

0,004 до 0,057 %. При этом более половины плавок имело остаточное содержание алюминия ниже 0,03 %.

Продолжительность плавления стандартной чушки вторичного алюминия толщиной 65 мм при раскислении низкоуглеродистого металла с температурой 1580–1600 °С в случае попадания в застойные зоны металла в ковше достигает 110–160 с. Плавление чушки в зоне воздействия струи металла происходит в 40–50 раз быстрее (2–4 с). Однако обеспечить ввод чушек в зону воздействия струи, как показала практика, во всех случаях невозможно. Поэтому для данного способа ввода алюминия характерен низкий и нестабильный уровень усвоения алюминия жидким металлом.

При реализации второго способа ввода алюминия количество плавок, содержащих менее 0,03 % алюминия, снизилось до 25 %, а доля плавок с оптимальной концентрацией алюминия составила 68 %. Раскисление стали гранулами обеспечило оптимальную остаточную концентрацию алюминия у 85 % плавок. Наличие большой удельной поверхности приводит к ускорению реакции взаимодействия алюминия с активным кислородом расплава, при этом задержки, связанные с длительностью расплавления и потери при контакте с атмосферой сводятся к минимуму.

Такая технология ввода алюминия для раскисления стали обеспечила наиболее стабильное остаточное содержание алюминия как от плавки к плавке, так и по объему стали в ковше.

*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,  
**Г.А. РУМЯНЦЕВА**, канд. техн. наук (БНТУ)

## **ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБОГАЩЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ДУТЬЯ КИСЛОРОДОМ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧАХ**

В работах [1–4] приведены результаты расчетов экономии топлива при обогащении воздуха горения кислородом в промышлен-

ных теплоагрегатах. Выражение топливосберегающего эффекта имеет вид

$$\begin{aligned} \Xi = \Delta V_1 + \Delta V_2 - \Delta V_3 = & \frac{\alpha k_{O_2}}{q_0} \left[ \frac{c_p(N_2) \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1}{\delta} \right) \Delta t_{yx}}{1 + \frac{\alpha k_{O_2}}{q_0} \left[ c_p(O_2) + c_p(N_2) \frac{1-\delta}{\delta} \right] \Delta t_0} + \right. \\ & \left. + 0,0461p \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1-\delta}{\delta(1-\delta_0)} (1-\Delta V_1) \right) - E_0 \frac{\delta - \delta_0}{\delta(1-\delta_0)} (1-\Delta V_1) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta V_1$  – количественный показатель экономии газообразного топлива за счет обогащения воздуха кислородом непосредственно в газопотребляющем агрегате;  $\Delta V_2$  – экономия энергии в дутьевом механизме за счет уменьшения объема дутья в пересчете на количество газообразного топлива;  $\Delta V_3$  – дополнительный расход энергии на получение кислорода из воздуха в пересчете на количество газообразного топлива;  $\delta_0$  – доля кислорода в воздухе (0,21);  $(1 - \delta_0)$  – доля балластных составляющих в воздухе (азота и примесей, 0,79);  $\delta$  – доля кислорода в смеси воздуха и кислорода;  $(1 - \delta)$  – доля балластных составляющих в смеси воздуха и кислорода;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $q_0$  – теплотворная способность 1 моля газообразного топлива, Дж/моль;  $\Delta t_{yx} = t_{yx} - t_{o,c}$ ,  $\Delta t_0 = t_0 - t_{o,c}$ ,  $t_{yx}$ ,  $t_0$ ,  $t_{o,c}$  – температура уходящих газов, подогрева смеси воздуха с кислородом и окружающей среды соответственно, °C;  $c_p(N_2)$ ,  $c_p(O_2)$  – молярная теплоемкость азота и кислорода соответственно, Дж/(моль·°C);  $k_{O_2}$  – стехиометрическое количество кислорода необходимого для сжигания 1 моля данного топлива;  $p$  – избыточное давление воздуха перед горелкой, Па;  $E_0$  – минимальные энергозатраты на производство 1 моля кислорода, Дж/моль.

