

УДК 621.311

**Исследование оптимального значения  
коэффициента избытка воздуха  
при сжигании искусственного  
композиционного жидкого топлива  
в энергетических котлоагрегатах\***

**П.Н. ДАНИЛОВ<sup>1</sup>, Е.Е. БОЙКО<sup>2</sup>, Ю.В. ОВЧИННИКОВ<sup>3</sup>, Ф.А. СЕРАНТ<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант. E-mail: [petrdanilovykt@gmail.com](mailto:petrdanilovykt@gmail.com)

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: [e.boyko1991@yandex.ru](mailto:e.boyko1991@yandex.ru)

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: [goxu9107@mail.ru](mailto:goxu9107@mail.ru)

<sup>4</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, ул. Кропоткина, 96/1, ЗАО «КОТЭС», доктор технических наук. E-mail: [dkmv90@mail.ru](mailto:dkmv90@mail.ru)

Коэффициент избытка воздуха является важным фактором, который влияет на экономичность эксплуатации котлоагрегата. Накопленная статистика по оптимальным значениям коэффициента избытка воздуха для различных видов топлив сильно отличается от значения для водоугольного топлива и, в частности, для искусственного композиционного жидкого топлива. Так как этот вид является новым топливом, данные по значению коэффициента избытка воздуха для него отсутствуют. В данной статье предложен метод теоретического определения избытка воздуха при факельном горении водоугольного топлива в камерной топке. Построены графические зависимости суммарных потерь теплоты от коэффициента избытка воздуха котлоагрегата в соответствии со стехиометрическим расчетом сжигания топлива; расчетная кривая потерь с уходящими газами; эксергетическая кривая потерь от неполноты сгорания топлива, а также суммарная кривая потерь, определяющих максимальное значение КПД котла. Выполнена проверка методики определения коэффициента избытка воздуха при расчете контрольного варианта при фракционном сжигании пылевидного угольного топлива в камерной топке котлоагрегата. Результаты определения коэффициентов избытка воздуха для искусственного композиционного жидкого топлива и пылеугольной пыли наглядно представлены графически. Выполнено сравнение коэффициента избытка воздуха для водоугольного топлива, рассчитанного по предложенной методике с экспериментальным результатом при сжигании водоугольного топлива на исследовательском стенде ОИСГТ-6. Были проведены эксперименты по определению продуктов сгорания, поскольку коэффициент избытка воздуха зависит от этого фактора. Компоненты продуктов сгорания определялись при помощи газоанализатора TESTO-330-2LL. Значение коэффициента избытка воздуха было определено графически. При

---

\* Статья получена 19 января 2015 г.

сравнении результатов коэффициентов избытка воздуха, полученных различными методами, получили, что значения коэффициентов избытка воздуха лежат в диапазоне от  $1,13 \pm 0,02$ , несовпадения результатов не превышают 1,8 %.

**Ключевые слова:** коэффициент избытка воздуха, водоугольное топливо, искусственное композиционное жидкое топливо, пылеугольное топливо, термодинамический метод, теоретический результат, проверка метода, экспериментальное подтверждение теоретического результата

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-2-143-156

## ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором, влияющим на экономичность эксплуатации парового котла, является коэффициент избытка воздуха, равный отношению действительного подаваемого в зону горения воздуха к теоретически необходимому количеству при сжигании топлива:

$$\alpha_B = \frac{V_B^D}{V_B^O}. \quad (1)$$

Ввод в топку излишне большого количества воздуха вызывает увеличение потерь с уходящими газами. Подача неоправданно малого количества воздуха приводит к неполному сгоранию топлива и возрастанию потерь от химической полноты сгорания. Таким образом, суммарные потери котлоагрегата в функции от коэффициента избытка воздуха имеют выраженный минимум при оптимальном значении коэффициента. Надо заметить, что теоретический КПД котла зависит от условий помола угля. В дальнейшем примем, что изменение режима горения топлива происходит при постоянных условиях помола.

Условие оптимального теоретического КПД можно заменить условием минимальной суммы относительных потерь энергии. Достаточно при этом учесть потерю тепла с уходящими газами и потерю химической и механической неполноты сгорания топлива, поскольку влияние коэффициента избытка воздуха на остальные виды потерь незначительно.

## 1. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД РАЧЕТА

Балансовое уравнение энергии для процесса сжигания топлива в котлоагрегате может быть записано в виде

$$q_T = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6, \quad (2)$$

где  $q_T$  – тепло, выделяющееся при сжигании топлива, кДж/кг·т;  $q_1$  – тепло, полезно использованное в котлоагрегате, кДж/кг·т;  $q_2$  – тепло, теряемое с уходящими газами, кДж/кг·т;  $q_3$  – тепло, теряемое от химической неполноты сгорания, кДж/кг·т;  $q_4$  – тепло, теряемое от механической неполноты сгорания, кДж/кг·т;  $q_5$  – тепло, теряемое от наружного охлаждения котлоагрегата, кДж/кг·т;  $q_6$  – тепло, теряемое со шлаком и золой, кДж/кг·т.

Разделив все члены уравнения на  $q_T$ , запишем выражение (2) в следующем виде:

$$1 = \sum_{i=1}^6 \xi_i . \quad (3)$$

Уравнение баланса энергии может быть записано в виде

$$\eta_{KA} = 1 - \sum_{i=2}^6 \xi_i . \quad (4)$$

Графическое решение поиска оптимального значения коэффициента избытка воздуха, учитывая, что  $q_5$  и  $q_6$  практически не зависят от коэффициента избытка воздуха, показано на рис. 1.

