

**В.И. Тимошпольский**,  
д.т.н., проф., директор  
по науке и новой технике  
научно-производственной  
группы компаний «Нефтегаз-  
стройизоляция», г. Киев

**С.М. Кабишов**,  
к.т.н., зав. лаб. «Теория  
и техника металлургиче-  
ских процессов»

**И.А. Трусова**,  
д.т.н., проф., зав. каф.  
«Металлургические  
технологии»

**Д.В. Менделев**,  
к.т.н., ст. преп. каф.  
«Металлургические  
технологии»

**Г.А. Румянцева**,  
к.т.н., доцент каф.  
«Металлургические  
технологии»

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КИСЛОРОДА ПРИ СЖИГАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

## Аннотация

В работе представлены результаты расчетов эффекта от применения кислорода для обогащения воздуха при сжигании различных видов газообразного топлива в высокотемпературных энергетических и технологических установках. Установлены граничные значения температуры дымовых газов при сжигании природного газа с коэффициентом избытка воздуха 1,05, ниже которых применение данного способа не эффективно. Сформулированы рекомендации, в каких агрегатах и технологиях применение кислорода наиболее эффективно.

## Summary

The paper presents the results of calculations of the effect of the use of oxygen enrichment of air during combustion of different types of fuel gas in high power and process plants. The boundary temperature of flue gases during the combustion of natural gas with an air ratio of 1.05, following which the application of this method is not effective, are set. Recommendations in which units and technologies use oxygen more efficiently are formulated.

В предыдущей работе [1] была представлена методика оценки эффективности применения кислорода для обогащения воздуха при сжигании газообразного топлива. Результирующая величина экономии топлива, учитывающая степень влияния доли кислорода в смеси, уменьшение энергопотребления дутьевыми механизмами, затраты электроэнергии на производство дополнительного количества кислорода, имеет вид:

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

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. Выражения для расчета указанных составляющих были приведены в работе [1].

Очевидно, что теплотворная способность топлива и стехиометрическое количество кислорода  $k_{O_2}$ , необходимого для сжигания 1 моля данного топлива, оказывают противоположное воздействие на величину экономии. Влияние калорийности газа  $q_0$  на долю экономии рассмотрим на примере процессов сжигания коксового,

Таблица 1. Характеристика газообразных топлив

Топливо	Удельная теплота сгорания $q_0$ , Дж/моль	Стехиометрическое количество кислорода для сжигания 1 моля газа $k_{O_2}$ , моль/моль
Природный газ	784000	1,953
Коксовый газ	400142,5	0,914
Доменный газ	89567,4	0,16

доменного и природного газа. Характеристика топлива приведена в таблице 1.

При проведении расчетов было принято, что кислород производится в криогенной установке, энергозатраты на его производство составляют  $E_0 = 30\ 000$  Дж/моль; коэффициент избытка кислорода, подаваемого в смеси на горение, равен  $\alpha = 1,05$ ; давление воздуха перед горелкой  $p = 4000$  Па, воздушно-кислородная смесь не подогревается ( $\Delta t_0 = 0$ ).

