

УДК 536.7:662.765.765:622.76

АПАЛЬКОВ А.П.

Институт газа НАН Украины

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА И РЕЦИРКУЛЯЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НА ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗУЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Проведено чисельні розрахунки впливу рециркуляції на зміну витрати палива та вихід NO_x в діапазоні коефіцієнтів надлишку повітря $\alpha = 1.0 \dots 1.2$ та кратності рециркуляції $r = 0 \dots 0.5$. Встановлено, що перерозподіл палива в умовах підтримання потрібного корисного теплосприйняття визначається зміною ККД топки, що обумовлений рециркуляцією продуктів згорання. Виконано розрахунки рівноважних продуктів згорання при температурах $T_{\#} = 25 \dots 500^\circ\text{C}$ з метою оцінки впливу коефіцієнту надлишку повітря α в діапазоні $\alpha = 1 \dots 2$ на зміну витрати палива.

Проведены численные расчеты влияния рециркуляции на изменение расхода топлива и выход NO_x в диапазоне коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1.0 \dots 1.2$ и кратности рециркуляции $r = 0 \dots 0.5$. Установлено, что перерасход топлива в условиях поддержания заданного полезного тепловосприятия определяется изменением КПД топки, обусловленного рециркуляцией продуктов сгорания. Выполнены расчеты равновесных продуктов сгорания при температурах $T_{\#} = 25 \dots 500^\circ\text{C}$ с целью оценки влияния коэффициента избытка воздуха α в диапазоне $\alpha = 1 \dots 2$ на изменение расхода топлива.

Numerical calculations of recirculation influence on change of the fuel consumption and emission NO_x in a range of excess air ratio $\beta = 1.0 \dots 1.2$ and recirculation ratio $r = 0 \dots 0.5$ are carried out. It is established, that the fuel overexpenditure in conditions of maintenance of available heat depends on change of efficiency combustion chamber, caused by combustion products recirculation. Calculations of equilibrium combustion products are carried out at temperatures $T_{\#} = 25 \dots 500^\circ\text{C}$ with the purpose of estimation of influence of excess air ratio β in range $\beta = 1 \dots 2$ on change of the fuel consumption.

 B_a – расход окислителя; B_f – расход топлива, δB_f – перерасход топлива, %; I – энтальпия; L_{st} – стехиометрический коэффициент, кг/кг, ($\text{м}^3/\text{м}^3$); M_a – молярная масса окислителя (воздуха), кг/кмоль; M_f – молярная масса топлива, кг/кмоль; $Q_{\#}^p$ – низшая теплота сгорания, кДж/кг; r – кратность рециркуляции; T_T – теоретическая температура горения, $^\circ\text{C}$; T_{fl} – температура на выходе из агрегата (температура печи), $^\circ\text{C}$; α – коэффициент избытка воздуха; η – коэффициент полезного действия.**Индексы:** f – топливо; fl – выход из агрегата; g – продукты сгорания; w – садка печи; t – теоретический.**Введение**

При разработке и создании нового оборудования, использующего в качестве топлива природный газ (метан), основными требованиями является эффективное использование топлива и снижение выбросов токсичных веществ.

При создании котельной техники, работающей на природном газе, для соблюдения жестких тре-

бований по токсичным выбросам прежде всего необходимо искать пути сокращения выбросов оксидов азота NO_x как основного загрязнителя атмосферы.

С целью уменьшения образования оксидов азота NO_x используется рециркуляция продуктов сгорания на выходе из котлоагрегата в свежую топливно-окислительную смесь (реализуется по-

дачей в факел, в воздух горения или в топливо). Влияние рециркуляции на выход оксидов объясняется действием нескольких факторов: а) снижением максимальной температуры в зоне горения из-за разбавления охлажденными продуктами сгорания; б) снижением концентраций реагирующих веществ из-за разбавления продуктами сгорания [1].

Метод относится к экономичным технологическим мероприятиям подавления оксидов азота. Наибольшее уменьшение содержания NO_x достигается одновременным применением наряду с рециркуляцией газов таких методов как ступенчатое сжигание, перераспределение топлива по ярусам, сжигание топлива с малыми избытками воздуха. Преимущество перечисленных технологических методов: низкие капитальные затраты, не требуется специальное оборудование.

