

УДК 621.311

С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
Д.В. МЕНДЕЛЕВ, канд. техн. наук,
Н.Г. МАЛЬКЕВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБОГАЩЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ДУТЯ КИСЛОРОДОМ

В настоящее время к числу прогрессивных технологий топливо-использования в энергетике и промышленности следует отнести топливно-кислородные и комбинированные топливно-электрические. Использование топливно-кислородных источников энергии открывает следующие возможности [1]:

- снижение выноса технологических материалов и загрязнения окружающей среды, уменьшение общих габаритов установок;
- резкое снижение удельного выхода продуктов сгорания;
- сокращение расхода топлива и, соответственно, выбросов вредных и парниковых газов.

Кроме того, по сравнению с топливно-воздушным источником энергии топливно-кислородный обеспечивает более высокий темп снижения удельного расхода топлива.

В данной работе выполнен анализ энерготехнологической эффективности применения топливно-кислородных режимов сжигания природного газа.

Как отмечено ранее [2–5], обогащение воздушного дутья кислородом повышает энергетические показатели тепловых установок (котлов, нагревательных и термических печей), причем этот эффект наиболее выражен при степени обогащения кислородом до 50 %. Оценим относительный прирост коэффициентов полезного действия на основе теплового баланса для котла при отоплении воздухом и обогащенной кислородом воздушной смесью.

Полезную теплоту выразим через расход топлива и КПД. Обозначим КПД при использовании воздуха как η_1 , а при использовании кислорода – через η_2 . Тогда получаем выражения

$$\begin{aligned} B \cdot Q_H^p &= \eta_1 B \cdot Q_H^p + Q_{\text{пот}} + B \cdot V_\alpha i_d; \\ B_k \cdot Q_H^p &= \eta_2 B_k \cdot Q_H^p + Q_{\text{пот}} + B_k \cdot V_{\alpha k} i_{\text{дк}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где B и B_k соответственно расходы топлива при использовании воздуха и кислорода, м^3 ; Q_H^p – низшая теплота сгорания топлива, $\text{Дж}/\text{м}^3$; V_α и $V_{\alpha k}$ – объемы продуктов сгорания с учетом коэффициента избытка воздуха, м^3 ; i_d и $i_{\text{дк}}$ – удельные энтальпии продуктов сгорания $\text{Дж}/\text{м}^3$.

Если принять расходы топлива в обоих случаях одинаковыми, то можно путем несложных преобразований выразить прирост коэффициента полезного действия в зависимости от величины расхода топлива

$$\eta_2 = 1 - \frac{(1 - \eta_1)Q_H^p - V_\alpha i_d + V_{\alpha k} i_{\text{дк}}}{Q_H^p}, \quad (2)$$

или

$$\Delta\eta = \frac{V_\alpha i_d - V_{\alpha k} i_{\text{дк}}}{Q_H^p}. \quad (3)$$

С использованием этого выражения рассчитано увеличение КПД котлов в зависимости от степени обогащения кислородом (A) для разных значений коэффициента расхода воздуха α (рисунок 1). В качестве исходных данных выбрали температуру уходящих газов $t_{yx} = 120$ °С, КПД котла при работе на воздухе принято $\eta_1 = 0,9$.

Как видно из рисунка, максимальный эффект достигается при больших значениях коэффициента избытка воздуха и может превышать 3 % (при $A = 50$ % и $\alpha = 1,3$). Этот эффект будет тем больше, чем выше температура отходящих газов из котла. Так, расчеты показали, что при температуре уходящих газов $t_{yx} = 150$ °С и тех же

значениях A и α прирост КПД $\Delta\eta = 4\%$, а при $t_{yx} = 200\text{ }^\circ\text{C}$ – $\Delta\eta = 5,2\%$. Однако максимальный прирост КПД достигается при степени обогащения воздуха кислородом порядка 30% .

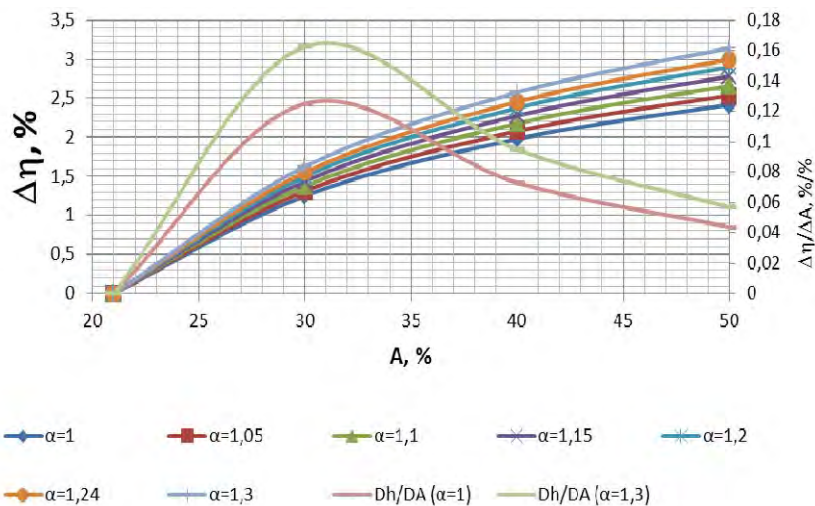


Рисунок 1 – Прирост КПД котлов от степени обогащения дутья кислородом

Для нагревательных и термических печей, учитывая низкие показатели тепловой работы (свыше 80% печей машиностроительного производства функционируют с КПД равным $8\text{--}12\%$, [6]). Обогащение воздушной смеси кислородом, как показывают расчеты, приводит к более заметному эффекту.

