

УДК 621.181

## **КОТЕЛ С КОЛЬЦЕВОЙ ТОПКОЙ ДЛЯ БЛОКА 660 МВт НА СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ СЖИГАНИИ БУРЫХ ШЛАКУЮЩИХ УГЛЕЙ**

*<sup>1</sup>Серант Ф.А., <sup>1</sup>Белоруцкий И.Ю., <sup>2</sup>Ершов Ю.А.,  
<sup>2</sup>Гордеев В.В., <sup>1</sup>Ставская О.И., <sup>1</sup>Кацель Т.В.*

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

*<sup>2</sup>ОАО «Подольский машиностроительный завод», г. Подольск*

В статье представлены основные технические решения применимые при проектировании котлов с кольцевой топкой, предназначенных для работы на бурых углях перспективного майкубенского разреза (Казахстан) в составе энергоблоков мощностью 660 МВт на суперсверхкритические параметры. Приведены результаты трехмерного моделирования процессов горения, наглядно показывающие преимущества данного типа топки по сравнению с традиционной топкой при сжигании сильношлакующих бурых углей. Представлено расположение основного и котельно-вспомогательного оборудования в существующей котельной ячейке блока 500 МВт Экибастузской ГРЭС-1. Уделено внимание вопросам уменьшения вредных выбросов.

Наряду с крупнейшим и давно разрабатываемым в Казахстане Экибастузским угольным бассейном в той же Павлодарской области имеются большие запасы бурых майкубенских углей. По данным ТОО «Карагандагипрошахт и К» балансовые запасы этих углей составляют 2,1 млрд.т. Плановая разработка майкубенских углей ведется с 1987 г. В 2011г добывалось 7,5 млн.т и запланировано в 2020 году увеличение их добычи до 15,64 млн.т/год. В настоящее время майкубенские угли поставляются и сжигаются в качестве замещающего непроектного топлива на ряде промпредприятий и электростанций в Казахстане, России и Украине. Дальнейшая разработка такого крупного месторождения предполагает наличие постоянных крупных потребителей.

Для пылевидного сжигания на электростанциях Майкубенский разрез предлагает уголь трех групп поставки: с зольностью  $A^d=13\%$ ; 22% и 28% при рабочей влажности  $W_f \approx 18\%$ . Майкубенский уголь обладает высокой реакционной способностью: при среднем выходе летучих 41÷42,9% теплота сгорания составляет 4500 – 4540 ккал/кг. Теплоценность летучих при зольности 13-28% соответствует примерно 1900 ккал/кг. По уровню взрываемости пыли этот уголь относится к третьей группе ( $K_T=1,5 \div 3,5$ ), как большинство бурых углей. Хотя географически майкубенский разрез расположен не столь далеко от экибастузского, эти угли (см. табл. 1–3) существенно различаются. Так в отличие от шлакующего и взрывоопасного майкубенского бурого угля экибастузский каменный уголь относится к марке «СС», первой группе взрывоопасности, более трудновоспламеняемый и практический нешлакующий.

Таблица 1. Состав топлива

Уголь	W <sup>r</sup>	A <sup>r</sup>	S <sup>r</sup>	C <sup>r</sup>	H <sup>r</sup>	N <sup>r</sup>	O <sup>r</sup>	Q <sub>i</sub> <sup>r</sup>	V <sup>daf</sup>
Майкубенский	21,0%	11,5%	0,9%	50,0%	3,6%	0,8%	12,2%	4400 ккал/кг	41,0%
Экибастузский	6,3%	39,6%	0,6%	43,0%	2,7%	0,8%	7,0%	3917 ккал/кг	31,4%

Таблица 2. Химический состав зольного остатка

Уголь	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Майкуб. уг.	45,33	21,65	0,91	14,75	5,27	2,86	2,71	0,91	4,25	-	0,78
Экиб. уг.	59,2	29,6	1,3	6	1,6	0,6	0,6	0,2	-	0,2	0,7

Таблица 3. Температурные характеристики золы

№ п/п	Наименование	Обозначение	Значение	
			Майкуб. уг.	Экиб. уг.
1.	Температура начала деформации золы, °С	t <sub>A</sub>	1200	1270
2.	Температура начала размягчения золы, °С	t <sub>B</sub>	1380	>1500
3.	Температура жидкоплавкого состояния золы, °С	t <sub>C</sub>	1470	>1500

Поэтому опытное сжигание майкубенских углей в высокотеплонапряженных топках котлов П-57 на блоках 500 МВт Экибастузской ГРЭС-1 не позволило из-за шлакования обеспечить нагрузку выше 70% от номинальной.

