

УДК 621.182 : 296.001.4

## Низкотемпературное ступенчатое сжигание топлива

**А.В. Жуйков**

*Теплоэнергетический факультет Политехнического института  
Сибирского федерального университета, кафедра теплотехники  
и гидрогазодинамики, Красноярск*

**Аннотация.** В статье представлены результаты разработки эффективного и дешевого способа подавления образования оксидов азота при ступенчатом сжигании канско-ачинских углей на котле БКЗ-75-39ФБ, отличающегося от классического варианта рядом конструктивных и технологических особенностей. Решена задача оптимального распределения потоков воздуха для снижения температуры ядра факела при помощи методов сопряженных градиентов. Определены пути дальнейшего развития данного способа.

**Abstract.** The results of an effective and cheap method of suppressing the formation of nitrogen oxides by staged combustion of kansk-achinsk coal on the boiler BKZ-75-39FB have been presented. The method differs from the classical version by a number of design and technological features. The problem of optimum air distribution for reducing the core temperature flame by conjugate gradient methods has been solved. The ways of further development of this method have been shown.

**Ключевые слова:** оксиды азота, котел БКЗ-75-39ФБ, нижнее дутье, ступенчатое сжигание  
**Keywords:** nitrogen oxides, boiler BKZ-75-39FB, bottom blasting, step burning

### 1. Введение

К настоящему времени разработаны десятки методов обезвреживания отходящих промышленных газов, многие из которых прошли опытную проверку и внедрены в ряде отраслей промышленности в различных странах мира. Но не все методы подходят для канско-ачинских углей, а те, которые подходят, имеют слишком высокую стоимость. Поэтому в процессе разработки эффективного и дешевого способа подавления образования оксидов азота при сжигании канско-ачинских углей на котле БКЗ-75-39ФБ предложен вариант ступенчатого сжигания топлива, отличающийся от классического варианта рядом конструктивных и технологических особенностей (см. рис.). Организация ступенчатого сжигания твердого топлива с подачей части воздуха выше основных горелок (классический вариант) позволяет снизить содержание оксидов азота на 40-50 %, но при этом отмечается одновременный рост температуры газов на выходе из топки. Это не приемлемо для котлов, сжигающих канско-ачинские угли (КАУ), так как рост температуры на выходе из топки приводит к резкому повышению интенсивности загрязнения поверхностей нагрева.

Здесь был применен принцип организации топочного процесса, в основу которого положено использование как гравитационных сил, так и сил инерции частиц топлива для вовлечения их в циркуляционное движение в топочной камере с подачей свежего окислителя по длине факела. Газовый вихревой факел в топке образуется в результате аэродинамического взаимодействия горелочных факелов и плоского факела нижнего дутья, направленного параллельно фронтального ската "холодной воронки". Возникающая циркуляция топлива создаёт благоприятные условия для выгорания наиболее крупных частиц за счет значительного увеличения времени их пребывания в топочном процессе при неоднократном возврате к месту подачи свежего окислителя. Таким образом, нижняя часть топки (холодная воронка) начинает интенсивно участвовать в теплообменных процессах, что несколько снижает температуру дымовых газов на выходе из топки, тем самым предотвращая загрязнение конвективных поверхностей нагрева за счет некоторого растягивания процесса горения по всему объему топочной камеры с подачей свежего окислителя по длине факела. Вследствие интенсивного турбулентного перемешивания продуктов горения, многократной циркуляции частиц в топочной камере и ряда других факторов в топочных устройствах такого типа происходят существенные изменения в процессе горения топлива, способствующие подавлению образования оксидов азота.

Предлагаемый способ ступенчатого сжигания во многом лишен недостатков классической схемы. Основное отличие предлагаемого способа от классической схемы заключается в том, что эффект снижения температуры топочных газов получен за счет воздействия двух факторов. Во-первых, созданием в топочном объеме турбулентных пульсаций с большой глубиной зоны перемешивания за

счет взаимодействия струи топливно-воздушной смеси с плоской струей вторичного дутьевого воздуха, направленного под углом к аксиальной оси факела. Такое взаимодействие привело к размыванию факела по объему топки и созданию циркуляционных потоков, включивших в работу объем "холодной воронки" топочной камеры. В процессе перераспределения факела температура его ядра уменьшилась, что повлияло на выход оксида азота. Второй фактор связан с обдувом устья факела потоком газа из холодной воронки, когда газ из "холодной воронки" охлаждает начальный участок факела. Такое взаимодействие кроме гидродинамической неустойчивости приводит к неустойчивости, обусловленной эффектом термоэмиссии, сопровождающимся возникновением турбулентных вихрей значительно меньших размеров, заполняющих циркуляционные потоки в объеме топки. Известно, что такие потоки обладают хорошей устойчивостью, и частицы топлива могут многократно циркулировать в объеме топочной камеры. Подвод окислителя и отвод продуктов реакции горения в данном случае более эффективен, чем в традиционной схеме, поэтому при использовании предлагаемого способа ухудшения полноты сгорания не наблюдается (Жуйков и др., 2010).

Следует отметить, что предложение по введению вторичного дутья в "холодную воронку" не является новым. Так, для котлов, работающих на торфе с влажностью 53-54 %, предусматривается подача вторичного воздуха в "холодную воронку". При этом решалась задача увеличения времени движения частицы топлива в факеле. В предложенной схеме этот способ введения дутьевого воздуха приобретает новое содержание.

