

УДК 621.18.01

НИЗКОЭМИССИОННЫЕ СХЕМЫ СЖИГАНИЯ В КОТЛАХ ПК-39-ПМ И БКЗ-420-140-5 С ВИХРЕВЫМИ ГОРЕЛКАМИ

Н. С. Маришин, Ф. А. Серант, А. И. Цепенюк, А. А. Лавриненко,
О. И. Ставская

ЗиО-КОТЭС, 630049 Новосибирск, ziinfo@cotes-group.com

Представлены основные технические решения по системе сжигания и конструкции топочно-горелочных устройств котлов ПК-39-ПМ и БКЗ-420-140-5 при сжигании экибастузского угля. Разработанные низкоэмиссионные схемы сжигания позволяют снизить выбросы оксидов азота как при низких, так и при высоких значениях теплонапряженности сечения топочного пространства. В основе разработанных технических решений по системам сжигания лежит математическое моделирование аэродинамики и горения угля в топках указанных котлов, проведенное в программном комплексе ANSYS Fluent.

Ключевые слова: паровой котел, схема сжигания, вихревая горелка, низкоэмиссионная горелка, оксиды азота, экибастузский уголь.

DOI 10.15372/FGV20180315

ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени вопрос экологичности сжигания твердого топлива в котлах не стоял так остро. Основное внимание уделялось стабильности воспламенения и горения, а также полноте выгорания топлива при избытке воздуха на выходе из топки $\alpha_T \geq 1.2$. Разработчики схем сжигания стремились обеспечить условия быстрого и качественного смешения воздуха с топливом. Типичными чертами традиционных схем сжигания были высокие показатели крутки в каналах аэросмеси ($n = 1.6 \div 2.0$) и избыток воздуха на основных горелках $\alpha_{гор} \geq 1.0$ [1, 2]. Традиционные схемы сжигания обеспечивают низкий механический недожог на выходе из котла, однако дают значительную генерацию оксидов азота. На данный момент экологические требования к установкам приводят к необходимости разработки новых схем сжигания и горелочных устройств для низкоэмиссионного сжигания топлива. Использование трехмерного многовариантного моделирования топочных процессов на основе методов вычислительной гидродинамики позволяет не только с достаточно высокой точностью проверить принятые технические решения, но и исследовать влияние множества факторов на стабильность горения и эмиссию оксидов азота на стадии проекти-

рования, без дорогостоящих натуральных экспериментов. Верификация расчетов по результатам натуральных исследований подтверждает достоверность выбранных моделей и параметров.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СИСТЕМАМ СЖИГАНИЯ И КОНСТРУКЦИЯМ ТОПОЧНО-ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

Разрабатываемые низкоэмиссионные схемы сжигания и конструкции топочно-горелочных устройств в первую очередь направлены на удовлетворение нормам выбросов NO_x при сохранении требуемого КПД котла. Это достигается за счет новых подходов к организации процессов горения в топке. Во-первых, это снижение избытка воздуха на основных горелках ($\alpha_{гор} < 1.0$) за счет отвода части воздуха из основных горелок в сопла пристенного и третичного дутья. Третичное дутье позволяет распределить окислитель по вертикали топки, что приводит к многоступенчатому сжиганию (вертикальная стадийность). Во-вторых, это доработка конструкции вихревых горелок для достижения многоступенчатого сжигания топлива в пределах факела каждой отдельной горелки (горизонтальная стадийность). Модернизация горелочных устройств включает в себя изменение параметра крутки в канале аэросмеси, скоростного режима в горелке, установку турбулизаторов в каналы аэросмеси. В ре-

зультате в топке реализуется как вертикальная стадийность горения, так и горизонтальная. При этом не нарушаются стабильность горения и показатели работы котла.

Для снижения эмиссии оксидов азота разработаны следующие технические решения, касающиеся сжигания в котле ПК-39-ПМ с высокой теплонапряженностью:

- снижение доли первичного воздуха в основных горелках за счет установки за мельницами делителей-пылеконцентраторов;

- вертикальная стадийность горения, которая обеспечивается организацией двухступенчатой системы сжигания экибастузского угля со встречным двухъярусным расположением вихревых горелок, работающих при низких избытках воздуха ($\alpha_{\text{гор}} < 0.75$);

- горизонтальная стадийность горения за счет установки новых вихревых горелок со сниженными скоростями горения пылевоздушной смеси и малой круткой этого потока.