Рециркуляция газов в топочную камеру в настоящее время широко применяется в котлах большой мощности, установленных на крупных электростанциях. При этом более эффективной является не внутренняя рециркуляция горячих топочных газов в горелку, а внешняя рециркуляция предварительно охлажденных газов из хвостовой части котла в дутьевой воздух. При подаче газов рециркуляции не в дутьевой воздух, а в топливо, интенсивность их воздействия возрастает.

Эффективность рециркуляции тем больше, чем выше температура в зоне горения. Она снижается при:

- а) уменьшении нагрузки котла;
- б) увеличении коэффициента избытка воздуха;
- в) уменьшении температуры горения топлива;
- г) повышении содержания азотосодержащих соединений;
- д) уменьшении температуры дутьевого воздуха.

К недостаткам ввода газов рециркуляций следует отнести снижение КПД котла из-за увеличения объемов газов и повышения температуры уходящих газов за котлом.

Цели и методика исследования

В настоящей работе задачей исследования является определение влияния рециркуляции продуктов сгорания и коэффициента избытка воздуха

α на энергетическую эффективность и образование NO_x в рабочем пространстве топливоиспользующих агрегатов (котельных агрегатов) и выход оксидов азота в продуктах сгорания.

В Институте газа НАНУ разработана и реализована термодинамическая методика расчета влияния коэффициента избытка воздуха α и рециркуляции продуктов сгорания на увеличение затрат топлива. Данная методика по расчету энергетической эффективности и удельного расхода топлива в рабочем пространстве топливоиспользующих агрегатов детально рассмотрена в [2, 3, 4].

Выполнение расчетов по данной методике связано с использованием универсального компьютерного продукта "FUEL", разработанного в Институте газа НАНУ под руководством Б.С. Со-роки для расчета составов, термодинамических и теплофизических свойств равновесных продуктов реакции исходной смеси, характеризуемой произвольным соотношением C:H:O:N . В этом случае предполагается наличие десятков компонент в продуктах реакции (продуктах сгорания).

Термодинамический анализ является более простым, однако лишь оценочным методом расчета, ибо требует предварительного задания температуры уходящих газов T_{fl} , значение которой при заданной технологической температуре определяется интенсивностью тепло- и массообменных процессов.

В качестве меры эффективности принимаются КПД использования теплоты η_H и топлива η_f для «идеальных» топок [2], то есть камер сгорания, для которых характерны только две составляющие в тепловом балансе: потоки полезной теплоты \dot{Q}_{us} и потери с уходящими продуктами сгорания \dot{Q}_{fl}

$$\dot{Q}_{us} + \dot{Q}_{fl} = (\Delta I_{g,T} - \Delta I_{g,fl}) + \Delta I_{g,fl} = \Delta I_{g,T}; \quad (1)$$

$$\eta_H = \frac{\Delta i_w}{I_T - I_{0,T}} = \frac{\Delta i_w}{B_f \cdot \Delta H_{f,T}} = \eta_{H,id} = \frac{I_T - I_{fl}}{I_T - I_{0,T}}; \quad (2)$$

$$\eta_f = \frac{\Delta i_w}{(I_T - I_{0,T})^*} = \frac{\Delta i_w}{B_f \cdot \Delta H_{f,T}^*} = \eta_{f,id} = \frac{I_T - I_{fl}}{(I_T - I_{0,T})^*}; \quad (3)$$

КПД топки рассчитываются через полные энтальпии смеси продуктов сгорания (теплоносителя): при теоретической температуре сгорания T_T и при температуре на выходе из топочного пространства T_{fl} .

В связи с тем, что отсчет нулевых энтальпий ведется от состояния равновесия при стандартных условиях ($T_0 = 298 \text{ K}$), при котором в продуктах сгорания H_2O находится в виде воды (конденсация продуктов сгорания), требуется включение в рассматриваемую схему дополнительных устройств помимо задействованных в топках котлов и печей [2].