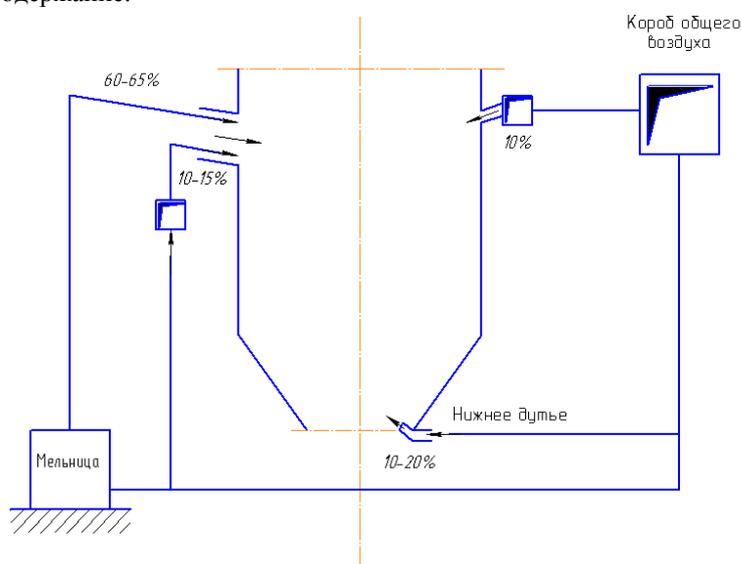


Рис. Схема организации низкотемпературного ступенчатого вихревого топочного процесса

## 2. Распределение подачи воздуха

Для проекта реконструкции котла БКЗ-75-39ФБ необходимо выбрать такой вариант распределения подачи воздуха, при котором ожидаемый в среднем выход оксидов азота был бы наименьшим в смысле некоторого критерия оптимальности. Был произведен тепловой расчет котла (Александров, 1963; Сидельковский, Юренев, 1978). После чего была создана адекватная физико-математическая модель, и разработаны методы и технология ее численной оптимизации.

Если непосредственно формулировать все основные параметры, влияющие на температуру факела, то в простых обозначениях общую модель линейной оптимизации можно записать так:

$$\min F(G) = \min \sum_i h(G_i) + H_T,$$

где  $G$  – расход воздуха на котел, кг/с;  $h$  – энтальпия первичного воздуха и вторичного воздуха на котел, кДж/кг;  $G_i$  – расход первичного и вторичного воздуха на котел, кг/с,  $H_T$  – энтальпия топлива, кДж/кг.

Для решения задачи были введены следующие ограничения:

1. выполнение ограничений подачи вторичного воздуха:

$$0,2 \leq X_0 \leq 0,6,$$

где  $X_0$  – расход вторичного воздуха.

2. Выполнение ограничений подачи первичного воздуха:

$$0,1 \leq X_1 \leq 0,25,$$

где  $X_1$  – расход первичного воздуха.

3. Выполнение ограничений подачи дополнительного вторичного воздуха:

$$0,1 \leq X_2 \leq 0,25,$$

где  $X_2$  – расход вторичного воздуха.

4. Выполнение ограничений подачи воздуха через нижнее дутье:

$$0,1 \leq X_3 \leq 0,25,$$

где  $X_3$  – расход вторичного воздуха.

В целевой функции минимизируется выход оксидов азота. Такая задача оптимального распределения потоков воздуха для снижения температуры ядра факела решается с помощью метода сопряженных градиентов.

Расчет произведен при помощи программы "Mathcad" и результаты расчетов сведены в таблицу.

Таблица

Нагрузка, т/ч	Вторичный воздух, %	Первичный воздух, %	Дополнительный вторичный воздух, %	Нижнее дутье, %
30	65	15	10	10
40	60	10	10	20
75	60	10	10	20

Для определения затрат на реконструкцию котла мы определяем величину необходимых капитальных вложений, включающих в себя капитальные вложения на составление проекта работ, а так же сметную стоимость. На составление проектных работ закладываем 100 тыс. руб.

Сметная стоимость составляет 188,564 тыс. руб. Она состоит из сметной стоимости строительных работ, сметной стоимости оборудования и монтажных работ.

Капитальные вложения (без НДС), необходимые нам для реконструкции одного котла, составляют:

$$K = K_{пр} + K_{см} = 100000 + 159800 = 259,8 \text{ тыс. руб.}$$

Итого: затраты на реконструкцию (с НДС) – 306,6 тыс. руб.

### 3. Заключение

Внедрение низкотемпературного ступенчатого сжигания топлива в котле БКЗ-75-39ФБ подавляет образование оксидов азота и уменьшает их содержание в дымовых газах, выбрасываемых в атмосферу, на 25-40 %. В целом новая организация топочного процесса на котле БКЗ-75-39ФБ не привела к побочным негативным результатам (недопустимому повышению температуры газов на выходе из топки и загрязнению хвостовых поверхностей нагрева, увеличению потерь теплоты от механической неполноты сгорания котла). Котел устойчиво работает под нагрузкой. Факел находится ниже середины топки и направлен к нижнему скату нижнего экрана. Ядро факела располагается ближе к переднему фронтальному экрану. В целом, результаты испытаний показали, что целесообразно разрабатывать низкотемпературное вихревое сжигание канско-ачинских углей для котлов большей производительности.

### Литература

- Александров В.Г.** Вопросы проектирования паровых котлов средней и малой мощности. *М.-Л., Гос. энерг. изд-во*, 111 с., 1963.
- Жуйков А.В., Кулагин В.А., Федченко М.П., Нагимулина С.А.** Низкоэмиссионная вихревая топка. Патент РФ №104670, МПК F 23. Заявлено 30.12.2010.
- Сидельковский Л.Н., Юрнев В.Н.** Парогенераторы промышленных предприятий. *М., Энергия*, 336 с., 1978.