На рисунке 2 представлены результаты расчета прироста величины КПД нагревательной печи, не оснащенной системой рекуперации теплоты с $t_{yx} = 900\text{ }^\circ\text{C}$ и первоначальным КПД 10% , а также удельный прирост КПД при добавлении в воздух 1% кислорода. Принято, что производительность печи, температура по ее зонам, тепловые потери через кладку и с охлаждающей водой остаются практически неизменными.

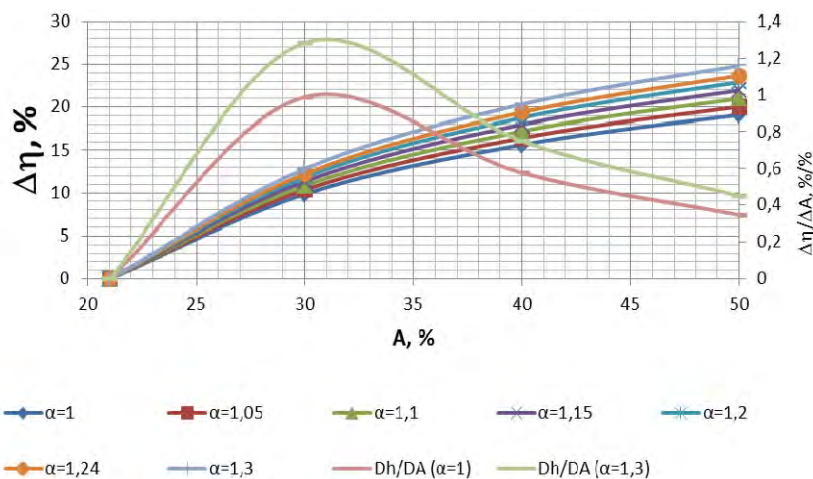


Рисунок 2 – Прирост величины КПД нагревательных печей от степени обогащения кислородом при различных α без подогрева воздуха

Как видно из рисунка, при обогащении воздуха до 50 % и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,05-1,1$ удается повысить КПД на 20–22 %. Для печей, использующих инжекционные горелки с коэффициентом избытка 1,15–1,25 (по данным [6] их количество составляет 55 % от печного парка), КПД возрастает на 24–25 %. Причем относительная удельная выгода обогащения кислородом находится при степени обогащения дутья кислородом 30–35 % и достигает 1–1,3 %/ %.

С учетом подогрева воздуха система уравнений теплового баланса имеет вид

$$\begin{aligned}
 B \cdot Q_H^p + B \cdot L_\alpha \cdot i_B &= \eta_1 (B \cdot Q_H^p + L_\alpha \cdot i_B) + Q_{\text{пот}} + B \cdot V_\alpha i_{\text{д}}; \\
 B_K \cdot Q_H^p + B_K \cdot L_{\alpha_K} \cdot i_{\text{вк}} &= \eta_2 (B_K \cdot Q_H^p + L_{\alpha_K} \cdot i_{\text{вк}}) + Q_{\text{пот}} + B_K \cdot V_{\alpha_K} i_{\text{дк}},
 \end{aligned} \quad (4)$$

где L_α и L_{α_K} – объемы воздуха и воздушно-кислородной смеси для сжигания 1 м^3 топлива.

В данном случае формула (1) приобретает вид

$$\eta_2 = 1 - \frac{[(1 - \eta_1)(Q_H^P + L_{\alpha} i_B) - (V_{\alpha} i_D - V_{\alpha K} i_{DK})]}{Q_H^P + L_{\alpha K} i_{BK}} \quad (5)$$

Расчеты показали, что при подогреве воздуха до 400 °С и температуре уходящих газов 900 °С прирост КПД составляет порядка 12–15 %, и тем больше, чем выше коэффициент избытка воздуха.