Вместе с тем, как правило, в отечественных публикациях и практике оценка эффективности использования топлива ведется через низшую теплоту сгорания Q_n^p . Принятие в качестве характеристики топлива Q_n^p имеет своим следствием рассмотрение H_2O в продуктах сгорания в виде пара.

Если температурное распределение в топке является заданным, то будет неизменным и распределение результирующих тепловых потоков при наличии рециркуляции продуктов сгорания в отсутствие рециркуляции в случае, если теплообмен в топке осуществляется излучением.

Так как полезное тепловосприятие идеальных печей можно представить в виде произведения $\Delta H = B_g (\Delta H_{g,T} - \Delta H_{g,fl})$, условие задачи сопоставления расходов топлива (горючего) при фиксированных α при использовании рециркуляции может быть сформулировано в виде

$$B'_g (\Delta H_{g,T} - \Delta H_{g,fl})' = B''_g (\Delta H_{g,T} - \Delta H_{g,fl})'' \quad (4)$$

Здесь ()' – без рециркуляции, ()'' – с рециркуляцией.

Обозначив выражение в скобках через Δ , получим:

$$\frac{B''_g}{B'_g} = \frac{\Delta'}{\Delta''} \quad (5)$$

Очевидно

$$B'_g = B'_f + B'_a = B'_f (1 + \alpha L_{st} M_a M_f^{-1}); \quad (6)$$

$$B''_g = B''_f + B''_a + r B''_g; \quad (7)$$

$$B''_g (1-r) = B''_f (1 + \alpha L_{st} M_a M_f^{-1}). \quad (8)$$

При этом изменение расхода топлива (перерасход) при использовании рециркуляции составит относительную величину

$$\delta B_{f,r} = \frac{B''_f - B'_f}{B'_f} = \frac{B''_f}{B'_f} - 1 = \frac{\Delta' (1-r)}{\Delta''} - 1. \quad (9)$$

С учетом изложенного выше для идеальной печи:

$$\frac{B''_f}{B'_f} = \frac{\Delta' (1-r)}{\Delta''} = \frac{\eta'_f}{\eta''_f}. \quad (10)$$

По подобной методике рассчитывается и изменение (перерасход) топлива при изменении коэффициента избытка воздуха:

$$\delta B_{f,\alpha} = \frac{B_f^\alpha - B_f^{\alpha=1.0}}{B_f^{\alpha=1.0}} = \frac{B_f^\alpha}{B_f^{\alpha=1.0}} - 1. \quad (11)$$

Обсуждение результатов

Численный анализ был проведен на примере газообразного топлива – метана с азотно-кислородным окислителем.

Были проведены численные расчеты влияния рециркуляции на изменение расхода топлива и выход NO_x в диапазоне коэффициента избытка

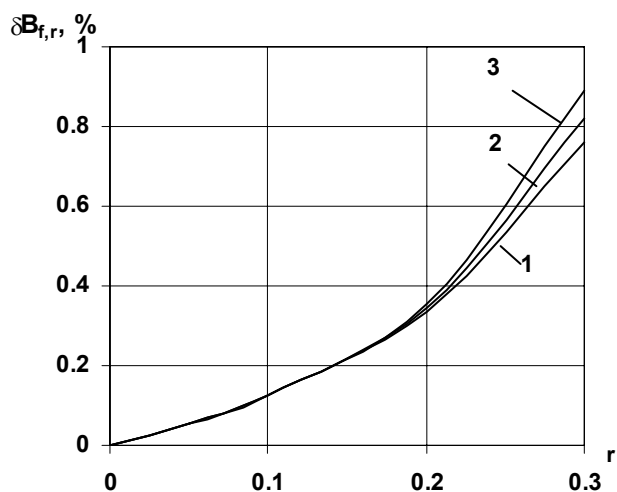


Рис. 1. Влияние рециркуляции продуктов сгорания r на перерасход топлива $\delta B_{f,r}$ при $T_{fl} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ при разных значениях α : 1 – 1,0; 2 – 1,1; 3 – 1,2.

воздуха $\alpha = 1.0...1.2$ и кратности рециркуляции $r = 0...0.3$. Полученные результаты представлены на рис. 1.

