

УДК 662.933.2:614.715

РЕКОНСТРУКЦИЯ КОТЛА П-57-3М ЭНЕРГОБЛОКА 500 МВТ ЭКИБАСТУЗСКОЙ ГРЭС-1 С ПЕРЕВОДОМ НА ДВУХСТУПЕНЧАТОЕ СЖИГАНИЕ ЭКИБАСТУЗСКОГО УГЛЯ

¹Серант Ф.А., ¹Квривишвили А.Р., ²Гордеев В.В.,
²Грузнов А.В., ¹Межов Е.А., ¹Лавриненко А.А.

¹ЗАО «ЗиО-КОТЭС», г. Новосибирск,

²ОАО «Подольский машиностроительный завод (ЗиО)», г. Подольск

Экибастузская ГРЭС-1 – крупнейшая тепловая электрическая станция, расположенная в Павлодарской области Казахстана. В ее состав входят 8 энергоблоков мощностью 500МВт с котлами П-57-3М производства ОАО «ЗиО». Проектным топливом является высокозольный нешлакующий экибастузский каменный уголь (A^r до 45%, $W^r=5-9\%$, $V^{daf}=31-33\%$, $Q_i^r=3800-4000$ ккал/кг), который относится к I группе взрывоопасности (по Российским стандартам).

Высокая забаластированность пылевоздушной смеси золой топлива значительно увеличивает время прогрева горючей части топлива, затягивает и ухудшает стабильность горения на пониженных нагрузках и требует наличия в ядре факела достаточно высоких температур для достижения хороших показателей по выгоранию топлива. Зола экибастузского угля является высоко абразивной, что накладывает особые требования по надежности и абразивной стойкости оборудования пылеприготовления, топочно-горелочных устройств и конвективных поверхностей нагрева.

В 70-х годах прошлого столетия при проектировании котлов П-57 во главу угла ставилась задача обеспечения стабильности воспламенения, горения и максимального выгорания экибастузского угля в котле, которая обеспечивалась высоким теплонапряжением сечения топочной камеры (до $6,3$ МВт/м²) и вихревыми горелочными устройствами с развитой зоной рециркуляции горячих топочных газов к устью горелки. Высокотемпературное сжигание угля при избытке воздуха на горелках выше единицы привело к высокому уровню генерации оксидов азота ($\sim 1200-1400$ мг/нм³).

В рамках проекта по восстановлению энергоблока ст. № 2 Экибастузской ГРЭС-1 Заказчиком были выдвинуты требования по обеспечению нормативов выбросов оксидов азота (не более 600 мг/нм³) технологическим методами за счет реконструкции системы сжигания без увеличения высоты здания и максимальном сохранении существующего каркаса котла.

ОАО «Подольский машиностроительный завод» с участием ЗАО «ЗиО-КОТЭС» выполнил проект модернизации котельной установки с котлом П-57-3М ст. №2 (рис.1). Для обеспечения требований Заказчика в проект были заложены следующие технические решения по системе топочно-горелочных устройств и пылеприготовления:

– сечение (по осям труб экранов $9,84 \times 21,84$ м) и объем топочной камеры модернизируемого парового котла на базе П-57-3М оставлены без изменения;

- в верхней части топки установлены двусветные экраны (щеки) для дополнительного снижения температуры на выходе из топки;
- сохранена система пылеприготовления прямого вдувания с размолотом топлива в 8 молотковых мельницах типа ММТ-2600/2550/590К и установкой специального делителя-пылеконцентратора. При этом обеспечивается следующее деление пылевоздушной смеси: ~85-90% угольной пыли и ~65-70% сушильного агента в основные пылепроводы; ~15-10% угольной пыли и ~35-30% сушильного агента в сбросные пылепроводы. Максимально длительная нагрузка котла обеспечивается при работе 7 пылесистем. Максимальная производительность мельницы составляет 47 т/ч при коэффициенте размолоспособности $K_{ЛО}=1,35$, вентиляции $V_{вент}=90$ тыс.м³/ч и тонине помола $R_{90}=15\%$. В системе пылеприготовления принята чисто воздушная сушка топлива. Температура пылевоздушной смеси за установкой поддерживается не выше 145°С. Регулирование температуры сушильного агента в пусковых режимах осуществляется присадкой холодного воздуха;