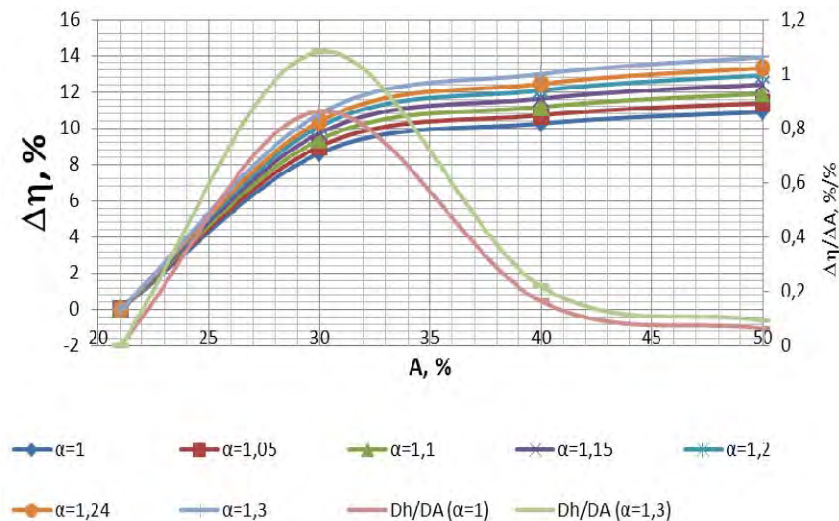


Рисунок 3 – Прирост величины КПД нагревательных печей от степени обогащения кислородом при различных α при подогреве воздуха до 400 °С

На рисунке 4 показан прирост КПД печи при температуре уходящих газов 900 °С, коэффициенте избытка воздуха 1,05 и различной температуре подогрева воздуха.

Как видно из рисунка, чем меньше температура подогрева воздуха, тем более значительно возрастает КПД, причем при незначительном обогащении воздуха кислородом (до 30 %) прирост КПД практически не зависит от температуры подогрева. Что касается температуры отходящих газов, то ее влияние на прирост КПД более существенно (рисунок 5).

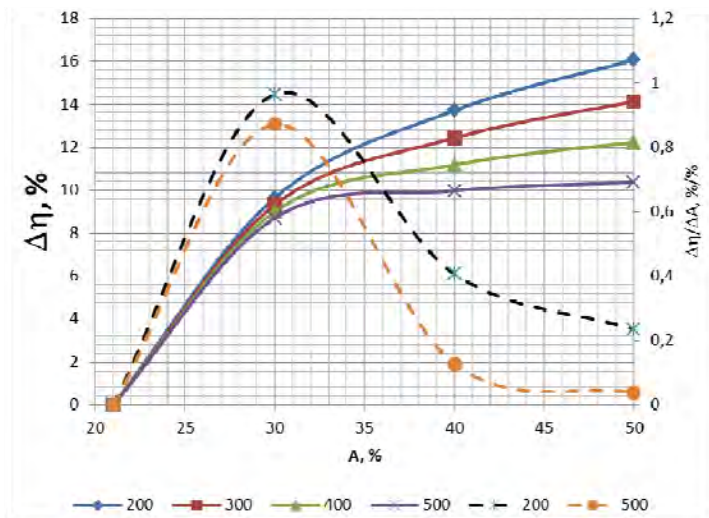


Рисунок 4 – Прирост величины КПД нагревательных печей от степени обогащения кислородом при различной температуре подогрева воздуха и $\alpha = 1,05$

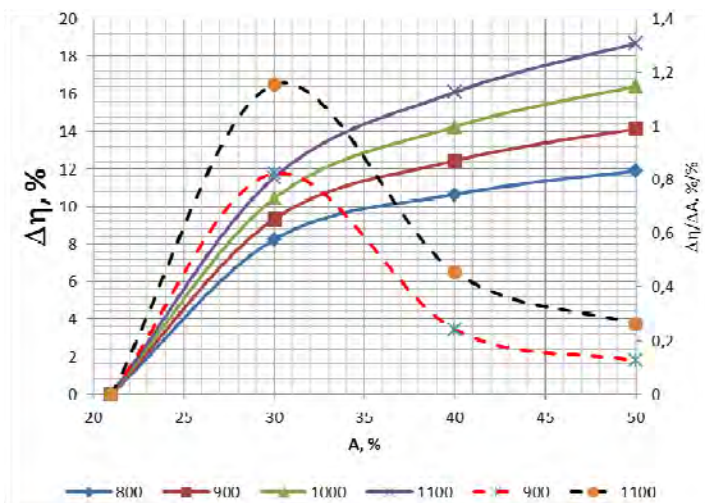


Рисунок 5 – Прирост величины КПД нагревательных печей от степени обогащения кислородом при различной температуре уходящих газов и $\alpha = 1,05$

Определим топливосберегающий эффект от обогащения воздушной смеси кислородом. Вначале выполним расчеты без подогрева воздуха.

Запишем систему уравнений (1) в виде

$$\begin{aligned} B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}} &= Q_{\text{пол}} + Q_{\text{пот}} + B \cdot V_{\alpha} i_{\text{д}}; \\ (B-x) \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}} &= Q_{\text{пол}} + Q_{\text{пот}} + (B-x) \cdot V_{\alpha k} i_{\text{дк}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где x – экономия топлива за счет обогащения воздуха кислородом.