Установлено, что при $r = 0.05$ и $T_{fl} = 1100$ °C перерасход топлива $\delta B_{f,r}$ к значению без рециркуляции ($r = 0$) составляет ~ 5.5 % практически независимо от α ; при $r = 0.1$ перерасход увеличивается до $12.6...12.7$ %, при $r = 0.2$ – до $33.6...35.6$ % (для разных α).

С целью оценки влияния коэффициента избытка воздуха α в диапазоне $\alpha = 1...2$ были выполнены расчеты равновесных продуктов сгорания при температурах $T_{fl} = 25...500$ °C. Полученные расчетные данные представлены на рис. 2.

При фиксированной температуре процесса с увеличением α наблюдается возрастание расхода топлива. Наиболее существенный перерасход топлива наблюдается при $T_{fl} = 500$ °C и составляет $\delta B_{f,\alpha} = 28$ % при $\alpha = 2$, в то время как при $T_{fl} = 100$ °C и $\alpha = 2$ перерасход составляет всего $\delta B_{f,r} = 2.8$ %.

На рис. 3. представлены результаты расчета содержания оксидов азота NO_x в продуктах сгорания метано-воздушной смеси при $\alpha = 1.0...1.2$.

При этом наблюдается снижение содержания оксидов азота NO_x в продуктах сгорания метано-воздушной смеси по мере увеличения кратности рециркуляции r для фиксированных значений α . Повышение значения α приводит к повышению уровня содержания оксидов азота. Влияние r несколько понижается с ростом α . Для $\alpha = 1.0$ при $r = 0.05$ сокращение выхода оксидов азота NO_x составляет величину порядка 24 %, при $r = 0.2-0.72$ %, для $\alpha = 1.2$ при $r = 0.05$ сокращение выхода оксидов азота NO_x составляет величину порядка 17.7 %, при $r = 0.2-0.60$ %. Отметим также (см. рис. 3) снижение теоретической температуры горения как с повышением α , так и значения кратности рециркуляции r .

Выводы

1. Расчеты термодинамически равновесных состояний продуктов сгорания могут быть использованы для оценки энергетической эффективности

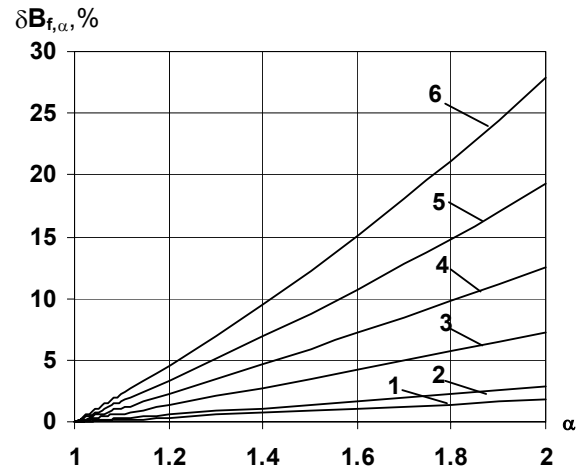


Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха α на перерасход топлива $\delta B_{f,\alpha}$ при следующих значениях T_{fl} , °C: 1 - 25; 2 - 100; 3 - 200; 4 - 300; 5 - 400; 6 - 500.