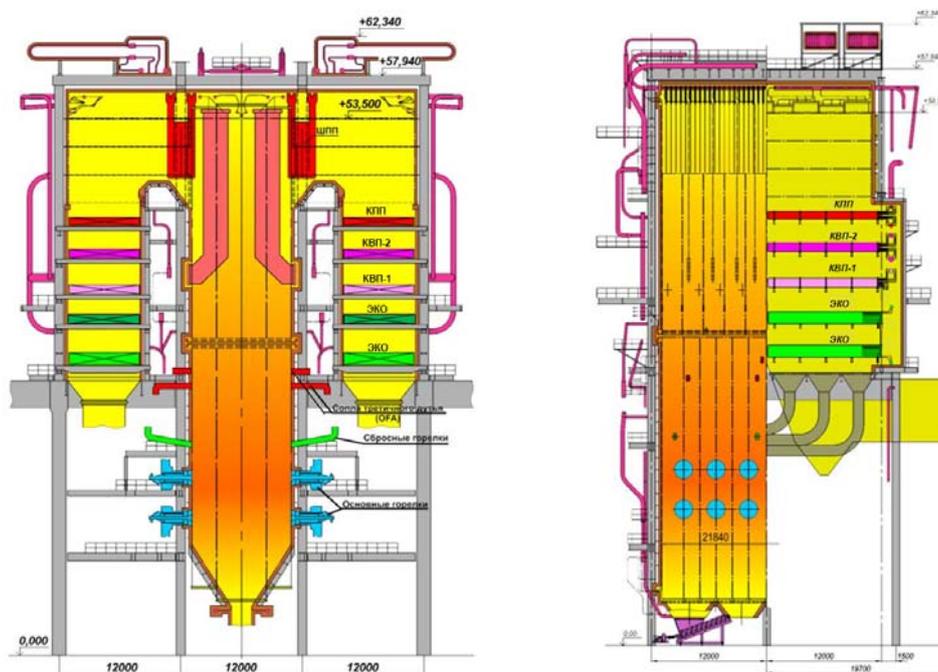


Рис. 1. Общий вид котла П-57Р. Продольный и поперечный разрез.

- топка оборудована 24 вихревыми низкоэмиссионными пылеугольными горелками, расположенными на боковых стенах в 2 яруса по встречной схеме (рис.2-4);

- для растопки котла на мазуте в основных горелках предусмотрены встроенные паромеханические форсунки на обоих ярусах. Розжиг форсунок и контроль за их работой производится запально-сигнальными устройствами (ЗСУ);

- над горелками основных ярусов устанавливается 8 сбросных горелок (рис. 3), расположенных по тангенциальной схеме таким образом, что в каждой полутопке организуется вихревое движение (симметричное относительно оси котла) пылевоздушной смеси по диаметру воображаемой окружности для лучшего выгорания топлива;

– организована вертикальная ступенчатость сжигания за счет подачи части вторичного воздуха через сопла третичного дутья (OFA), расположенные в 2 яруса выше сбросных сопел (рис. 2,3): в первом ярусе – 8 сопел по тангенциальной схеме с противокруткой соплам сброса (для лучшего смешивания воздуха с пылегазовой средой и более полного выгорания топлива); во втором ярусе – 4 сопла по встречной схеме, подающие воздух по центру топки;

– защита фронтального и заднего экранов и исключение восстановительной атмосферы возле данных поверхностей нагрева в области основных ярусов горелок осуществляется с помощью организованного пристенного дутья. Всего устанавливается 12 сопел;

– каждая мельница работает на 3 горелки одного яруса и одно сбросное сопло. Таким образом, на сниженных нагрузках за счет отключения мельниц можно добиться большей концентрации факела в одном ярусе.