Для надежной и экономичной работы котла на майкубенских углях необходимы умеренные теплонапряжения сечения топки, обеспечивающие низкий уровень температуры газов в ядре факела и вверху топки.

По просьбе Экибастузской ГРЭС-1 для сжигания майкубенских шлакующих углей ЗиО-КОТЭС совместно с Подольским машиностроительным заводом проработали профиль котла с кольцевой топкой применительно к блоку 660 МВт на суперсверхкритические параметры пара.

Технические решения по котлу разработаны с учетом опыта работы котла Е-820 с кольцевой топкой на Ново-Иркутской ТЭЦ (г. Иркутск). Данный котел производительностью 820 т/ч установлен в существующей ячейке для котла 500 т/ч и успешно работает уже в течение 12 лет. Проведенные испытания котла при сжигании шлакующего канско-ачинского (ирша-бородинского) и азейского углей полностью подтвердили работоспособность и эффективность кольцевой топки (КПД котла – 93,5%, выбросы NO<sub>x</sub> < 400 мг/нм<sup>3</sup>, отсутствие шлакования топки и конвективных поверхностей нагрева).

Прямоточный котел с кольцевой топкой Пп-1800-27,0-610/610 рассчитан на паропроизводительность 1800 т/ч с давлением пара 27 МПа и температурой острого и вторичного пара 610°С. Котел с промежуточным перегревом пара, однокорпусный, закрытой Т-образной компоновки, газоплотный. Общий вид котла и план кольцевой топки представлены на рис. 1, 2. Основные расчетные параметры котла приведены в таблице 4.

Принципиальной особенностью конструкции котла является кольцевая топка, представляющая собой восьмигранную призматическую камеру (рис. 1, 2) с условным диаметром по наружной камере 23 м, внутри которой соосно по всей

высоте установлена полая восьмигранная экранированная вставка с условным диаметром 11,5 м. Под условным диаметром понимается диаметр окружности, условно вписанной в восьмигранное сечение камеры. Стены внутренней и наружной камер выполняются из цельносварных газоплотных панелей из труб  $\text{Ø}32 \times 6$  (12X1МФ) с шагом 48 мм. Во внутренней камере установлена основная центральная строительная колонна (пилон), лестницы и помосты.

В нижней части топки наружные экраны отгибаются внутрь и образуют восьмикатную холодную воронку. При принятых размерах топки теплонапряжение объёма и сечения топки составляют соответственно  $111,7 \text{ кВт/м}^3$  и  $4,34 \text{ МВт/м}^2$ . Температура топочных газов в ядре факела (на выходе из зоны активного горения) и вверху топки составляет  $\sim 1380^\circ\text{C}$  и  $\sim 1090^\circ\text{C}$  соответственно.