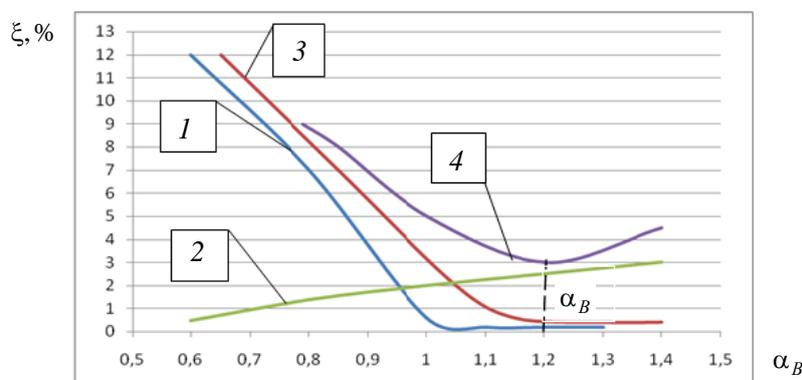


Рис. 1. Графическая зависимость суммарных потерь теплоты  $\sum \xi_{2,3,4}$  от  $\alpha_B$  в энергетическом балансе котлоагрегата:

1 – теоретическая кривая в соответствии со стехиометрическим расчетом сжигания топлива; 2 – расчетная кривая потерь с уходящими газами; 3 – энергетическая кривая потерь от неполноты сгорания топлива;

4 – суммарная кривая потерь, определяющих  $\eta_{K_{\max}} = (\alpha_{B_{\text{опт}}})$

Зависимость относительной потери тепла с уходящими газами может быть построена практически точно на основе расчетов реакции горения топлива. Но кривая зависимости относительной потери тепла от неполноты сгорания не может быть рассчитана, так как эта потеря является следствием необратимости процессов горения, аэродинамики потоков и диффузии компонентов реакции в зоне горения. Кроме того, на эти процессы влияет способ сжигания топлива, а также конструктивно-компоновочные характеристики топки и газового тракта котлоагрегата. Поэтому величины  $\xi_3$  и  $\xi_4$  определяются экспериментально. Опыт испытаний котлов показывает, что потеря от неполноты сгорания топлива зависит от режима работы котлоагрегата, тонкости помола топлива и температурного режима топки. В практическом интервале значений коэффициента избытка воздуха для энергетических котлов малой и средней паропроизводительности (до 650 т/ч) с факельными топками суммарная потеря ( $\xi_3 + \xi_4$ ) присутствует всегда, поэтому важно знать опти-

мальное значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$ , которое соответствовало бы максимальному значению КПД котла.

В технической литературе накоплена статистика по оптимальным значениям коэффициента избытка воздуха и даны рекомендации для различных топлив, способов сжигания и различных видов топок [1–16]. Значение  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  может сильно отличаться даже при одинаковых видах топок и способе сжигания. Так, в камерных топках при сжигании природного газа  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  имеет значение 1,03...1,05, мазута – 1,08...1,12, угольной пыли 1,20...1,24.

Поскольку водоугольное топливо (ВУТ), и в частности искусственное композиционное жидкое топливо (ИКЖТ), все еще является новым топливом для энергетики, данные по  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  для него отсутствуют. При тепловых расчетах работы котлоагрегатов на ВУТ обычно по аналогии с жидким топливом принимают значение  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  на уровне 1,15. Нами было проведено исследование  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  для ВУТ (ИКЖТ) с целью теоретического обоснования значения коэффициента избытка воздуха для этого топлива и сделана попытка экспериментальной проверки теоретического вывода.

Исследование выполнено на примере факельного сжигания ИКЖТ, изготовленного из кузнецкого угля ОСР с содержанием жидкой фазы 0,4 кг/кг·т. В качестве контрольного расчета было рассмотрено факельное сжигание ОСР по рабочей массе в камерной топке. В контрольном варианте было известно значение  $\alpha_{B_{\text{опт}}} = 1,22$ . Величина относительной потери от неполноты сгорания была принята средней по значению  $\xi_3 + \xi_4 = 0,03$ , или 3 % в соответствии с условиями сжигания [16]. Лабораторные исследования сжигания ИКЖТ дают основания установить значение относительной погрешности от неполноты сгорания для ИКЖТ на 30 % ниже, чем для контрольного варианта.

Методика теоретической части исследования заключается в следующем:

1. Сравнительный расчет процесса горения топлива на основе стехиометрических реакций или на основе химических реакций и закона сохранения массы химических элементов в реакциях.

Сравнительный расчет производится при одинаковых граничных условиях процесса: одинаковый исходный угол, равенство начальных и конечных температур в процессе горения, одинаковые допущения в условиях реакции.

2. Расчет процесса горения угольной пыли и ИКЖТ производится в условиях факельного сжигания в камерных топках.

3. Расчет процесса сжигания ИКЖТ и контрольного топлива проводится при изменении коэффициента избытка воздуха  $\alpha_B$  от 0,6 до 1,4.