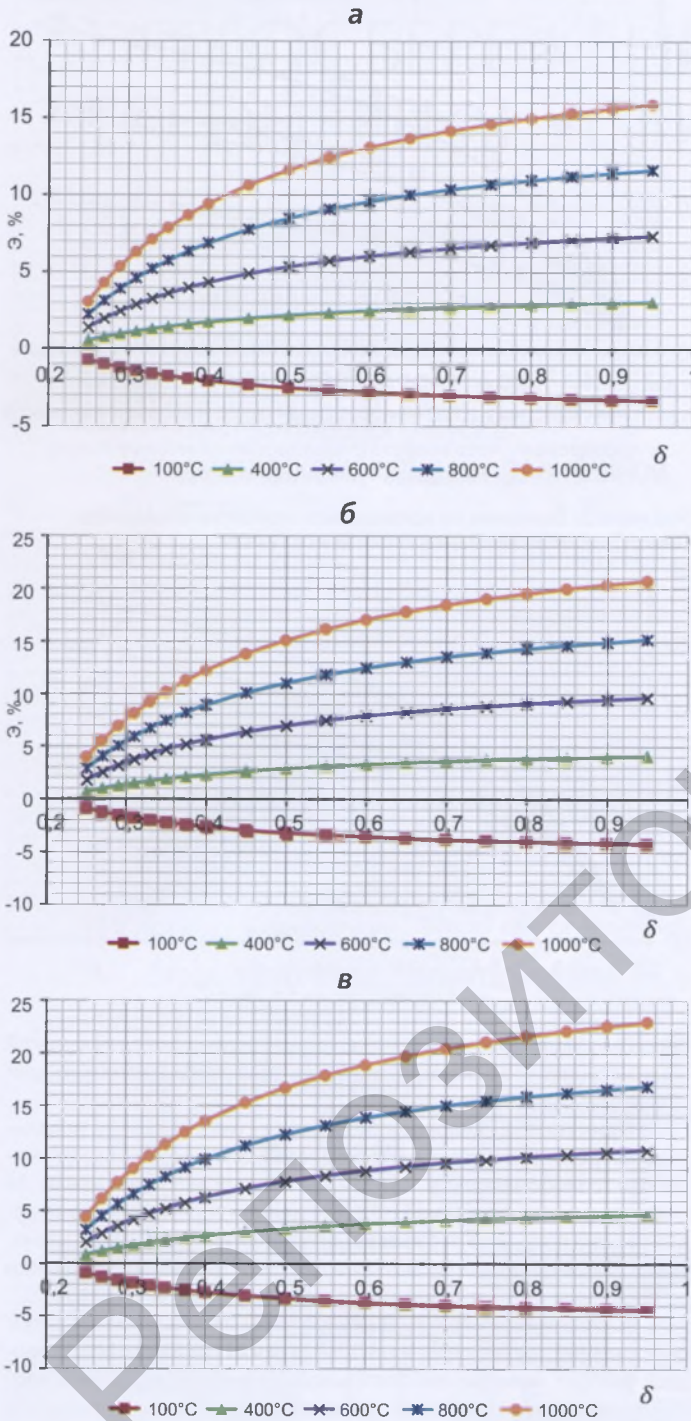
Результаты расчетов для вариантов сжигания доменного, коксового и природного газов приведены на рисунках 1.

Анализ представленных рисунков показывает, что при температуре дымовых газов выше  $400^\circ\text{C}$  наибольшая эффективность использования воздуха, обогащенного кислородом, наблюдается при сжигании природного газа. Причем по мере увеличения концентрации кислорода в смеси величина эффекта монотонно возрастает. При уменьшении калорийности топлива эффективность использования кислорода несколько уменьшается. Так, если при сжигании природного газа максимальный эффект при  $\Delta t_{yx} = 1000^\circ\text{C}$  составляет около 23%, то для коксового газа – около 21%, доменного – 16%. Однако в случае, когда разность температуры уходящих газов и окружающей среды равна  $100^\circ\text{C}$ , т.е. для варианта сжигания газообразного топлива, например, в водогрейном котле, энергоэффективность использования кислорода отрицательная. Это характерно для всех рассмотренных горючих газов.

Вместе с тем, если оценить отдельно члены зависимости (1), т.е. составляющие, определяющие величину эффекта – уменьшение расхода топлива в газопотребляющем агрегате за счет использования кислорода, уменьшение расхода электроэнергии в дутьевых меха-

Это второе сообщение на тему «Энергетическая эффективность обогащения воздуха кислородом при сжигании газообразного топлива». См. статью «Методика оценки энергоэффективности обогащения воздуха кислородом при сжигании газообразного топлива» в №11, 2013.