Для котла БКЗ-420-140-5 с низкой теплонапряженностью технические решения по системе сжигания включают в себя:

- установку основных вихревых горелок в один ярус по встречной схеме при избытке воздуха на горелках $\alpha_{\text{гор}} \approx 0.93 \div 0.98$;

- установку специальных рассекателей-турбулизаторов в каналах пылевоздушной смеси (ПВС);

- вертикальную стадийность горения за счет третичного дутья;

- горизонтальную стадийность горения, которая обеспечивается оригинальной конструкцией каналов ПВС, наличием непроточного канала, отделяющего струи ПВС от струй вторичного воздуха, а также за счет разделения вторичного воздуха на два потока с разными параметрами крутки.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ УГЛЯ В ТОПКЕ

Для проверки принятых технических решений с использованием программного комплекса ANSYS Fluent проведено моделирование топочного процесса в реконструированных котлах ПК-39-ПМ и БКЗ-420-140-5. Для этого была построена геометрическая модель. На рис. 1 показана геометрическая модель котла ПК-39-ПМ.

Данная модель покрывалась расчетной сеткой (рис. 2), в области больших градиентов концентраций реагентов и скоростей сет-

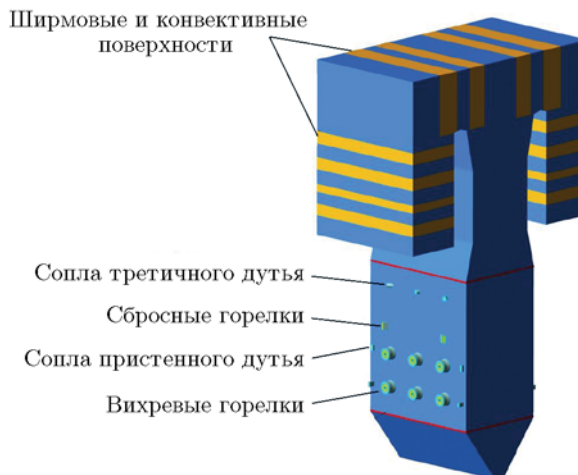


Рис. 1. Общий вид геометрической модели котла ПК-39-ПМ

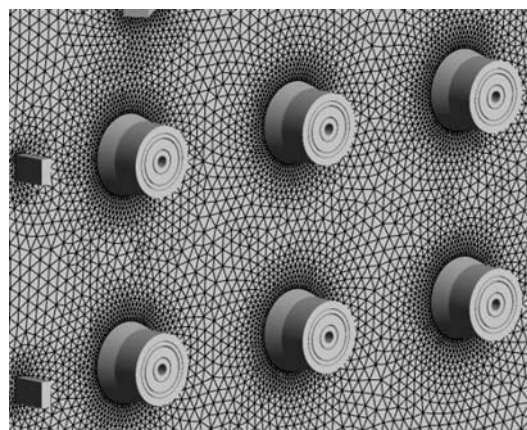


Рис. 2. Расчетная сетка вблизи горелок

ка сгущалась. Объем ширмовых и конвективных поверхностей в математической модели задавался как пористая среда с коэффициентами сопротивления. Внутри данных пакетов задан постоянный объемный коэффициент теплосъема, который обеспечивает снижение температуры газового потока при прохождении через поверхность на величину, определенную из теплового расчета котла.

В расчетную модель введены следующие допущения и упрощения:

- подсос воздуха в топку осуществляется через холодную воронку в местах сочленения холодной воронки и нижней радиационной части, а также этой нижней части со средней радиационной частью;

- коэффициент теплопередачи от стенки топки к нагреваемой среде и температура среды в экранах по высоте топки в диапазоне

370 ÷ 440 °С при степени черноты экранов $\varepsilon = 0.8$ соответствуют коэффициенту эффективности экранов $\psi = 0.35$;

— ПВС и воздух подавались равномерно по сечениям соответствующих каналов.