4. Вычисление потерь с уходящими газами производится по результатам расчета процесса горения топлива

$$\xi_2 = \frac{1}{q_T} \sum m_i h_i, \quad (4a)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го компонента продуктов сгорания топлива, кг/кг·т;  $h_i$  – энтальпия  $i$ -го компонента при температуре выхода продуктов сгорания  $t_{n.c.}$  кДж/кг·т;  $t_{n.c.}$  – температура выхода продуктов сгорания, принята 150 °С.

Кроме того, выполнен расчет  $\xi_2$  при  $t_{п.с} = 175$  и  $125$  °С.

5. Потери  $\xi_3$  и  $\xi_4$  выбираются в соответствии с рекомендациями методических руководств по тепловому расчету котлоагрегатов [1–7], для ИКЖТ – на 30 % ниже.

На основании расчетов и принятых значений  $\xi_3$ ,  $\xi_4$  строятся графики в системе координат  $\sum \xi_i$  и  $\alpha_B$ . На кривой  $(\xi_2 + \xi_3 + \xi_4)$  определяется точка минимума суммы, которая соответствует на оси  $\alpha_B$  оптимальному значению  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$ .

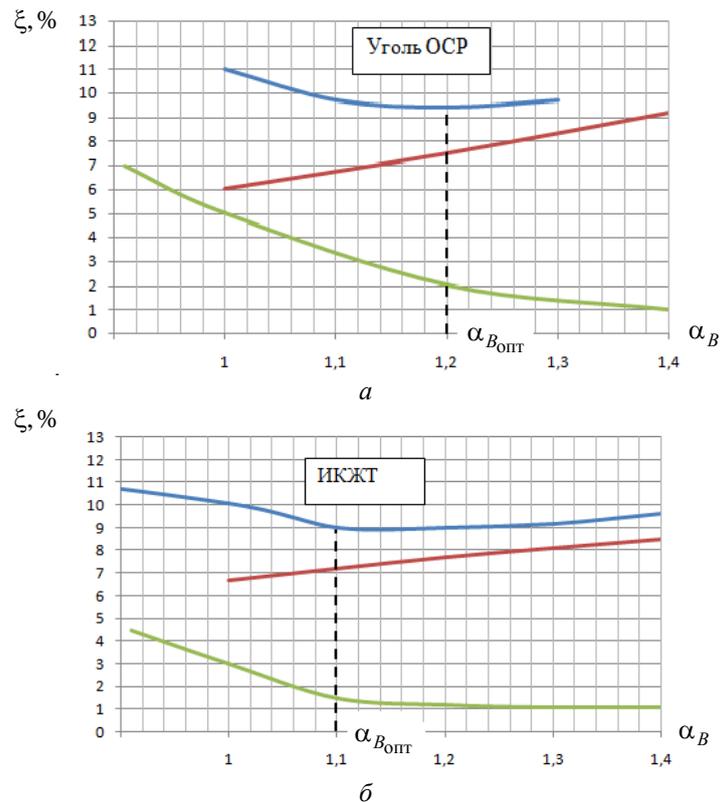


Рис. 2. Результаты определения  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  :

*а* – контрольное топливо: угольная пыль ОСР  $\alpha_{B_{\text{опт}}} = 1,2$ ;

*б* – ИКЖТ (уголь ОСР – 60 %, вода – 40 %)  $\alpha_{B_{\text{опт}}} = 1,136$

Результаты расчетов  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  подтверждают работоспособность методики, поскольку  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$ , полученное расчетным путем для факельного сжигания каменного угля класса ОСР в камерной топке, практически совпадает с рекомендуемым экспериментальным значением; величина  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  для ИКЖТ определяется расчетным путем,  $\alpha_{B_{\text{опт}}} = 1,136$  согласуется с величиной  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  для сжигания топлива (мазута).

Для проведения эксперимента на основе стенда ОИСГТ-6 на полигоне НПО «Росток» [17] была собрана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 3.

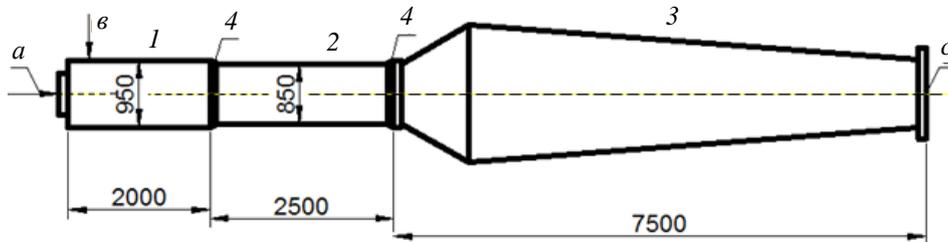


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

1 – циклонный предтопок; 2 – вставка из жаропрочной трубы  $\varnothing$  850 мм; 3 – котел-утилизатор КУ-6; 4 – герметичное уплотнение; а – топливо ИКЖТ; в – воздух; с – отходящие газы

Экспериментальная установка включает в себя циклонный предтопок ЦП и стенд ОИСГТ-6, к которому через вставку из жаропрочной стали в виде трубы диаметром 850 мм и длиной 2,5 м подсоединялся котел-утилизатор тепловой мощностью 6,5 МВт.

Вставка необходима для того, чтобы с учетом крутки факела закончить горение топлива в ней, в котел-утилизатор входили только раскаленные газы, режим его работы соответствовал штатному. Охлаждение водогрейного котла-утилизатора осуществлялась через циркуляционную водяную систему, включавшую в себя бак-аккумулятор.