В технической литературе приводятся многочисленные, и зачастую противоречивые данные по энергетическим затратам на производство кислорода по различным технологиям, а также отмечается, что технологии производства кислорода постоянно совершенствуются [5]. В связи с этим представляет интерес определить граничное значение энергетических затрат на производство кислорода, ниже которого применение топливно-кислородных технологий рен-

табельно. Формула для определения минимальных энергозатрат на производство 1 моля кислорода получается из выражения (1) и имеет вид

$$E_0 = \frac{\frac{q_0}{\alpha k_{O_2}} \Delta V_1 + 0,0461 p \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1-\delta}{\delta(1-\delta_0)} (1-\Delta V_1) \right)}{\frac{\delta - \delta_0}{\delta(1-\delta_0)} (1-\Delta V_1)}. \quad (2)$$

На рисунке 1 приведены энергетические затраты на производство кислорода по различным технологиям [5], а также граничные значения энергетических затрат на производства кислорода (в зависимости от температуры отходящих газов), ниже которых применение топливно-кислородных технологий рентабельно. Как показали расчеты [1–4], для отопительных котлов применение кислородных технологий станет рентабельным, если снизить удельные затраты на производство кислорода до 12 000 Дж/моль, что соответствует примерно 350 МДж/т или если разница температур уходящих газов и окружающего воздуха будет больше, чем показано на рисунке 2. Что же касается нагревательных печей, то с температурой уходящих газов свыше 500–600 °С любая кислородная технология энергетически выгодна.

Таким образом, можно отметить:

1. Эффект от применения кислорода при сжигании газообразного топлива тем выше, чем больше отношение  $q_0/k_{O_2}$  (теплотворной способности топлива к стехиометрическому количеству кислорода, необходимого для горения). То есть для «тяжелых» топлив, например, пропан-бутановой смеси или природного газа, в котором достаточно велика доля углеводородов, более тяжелых, чем метан, эффективность будет выше, чем у топлив с высоким содержанием СО и  $H_2$ , а также балластных составляющих ( $N_2$ ,  $O_2$ ).

2. Обогащение воздуха кислородом позволяет получить положительный эффект лишь при условии, что температура уходящих газов превышает определенное значение (в зависимости от степени обогащения и удельных энергетических затрат на производство кислорода). Так при снижении удельных затрат электроэнергии на производство кислорода с 30 000 Дж/моль до 24 000 Дж/моль зна-

чение предельной функции температуры отходящих газов снижается на 50 °С.

3. Наличие рекуперативного теплообменника несколько снижает эффект от использования кислорода. Кроме того, если отсутствует возможность подогрева смеси в металлическом рекуператоре по причине высокой концентрации и химической активности кислорода, а воздух в базовом варианте подогревается, то использовать кислород не имеет смысла, либо необходимо ограничиться невысокой концентрацией его в смеси, которая не будет отрицательно влиять на долговечность теплообменника.

4. Высока эффективность сжигания газа с использованием дутья, обогащенного кислородом в том случае, когда технологический процесс требует наличия окислительной атмосферы в рабочем пространстве агрегата (дуговые сталеплавильные печи и др.).