Для расчета турбулентных течений в топке котла в программном комплексе ANSYS Fluent численно решаются уравнения неразрывности и импульса потока, осредненные по Рейнольдсу, в стационарной постановке, для замыкания которых используется стандартная $k-\varepsilon$ -модель турбулентности. Описание движения и тепло- и массообмена одиночных частиц топлива вдоль их траектории выполняется в рамках лагранжева подхода. Моделирование лучистого теплообмена проводится по модели P-1 [3, 4].

Фракционный состав топлива описывается распределением Розина — Раммлера, в котором характерный размер твердых частиц δ_0 определяется тониной помола топлива (R_{90}) и коэффициентом полидисперсности. В тепловом балансе угольной частицы учитываются теплота испарения влаги, передача тепла теплопроводностью и конвекцией, лучистый теплообмен и теплота сгорания коксового остатка. Температура частицы считается одинаковой внутри частицы, но отличающейся от температуры окружающей газовой среды.

Основные исходные данные для моделирования сжигания экибастузского угля в топках котлов ПК-39-ПМ и БКЗ-420-140-5 приведены в табл. 1.

ANSYS Fluent позволяет моделировать образование термических, быстрых и топливных оксидов азота, а также процессы их восстановления.

Данная математическая модель сжигания угля и модель образования оксидов азота прошли верификацию при численном моделировании эксплуатационного варианта с традиционными горелками и существующими схема-

Таблица 1
Основные исходные данные для моделирования

Котел	Расход угля, т/ч	Тонина помола R_{90} , %	Температура, °С	
			ПВС	горячего воздуха
ПК-39-ПМ	177.2	12	134	259
БКЗ-420-140-5	71.9	8 ÷ 12	177	380

Таблица 2

Сравнение осредненных эксплуатационных данных с результатами численного моделирования

Источник	q_4 , %	C_{CO} , мг/нм ³	C_{NO_x} , мг/нм ³
Эксперимент	2.5	29	611
Моделирование	2.8	35	598

Примечание. q_4 — механический недожог, C — концентрация.

ми сжигания [5]. Использовались справочные кинетические константы горения кокса экибастузского угля и принятая схема горения $C \rightarrow CO \rightarrow CO_2$. Результаты расчетов хорошо согласуются с эксплуатационными данными по механическому недожогу топлива и выбросам CO. Модель образования NO_x также демонстрирует удовлетворительное соответствие с результатами испытаний (табл. 2).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Трехмерное моделирование топочных процессов применительно к котлам ПК-39-ПМ и БКЗ-420-140-5 проведено в предположении 100%-й нагрузки и работе четырех мельниц.

Результаты математического моделирования топочных процессов в котле ПК-39-ПМ представлены на рис. 3–6 в виде полей температуры, концентрации NO_x , концентрации дисперсной фазы.