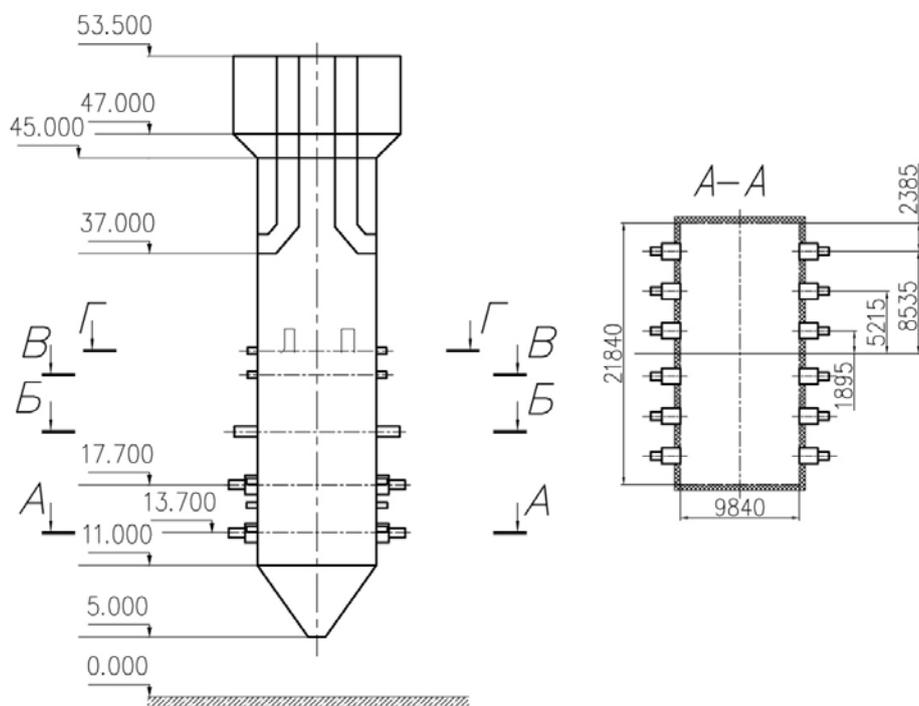


Рис. 2. Принципиальная схема расположения основных горелок и направления их круток.

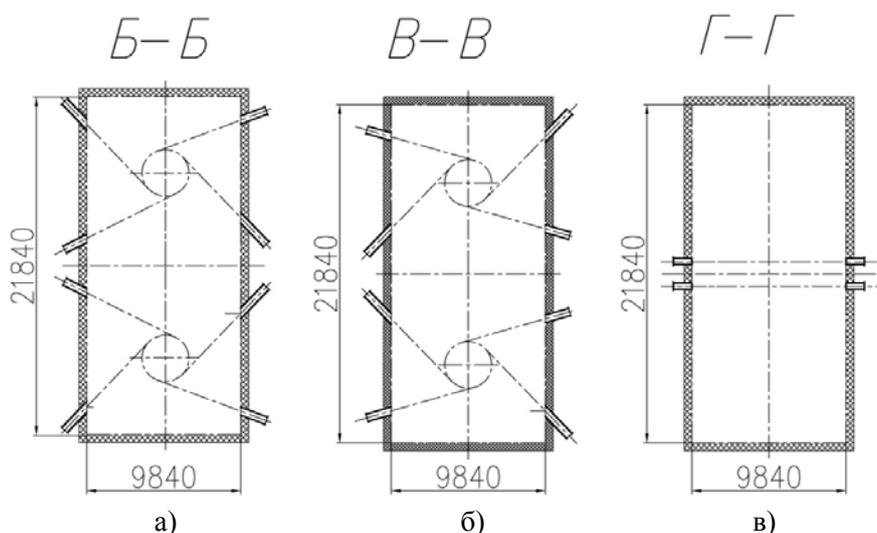


Рис. 3. Схема расположения сбросных сопел (а) и сопел третичного дутья (б, в)

Горелка (рис. 4) разделена на четыре concentрических кольцевых канала и один центральный канал круглого сечения.