**Рисунок 1.** Зависимость эффекта от использования кислорода для обогащения дутьевого воздуха при сжигании газообразных топлив: а) доменного газа; б) коксового газа; в) природного газа



низмах и дополнительный расход электроэнергии на получение кислорода из воздуха, то получим картину, представленную на рисунке 2.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что в водогрейном котле отрицательная энергоэффективность использования кислорода обусловлена величиной затрат на его получение из воздуха, которые значительно превышают сумму положительных составляющих: экономию газа непосредственно в агрегате и электроэнергии в дутьевом механизме.

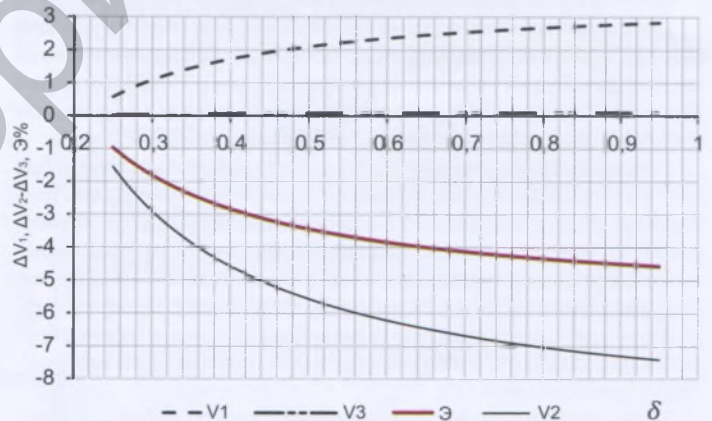
Приравняв зависимость (1) к нулю при отсутствии предварительного подогрева смеси ( $\Delta t_0 = 0$ ) и прибавив значение температуры окружающей среды  $t_{o.c} = 20^\circ\text{C}$ , можно определить предельные значения  $t_{yx}$ , выше которых будет наблюдаться положительная эффективность использования кислорода

$$t_{yx} = \frac{E_0 - 0,0461 p \frac{1}{\delta_0}}{c_m(N_2) \left[ \frac{1}{\delta_0} - 1 + \frac{\alpha k_{O_2}}{\delta \delta_0 q_0} (E_0(\delta - \delta_0) + 0,0461 p \cdot (1 - \delta)) \right]} + t_{o.c.} \quad (2)$$

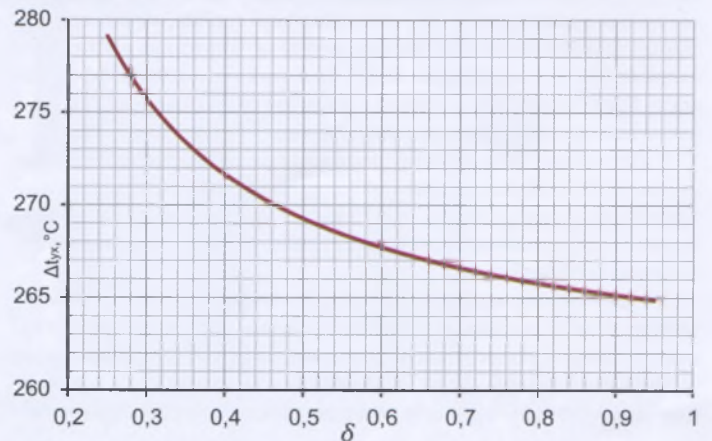
Во всем диапазоне концентраций кислорода в смеси с воздухом при коэффициенте избытка  $\alpha = 1,05$  для получения положительного эффекта температура уходящих газов должна быть не ниже линии, представленной на рисунке 3. Как видим, рост концентрации кислорода от 0,25 до 0,95 несколько понижает минимально допустимую температуру дымовых газов. Но это снижение относительно невелико: температура  $t_{yx}$  уменьшается от  $279^\circ\text{C}$  до  $265^\circ\text{C}$ . Уменьшению критической температуры способствует и увеличение коэффициента избытка кислорода. Но эффект будет незначительным: согласно расчету рост  $\alpha$  от 1,05 до 1,3 приводит к тому, что максимальное значение температуры  $t_{yx}$  снизится чуть более, чем на  $1^\circ\text{C}$ , а минимальное – на  $4^\circ\text{C}$ .