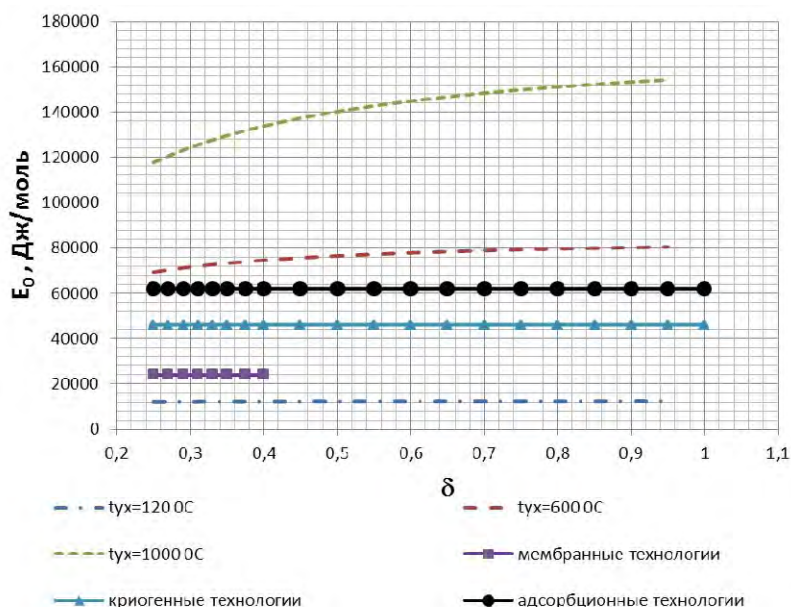


Рисунок 1 – Граничные значения энергетических затрат на производство кислорода (в зависимости от температуры отходящих газов), ниже которых применение топливно-кислородных технологий рентабельно

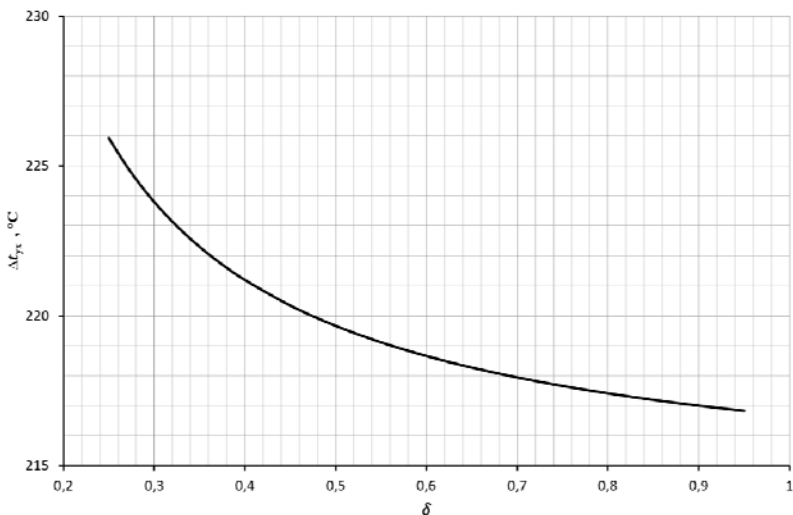


Рисунок 2 – Граничные значения температуры уходящих газов при сжигании природного газа с воздухом, обогащенным кислородом (выше линии – энергоэффективность положительная, ниже – отрицательная)

С целью определения реальных производственных затрат и эффекта от использования кислорода выполним дополнительные расчеты. С учетом стоимости газа  $C_{\text{газ}}$  и потребленной электроэнергии  $C_{\text{э/э}}$  суммарные затраты на оплату энергоносителей при обогащении воздушного дутья кислородом составят:

$$Z = \Delta V_1 C_{\text{газ}} - (\Delta V_3 - \Delta V_2) \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{3,6} C_{\text{э/э}}.$$

Для выявления перспектив применения кислорода при сжигании газообразного топлива в энергетических и технологических установках рассмотрим влияние отношения цены на природный газ к стоимости электроэнергии на величину эффективности данного процесса. При этом выполним оценку для трех вариантов:

- при фактических ценах на энергоносители, действующих в настоящее время в Республике Беларусь для промышленных предприятий (около 360 долл. США/1000 м<sup>3</sup> и 111,4 долл. США/1000 кВт·ч);
- для случая, когда цена на природный газ равна 600 долл. США/1000 м<sup>3</sup> (с учетом перспективы повышения цены на

газ на российском рынке, а также для Республики Беларусь), а цена на электроэнергию повышается до средневропейской (130 долл. США/1000 кВт·ч).