Проведя несложные преобразования, получим

$$(B-x) \left(Q_{\text{H}}^{\text{P}} - V_{\alpha k} i_{\text{дк}} \right) = B \left(Q_{\text{H}}^{\text{P}} - V_{\alpha} i_{\text{д}} \right); \quad (7)$$

$$x \left(Q_{\text{H}}^{\text{P}} - V_{\alpha k} i_{\text{дк}} \right) = B \left(V_{\alpha} i_{\text{д}} - V_{\alpha k} i_{\text{дк}} \right). \quad (8)$$

Отсюда находим

$$\frac{x}{B} = \frac{V_{\alpha} i_{\text{д}} - V_{\alpha k} i_{\text{дк}}}{Q_{\text{H}}^{\text{P}} - V_{\alpha k} i_{\text{дк}}} = \frac{V_{\alpha} i_{\text{д}}}{V_{\alpha k} i_{\text{дк}}} \cdot \frac{1 - \frac{V_{\alpha k} i_{\text{дк}}}{V_{\alpha} i_{\text{д}}}}{\frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{V_{\alpha k} i_{\text{дк}}} - 1}.$$

Обозначим через K отношение энтальпий продуктов сгорания при обогащении воздуха кислородом и без обогащения

$$K = \frac{V_{\alpha k} i_{\text{дк}}}{V_{\alpha} i_{\text{д}}},$$

тогда относительная экономия топлива будет равна

$$\frac{x}{B} = \frac{1}{K} \cdot \frac{1-K}{\frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{V_{\alpha k} i_{\text{дк}}} - 1} = \frac{1}{K} \cdot \frac{1-K}{\frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{K \cdot V_{\alpha} i_{\text{д}}} - 1}. \quad (9)$$

Без учета рекуперации теплоты коэффициент использования топлива имеет вид

$$\eta_{и.т} = \frac{Q_H^p - V_\alpha i_d}{Q_H^p} = 1 - \frac{V_\alpha i_d}{Q_H^p},$$

отсюда получим

$$\frac{Q_H^p}{V_\alpha i_d} = \frac{1}{1 - \eta_{и.т}},$$

и выражение для относительной экономии топлива примет вид

$$\frac{x}{B} = \frac{1 - K}{\frac{1}{1 - \eta_{и.т}} - K}.$$

Как показали расчеты (таблица 1), величина K остается практически постоянной при фиксированной степени обогащения и различных температурах отходящих газов. Также на величину K не влияет коэффициент избытка воздуха (таблица 2), т.е. $K = K(A)$. Зависимость $K = K(A)$ приведена на рисунке б.

Таблица 1 – Величина K в зависимости от степени обогащения воздуха кислородом при различных температурах и $\alpha = 1,05$

Содержание кислорода, %	Объем дыма, м ³	Энтальпия продуктов сгорания, кДж/м ³				$K = \frac{V_{\alpha k} i_{dk}}{V_\alpha i_d}$			
		120	300	500	800	120	300	500	800
21	10,79	165,59	414,5	720,72	1191,30	1,00	1,00	1,00	1,00
25	9,20	167,14	417,8	729,56	1208,27	0,86	0,86	0,86	0,87
30	7,84	169,01	421,8	740,24	1228,75	0,74	0,74	0,75	0,75
40	6,13	172,46	429,2	759,91	1266,53	0,59	0,59	0,60	0,60
50	5,10	175,62	436,0	777,96	1301,19	0,50	0,50	0,51	0,52

Таблица 2 – Величина K в зависимости от степени обогащения воздуха кислородом и α

Значения коэффициентов K							
% O ₂	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,05$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,15$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,24$	$\alpha = 1,3$
21	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
35	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
40	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
50	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52

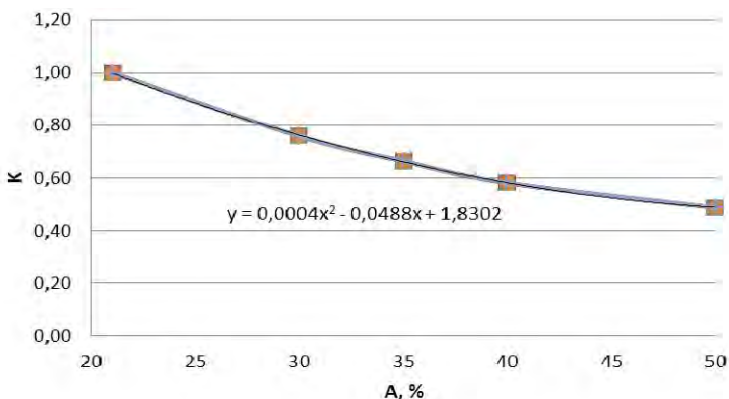


Рисунок 6 – Зависимость параметра K от степени обогащения воздуха кислородом

На рисунке 7 показана номограмма для расчета относительной экономии топлива (\mathcal{E} , %) от степени обогащения воздушного дутья кислородом при различной температуре уходящих газов.

