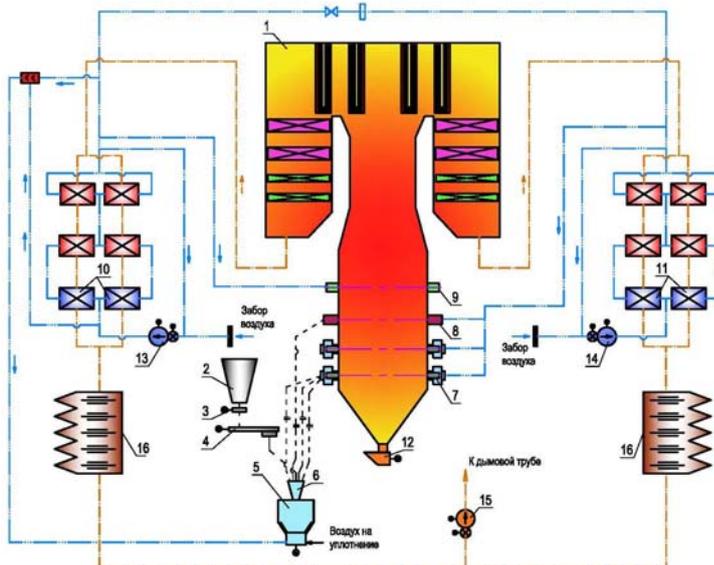


Рис. 2 – Принципиальная схема газовоздушного тракта и системы пылеприготовления.

- |   |          |
|---|----------|
| 1. Корпус котла                                       | 2 шт.    |
| 2. Бункер сырого угля                                 | 8 шт.    |
| 3. Плоский затвор                                     | 8 шт.    |
| 4. Питатель сырого угля                               | 8 шт.    |
| 5. Мельница   | 8 шт.    |
| 6. Делитель-пылеконцентратор                          | 8 шт.    |
| 7. Основные горелки                                   | 24 шт.   |
| 8. Восстановительные горелки                          | 8 шт.    |
| 9. Сопла третичного дутья                             | 12 шт.   |
| 10. Трубчатый воздухоподогреватель первичного воздуха | комплект |
| 11. Трубчатый воздухоподогреватель вторичного воздуха | комплект |
| 12. Шлакоудалитель                                    | 6 шт.    |
| 13. Вентилятор первичного воздуха                     | 2 шт.    |
| 14. Вентилятор вторичного воздуха                     | 2 шт.    |
| 15. Дымосос   | 2 шт.    |
| 16. Пятипольный электрофильтр                         | 2 шт.    |
- Количество указано на котел

## 2. Схема сжигания

При реконструкции котла сохранена топка прямоугольного сечения с проектными размерами в плане 10800×7820 мм со встречным расположением вихревых горелок в 2 яруса.

Выполненные конструктивные проработки и дополнительный анализ показали, что более целесообразно сохранить 2-х ярусное расположение горелок по 12 штук на каждый корпус. Расстояние между ярусами горелок сохраняется, так как тепловые характеристики топки находятся в пределах рекомендуемых нормами для экибастузского угля (расчетная -  $q_{лг}=1,22$  МВт/м<sup>2</sup>; рекомендуемая -  $q_{лг}=1,1 \dots 1,35$  МВт/м<sup>2</sup>; расчетная -  $q_F=4,8$  МВт/м<sup>2</sup>; рекомендуемая -  $q_F=6,4$  МВт/м<sup>2</sup> расчетная -  $q_{Fяр}=2,4$  МВт/м<sup>2</sup>; рекомендуемая -  $q_{Fяр}=2,3 \dots 3,2$  МВт/м<sup>2</sup>).

Схема расположения горелок и сопл показана на рис. 3.