- цена на газ равна 800 долл. США/1000 м<sup>3</sup> (среднеевропейская цена для промышленных предприятий), цена на электроэнергию как и в предыдущем варианте равна средневропейской (130 долл. США/1000 кВт·ч).

На рисунке 3 приведены кривые, характеризующие нулевую эффективность использования кислорода для обогащения дутья при различных температурах уходящих газов и степени обогащения воздуха кислородом. Горизонтальные линии отражают соотношение цен на природный газ и электроэнергию для трех вариантов, указанных выше.

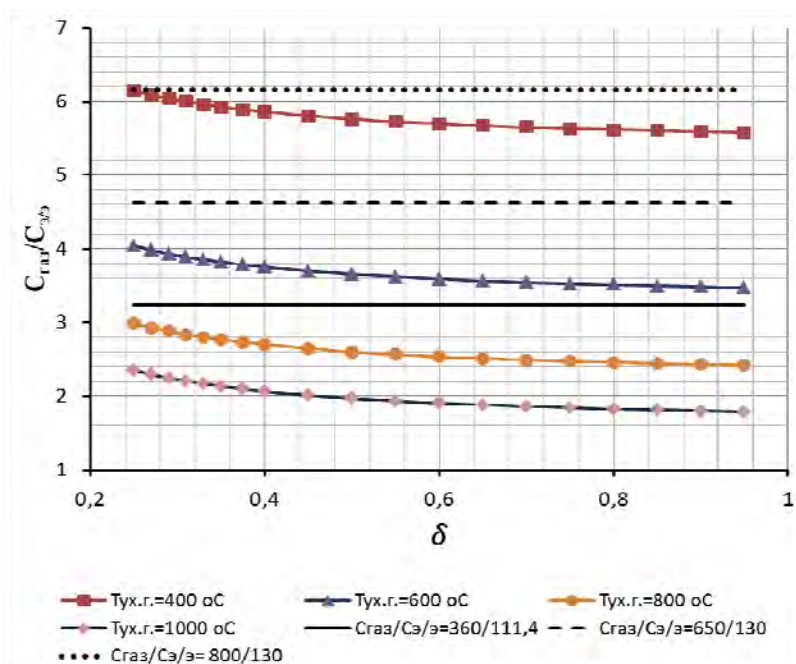


Рисунок 3 – Соотношение цен на природный газ и электроэнергию ( $C_{газ}/C_{э/э}$ ), необходимое для получения положительного экономического эффекта от использования кислорода для обогащения дутья в технологических установках с различной температурой уходящих газов ( $T_{ух.г.}$ ), и степени обогащения воздуха кислородом

В качестве расчетного соотношения использовалась следующая зависимость:

$$\frac{C_{\text{газ}}}{C_{3/3}} = \frac{\Delta V_3 - \Delta V_2}{\Delta V_1} \cdot \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{3,6}.$$

Как видим, при существующих ценах на природный газ и электроэнергию использование кислорода для обогащения воздушного дутья эффективно лишь для двух вариантов, когда температура уходящих газов принималась равной 800 °С и 1000 °С. В то же время повышение цен на газ до 600 долл. США/1000 м<sup>3</sup>, а электроэнергии до 130 долл. США/1000 кВт·ч приводит к тому, что положительный экономический эффект будет получен в установках с температурой уходящих газов около 500–550 °С. Дальнейшее повышение цены на газ до средневропейской для промышленных предприятий Западной Европы (около 800 долл. США/1000 м<sup>3</sup>) приводит к тому, что применение кислорода становится целесообразным уже при температуре уходящих газов 400 °С. Причем при высоких значениях степени обогащения  $\delta$  появляется возможность снизить данную температуру.

В реальных величинах (долл. США) уровень экономии при существующих в Республике Беларусь тарифах на энергоносители отражен на рисунке 4.