Конструкция была газоплотной, что позволяло производить настройку установки на режим по выходному сечению котла с, используя переносной газоанализатор TESTO 330-2LL.

Ниже дано краткое описание принятой методики [18]. Условие оптимального термического КПД котлоагрегата заменяется условием минимальной суммы относительных потерь энергии. Достаточно при этом учесть потери тепла с уходящими газами и потерю тепла от химической и механической неполноты сгорания топлива, поскольку влияние коэффициента избытка воздуха на остальные виды потерь незначительно.

Если принять допущение, что качество топлива неизменно, то при постоянной производительности котла функция цели может быть представлена выражением

$$n_S'' \left[ (\bar{c}_\mu)(t_S - t_0) + [\text{CO}] (\mu Q_H)_{\text{CO}} \right] + \frac{c}{12} x_c (\mu Q_H)_C = \min, \quad (5)$$

где  $n_S''$  – количество влажных продуктов сгорания, отнесенных к единице топлива, кмоль/кг;  $\bar{c}_\mu$  – средняя мольная теплоемкость влажных продуктов сгорания, кДж/(кмоль·К);  $t_S$  – температура продуктов сгорания, выбрасываемых в окружающую среду, °С;  $t_0$  – температура окружающей среды, °С; [CO] – мольная доля окиси углерода во влажных продуктах сгорания;  $(\mu Q_H)_{\text{CO}}$ ,  $(\mu Q_H)_C$  – нижняя мольная теплота сгорания окиси углерода и

аморфного углерода, кДж/кмоль;  $c$  – массовая доля углерода в топливе;  $x_c$  – коэффициент неполного сгорания, выражающий отношение свободного углерода в продуктах сгорания (твердых) к количеству углерода в топливе, кг/кг.

В уравнение (5) удобно ввести количество  $n''_{SS}$  сухих продуктов сгорания, а также мольную долю [CO] сухих продуктов сгорания. Тогда теплоемкость продуктов сгорания следует отнести к  $(1 - X_S)$  кмоль, где  $X_S$  означает мольную степень увлажнения продуктов сгорания.

$$n''_{SS} \{ (\bar{c}_\mu)_{1+x} (t_S - t_0) + [\text{CO}] (\mu Q_H)_{\text{CO}} \} + \frac{c}{12} (\mu Q_H)_C = \min. \quad (6)$$

Для определения коэффициента избытка воздуха  $\alpha_B$ , обеспечивающего условия (6), следовало бы для не менее чем двух значений величины  $\alpha_B$  вычислить величину производной функции цели, а затем путем интерполяции найти значение  $\alpha_B$ , при котором производная равна нулю. Вместо  $\alpha_B$  удобнее как параметр ввести мольную долю кислорода в сухих продуктах сгорания  $[\text{O}_2]$ . Условие (6) в этом случае можно заменить условием

$$\begin{aligned} \frac{d \left[ n''_{SS} (\bar{c}_\mu)_{1+x} (t_S - t_0) \right]}{d[\text{O}_2]} + (\mu Q_H)_{\text{CO}} \frac{d \{ n''_{SS} [\text{CO}] \}}{d[\text{O}_2]} + \\ + \frac{c}{12} (\mu Q_H)_C \frac{dx_c}{d[\text{O}_2]} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Определение левой стороны уравнения (7) для минимально двух значений  $[\text{O}_2]$  требует использования непрерывных методов, позволяющих изменить за короткое время входящие в уравнение (7) переменные при минимально трех значениях  $[\text{O}_2]$ . Имея, таким образом, три значения функции (7), можно определить метод конечных разностей второго значения производной этой функции.

Основные переменные в уравнении (7)  $n''_{SS}$  и  $x_c$  не поддаются непрерывным измерениям. Эти величины могут быть получены на основе вычислений и проведения лабораторного анализа. Выражения, определяющие  $n''_{SS}$ , а также  $x_c$  путем анализа продуктов сгорания, очень чувствительны к ошибкам измерений, поскольку включают в знаменателе величину  $[\text{N}_2] - 0,79$ , где  $[\text{N}_2]$  – мольная доля азота в сухих продуктах сгорания. Определение  $[\text{N}_2]$  с абсолютной погрешностью 0,5 % приводит к относительной погрешности разницы  $[\text{N}_2] - 0,79$  в значении ~25 %. Эта погрешность дает большую погрешность в определении количества продуктов сгорания. Еще большую погрешность (до 500 %) дает определение коэффициента  $x_c$ . Существует только одна возможность уменьшения погрешности определения величины  $n''_{SS}$ , а также  $x_c$  на основе анализа продуктов сгорания. Следует стремиться к тому, чтобы число неизвестных в материальных балансах С, Н, О и N было

меньше числа уравнений. Тогда можно было бы ввести согласование субстанциональных балансов и, таким способом, получить увеличение точности определения неизвестных [20].