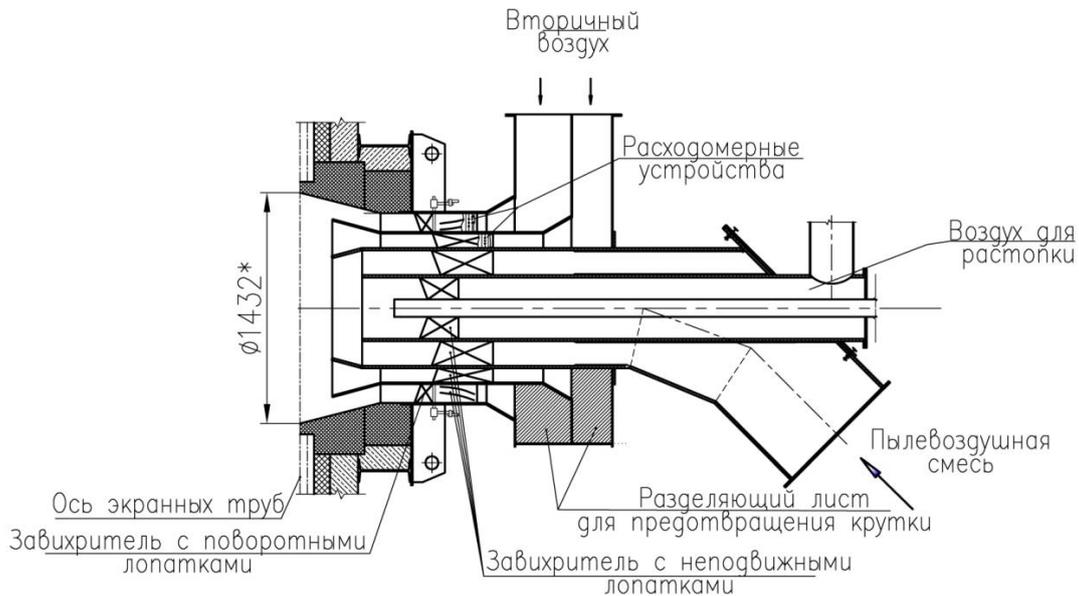


Рис. 4. Принципиальная конструкция низкоэмиссионной горелки.

В центральном канале традиционно располагается растопочная мазутная форсунка.

В первый от центральной трубы кольцевой канал горелки подается часть вторичного воздуха. При растопке котла он обеспечивает начальное воспламенение мазута. В выходной части этого канала устанавливается осевой завихритель, позволяющий обеспечить лучшее смешивание воздуха с распыленным мазутом и, следовательно, стабильное горение растопочного топлива. При работе на пылевоздушной смеси в данный кольцевой канал подается воздух, необходимый для охлаждения.

Для более быстрого прогрева и зажигания поступающего топлива в выходной части канала аэросмеси устанавливается нерегулируемый аксиальный лопаточный завихритель с малой круткой. Кольцевая часть наружной трубы канала аэросмеси выполняется конической в форме конфузора, что, согласно проведенным расчетам, позволяет повысить концентрацию пыли в зоне воспламенения.

В корне факела за счет наличия крутки потоков, истекающих из кольцевых каналов горелки, образуется зона активной рециркуляции горячих топочных газов – зона «обратных токов». За счет такой направленности аэросмеси в зону высоких температур происходит ее быстрый прогрев, а недостаток кислорода в этой зоне позволяет снизить образование топливных оксидов азота, вносящих большой вклад в величину валовой эмиссии NO_x .

Канал вторичного воздуха разбит на два кольцевых потока. Во внутреннем канале вторичного воздуха устанавливаются нерегулируемые аксиальные завихрители с умеренным коэффициентом крутки. В периферийном кольцевом канале последовательно устанавливаются нерегулируемые и регулируемые осевые завихрители. Регулируемые завихрители позволяют устанавливать различные углы лопаток и тем самым изменять параметр крутки воздушного потока.

Наружный канал имеет большую величину крутки. Поэтому часть воздуха отрывается от основного потока на начальном участке факела в зоне выхода и воспламенения летучих, за счет чего организуется горизонтальная стадийность горения топлива.

Для проверки технических решений было проведено математическое моделирование топочных процессов в программном комплексе ANSYS Fluent с определением полей температур, концентраций кислорода, окиси углерода, оксидов азота, золотопливных частиц в объеме топки и тепловых потоков на ее стены.

При моделировании были приняты следующие допущения:

1. Ширмы в математической модели задаются пористой средой. При этом задается сопротивление по оси X таким образом, чтобы среда могла перемещаться только по направлениям Y и Z. Величина теплосъема ширм определялась из теплового расчета котла и задавалась постоянной с единицы объема, занимаемого ширмами.

2. Значения степени черноты топки и коэффициента теплопередачи (от среды внутри труб до наружной стенки загрязнения экранов) пересчитывались таким образом, чтобы коэффициент тепловой эффективности экранов составлял $\psi = 0,38$, согласно теплогидравлическим расчетам котла.

Обобщенные результаты расчета для 8-ми и 7-ми мельничного режимов представлены на рис. 5 в виде графиков средних по сечению температур, концентраций кислорода, концентраций CO, концентраций оксидов азота.

Из представленных данных (Табл.1, рис.6) видно, что на 8^{ми} мельничном режиме обеспечивается практически равномерное распределение температур газов по отводящим газоходам T-образного котла, в то время как на 7^{ми} мельничном режиме неравномерность составляет 46[°]C, при этом более низкий уровень температур газов наблюдается на стороне отключенного блока горелок.