Разработанные технические решения (приводятся для одного корпуса), необходимые для достижения концентрации NO<sub>x</sub> в дымовых газах ≤600 мг/нм<sup>3</sup> (при н.у. и O<sub>2</sub>=6%), а также для обеспечения безшлаковочной работы топки и повышения устойчивости горения на сниженных нагрузках заключаются в следующем:

- 12 основных низкоэмиссионных вихревых пылеугольных горелок (рис. 4) располагаются в 2 яруса на боковых стенах топочной камеры по встречной схеме. Конструктивно горелки выполнены с центральным подводом аэросмеси и каналами вторичного воздуха. Потoki аэросмеси и вторичного воздуха закручиваются аксиальными завихрителями. При этом завихритель вторичного воздуха в наружном канале выполнен с поворотными лопатками.

- Над горелками основных ярусов устанавливаются 4 сбросные горелки, расположенные по тангенциальной схеме таким образом, что в топке организуется вихревое движение пылевоздушной смеси для лучшего смешения и выгорания топлива. В сбросные горелки подается пыль в количестве ~ 0,07V<sub>р</sub> и сушильный агент в количестве 0,4V<sub>аэп</sub>, при этом избыток воздуха на сбросных горелках на основных режимах работы составляет  $\alpha_{сбр} \geq 2$ .

- Организована вертикальная ступенчатость сжигания за счет подачи части вторичного воздуха (20% от теоретически необходимого) через сопла третичного дутья (OFA). Сопла OFA расположены выше яруса сбросных горелок по тангенциальной схеме в «противокрутку» по отношению к вращению струи сбросного агента (для лучшего смешивания воздуха с пылегазовой средой и более полного выгорания топлива).

- Каждая мельница работает на 3 горелки одного яруса и одну сбросную горелку, что позволяет на сниженных нагрузках повысить устойчивость горения топлива при отключении одной или двух мельниц.