Дальнейшие разработки методики оптимизации  $\alpha_B$  заключаются в преобразовании выражения (7) с величинами  $n''_{SS}$ ,  $(c_\mu)_{1+x}$  и  $x$  через мольные доли компонентов продуктов сгорания и через массовые доли компонентов топлива. Левая сторона уравнения имеет в этих преобразованиях форму дроби. С целью выполнения условия (6) достаточно было бы найти нулевые значения дроби. Для этого вводятся значения:

$$[\text{RO}_2] = [\text{CO}_2] + [\text{SO}_2];$$

$$a = 0,79(c_\mu)_{\text{N}_2} + 0,21(c_\mu)_{\text{O}_2};$$

$$\delta = (c_\mu)_{\text{H}_2\text{O}};$$

$$\gamma = (c_\mu)_{\text{CO}_2} - (c_\mu)_{\text{CO}} = 0,395[(c_\mu)_{\text{O}_2} - (c_\mu)_{\text{N}_2}] + 0,5x_a(c_\mu)_{\text{H}_2\text{O}};$$

$$\gamma' = (c_\mu)_{\text{CO}_2} - (c_\mu)_{\text{CO}} = 0,395[(c_\mu)_{\text{O}_2} - (c_\mu)_{\text{N}_2}];$$

$$\varepsilon = (c_\mu)_{\text{CO}_2} - (c_\mu)_{\text{O}_2};$$

$$\mu = (c_\mu)_{\text{CO}_2} - (c_\mu)_{\text{N}_2} - [(c_\mu)_{\text{O}_2} - (c_\mu)_{\text{N}_2}].$$

Причем  $L_R = 1 + 0,79 \cdot 0,375 \frac{8H - 0 - 0,3N}{C + 0,375S}$  – число, следующее из химического топлива.

Из статических данных следует, что значение числа  $L_R$  для данного вида топлива практически постоянно. Для каменного угля получено

$$L_R = 1,1034 \pm 0,0237.$$

Коэффициенты  $a$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  и  $\mu$  зависят от температуры продуктов сгорания, однако влияние этой температуры невелико, поэтому в дальнейших преобразованиях принято постоянное значение этих коэффициентов, считая, что температура продуктов сгорания на выходе из котла изменяется в границах  $160 \pm 30$  °С. Для каменного угля получено:

$$a = 29,3867 \pm 0,0818,$$

$$\delta = 34,1467 \pm 0,1839,$$

$$\gamma = 10,8340 \pm 0,7176,$$

$$\gamma' = 10,5533 \pm 0,6949,$$

$$\varepsilon = 10,1877 \pm 0,6336,$$

$$\mu = 9,8879 \pm 0,6222 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$$

При сжигании каменного угля можно принять постоянное значение для выражений, зависящих только от температуры продуктов сгорания, если влияние этой температуры очень мало. Для каменного угля

$$(\mu Q_H)_C - \varepsilon(t_S - t_0) = 405104,2 \pm 419,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}},$$

$$(\mu Q_H)_C - (\mu Q_H)_{CO} - (\gamma - \varepsilon)(t_S - t_0) = 123604,7 \pm 33 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}.$$

С учетом высказанного упрощенная запись условия минимума суммы потерь с уходящими газами и от неполноты сгорания при сжигании каменного угля ( $x = 0,025 \pm 0,2$ ) принимает вид

$$\begin{aligned} F(O_2)_{1-2} = & \left\{ 405104,2 [RO_2]'' + 123604,7 [CO]'' - (29,39 + 34,15x_a)(t_S'' - t_0)'' + \right. \\ & + [0,16 + 0,386x_a] + 8,72(x_S' + x_S'' - 2x_a) - 0,246([CO]' + [CO]'' + \\ & + 3,083([RO_2]' + [RO_2]''))(t_S' - t_S'') \frac{x_S' - x_a(1 - 0,5[CO]')}{[O_2]' - [O_2]''} - \\ & - \{ 405104,2 [RO_2]' + 123604,7 [CO]' - (29,39 + 34,15x_a)(t_S' - t_0)' + \\ & + [0,16 + 0,386x_a + 8,72(x_S' + x_S'' - 2x_a) - 0,246([CO]' + [CO]'' + \\ & \left. + 3,083([RO_2]' + [RO_2]''))(t_S' - t_S'') \} \frac{x_S'' - x_a(1 - 0,5[CO]'')}{[O_2]' - [O_2]''}. \end{aligned} \quad (8)$$

В уравнении (8) функция  $F(O_2)_{1-2}$  рассчитана на обработку двух измерений режимов – предыдущего (') и последующего ("). Измерения должны производиться после стабилизации режимов, и если предварительно известно вероятное значение оптимального коэффициента избытка воздуха, то диапазон из трех последовательных измерений должен включать в себя предполагаемое значение  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$ . В этом случае возможно ограничиваться тремя режимами работы котлоагрегата 1, 2 и 3 и рассчитывать значение двух функций режима  $F(O_2)_{1-2}$  и  $F(O_2)_{2-3}$ .

Оптимальная доля кислорода в продуктах сгорания, выполняющая условие  $F(O_2) = 0$ , следует из линейной интерполяции:

$$[O_2]_{\text{опт}} = \frac{([O_2]''' + [O_2]'' ) F(O_2)_{1-2} - ([O_2]'' + [O_2]') F(O_2)_{2-3}}{2[F(O_2)_{1-2} - F(O_2)_{2-3}]}. \quad (9)$$

Очередной цикл нахождения  $[O_2]_{B_{\text{опт}}}$  должен быть выполнен при смене теплоты сгорания топлива  $Q_H^P$ , качества помола топлива, а также при смене нагрузки котла.

Возможность распространения изложенной методики экспериментального определения  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  на ВУТ (ИКЖТ) следует из того, что это топливо можно рассматривать как сильно обводненное угольное топливо.