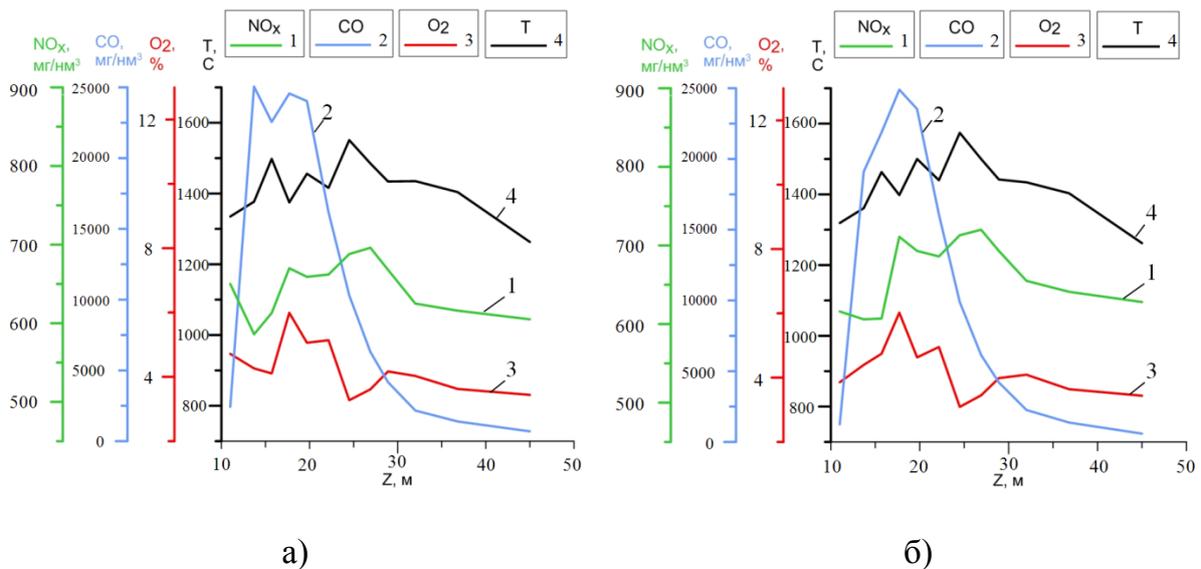


Рис. 5. Средние по сечению значения температуры, концентрации кислорода, CO и оксидов азота а) в 7-мимельничном режиме; б) в 8-мимельничном режиме. Концентрации NO_x и CO переведены на нормальные условия (NO₂ при 6% содержании O₂).

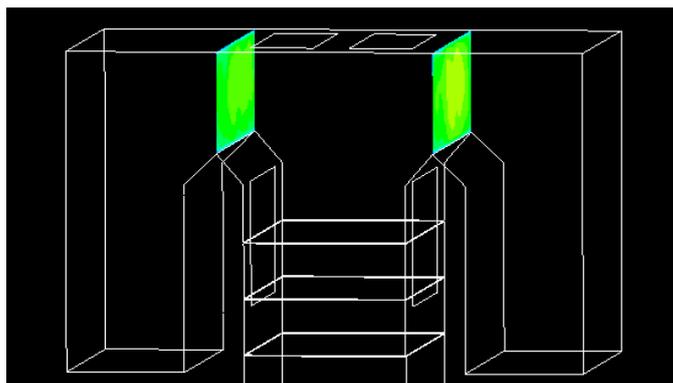


Рис. 6. Вертикальные сечения для определения неравномерностей по конвективным шахтам.

Таблица 1. Средние значения основных показателей в вертикальных сечениях.

Сечение	T, °C	O ₂ , %	CO, мг/нм ³	NO _x , мг/нм ³	q ₄ , %
8-мимельничный режим					
Лево	1090	3,8	241	618	2,5
Право	1093	2,56	276	626	
7-мимельничный режим					
Лево	1075	2,8	245	597	2,2
Право	1121	3,73	346	596	

На рис. 7 приведены результаты моделирования в виде полей температур в осевых сечениях топки для 7-ми и 8-ми мельничных режимов.