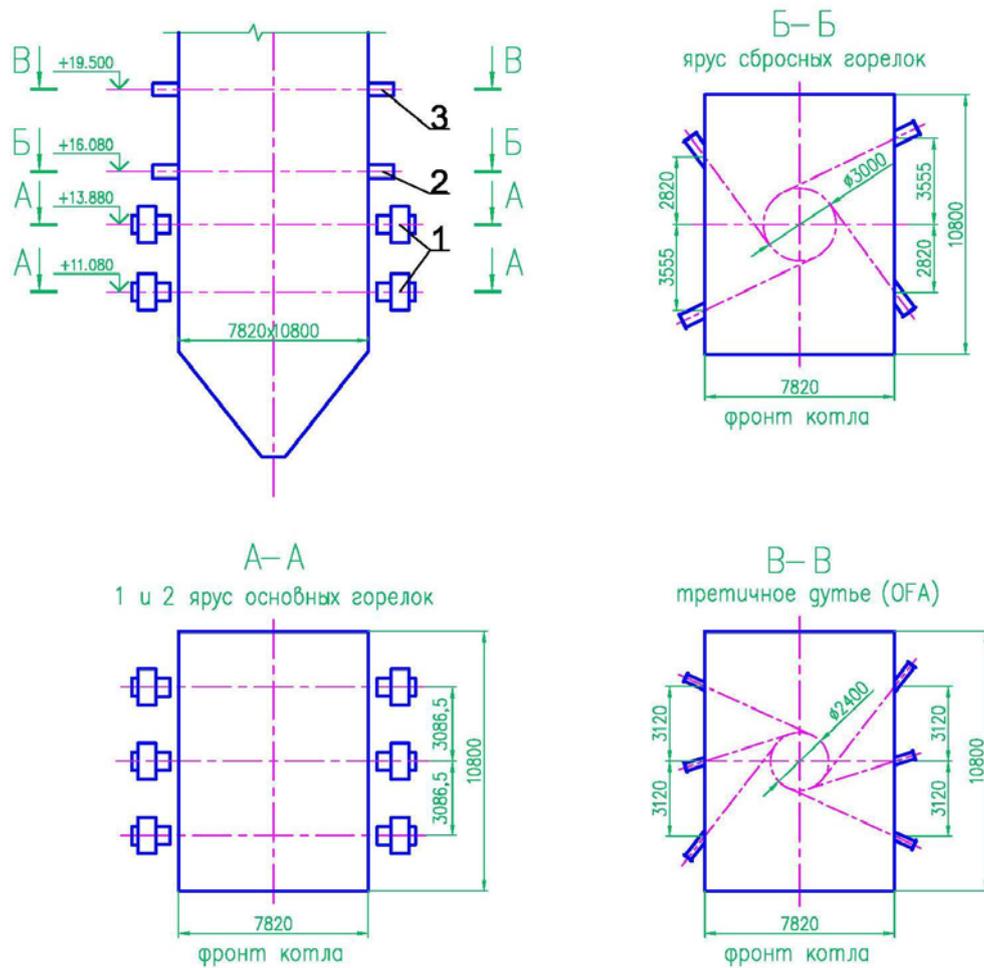


Рис. 3 – Схема расположения основных горелок, сопел сброса и третичного воздуха (OFA).  
 1 – основные горелки, 2 – сбросные горелки, 3 – сопла третичного дутья (OFA)

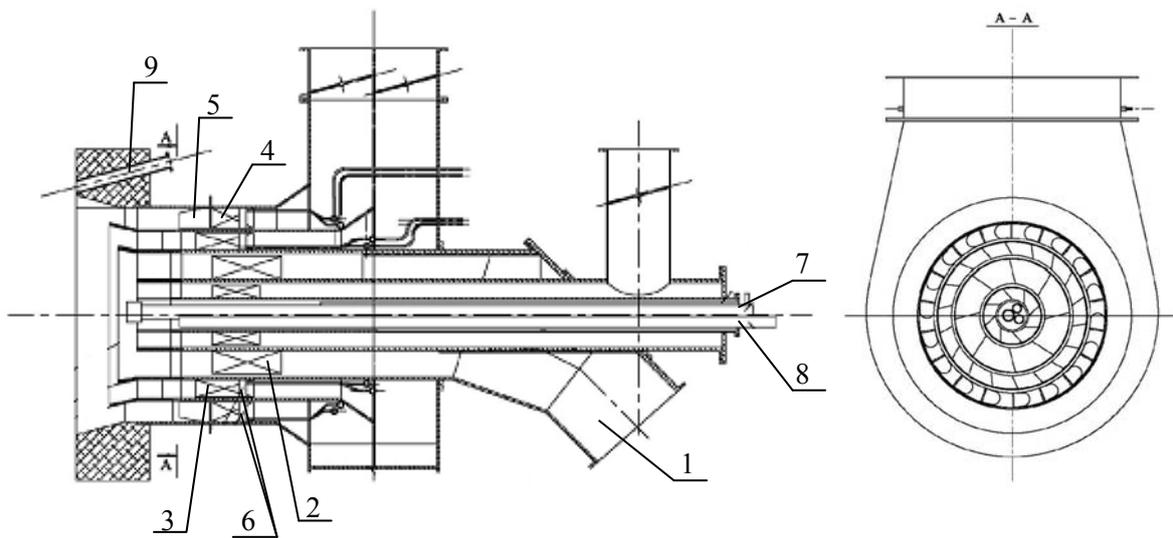


Рис. 4 – Вихревая горелка котла ПК-39-2М.  
 1 – канал аэросмеси, 2 – завихритель аэросмеси, 3 – завихритель внутреннего потока вторичного воздуха, 4 – завихритель наружного потока вторичного воздуха, 5 – поворотные лопатки, 6 – расходомерное устройство, 7 – растопочная мазутная форсунка, 8 – запальник, 9 – труба установки датчика контроля факела.

Среднеходные мельницы, оборудованные центробежными сепараторами, позволяют получить сравнительно тонкую пыль ( $R_{90} \leq 10\%$ ,  $R_{200} < 1\%$ ), что требуется для принятой схемы сжигания экибастузских углей.

В связи с повышенной вентиляцией среднеходной мельницы МВС-195 в предложенной схеме за каждой мельницей установлен центробежный делитель-пылеконцентратор, конструкции ЦКТИ (рис. 5), который по проекту должен был разделить и подать 93% топлива и 60% первичного воздуха в основные горелки и 7% топлива и 40% первичного воздуха в сбросные горелки.