Основные факторы, от которых зависит значение коэффициента избытка воздуха, для ИКЖТ, очевидно, такие же, как и для пылевидного угольного топлива: величина помола, нагрузка на котлоагрегат, топливо. Как известно, для камерных топок при факельном сжигании каменных углей величина коэффициента избытка воздуха в оптимальном режиме  $\alpha_{B_{\text{опт}}} \sim 1,22 \dots 1,24$ , т. е. изменяется в довольно узком диапазоне, но неверно будет утверждение, что величина  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  для ИКЖТ, составленного на основе каменных углей, такая же. Также ее нельзя рассчитать пропорционально доле каменного угля в композиции. Зависимость  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  от влияющих факторов нелинейна. Однако лучше всего определять эту величину на основе измерений состава продуктов сгорания на работающем котлоагрегате.

Нами были проведены эксперименты для определения по изложенной методике оптимального коэффициента избытка воздуха для ИКЖТ  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  для топливной композиции следующего состава:

$$C^P = 46,074; H^P = 2,178; N^P = 0,912; O^P = 1,314; S^P = 0,300;$$

$$A^P = 9,198; W^P = 40,0$$

в процентах на основе кузнецкого угля марки ОС. Размеры твердых частиц были  $\leq 3$  мкм.

Испытания проводились в трех режимах:  $\alpha_B = 1,01$ ,  $\alpha_B = 1,2$ ,  $\alpha_B = 1,4$ .

При постоянной нагрузке котла определялись компоненты продуктов сгорания при помощи газоанализатора TESTO 330-2LL. Результаты измерений см. в таблице.

**Состав газа по результатам измерений для расчета  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$**

Режим	Индекс	Мольные доли компонентов продуктов сгорания					Температура, °C	
		[O <sub>2</sub> ]	[RO <sub>2</sub> ]	[CO]	$x_S$	$x_a$	$t_S$	$t_0$
1	I	0,005	0,159	0,005	0,151	0,01	148,2	17
2	II	0,056	0,134	0,003	0,131	0,01	151,1	17
3	III	0,067	0,121	0,001	0,120	0,01	156,2	17

По результатам таблицы было вычислено значение функции  $F(O_2)$  по формуле (8):

$$F(O_2)_{1-2} = 10398;$$

$$F(O_2)_{2-3} = -44536.$$

Далее по формуле (9) была вычислена оптимальная молярная доля свободного кислорода  $[O_2]$  в продуктах сгорания  $[O_2]_{\text{опт}} = 0,028$  (2,8 %).

Окончательный результат определяем графически на основе линейной интерполяции (рис. 4).

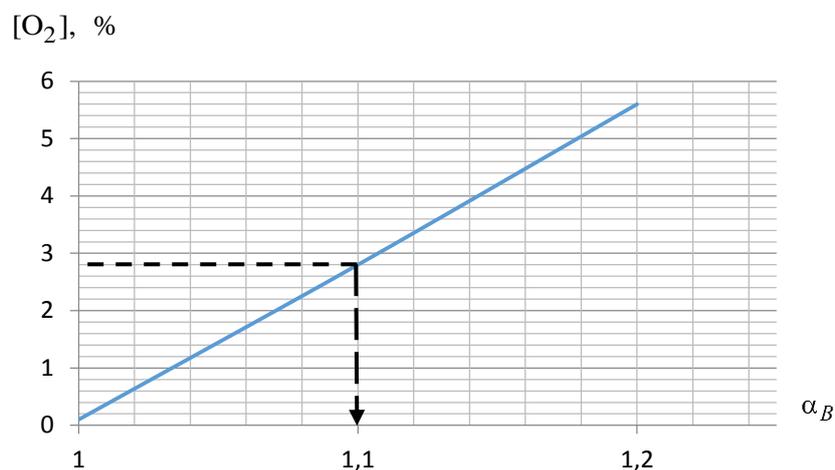


Рис. 4. Графическое определение  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  на основе линейной интерполяции кусочной функции  $F(O_2)$  на основе решения уравнения (9)

Таким образом, в соответствии с рис. 4  $\alpha_{B_{\text{опт}}} = 1,1$ .

Можно также воспользоваться известной кислородной формулой для определения  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  по доле свободного кислорода в продуктах сгорания:

$$\alpha_B = \frac{21}{21 - [O_2]} = \frac{21}{21 - 2,8} = 1,15,$$

где  $[O_2]$  – молярная доля свободного кислорода в продуктах сгорания, %.

Различными методами независимо друг от друга были получены три результата:

$$\alpha_{B_{\text{опт}(1)}} = 1,136; \alpha_{B_{\text{опт}(2)}} = 1,10; \alpha_{B_{\text{опт}(3)}} = 1,15.$$

Среднее значение  $\alpha_{B_{\text{опт ИЖКТ}}} = 1,1286 \sim 1,13 \pm 0,02$ . Несовпадение результатов не превышает 1,8 %, что объясняется неизбежными округлениями при расчетах и погрешностями измерений.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена методика теоретического определения оптимального значения коэффициента избытка воздуха при сгорании твердых и жидких топлив. Выполнена проверка методики на достоверность результата.

2. В соответствии с предложенной методикой впервые теоретически получено значение  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  для ВУТ (ИКЖТ).

3. Выполнено экспериментальное определение  $\alpha_{B_{\text{опт}}}$  для ИКЖТ в рамках исследований по кинетике горения тонкодисперсных водоугольных суспензий и оптимизации режимов их сжигания (Госконтракт № 16.518.11.7070 от 25 августа 2011 г.).