Максимум температур находится выше 2-го яруса основных горелок на уровне сброса. В целом, локальные температуры в ядре факела не превышают 1750°C (максимальные изотермы соответствуют 1700°C), а средние температуры по высоте топки ≤1550°C. Средняя температура газов перед двусветными экранами находится на уровне 1400°C. В режиме с 7-ю работающими мельницами температурные поля деформированы с превалированием более высоких температур в полутопке, «соседней» отключенному блоку горелок.

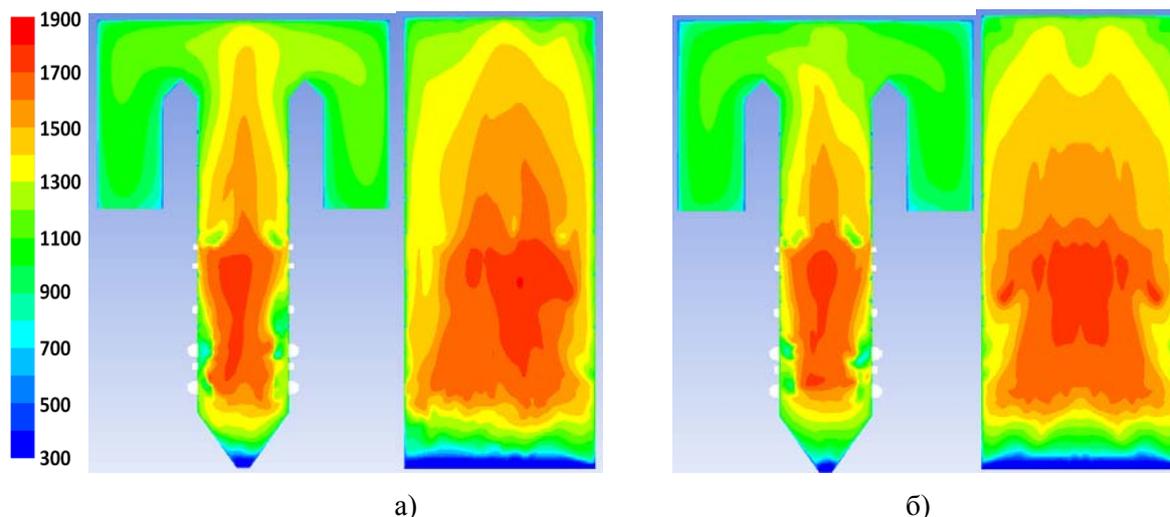


Рис. 7. Температурные поля в осевых сечениях, °C.
а) семимельничный режим; б) восьмимельничный режим.

Эффективность работы пристенного дутья иллюстрируется на рис.8. Видно, что в пристенной области у фронтальной и задней стенок присутствует кислород, что снижает риск коррозии металла труб в восстановительной среде. Кроме того, в пристенной области снижается локальная температура на 150-200°C, что дополнительно защищает поверхности нагрева. Также важно отметить тот факт, что воздушные струи от сопел пристенного дутья распространяется на всю ширину топки, что позволяет полностью перекрыть фронтальную и заднюю стенки. Это очень важно в теплонапряженных областях.

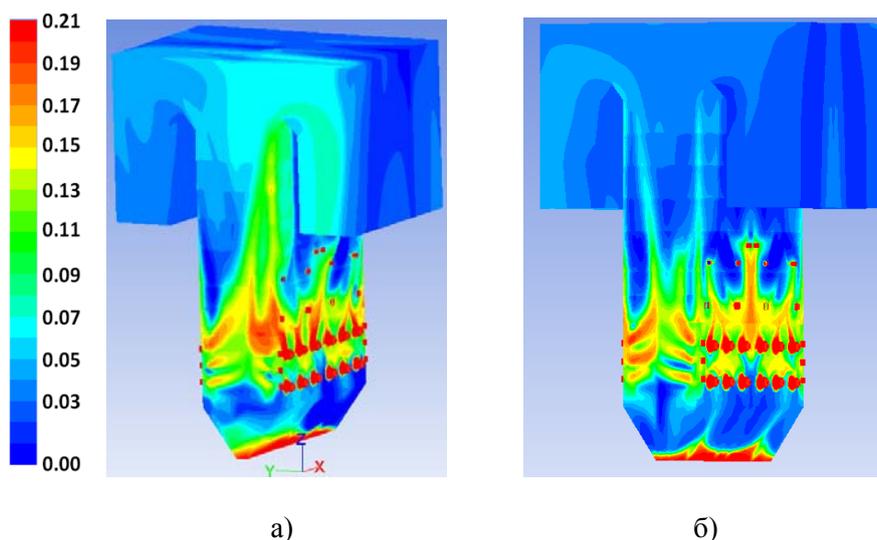


Рис. 8. Объемная доля кислорода вблизи стен топочной камеры.
а) семимиллиметровый режим; б) восьмимиллиметровый режим.