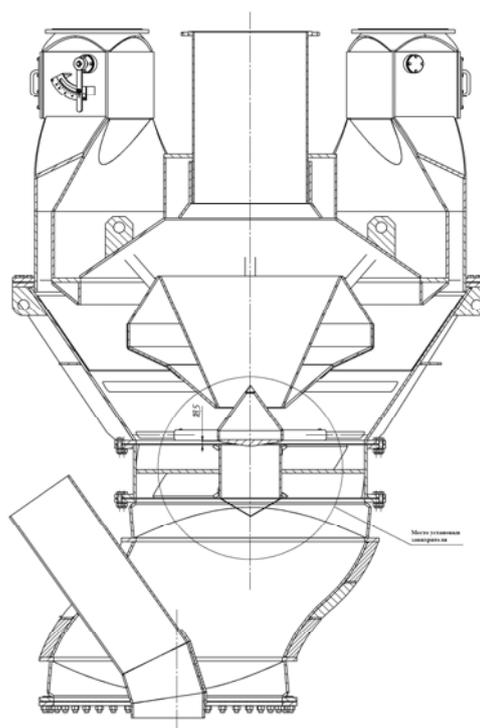


Рис. 5 – Делитель-пылеконцентратор

### 3. Моделирование топочного процесса.

На этапе проектирования котла ПК-39-2М численное моделирование топочных процессов выполнялось для проверки принимаемых проектно-технических решений по топочно-горелочным устройствам.

Для этой цели во всем топочном объеме были рассчитаны: поля скоростей; поля температур; концентрации кислорода; концентрации оксидов азота; выгорание топлива; тепловые потоки на стенки топки.

Моделирование выполнялось с помощью программы Ansys Fluent. Геометрия топочной камеры, использованная для расчета, изображена на рис. 6. Здесь и далее все размеры даны в метрах. Также на рис. 6 приведены направления крутки вихревых горелок.

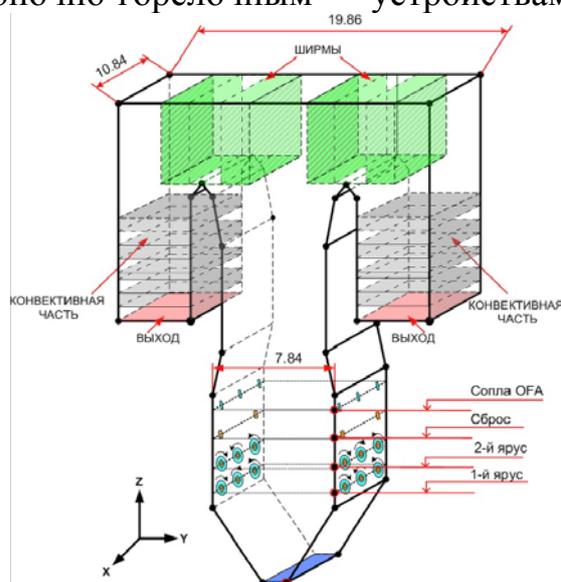


Рис. 6 – Расчетная модель топочной камеры котла.

Результаты расчета для номинальной нагрузки котла представлены в виде графика (рис. 7) средних по сечению значений температуры, концентрации кислорода, оксидов азота и выгорания топлива.

На рис. 8 приведены основные характеристики факела в пригорелочной зоне. Как видно из рис. 8(а), на выходе из горелки имеется развитая зона приосевой рециркуляции, благодаря которой к устью горелки притекают высокотемпературные ( $1200 \dots 1300^\circ\text{C}$ ) и обескислороженные

( $O_2=2...3\%$ ) топочные газы. При этих условиях обеспечиваются устойчивое воспламенение топлива и активное выделение и горение летучих составляющих на коротком (приустьевом) участке горелочной струи. На рис. 8(в) хорошо видна восстановительная зона по оси горелки, где высокая концентрация летучих и низкая концентрация кислорода, что способствует частичному восстановлению  $NO_x$  из подсосываемых топочных газов. Наличие восстановительной зоны вблизи грелок способствует общему снижению  $NO_x$  на первом ярусе горелок ( $\approx 540 \text{ мг/нм}^3$  приведенных к  $O_2=6\%$ ).