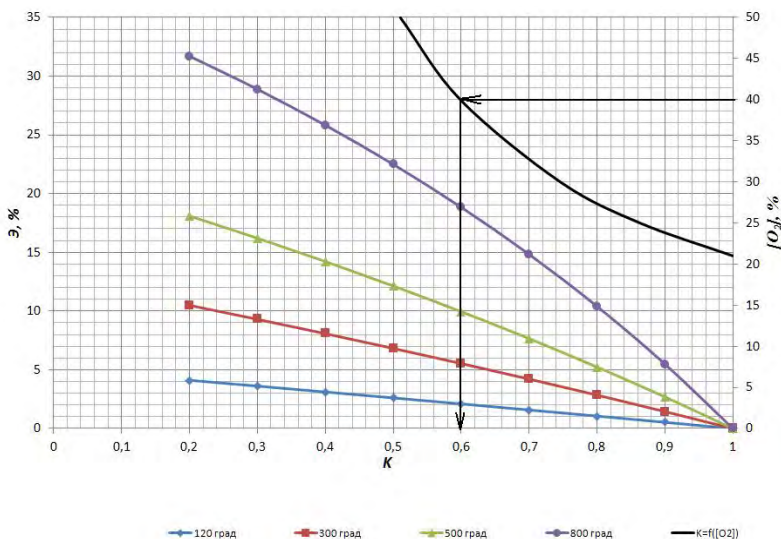


Рисунок 7 – Экономия топлива от степени обогащения воздуха кислородом при различной температуре

Функция K позволяет определять экономию топлива при обогащении воздушного дутья кислородом при сохранении неизменными всех технологических параметров, включая температуру уходящих газов, что является существенным при эксплуатации котельного оборудования, где снижение температуры дыма может приводить к конденсации водяных паров. При заданной степени обогащения ведем горизонтальную линию до пересечения с функцией $K = K(O_2)$ и опускаем вертикальную линию. По точкам пересечения с кривыми экономии топлива при различных температурах определяем степень экономии.

При наличии рекуперации теплоты система (6) принимает вид

$$Q_H^p + B \cdot L_{\alpha} i_{\text{в}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{пот}} + B \cdot V_{\alpha} i_{\text{д}};$$

$$(B - x) \cdot Q_H^p + (B - x) \cdot L_{\alpha\kappa} i_{\text{вк}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{пот}} + (B - x) \cdot V_{\alpha\kappa} i_{\text{дк}}.$$

После преобразования получим уравнение, аналогичное уравнению (9)

$$x \cdot (Q_H^p - (V_{\alpha k} i_{dk} - L_{\alpha k} i_{bk})) = B((V_{\alpha} i_d - L_{\alpha} i_b) - (V_{\alpha k} i_{dk} - L_{\alpha k} i_{bk})).$$

Введем эффективную энтальпию уходящих газов

$$V_{\alpha} i_d^{*} = (V_{\alpha} i_d - L_{\alpha} i_b) = (1 - \gamma) V_{\alpha} i_d;$$

$$V_{\alpha k} i_{dk}^{*} = (V_{\alpha k} i_{dk} - L_{\alpha k} i_{bk}) = (1 - \gamma) V_{\alpha k} i_{dk},$$

где γ – степень рекуперации энергии дымовых газов.

Получаем аналогичное выражение, как и в уравнении (9)

$$\frac{x}{B} = \frac{V_{\alpha} i_{\alpha}^{*} - V_{\alpha k} i_{\alpha k}^{*}}{Q_H^p - V_{\alpha k} i_{\alpha k}^{*}} = \frac{V_{\alpha} i_{\alpha}^{*}}{V_{\alpha k} i_{\alpha k}^{*}} \cdot \frac{1 - V_{\alpha k} i_{\alpha k}^{*} / V_{\alpha} i_{\alpha}^{*}}{Q_H^p / V_{\alpha k} i_{\alpha k}^{*} - 1}. \quad (10)$$

Также, вводя новый K^* и коэффициент использования топлива

$$K^* = \frac{V_{\alpha k} i_{\alpha k}^{*}}{V_{\alpha} i_{\alpha}^{*}}, \quad \eta_{и.т}^* = \frac{Q_H^p - V_{\alpha} i_{\alpha}^{*}}{Q_H^p} = 1 - \frac{V_{\alpha} i_{\alpha}^{*}}{Q_H^p},$$

окончательно получаем выражение для экономии топлива

$$\frac{x}{B} = \frac{1 - K^*}{1 - \eta_{и.т}^*}. \quad (11)$$

На рисунках 8 и 9 приведены результаты влияния степени обогащения воздуха кислородом на коэффициент использования топлива η и экономию топлива в зависимости от температуры подогрева при $\alpha = 1,05$ и температуре уходящих газов 900°C .

Как видно из этих рисунков, наиболее высокий удельный рост экономии наблюдается при обогащении воздуха около 30 %.