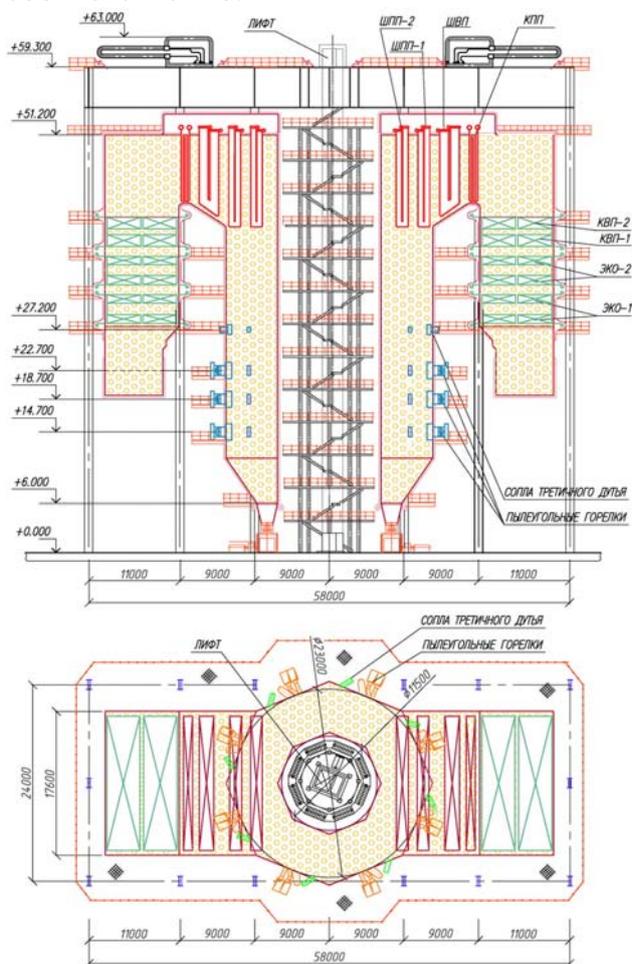


Рис. 1. Общий вид котла с кольцевой топкой по типу Пп-1800-27,0-610/610

При этом уровне температур обеспечивается бесшлаковочный режим сжигания майкубенских углей.

Топка оборудуется 24-мя основными регулируемыми низкоэмиссионными прямооточными горелками, расположенными на 8-ми наружных гранях топки в 3 яруса по тангенциальной схеме (по касательным к внутренней вставке).

Конструкция горелки позволяет создать систему горизонтальной стадийно-ступенчатой подачи вторичного воздуха для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  и обеспечить симметричную аэродинамику в топке.

В основу конструкции регулируемой прямооточной горелки положена аэродинамическая регулировка (рис. 2).

Канал вторичного воздуха делится на два вертикально-щелевых подканала: средний, ось которого параллельна оси канала аэросмеси, и боковой, расположенный под острым ( $30 \dots 45^\circ$ ) углом к нему. Такая кон-

струкция горелки позволяет путем перераспределения вторичного воздуха по этим каналам в достаточно широких пределах изменять направление горелочных струй и интенсивность смешения первичного и вторичного потоков [1]. Для уменьшения опасности коррозии наружных экранов топки и улучшения условий зажигания аэросмеси вытекающая из горелки струя аэросмеси располагается со стороны факела, а струя вторичного воздуха – со стороны наружного экрана. Использование регулируемых горелок позволяет также варьировать условия теплообмена в кольцевой топке.

На уровне нижнего яруса горелок установлено 8 растопочных мазутных горелок. Для организации ступенчатого сжигания (для снижения  $\text{NO}_x$ ) в верхней части топки расположены воздушные сопла «третичного» дутья (OFA). Для интенсификации смешения и ликвидации остаточной крутки факела струи OFA вводятся в топку по тангенциальной схеме в направлении, противоположном вращению основного факела.

Таблица 4. Технические параметры котла Пп-1800-27,0-610/610

Наименование величины	Значение
Расход свежего пара, т/ч	1804
Параметры свежего пара	
• давление, МПа	27,0
• температура, °С	610
Температура питательной воды на входе в котел, °С	301
Параметры промежуточного перегрева пара:	
• температура на выходе, °С	610
• температура на входе, °С	345
• расход пара, т/ч	1431
• давление на выходе из котла, МПа	4,4
КПД котла брутто, %	92,0
Расход натурального топлива, т/ч	276,1