Развитие факела по высоте топки показано на рис. 9, где приведены поля температуры и концентраций  $NO_x$  и  $O_2$  в поперечном и продольном сечениях топки. Как видно из рис. 9(а) зона максимальных температур факела находится на уровне второго яруса горелок, где максимальные температуры составляют  $\leq 1700^\circ\text{C}$ , а средние температуры не более  $1520^\circ\text{C}$ . Средняя температура на выходе из топки (перед ширмами) –  $1180^\circ\text{C}$ .

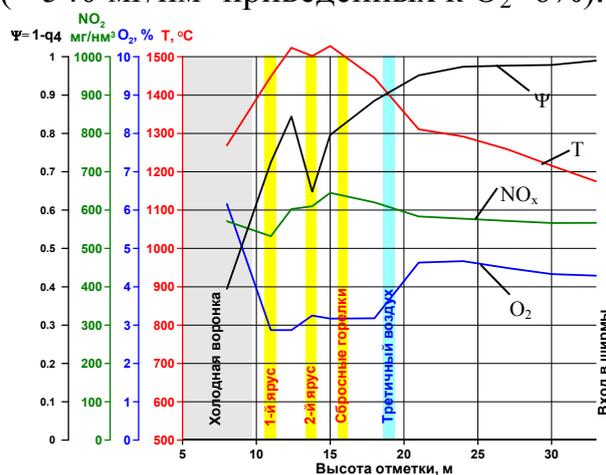


Рис. 7 – Средние по сечению температуры, концентрации кислорода, оксидов азота и выгорание топлива.

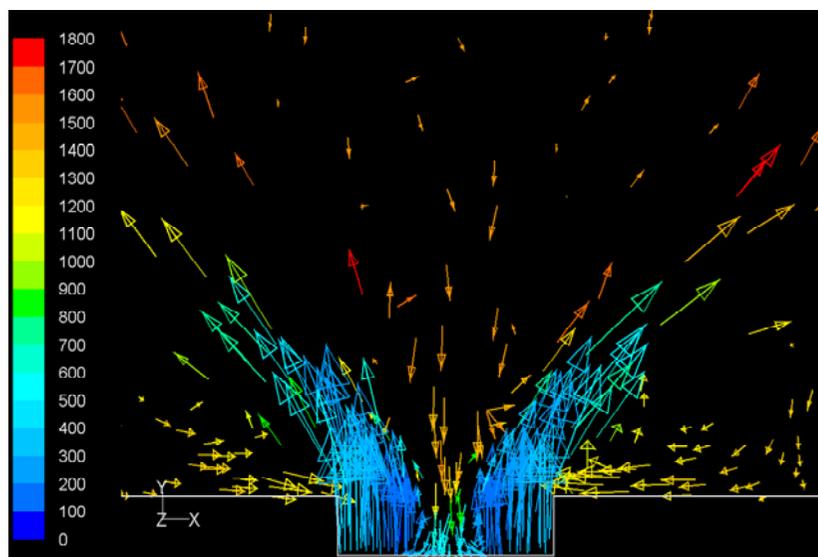
Характерной особенностью принятой схемы сжигания, а также конструкций и режимов работы и сбросных горелок является наличие обедненной кислородом центральной зоны топки (рис. 9(б)), что способствует меньшему образованию  $NO_x$ , но ухудшает условия выгорания топлива. Принятые тангенциальная схема и скорости ввода струй сбросного и третичного воздуха способствует интенсивному подводу кислорода в центр топки и эффективному их смешению с топливом. В результате по данным расчета ожидаемая степень выгорания топлива составила  $\approx 98\%$  (рис. 7).

Результаты расчетов образования  $NO_x$  представлены в виде полей на рис. 9(в). Как видно, более высокие уровни  $NO_x$  характерны для областей повышенных локальных температур и концентраций кислорода, т.е. на первом и втором ярусах основных горелок.