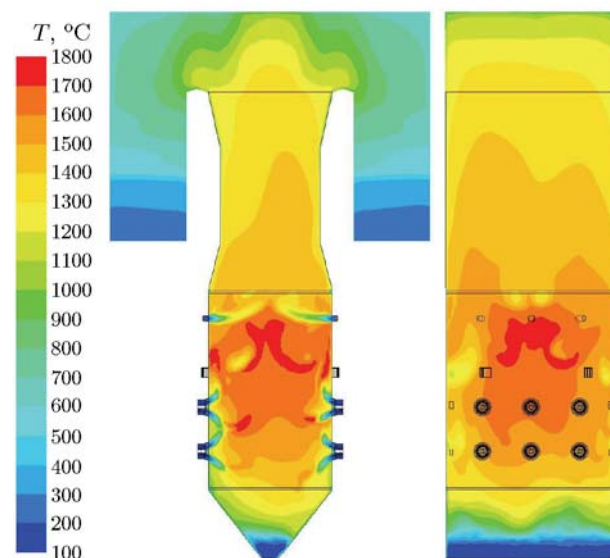


Рис. 3. Поля температуры в осевых сечениях котла

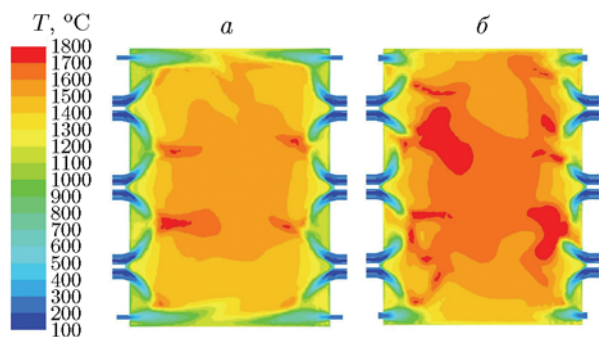


Рис. 4. Поля температуры в сечениях на уровне 1-го (а) и 2-го (б) яруса горелок

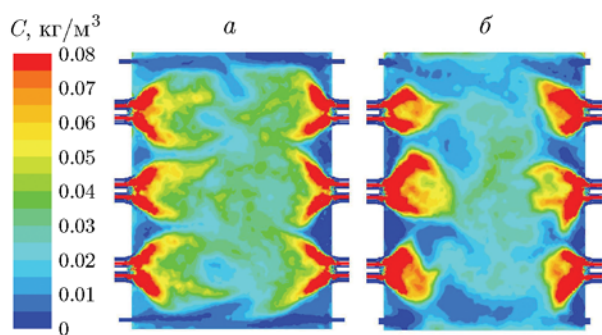


Рис. 5. Поля концентрации дисперсной фазы в сечениях на уровне 1-го (а) и 2-го (б) яруса горелок

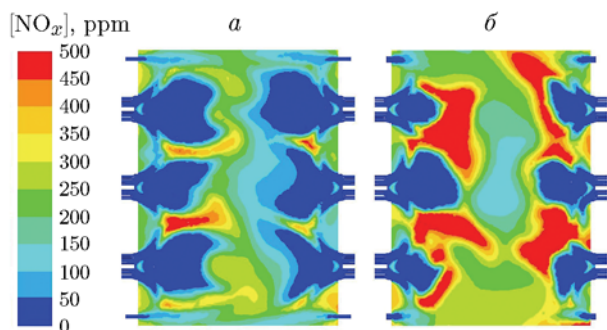


Рис. 6. Поля концентрации NO_x в сечениях на уровне 1-го (а) и 2-го (б) яруса горелок

Благодаря низкому избытку воздуха на горелках и слабой крутке потока в каналах аэро-смеси в приосевой зоне горелок, топливо находится в бескислородной зоне, что обеспечивает наличие в ней области восстановления оксидов азота. При этом горелки работают стабильно, с хорошо развитой зоной обратных токов и притоком горячих топочных газов к устью горелки. Воспламенение и горение экибастузского угля стабильны. Факел равномерно заполня-

ет топочное пространство. Разработанная схема сжигания для котла ПК-39-ПМ обеспечивает надежную его работу в диапазоне нагрузок $(0.6 \div 1.0)D_{\text{ном}}$. Стоит отметить, что для котлов, введенных в 2008–2013 гг., проектный и достигнутый уровень концентрации NO_x составлял $\approx 600 \text{ мг/нм}^3$. В новых котлах с доработанными схемой сжигания и конструкцией горелок при номинальной нагрузке в базовом 4-мельничном режиме обеспечиваются расчетные значения приведенной концентрации оксидов азота 530 мг/нм^3 и механического недожога $\leq 2 \%$. Таким образом, можно сказать, что в топках с высокой теплонапряженностью сечения предлагаемые технические решения по разработке низкоэмиссионных схем сжигания позволяют получить выброс оксидов азота на $\approx 10 \div 15 \%$ ниже требуемого нормами уровня 600 мг/нм^3 .

На рис. 7–10 показаны результаты математического моделирования топочных процессов в котле БКЗ-420-140-5 в виде полей температуры и концентрации дисперсной фазы.