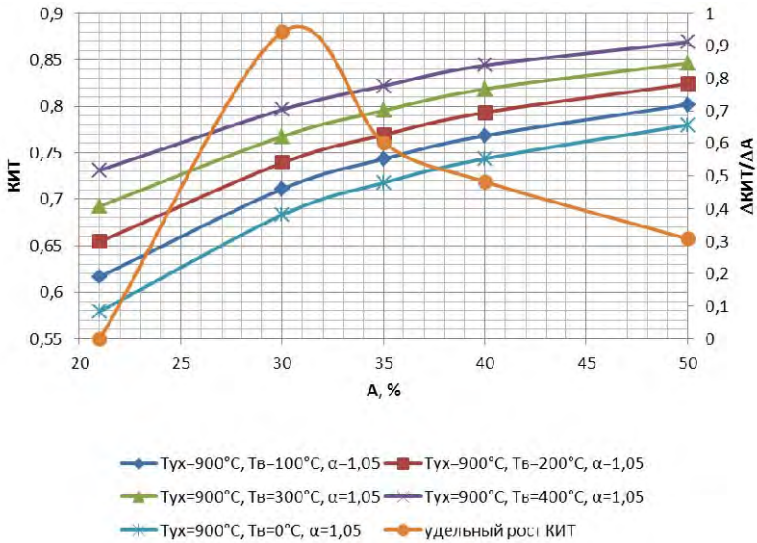


Рисунок 8 – Влияние температуры подогрева воздуха и степени обогащения его кислородом на KИТ

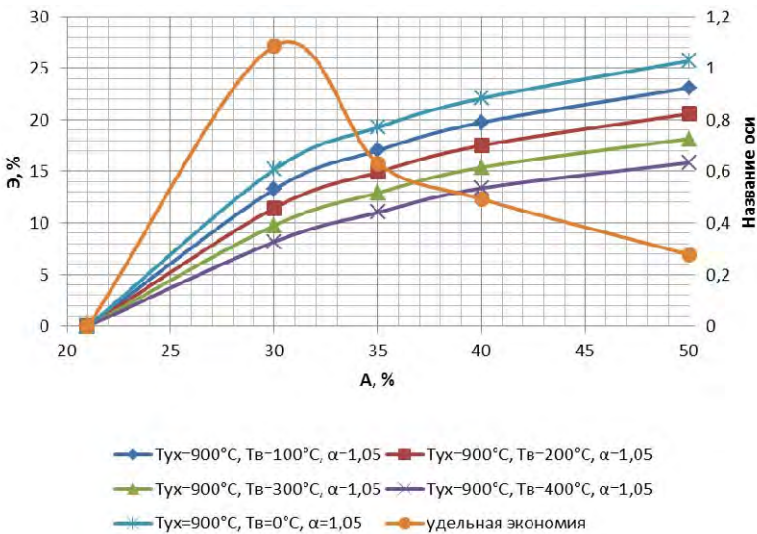


Рисунок 9 – Влияние температуры подогрева воздуха и степени обогащения его кислородом на экономию топлива

На рисунке 10 показана номограмма для расчета относительной экономии топлива (\mathcal{E} , %) от степени обогащения воздушного дутья кислородом при различной температуре уходящих газов и подогре-ва воздуха.

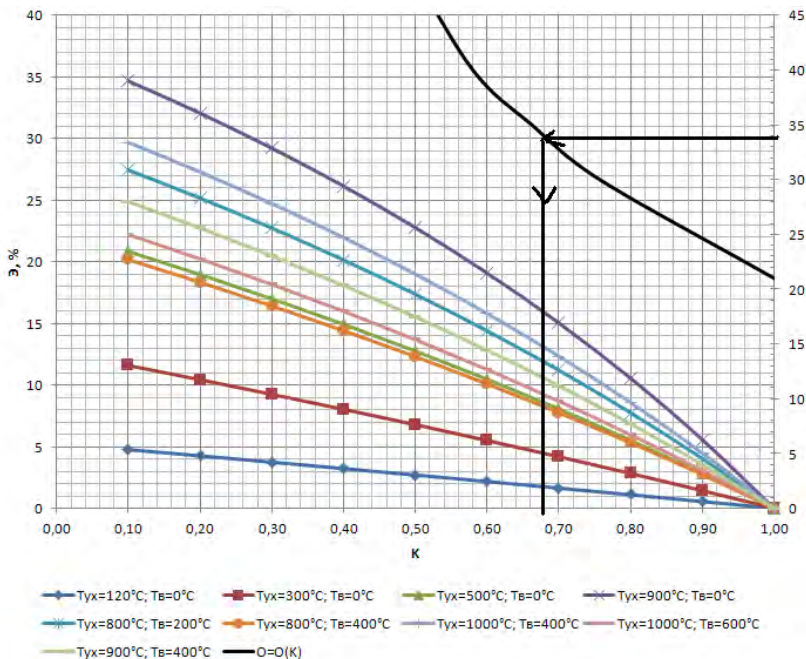


Рисунок 10 – Экономия топлива от степени обогащения воздуха кислородом при различной температуре уходящих газов и температуре подогрева воздуха

Помимо прямого эффекта (повышение КПД установок и снижение топливотребления за счет исключения балластной составляющей окислителя) обогащение воздушной смеси кислородом имеет и ряд косвенных эффектов, а именно, повышение температур в зоне горения и степени черноты системы газов. Для определения степени черноты продуктов сгорания использовали формулу Белова, взятую из работы [7], которая обобщает данные по степеням черноты продуктов сгорания природного газа

$$\varepsilon_{\Gamma} = 2 \cdot 10^{-12} \left(775 \sqrt[3]{P_{\Sigma}} + 4845 - 8,27 (5,9 - S_{\text{эфф}})^3 - T \right)^3, \quad (12)$$

где P_{Σ} – суммарное содержание трехатомных газов в продуктах сгорания, %; $S_{\text{эфф}}$ – эффективная длина луча, м; T – температура дымовых газов, °С.