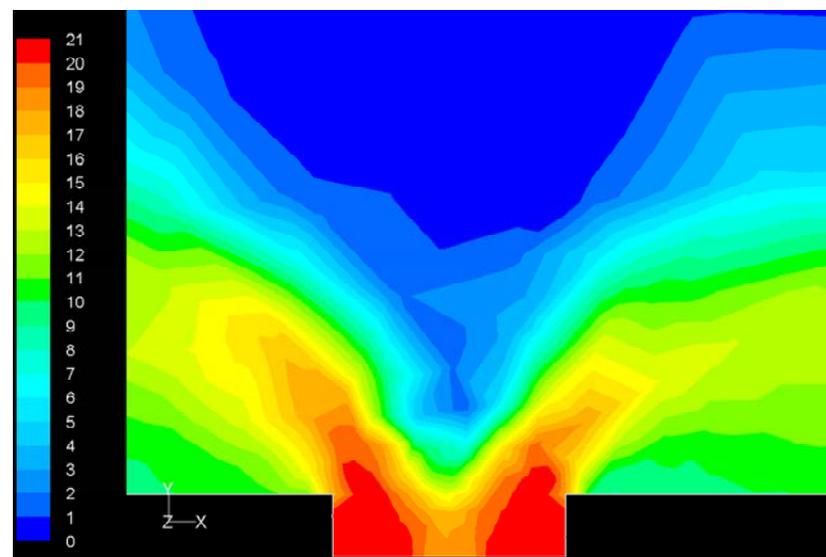
В целом выбранная схема сжигания топлива обеспечивала расчетный уровень  $NO_x$  на выходе из топки  $\approx 580 \text{ мг/нм}^3$  (при  $O_2=6\%$ ).

#### 4. Результаты испытаний котла.

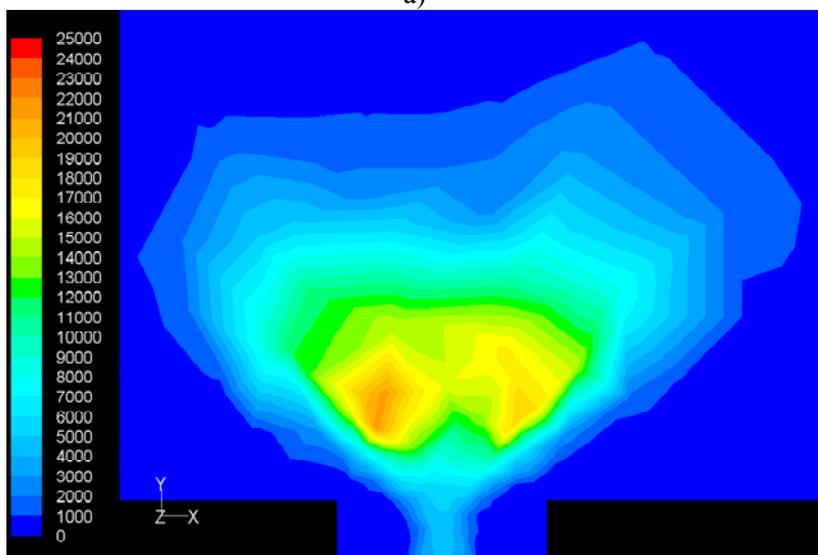
После ввода в 2011 году котла в эксплуатацию «ЗиО-КОТЭС» выполнил комплекс наладочных работ и режимных испытаний котла. В период проведения этих работ качество угля подаваемого на котел характеризовалось следующим техническим составом:  $W^r = 3,6...5,1\%$ ;  $A^r = 37,0...41,2\%$ ;  $Q_i^r = 3925...4612 \text{ ккал/кг}$ , при средних величинах  $W_{cp}^r = 4,4\%$ ,  $A_{cp}^r = 39,1\%$ ,  $Q_{i\text{cp}}^r = 4269 \text{ ккал/кг}$ . Как видно, технический состав сжигаемого