Конструкция каналов ПВС предусматривает установку особых технологических элементов (рассекателей-турбулизаторов) в выходной части каналов по окружности. Благодаря таким рассекателям-турбулизаторам образуются высококонцентрированные струи пылевоздушной смеси (см. рис. 10), что способствует их более быстрому прогреву на выходе из горелки, интенсивному выделению летучих и их воспламенению в условиях малого избытка воздуха. Лопатки завихрителя усиливают концентрацию угольной пыли на стенках рассекателей-турбулизаторов. Такое исполнение проточной части каналов ПВС горелки позволяет существенно снизить генерацию топливных оксидов азота. Также в конструкции горелок используется принцип двухступенчатого сжигания топлива в пределах факела каждой отдельной горелки (горизонтальная стадийность). Вторичный воздух делится на два потока с разными параметрами крутки. Внутренний поток закручивается и служит для стабилизации факела. Наружный канал имеет больший параметр крутки, и часть воздуха отрывается от основного потока пыли на начальном участке факела в зоне выхода и воспламенения летучих веществ. Этому также способствует слабopоточный канал, разделяющий каналы аэро-смеси и вторичного воздуха.

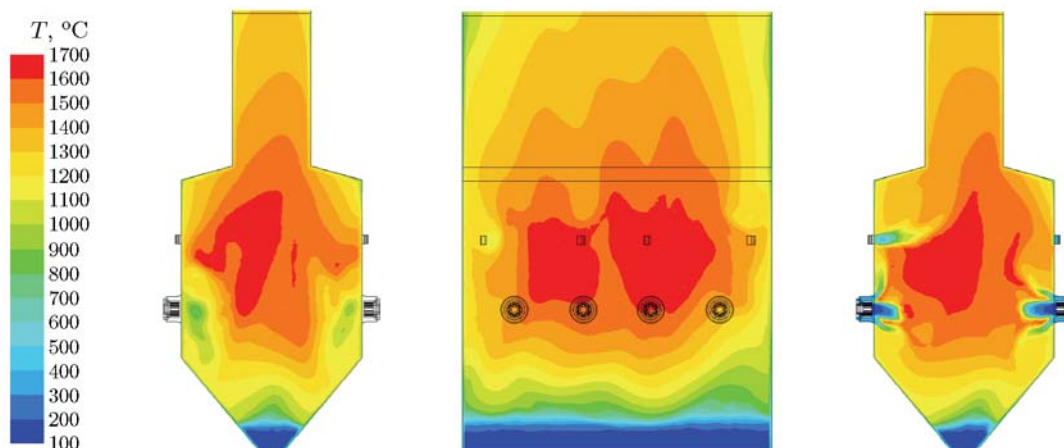


Рис. 7. Поля температуры по осям топочной камеры и в вертикальном сечении по оси центральных горелок

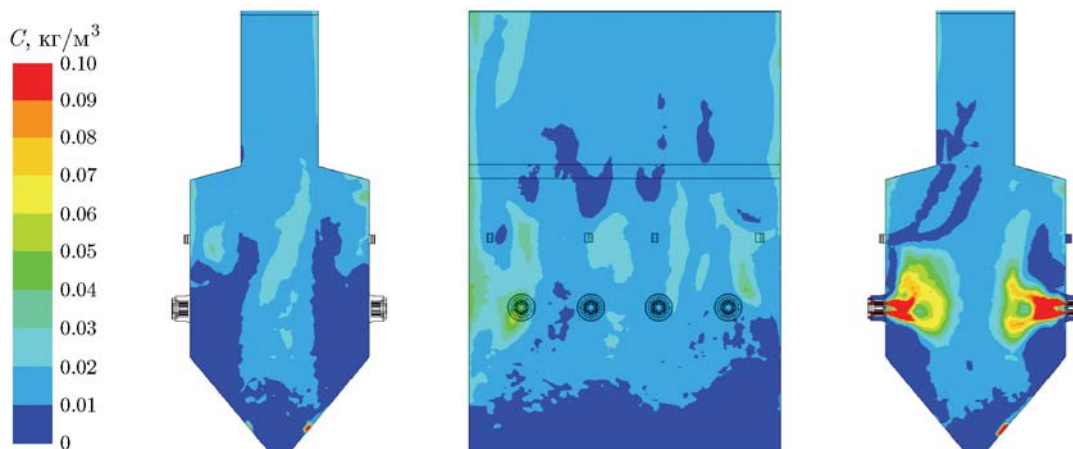


Рис. 8. Концентрация дисперсной фазы по осям топочной камеры и в вертикальном сечении по оси центральных горелок