В зоне от отметки 45 м до входа в горизонтальные газоходы идет интенсивное выгорание CO с 587 (695) мг/м³ до 241 (245) мг/м³ (в скобках приведены значения для 7-миллиметрового режима). Необходимо отметить, что согласно расчетным данным CO догорает далее по газоходам пока температура газов не снизится до ~700°C, и на выходе из котла составит ≤ 50 мг/м³. Таким образом, компоновка сопел третичного дутья обеспечивает благоприятные условия для дожигания химического недожога.

На рис. 9 приведены тепловые потоки на топочные экраны. Наиболее теплонапряженные поверхности (~250-270 кВт/м²) расположены на боковых стенах топки в районе сбросных сопел и сопел третичного дутья. Также достаточно высокое теплонапряжение наблюдается в районе фронтальной и задней стен топки на уровне ярусов основных горелок. Температуры вблизи стен самых теплонапряженных участков находятся на уровне 1000-1100°C, что является допустимым для Экибастузских углей.

В целом, при применении данного топочно-горелочного устройства обеспечивается достижение выбросов NOx ≤ 600 мг/м³ (в семимиллиметровом режиме). Результаты показали, что применение данного топочно-горелочного устройства и компоновки сбросных сопел и сопел третичного дутья обеспечивают наиболее оптимальный баланс между подавлением оксидов азота и механическим недожогом.

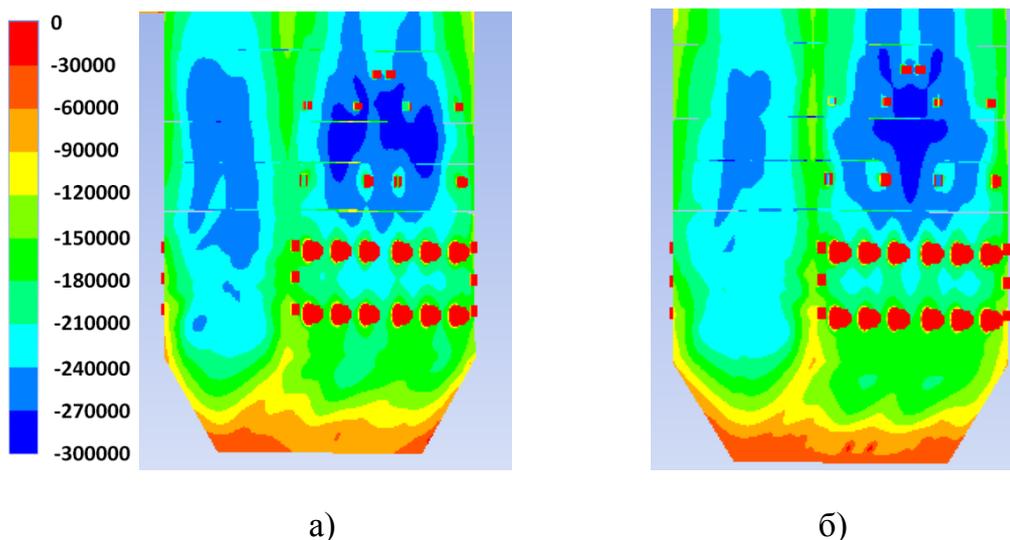


Рис. 9. Тепловой поток на стены топки, Вт/м². а) семимельничный режим (вид со стороны боковой стены, противоположной отключенным горелкам); б) восьмимельничный режим.

Выводы

1. ОАО «Подольский машиностроительный завод» совместно с ЗАО «ЗиО-КОТЭС» разработан проект реконструкции котельной установки с котлом П-53-3М ст. № 2 Экибастузской ГРЭС-1 с переводом его на двухступенчатое сжигание.
2. Проверка технических решений на стадии проектирования проводилась с помощью 3D-моделирования топочных процессов в программном комплексе ANSYS Fluent.
3. Результаты расчетов показали возможность достижения требуемого уровня выбросов $\text{NO}_x \leq 600 \text{ мг/нм}^3$ при приемлемом значении механического недожога ($q_4 \leq 2,5\%$) при сжигании высокозольного экибастузского угля.