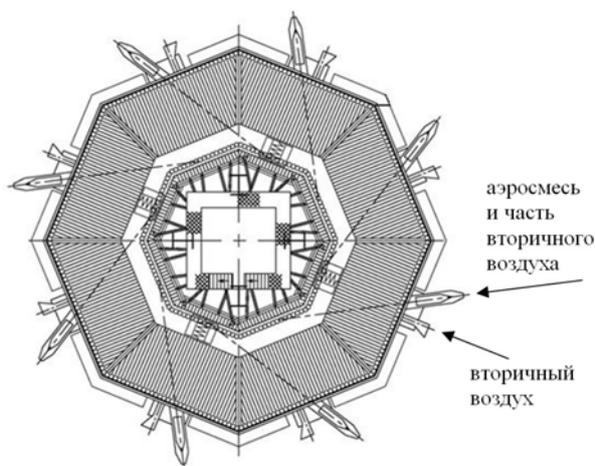


Рис. 2. Кольцевая топка котла. План.

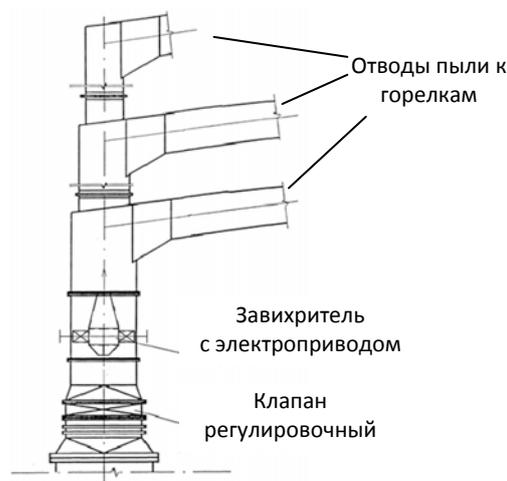


Рис. 3. Центробежный регулируемый делитель пыли.

Система пылеприготовления прямого вдувания с 8-ю молотковыми мельницами и газовой сушкой топлива.

На напорной стороне каждой мельницы за сепаратором установлены клапан и центробежный делитель пыли с поворотными лопатками (рис. 3). Из пыледелителя аэросмесь подводится к 3-м ярусам вертикального горелочного блока. Поворотные лопатки пыледелителя позволяют перераспределять загрузку топливом ярусов горелок по высоте топки.

Снижение окислов азота до уровня  $\leq 300\div 350 \text{ мг/нм}^3$  достигается за счет применения следующих технологических мероприятий:

– тангенциальная компоновка горелочных устройств. Наличие в таких топках вихревого движения газов в горизонтальной плоскости способствует притоку к устью горелок обедненных кислородом топочных газов, что позволяет уменьшить содержание кислорода на участке выхода и горения летучих;

– организация горизонтальной стадийности за счет конструкции горелки: отвода отдельно от основного потока части (~30%) воздуха. Возможна дополнительная установка боковых сопел;

– подача 18–22% воздуха в верхнюю часть топки (OFA).

По схеме пароводяного тракта подведенная к котлу питательная вода делится на 2 потока, каждый из которых расположен в одной половине топки и одной конвективной шахте Т-образного котла. В свою очередь каждый поток в котле делится на 2 подпотока, которые до узла встроенных полнопроходных сепараторов имеют несколько точек полного перемешивания в пределах потока. Питательная вода, пройдя экономайзер и подвесные трубы конвективной шахты, поступает в экраны внутренней вставки, которые вся среда проходит одним ходом с весовой скоростью  $1950 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ . После внутренней вставки среда поступает в наружные экраны, которые проходит в два хода с той же весовой скоростью  $1950 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ . Пройдя наружные экраны топки пар направляется в паропаровой теплообменник (ППТО), служащий для основного регулирования температуры вторичного пара. После ППТО среда проходит узел всторенных полнопроходных сепараторов, экраны потолка и ограждающих стен, две ступени ширм и поступает в выходную ступень конвективного пароперегревателя. Перед ширмами первой ступени и перед выходной конвективной ступенью в каждом подпотоке имеются впрыскивающие пароохладители для регулирования температуры первичного пара. Поверхности нагрева ступеней пароперегревателя, работающие при сверхкритических параметрах пара, выполняются из аустенитных сталей 12X18H12T с температурой применения до  $640^\circ\text{C}$  и 10X13Г12БС2Н2Д2 (ДИ-59) с температурой применения до  $650^\circ\text{C}$ .