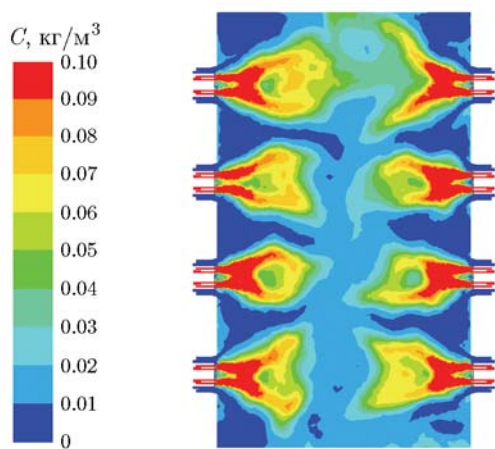


Рис. 9. Концентрация дисперсной фазы на уровне яруса горелок

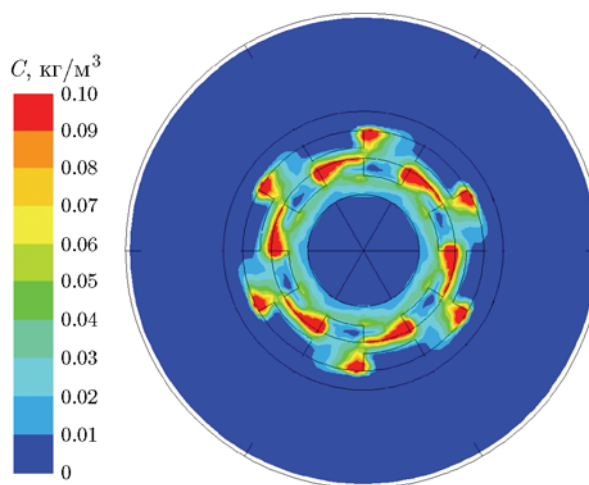


Рис. 10. Поле концентрации дисперсной фазы на выходе из горелки

Разработанные для котлов БКЗ-420-140-5 технические решения позволяют обеспечить образование оксидов азота на уровне $500 \div 550 \text{ мг/нм}^3$ при механическом недожоге на выходе из котла не более 2 %, в то время как в реальных условиях работы котла концентрация оксидов азота находится на уровне $420 \div 500 \text{ мг/нм}^3$ [6, 7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем математического моделирования разработаны технические решения по выбору схемы сжигания и конструкции топочно-горелочных устройств. На основе проведенного трехмерного математического моделирования показано, что в высокотеплонапряженных топках котла ПК-39-ПМ концентрация оксидов азота может достигать 530 мг/нм^3 (при нормальных условиях и $O_2 = 6 \%$), в низкотеплонапряженных топках котла БКЗ-420-140-5 оксидов азота — до $420 \div 500 \text{ мг/нм}^3$ (при тех же условиях).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Померанцев В. В.** Основы практической теории горения. — Л.: Энергия, 1973.
2. **Методические** указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / под ред. Э. Х. Вербовецкого, Н. Г. Жмерика. — СПб.: ВТИ-АООТ «НПО ЦКТИ», 1996.
3. **Ansys Fluent User's Guide.** Release 16.2, 2015.
4. **Ansys Fluent Theory Guide.** Release 16.2, 2015.
5. **Квривишвили А. Р., Серант Ф. А., Ставская О. И., Лавриненко А. А., Линдт В. В.** Численные исследования топочного процесса в пылеугольных котлах крупных энергоблоков // Материалы VIII Всерос. конф. с международным участием «Горение твердого топлива», Новосибирск, 2012 г.
6. **Выполнение** режимно-наладочных работ на котлоагрегате БКЗ-420 ст. № 3 ТЭЦ-2 АО «Астана-Энергия» после внедрения проекта «Подавление окислов азота»: технический отчет / ТОО «Фирма РИЭКО». — Алматы, 2013.
7. **Выполнение** режимно-наладочных работ на котлоагрегате БКЗ-420 ст. № 4 ТЭЦ-2 АО «Астана-Энергия» после внедрения проекта «Подавление окислов азота»: технический отчет / ТОО «Алтайэнергоналадка». — Усть-Каменогорск, 2012.

*Поступила в редакцию 1/IX 2017 г.,
в окончательном варианте — 17/XI 2017 г.*