Анализ приведенного рисунка показывает, что в газопотребляющей установке, температура уходящих газов из которой равна 800 °С, а расход природного газа равен 100 м<sup>3</sup>/ч, при обогащении воздуха кислородом от  $\delta = 0,25$  до 0,95 за счет уменьшения топливопотребления и энергопотребления дутьевым механизмом и с учетом дополнительных затрат на производство кислорода суммарный эффект возрастает от 0,13 до 2,05 долл. США. При  $T_{\text{ух.г}} = 1000$  °С величина экономии достигает от 0,57 долл. США при  $\delta = 0,25$  до 4,55 долл. США при  $\delta = 0,95$ .

Энергоэффективность применения кислорода при температурах уходящих газов 600 °С и менее – отрицательная. Но при этом не учитывается величина экологического эффекта, обусловленная снижением объема выбросов парниковых газов и NO<sub>x</sub>.

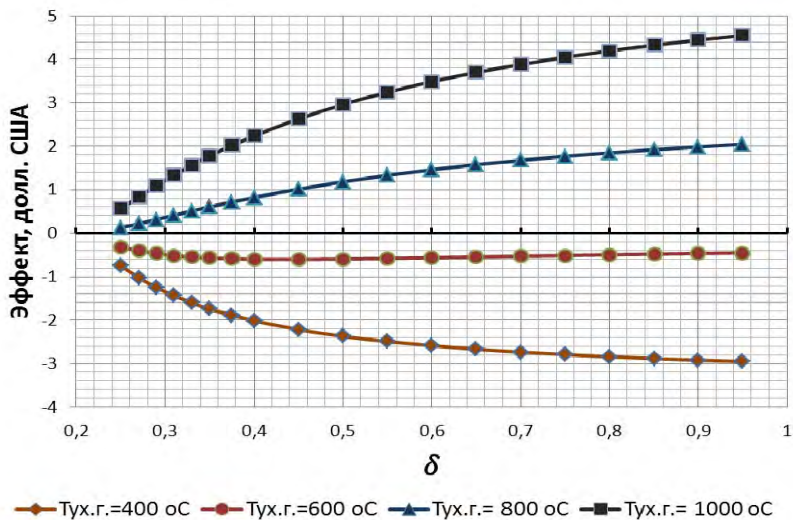


Рисунок 4 – Величина эффекта в денежном выражении при обогащении воздуха дутья кислородом в технологических установках с различными температурами уходящих газов (расход природного газа в базовом варианте при использовании воздуха без кислорода ( $\alpha = 1,05$ ) равен  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ )

Выполненный анализ экономической эффективности применения кислорода для обогащения воздуха при сжигании природного газа в теплоэнергетических и высокотемпературных технологических установках показывает следующее:

- при действующих тарифах на энергоносители применение кислорода позволит получить положительный экономический эффект при достаточно высоких температурах дымовых газов, которые присущи нагревательным и термическим печам машиностроительного и металлургического производства;
- повышение стоимости природного газа в соответствии с планами правительства России приведет к росту привлекательности кислородных технологий для его потребителей;
- выравнивание тарифов на природный газ и электроэнергию до уровня европейских позволит эффективно использовать кислород в установках, где температура уходящих газов находится на уровне  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Таким образом, с учетом перспектив развития мирового рынка энергоресурсов и роста цен на природный газ уже сейчас необходимо активно рассматривать возможности внедрения кислородных технологий на производстве. Прежде всего, это касается предприятий металлургического и машиностроительного комплекса, где эксплуатируются высокотемпературные газопламенные печи. Для решения поставленной задачи следует создать новые конструкции газогорелочных устройств и разработать мероприятия, обеспечивающие безопасность производства при использовании кислорода.

## Литература

**1. Технико-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.

**2. Энергетический** эффект от использования кислорода для обогащения воздуха горения в газопотребляющих агрегатах / В.И. Тимошпольский [и др.] // Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. Нац. металлург. акад. Украины. – Днепропетровск: Новая идеология, 2013. – Вып. 5 (20). – С. 20–22.

**3. 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.

**4. 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.

**5. 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.