Выполненные в программном комплексе ANSYS «FLUENT» расчёты позволили получить детальные характеристики топочного процесса, такие как распределение скорости и температуры, поля концентраций  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ , дискретных фаз, тепловые потоки в сечениях топки, а также проследить траектории частиц.

Анализ приведенных (рис. 4, 5) результатов расчетов показывает:

– при принятых конструктивных и режимных параметрах в кольцевой топке обеспечивается благоприятная аэродинамика, при которой факел движется в основном в середине кольцевого канала без активного наброса на внутренний и наружный экраны. Вращательная составляющая скорости в зоне горелок первого-третьего ярусов составляет максимум 17-18 м/с. Подача струй третичного воздуха (OFA) в количестве 22-26% с противокруткой значительно гасит крутку основного факела и обеспечивает сравнительно равномерное поле скоростей в выходном сечении топки.

– максимальный уровень температуры факела наблюдается в зоне выше 3-го яруса горелок и составляет  $\sim 1380^\circ\text{C}$ , что близко к результатам позонных расчетов. Температура газов вверху топки на уровне  $\sim 1090^\circ\text{C}$ .

– максимальные температуры загрязненной стенки на внутренней вставке и наружных экранах примерно близки и составляют 790-860°С, что обеспечивает благоприятные условия для их бесшлаковочной работы.

– максимальные тепловые потоки также наблюдаются в зоне над третьим ярусом горелок и составляют 225-250 кВт/м<sup>2</sup>.

– несмотря на сравнительно низкие температуры факела в кольцевой топке за счет интенсивного смесеобразования обеспечивается сравнительно полное выгорание топлива (на уровне 98,4-98,7%).

Поскольку при газовой сушке топлива максимальные температуры в топке не превышают 1400°С, при которых в факеле не образуются воздушные NO<sub>x</sub>, в данном режиме работы кольцевой топки возникают благоприятные условия, обеспечивающие весьма низкий уровень оксидов азота (< 300 мг/нм<sup>3</sup> при O<sub>2</sub> = 6%).

Необходимо отметить, что в кольцевой топке обеспечивается высокая равномерность (до 90%) тепловосприятности экранов по ее высоте и распределения температур в поперечных сечениях топки за счет равномерного омывания экранов потоком топочных газов.

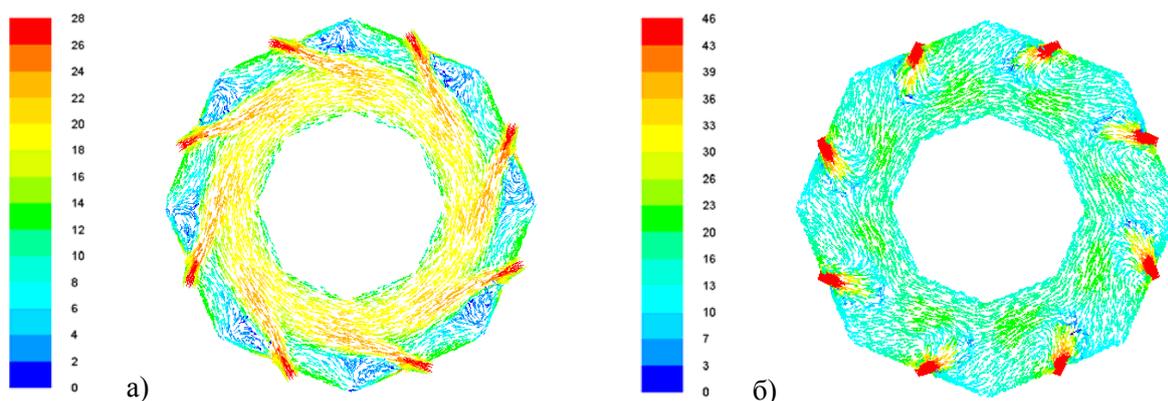


Рис. 4. Поля скоростей по сечениям топки. а) – на уровне 2-го яруса горелок, б) – на уровне яруса сопел OFA, м/с

Результаты расчетов наглядно демонстрируют основное преимущество котлов с кольцевой топкой по сравнению с котлами с традиционной топкой. Установка в центральной части топки большой поверхности нагрева – внутренней вставки, а так же дополнительная интенсификация теплообмена за счет организации тангенциального движения факела и увеличения конвективной составляющей, обеспечивают сравнительно низкий ( $\leq 1380^{\circ}\text{C}$ ) уровень максимальных температур в топке (рис. 5). Это позволяет избежать интенсивного шлакования стен топки и охладить дымовые газы к выходу из топки.