4. Рекомендуемое значение  $\alpha_{B_{\text{опт}}} = 1,13 \pm 0,02$  для ИКЖТ практически совпадает с рекомендуемым значением при сжигании жидких углеводородных топлив энергетического назначения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / РАО ЕС России. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ЦКТИ: ВТИ, 1998. – 256 с.
2. РД 153-34.1-26.303-98. Методические указания по проведению эксплуатационных испытаний котельных установок для оценки качества ремонта. – М.: ОРГРЭС, 2000. – 47 с.
3. Трёмбовля В.И., Фигнер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. – М.: Энергия, 1977. – 296 с.
4. Стаскевич Н.Л., Северинец Г.Н., Вигдорчик Д.Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.
5. Янкевич В.И. Наладка газомазутных промышленных котельных. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 216 с.
6. Равич Р.Б. Эффективность использования топлива. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
7. СН 350-66. Указания по проектированию котельных установок. – М.: Строиздат, 1967. – 83 с.
8. Авдеев А.А., Белосельницкий Б.С., Краснов М.Н. Контроль топлива на электростанциях. – М.: Энергия, 1973. – 384 с.
9. Основы практической теории горения / под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергия, 1973. – 264 с.
10. Роддатис К.Ф. Котельные установки. – М.: Энергия, 1977. – 433 с.
11. Рыжский В.Я. Тепловые электрические станции. – М.: Энергия, 1976. – 448 с.
12. Резников М.И. Парогенераторные установки электростанций. – М.: Энергия, 1974. – 360 с.
13. Атлас котельных агрегатов / под ред. А.П. Ковалева. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 120 с. – Атлас котельных агрегатов: дополнение. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 22 с.
14. Тепловой расчет котельных агрегатов: (нормативный метод) / Н.В. Кузнецов, В.В. Митора, И.В. Дубровский, Э.С. Карасина, М.М. Рубин, А.Г. Блох, Ю.Л. Маршак, Р.А. Петросян, В.А. Локшин, С.И. Мочан, П.Н. Кендысь. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1973. – 295 с.
15. Липов Ю.М. Основы топочных процессов. – М.: Энергия, 1969. – 346 с.
16. Внуков А.К. Надежность и экономичность котлов для газа и мазута. – М.: Энергия, 1966. – 368 с.
17. Пугач Л.И. Энергетика и экология: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 504 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).
18. Овчинников Ю.В. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Проведение исследований на основе стенда ОИСГТ-6 кинетики горения тонкодисперсных водоугольных суспензий и оптимизации режимов их сжигания применительно к промышленным котлоагрегатам мощностью до 35 МВт», выполненной по Государственному контракту от 25 августа 2011 г. № 16.518.11.7079 с Министерством образования и науки Российской Федерации на выполнение научно-исследовательской работы: (шифр 2011-1,8-518-007-0,007). – Новосибирск, 2012. – 168 с.
19. Szargut J. Energetyka cieplna w hutnictwie. – Katowice: Slask, 1972. – 621 p.
20. Zbior zadan z gospodarki cieplnej / J. Szargut, A. Guzik, E. Kostowski, J. Wandrasz, A. Ziębik. – Gliwice: Skrypt Politechniki Śląska, 1971. – 240 p.

*Данилов Петр Николаевич*, магистрант кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – разработка методики расчета оптимального коэффициента избытка воздуха для водоугольного топлива. E-mail: petrdanilovykt@gmail.com

*Бойко Екатерина Евгеньевна*, аспирант кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – разработка схемы сжигания ИКЖТ в энергетических котлоагрегатах. E-mail: e.boyko1991@yandex.ru

*Овчинников Юрий Витальевич*, доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – разработка и исследование новых видов композиционных топлив из угля. Имеет более 100 публикаций, в том числе 4 монографии и один учебник. E-mail: e.boyko1991@yandex.ru

*Серант Феликс Анатольевич*, доктор технических наук, заместитель генерального директора ЗАО «КОТЭС». Основное направление исследований – котлостроение, разработка котла с кольцевой топкой. Имеет более 140 публикаций. E-mail: dkmv90@mail.ru

### ***Investigation of an optimal value of the excess air ratio during combusting an artificial composite liquid fuel in the power-generating boiler\****

*P.N. DANILOV<sup>1</sup>, E.Ev. BOIKO<sup>2</sup>, Yu.V. OVCHINNIKOV<sup>3</sup>, F.A. SERANT<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Master's degree student. E-mail: petrdanilovykt@gmail.com*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; post-graduate student. E-mail: e.boyko1991@yandex.ru*

<sup>3</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; D.Sc. (Eng.), professor. E-mail: roxy9107@mail.ru*

<sup>4</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; D.Sc. (Eng.). E-mail: dkmv90@mail.ru*