Помимо оценки предельных значений температуры уходящих газов, интерес представляет анализ влияния на эффективность использования кислорода при сжигании газообразного топлива таких параметров как коэффициент избытка кислорода (смеси воздуха и кислорода)  $\alpha$  и температуры предварительного подогрева смеси  $\Delta t_0$  на эффективность предлагаемого мероприятия. Для решения данной задачи выполнены дополнительные расчеты.

**Рисунок 2.** Зависимость составляющих эффекта при сжигании природного газа в водогрейном котле от концентрации кислорода в смеси



**Рисунок 3.** Граничные значения температуры уходящих газов при сжигании природного газа с воздухом, обогащенным кислородом (выше линии – энергоэффективность положительная, ниже – отрицательная)





Максимальной эффективности от применения кислорода можно достичь в печах с окислительной атмосферой, например, в плавильных печах, сжигая газ в газокислородной фурме и одновременно используя эту фурму для вдувания в рабочее пространство дополнительного кислорода (для подрезки лома или окисления примесей либо CO).

Учитывая, что подогрев воздуха в рекуперативных теплообменниках имеет смысл при достаточно высоких температурах уходящих газов, рассмотрим варианты с  $\Delta t_{yx} = 600^\circ\text{C}, 800^\circ\text{C}, 1000^\circ\text{C}$ . При этом температуру подогрева воздушно-кислородной смеси примем равной  $\Delta t_0 = 0,5\Delta t_{yx}$ . Полученные зависимости приведены на рисунке 4.

Сравнение полученных результатов (сплошные линии) с данными, полученными при расчете эффективности использования кислорода без предварительного подогрева смеси (штриховые линии), показывает, что при наличии рекуперативного теплообменника сравнительная эффективность использования кислорода для обогащения воздуха горения несколько снижается. Но это уменьшение незначительно. Не следует забывать, что совместное использование кислорода и подогрева воздушно-кислородной смеси увеличивает суммарную энергоэффективность процесса. Если, например, при температуре дымовых газов  $t_{yx} \approx 800^\circ\text{C}$  подогрев воздуха до  $400^\circ\text{C}$  дает около 25% экономии топлива, то за счет обогащения воздуха до  $[O_2]=50\%$  величина экономии возрастет еще на 12% от расхода газа. Фактический расход по сравнению с вариантом, в котором отсутствует рекуператор и не используется кислород, составит:

$$V = V_0 \cdot (1 - 0,25) \cdot (1 - 0,12) = 0,66 V_0.$$

Таким образом, суммарная экономия энергоресурсов составит 34% от начального расхода природного газа.

Для оценки влияния  $\alpha$  рассмотрим процесс сжигания природного газа с воздухом, обогащенным кислородом. Коэффициент избытка кислорода  $\alpha$  будем варьировать в пределах от 1,05 до 1,5; примем  $\Delta t_{yx} = 800^\circ\text{C}, \Delta t_0 = 400^\circ\text{C}$ , все остальные параметры такие же, как и в предыдущих расчетах. Результаты приведены на рисунке 5.

Очевидно, что увеличение коэффициента избытка кислорода при сжигании природного газа позволяет существенно уменьшить расход энергоресурсов, необходимых для реализации процесса. Это позволяет утверждать, что максимальной эффективности от применения кислорода можно достичь в печах с окислительной атмосферой, например, в плавильных печах, сжигая газ в газокислородной фурме и одновременно используя эту фурму для вдувания в рабочее пространство дополнительного кислорода (для подрезки лома или окисления примесей либо CO).