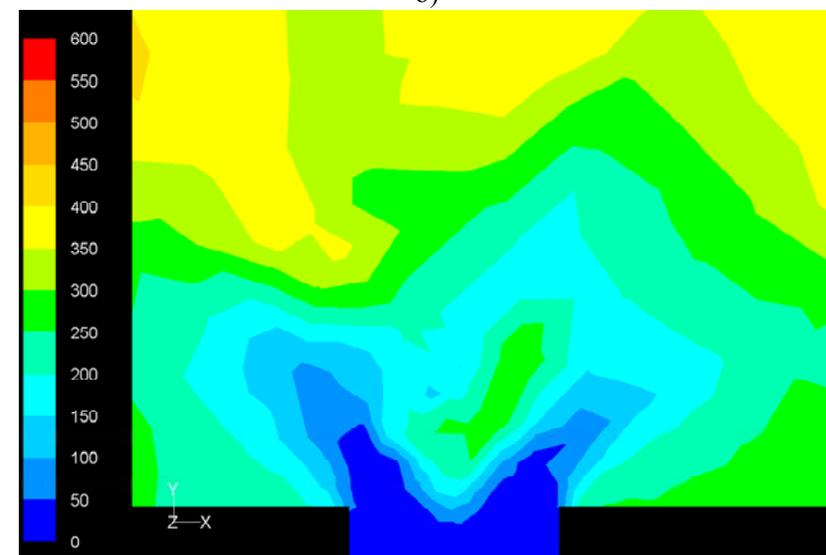
а)



б)



в)



г)

Рис. 8 – Поля скоростей, цвет соответствует температуре (а), кислорода, % (б), концентраций летучих, ppm (в) и NOx, ppm (г) на выходе из горелки.