Таким образом, дымовые газы попадают в конвективные шахты достаточно охлажденными, чтобы не вызывать активного шлакования поверхностей нагрева. По результатам теплового расчета на выходе из топки температура газов находится на уровне 1090°С, а на входе в поворотную камеру ~850°С. При этом, несмотря на низкие температуры, в кольцевой топке обеспечивается устойчивое воспламенение и экономичное выгорание топлива.

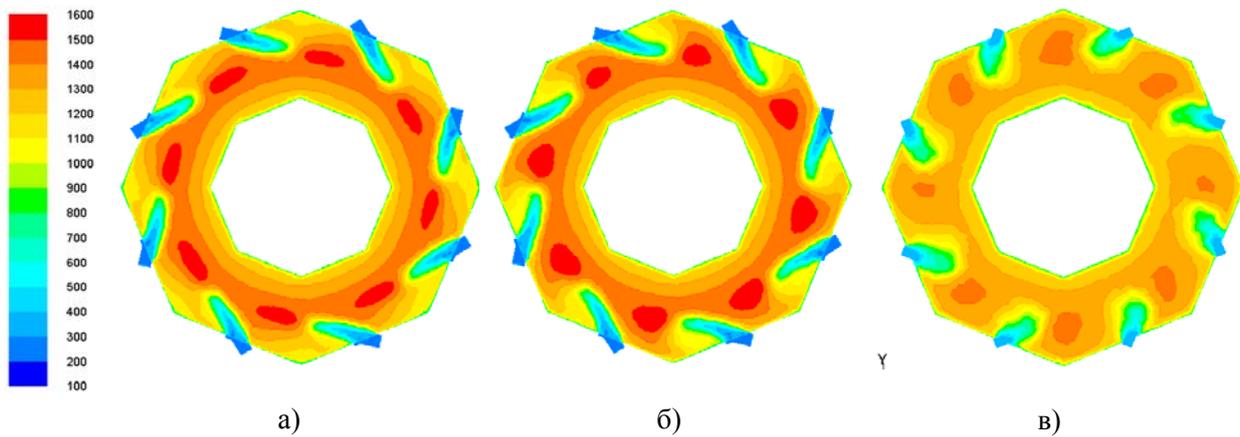


Рис. 5. Поля температур по сечениям топки. а) – на уровне 2-го, б) – на уровне 3-го ярусов горелок, в) – на уровне яруса сопел OFA, °C