Расчеты показали, что обогащение воздушного дутья кислородом до 50 % повышает степень черноты газов на 0,1–0,16 в зависимости от температуры в камере сгорания, причем при более низких температурах этот эффект существеннее (рисунки 11 и 12).

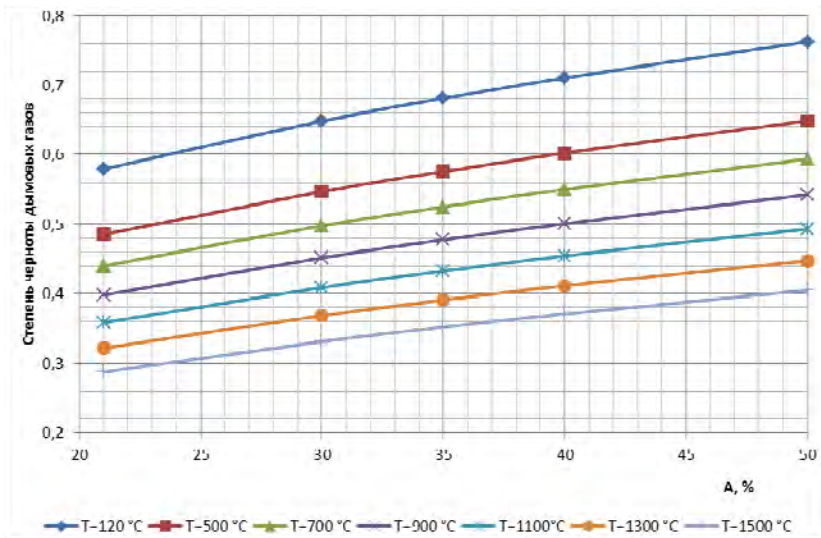


Рисунок 11 – Степень черноты продуктов сгорания при различной степени обогащения воздуха кислородом и температуре (при $S_{\text{эфф}} = 2,19$ м) при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,05$

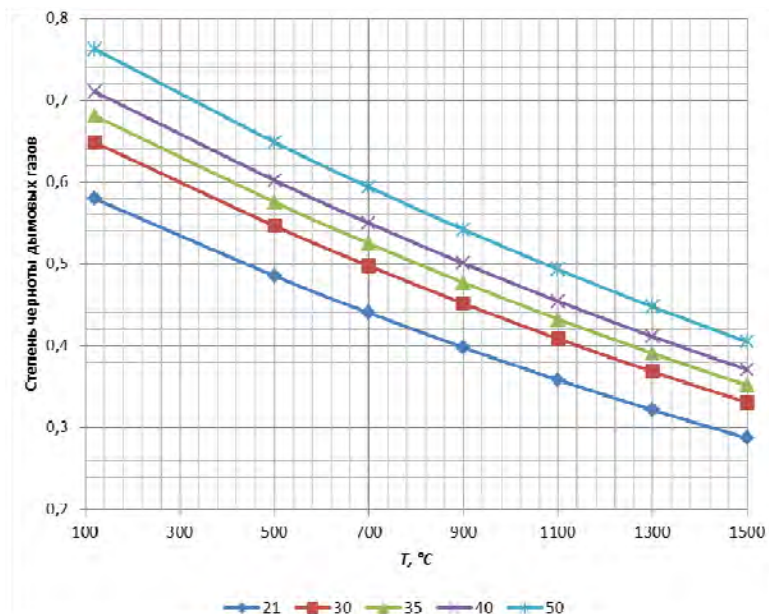


Рисунок 12 – Степень черноты продуктов сгорания природного газа в зависимости от температуры и степени обогащения кислородом (при $S_{\text{эфф}} = 2,19 \text{ м}$) при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,05$

Исследование влияния эффективной длины луча (рисунки 13 и 14) на степень черноты продуктов сгорания показало наличие предельного значения эффективной длины луча, выше которого дальнейшее увеличение геометрии камеры сгорания не приводит к повышению приведенной степени черноты продуктов сгорания.

Заключение. В статье приведены методики расчета энерготехнологической эффективности обогащения воздушного дутья кислородом, позволяющие выбирать оптимальную степень обогащения в зависимости от технологических особенностей теплогенерирующих установок. Показано, что помимо прямого эффекта (повышение КПД установок и снижение топливопотребления за счет исключения балластной составляющей окислителя) обогащение воздушной смеси кислородом имеет и ряд косвенных эффектов, в частности, повышение температур в зоне горения и степени черноты продуктов сгорания.