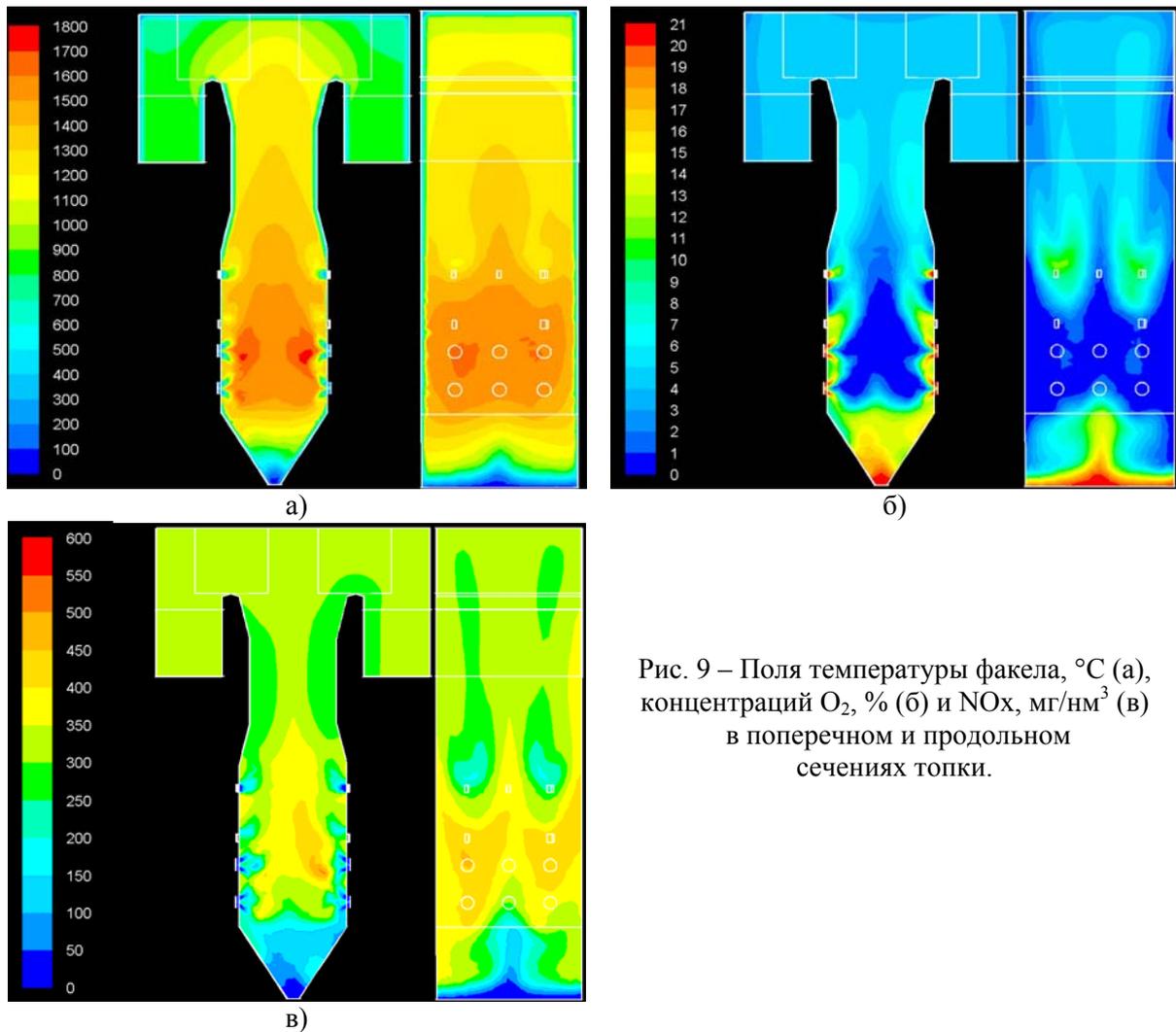


Рис. 9 – Поля температуры факела, °С (а), концентраций O<sub>2</sub>, % (б) и NO<sub>x</sub>, мг/м<sup>3</sup> (в) в поперечном и продольном сечениях топки.

на котле угля отличался от проектного (расчетного) меньшей влажностью и большей калорийностью.

В ходе наладочных работ особое внимание уделено отработке конструкции и режимов работы пыледелителей-концентраторов. Для обеспечения проектных показателей по разделению пыли и сушильного агента потребовалась его частичная реконструкция, которая позволила получить степень разделения пыли 98...96% в основные горелки и 2...4% в сбросные горелки, а сушильного агента 59...54% и 41...46% соответственно. Достигнутая максимальная относительная неравномерность раздачи от одной мельницы к трем основным горелкам по топливу 19% и по сушильному агенту 15% (средние величины по мельницам). Тонкость помола пыли к основным горелкам  $R_{90}=8...10\%$ , а к сбросным горелкам 1...3%.

Результаты проведенных испытаний котла приведены в таблице 2 в сравнении с проектными значениями и данными рассмотренного выше трехмерного (расчетного) моделирования топочного процесса.

Основные показатели котла ПК-39-2М Аксуской ЭС АО «ЕЭК»

Наименование	Значение показателей		
	Проектные	Моделирование	Испытания
Паровая нагрузка котла, т/ч	1050	1050	1030
Давление острого пара за котлом, кгс/см <sup>2</sup>	255	255	250
Температура острого/вторичного пара, °С	545/545	545/545	544/545
Температура газов на выходе из топки, °С	1247	1180	1200
КПД котла (брутто), %	92,5±0,5	-	91,9
Потери тепла с механическим недожогом, %	1,0	2,0	2,1
Концентрация NO <sub>x</sub> за котлом (при O <sub>2</sub> =6%), мг/нм <sup>3</sup>	≤600	570	593...611
Концентрация СО за котлом (при O <sub>2</sub> =6%), мг/нм <sup>3</sup>	≤50	≤35	30

Анализ полученных результатов показывает достаточно близкую сходимость данных моделирования и эксперимента, особенно по экологическим показателям и выжигу топлива, что подтверждает правомочность использования принятой модели расчета при разработке технологий и конструкций топочно-горелочных устройств для новых и реконструируемых котлов.

В целом полученный положительный опыт эксплуатации и данные испытаний котла ПК-39-2М подтверждают, что заложенные в конструкцию котла основные технические решения по организации ступенчатого сжигания обеспечили достижение проектных технико-экономических показателей котла при сжигании высокозольных экибастузских углей и работе котла во всем эксплуатационном диапазоне нагрузок (60...100%).

Учитывая положительные результаты работы первого модернизированного котла ПК-39-2М, станцией (Аксуской ЭС АО «ЕЭК») принято решение и заключен контракт на установку следующих двух котлов этой модификации.