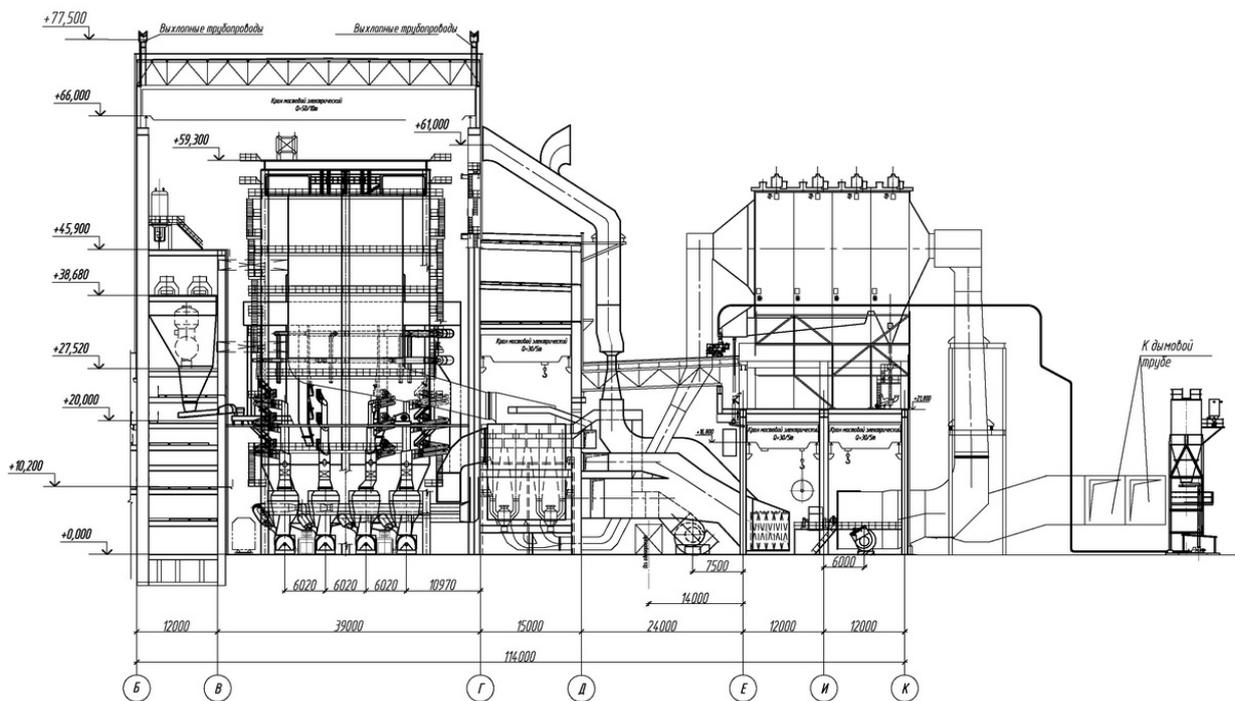


Рис. 6. Компоновка котла Пп-1800-27,0-610/610 в существующей котельной ячейке блока 500 МВт Экибастузской ГРЭС-1. Продольный разрез.

На рис. 6 представлена компоновка котла Пп-1800-27,0-610/610 с котельно-вспомогательным оборудованием в существующей котельной ячейке блока 500 МВт Экибастузской ГРЭС-1. Компоновочные решения предусматривают реконструкцию тракта топливоподдачи, установку новых бункеров сырого угля в области деаэрационной этажерки и переход на газовую сушку топлива с установкой дымососов рециркуляции газов.

## Заключение

1. Для энергоблока 660 МВт на суперсверхкритические параметры пара ( $P_{\text{пл}}=27$  МПа;  $t_{\text{пл/вл}}=610/610^{\circ}\text{C}$ ) предложен Т-образный котел с кольцевой топкой, рассчитанный на сжигание шлакующих бурых углей.
2. Кольцевая топка позволяет за счет большого тепловосприятия внутренней вставки обеспечить необходимые по условиям безшлаковочного режима температуру газов в ядре факела и в верху топки.
3. При использовании существующего главного корпуса станции перевод энергоблока 500 МВт Экибастузской ГРЭС-1 на сжигание шлакующего майкубенского бурого угля с сохранением или увеличением мощности возможен только при установке котла с кольцевой топкой.
4. Выполненные проработки подтверждают перспективность использования котлов с кольцевой топкой при их установке в существующей строительной ячейке станции для замены старых отработанных котлов с сохранением или даже с увеличением мощности и параметров нового энергоблока.

## Литература

1. Серант Ф.А., Устименко Б.П., Змейков В.Н., Кроль В.О. Кольцевые топки пылеугольных котлов. Алма-Ата, Наука, 1988, 168с.
2. Серант Ф.А., Разработка и исследование кольцевой топки, ее промышленное внедрение и испытания на котле паропроизводительностью 820 т/ч. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск, 1999, 58с.
3. Богомоллов В.В., Артемьева Н.В. Теплотехнические и физические характеристики майкубенского угля // Тепловые электростанции, 2007, №6.