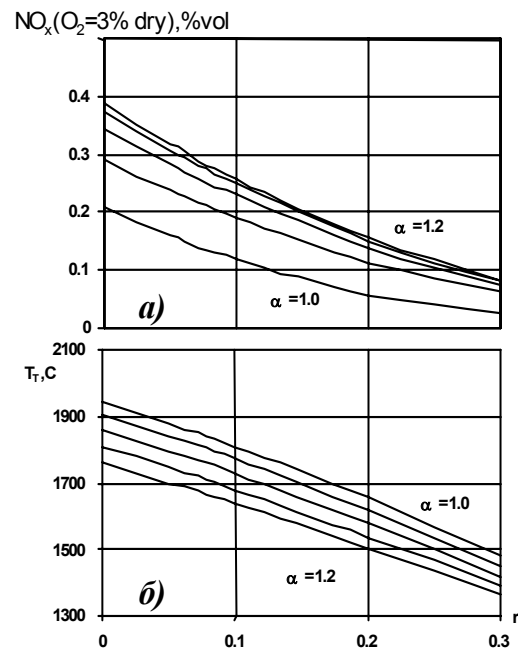


Рис. 3. Изменение содержания оксидов азота NO_x в продуктах сгорания (а) и теоретической температуры горения метано-воздушной смеси T_T (б) в зависимости от изменения кратности рециркуляции продуктов сгорания r для значений $\alpha = 1.0, 1.05, 1.1, 1.15, 1.2$.

и удельного расхода топлив в топливоиспользующих агрегатах в допущении “идеальной печи”.

2. Установлено, что перерасход топлива в условиях поддержания заданного полезного тепловосприятия определяется изменением КПД топки, обусловленного рециркуляцией продуктов сгорания.

3. Установлено, что рециркуляция продуктов сгорания приводит к одинаковому перерасходу топлива, практически независимо от величины α для значений $r \leq 0.2$, а в диапазоне $r = 0.2 \dots 0.3$ для разных α перерасход имеет разную величину.

4. Установлено, что затраты топлива увеличиваются с увеличением α для фиксированной температуры процесса. Влияние α возрастает при увеличении значения T_{fl} .

5. В ходе анализа термодинамических расчетов установлено, что рециркуляция продуктов сгора-

ния приводит к снижению выбросов оксидов азота NO_x .

ЛИТЕРАТУРА

1. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива.– Л.: Недра.– 1977.– 294 с.
2. Сорока Б.С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах.– Киев: Наукова думка, 1993.– 413 с.
3. Сорока Б.С., Шандор П. Термодинамический анализ энергоэкологической эффективности использования топлива // Пром. теплотехника.– 1999.– Т. 21.– № 6.– С. 43-50.
4. Сорока Б.С. Топливные печи в проблеме интенсификации процессов тепло- и массопереноса// Материалы 5-го Минского международного фо-рума по тепло- и массообмену.– Минск, Белоруссия, 24-28 мая, 2004.– 25 с.

Получено 26.09.2004 г.

* Выполнено под руководством д.т.н., проф. Б.С. Сороки.

УДК 622.61, 537.533

Кукота Ю.П., Бондзик Д.Л., Дунаевская Н.И., Чернявский Н.В.

Институт угольных энерготехнологий НАН и Минтопэнерго Украины

ПЛАЗМЕННЫЙ ПОДЖИГ ВЫСОКОЗОЛЬНЫХ АНТРАЦИТОВ ПРИ ИХ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ

Запропоновано варіант ступінчастої плазмової термохімічної підготовки антрацитового пилу перед спалюванням в топці пилуугольних котлів. Експериментально досліджено динаміку теплових процесів на початковій стадії взаємодії пилуугольної суміші з повітряною плазмовою струминою. Показано можливість зменшення енерговитрат при безмазуттовому підпалюванні низько реакційного високозольного вугілля.

Предложен вариант ступенчатой плазменной термохимической подготовки антрацитовой пыли перед сжиганием в топке пылеугольных котлов. Экспериментально исследована динамика тепловых процессов в начальной стадии взаимодействия пылеугольной смеси с воздушной плазменной струей. Показана возможность снижения энергозатрат при безмазутном поджиге низкорекреакционных высокозольных углей.

A plasma thermochemical variant of pulverized anthracite preparation for its incineration in a coal-fed furnace has been proposed. The dynamics of thermal processes at the initial stage of interaction between an air plasma jet and air pulverized coal jet has been investigated. A possibility of energy expenditure reduction at the oilless ignition of low reactive high ash coals has been shown.

A – зольність, %;

I – ток дуги, А;

V – напряжение дуги и выход летучих, В, %;

G – массовый расход, г/с;

P – электрическая мощность, кВт;

$\pm Q$ – тепловыделения и теплопотери, кВт;

T – температура, К, °С;

Q_n^p – теплотворная способность топлива, кДж/кг;