The excess air ratio is an important factor that influences the efficiency of a boiler. The accumulated statistics on the optimal excess air ratio values for different types of fuels differ greatly from the value of the coal-water fuel (CWF) and, in particular, of the artificial composite liquid fuel. Since this is a new kind of fuel, data on the value of the air excess factor for the artificial composed liquid fuel is not available. In this paper, we propose a method of theoretical determination of the excess air during combustion of a pulverized coal-water fuel in the furnace chamber. According to the stoichiometric calculation of combustion graphic dependences are built depending on the total loss of heat from the boiler excess air ratio; an estimated loss curve with exhaust gases; an exergy loss curve resulting from the incomplete combustion of fuel and a total loss curve determining the maximum efficiency of the boiler are drawn. We tested the proposed methodology of determining the excess air ratio in the calculation of a control alternative in the fractional combustion of the pulverized coal fuel in the boiler furnace chamber. The results of determining the excess air ratio for an artificial composite liquid fuel and the pulverized coal dust are presented graphically. The excess air ratio of the coal-water fuel calculated by the proposed method was compared with the experimental result when burning CWF on the OISGT-6 research bench. Experiments were conducted to reveal combustion products because the excess air ratio depends on this factor. The components of the combustion products were determined using the TESTO-330-2LL gas analyzer. The value of the excess air ratio was graphically determined. While comparing the results of the excess air ratio obtained by different methods we can see that the coefficients of excess air are in the range of  $1,13 \pm 0,02$  and the discrepancy of the results does not exceed 1.8 %.

**Keywords:** excess air ratio, coal-water fuel, artificial composite liquid fuel, powdered coal, thermodynamic method, theoretical result, method testing, experimental confirmation of theoretical result

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-2-143-156

---

\* Received 19 January 2015.

## REFERENCES

1. *Teplivoi raschet kotlov (normativnyi metod)* [Thermal calculation of boilers (Standard method)]. 3rd ed., remaking and addition. 3rd ed., rev. and enl. St. Petersburg, NPO TsKTI Publ., 1998. 256 p.
2. RD 153-34.1-26.303-98. *Metodicheskie ukazaniia po provedeniiu ekspluatatsionnykh ispytaniu kotel'nykh ustanovok dlia otsenki kachestva remonta* [Procedural guidelines for in-service tests of boiler plants to assess quality of repair]. Moscow, ORGRES Publ., 2000. 47 p.
3. Trembovlya V.I., Figner E.D., Avdeeva A.A. *Teplotekhnicheskie ispytaniya kotel'nykh ustanovok* [Heat-engineering tests of boilers]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 296 p.
4. Staskevich N.L., Severinets G.N., Vigdorichik D.Ya. *Spravochnik po gazosnabzheniyu i ispol'zovaniyu gaza* [Handbook on gas supply and use of gas]. Leningrad, Nedra Publ., 1990. 762 p.
5. Yankelevich V.I. *Naladka gazomazutnykh promyshlennykh kotel'nykh* [Setting up the oil-gas industrial boiler stations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 216 p.
6. Ravich R.B. *Effektivnost' ispol'zovaniya topliva* [Fuel efficiency]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 344 p.
7. SN 350-66. *Ukazaniya po proektirovaniyu kotel'nykh ustanovok* [Building regulation 350-66. Engineering information of boilers]. Moscow, Stroizdat Publ., 1967. 83 p.
8. Avdeeva A.A., Belosel'nitskii B.S., Krasnov M.N. *Kontrol' topliva na elektrostantsiyakh* [Control of fuel in power plants]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 384 p.
9. Pomerantsev V.V., ed. *Osnovy prakticheskoi teorii goreniiya* [Fundamentals of practical combustion theory]. Leningrad, Energiya Publ., 1973. 264 p.
10. Roddatis K.F. *Kotel'nye ustanovki* [Boiler systems]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 433 p.
11. Ryzhkin V.Ya. *Teplovyie elektricheskie stantsii* [Thermal power stations]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 448 p.
12. Reznikov M.I. *Parogeneratormye ustanovki elektrostantsii* [Steam generating units of power station]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 360 p.
13. Kovalev A.P., ed. *Atlas kotel'nykh agregatov* [The atlas of boiler units]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1958. 120 p. *Atlas kotel'nykh agregatov: dopolnenie* [The atlas of boiler units: addition]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 22 p.
14. Kuznetsov N.V., Mitora V.V., Dubrovskii I.V., Karasina E.S., Rubin M.M., Blokh A.G., Marshak Yu.L., Petrosyan R.A., Lokshin V.A., Mochan S.I., Kendys P.N. *Teplivoi raschet kotel'nykh agregatov: (normativnyi metod)* [Thermal design of boiler units: (normative method). 2nd ed. Moscow, Energiya Publ., 1973. 295 p.
15. Lipov Yu.M. *Osnovy topochnykh protsessov* [Fundamentals of combustion processes]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 346 p.
16. Vnukov A.K. *Nadezhnost' i ekonomichnost' kotlov dlya gaza i mazuta* [Reliability and efficiency of boilers for gas and oil fuel]. Moscow, Energiya Publ., 1966. 368 p.
17. Pugach L.I. *Energetika i ekologiya* [Energy and ecology]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2003. 504 p.
18. Ovchinnikov Yu.V. [Conducting research based on stand-6 OISGT combustion kinetics of fine coal-water slurries and optimization of combustion in relation to industrial boilers capacity to 35 MW]. Delivery by state contract 25.08.2011, no. 16.518.11.7079. (In Russian, unpublished)
19. Szargut J. *Energetyka cieplna w hutnictwie*. Katowice, Slask, 1972. 621 p. (In Polish)
20. Szargut J., Guzik A., Kostowski E., Wandrasz J., Ziębik A. *Zbior zadan z gospodarki cieplnej*. Gliwice, Skrypt Politechniki Śląska, 1971. 240 p.