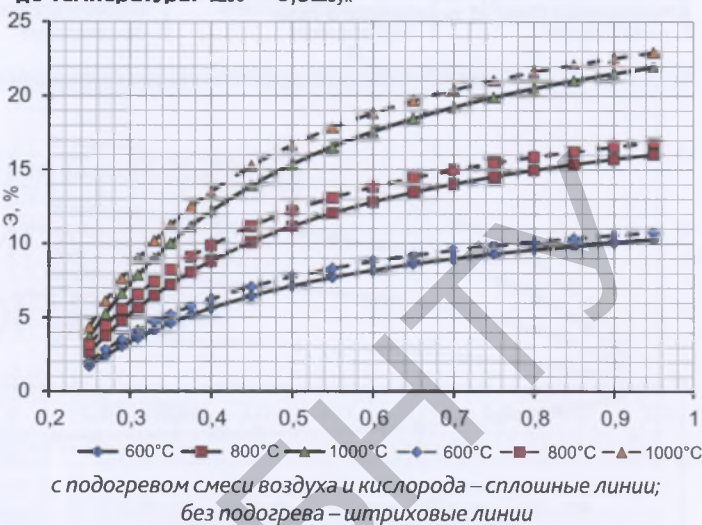
Таким образом, анализ, выполненный в данной работе, показывает:

1. Эффект от применения кислорода при сжигании газообразного топлива тем выше, чем больше отношение  $q_0/k_0$  (теплотворной способности топлива к стехиометрическому количеству кислорода, необходимого для горения). Т.е. 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 CO и  $H_2$ , а также балластных составляющих ( $N_2, O_2$ ).

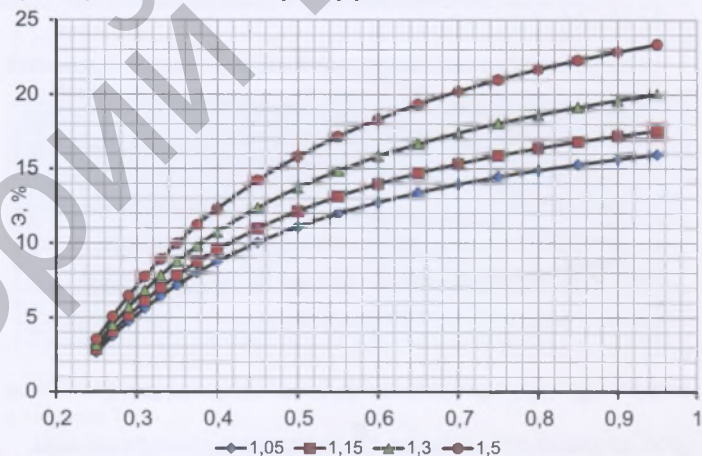
2. Обогащение воздуха кислородом при отсутствии рекуперации теплоты уходящих газов позволяет получить положительный эффект лишь при условии, что температура уходящих газов превышает определенное значение (от  $265^\circ\text{C}$  до  $279^\circ\text{C}$  в зависимости от степени обогащения).

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 кис-

**Рисунок 4.** Величина эффекта от обогащения воздуха горения кислородом при подогреве смеси до температуры  $\Delta t_0 = 0,5\Delta t_{yx}$



**Рисунок 5.** Влияние коэффициента избытка кислорода (смеси) на величину энергоэффективности



лород не имеет смысла, либо необходимо ограничиться невысокой концентрацией его в смеси, что не будет отрицательно влиять на долговечность теплообменника.

4. Применение кислорода будет эффективно в случае использования рекуперативных либо регенеративных горелок с керамическим теплообменником, который не подвергается окислению. За счет технологии сжигания FLOX [2] в данных горелках попутно будет решена проблема образования термических NOx. Тогда экономия топлива будет складываться из двух составляющих: экономии от подогрева дутья и экономии от использования кислорода.

5. 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 с газокислородными фурмами и др.).

### Литература

1. Методика оценки энергоэффективности обогащения воздуха кислородом при сжигании газообразного топлива / В.И. Тимошпольский, С.М. Кабишов, И.А. Трусова [и др.] // Энергоэффективность. – 2013. – №11. – С. 32–34.
2. Макий, А. Технология беспламенного горения // Оборудование. Технический альманах. – 2006. – №4. – С.14–17.

Статья поступила в редакцию 11.11.2013