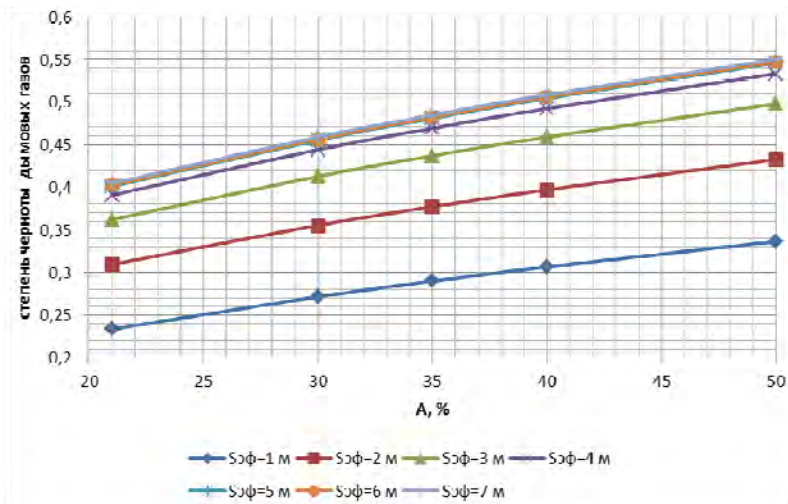


Рисунок 13 – Степень черноты дымовых газов в зависимости от степени обогащения воздуха горения кислородом (A) и эффективной длины луча

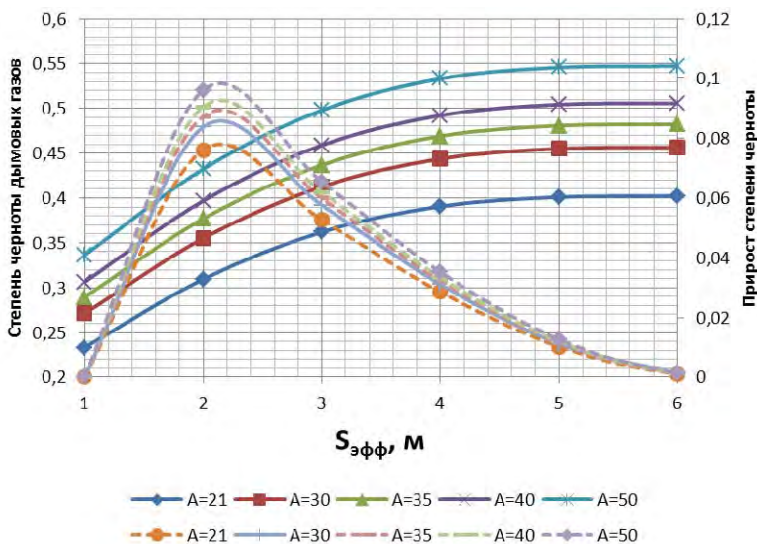


Рисунок 14 – Степень черноты дымовых газов (ее прирост) в зависимости от степени обогащения воздуха горения кислородом (A) и эффективной длины луча (ее прироста)

Литература

1. Использование кислорода и обогащенного кислородом воздуха в нагревательных печах, колодцах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей / И.Н. Карп [и др.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 3. – С. 18–29.

2. Техничко-экономическая эффективность использования дутья, обогащенного кислородом, в отопительных котлах малой мощности. Сообщение 1. Моделирование тепловой работы котлов / С.М. Кабишов [и др.] // Энергетика. Изв. вузов и энергетич. объедин. СНГ. – 2013. – № 6. – С. 67–86.

3. Энергетический эффект от использования кислорода для обогащения воздуха горения в газопотребляющих агрегатах / В.И. Тимошпольский [и др.] // Metallургическая теплотехника: сб. науч. тр. Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: Новая идеология. – 2013. – Вып 5 (20). – С. 20–22.

4. Энергетическая эффективность обогащения воздуха кислородом при сжигании газообразного топлива. Сообщение 1. Методика оценки энергоэффективности / В.И. Тимошпольский [и др.] // Науч.-практ. журнал «Энергоэффективность». – Ноябрь, 2013. – С. 24–26.

5. Энергетическая эффективность обогащения воздуха кислородом при сжигании газообразного топлива. Сообщение 2. Эффективность применения кислорода при сжигании различных видов топлива / В.И. Тимошпольский [и др.] // Науч.-практ. журнал «Энергоэффективность». – Декабрь, 2013. – С. 34–36.

6. Тимошпольский, В.И. Концепция реконструкции и модернизации парка нагревательных печей металлургических и машиностроительных предприятий Республики Беларусь: от теории к практике (проблемные вопросы) / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман // Литье и металлургия. – 2007. – № 2. – С. 21–28.

7. Лисиенко, В.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справочное издание: в 3-х кн. Кн. 1 / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 608 с.