

**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»

**М.Л. Герман,**  
к.ф.-м.н., доцент каф.  
«Металлургические  
технологии»

**П.Э. Ратников,**  
к.т.н., доцент каф.  
«Металлургические  
технологии»

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

# МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ ВОЗДУХА КИСЛОРОДОМ ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

## Аннотация

В работе представлена методика, позволяющая оценить энергоэффективность применения кислорода для обогащения воздуха при сжигании газообразных топлив в высокотемпературных энергетических и технологических установках. Достоинством данной работы является учет не только экономии непосредственно топлива, но также затрат электроэнергии на производство кислорода и снижения энергопотребления дутьевыми механизмами.

## Summary

The method that allows to evaluate oxygen application energy efficiency in reference to air enrichment of gaseous fuel in high temperature power and technological plants is provided. The advantage of this work is to take into account economy of not only the direct cost of fuel, but also the cost of electricity to produce oxygen and reduce the power consumption of the blow mechanisms.

К числу основных составляющих энергосберегающего эффекта от обогащения кислородом дутьевого воздуха, применяемого при сжигании газообразного топлива в теплотехнологических агрегатах, можно отнести:

- уменьшение объема балластных газов (азота), нагреваемых в процессе горения топлива и, следовательно, уменьшение объема продуктов сгорания топлива, что, в свою очередь, приводит к сокращению тепловых потерь с дымовыми газами;

- снижение объемов дутья и продуктов сгорания, что требует менее мощных тягодутьевых механизмов для обеспечения подачи газов в зону горения и отвода продуктов сгорания из нее;

- повышение концентрации излучающих трехатомных газов в образующихся продуктах сгорания, что увеличивает радиационный тепловой поток на тепловоспринимающие поверхности, интенсифицируя процессы теплообмена.

Экологические аспекты, в частности, образование  $NO_x$  приведены в работе [1], при этом показано, что, несмотря на рост концентрации термических оксидов азота в продуктах горения газа в смеси с воздухом, обогащенным кислородом, общее количество  $NO_x$  в дымовых газах уменьшается. Следует также отметить, что на практике объемы выбросов  $NO_x$  при сжигании газообразного топлива в значительной степени зависят от совершенства конструкции горелочных устройств. Например, применение технологии FLOX [2] позволяет существенно уменьшить выбросы оксидов азота и минимизировать отрицательное влияние более высокого содержания кислорода в зоне горения на процесс их образования.

Учитывая сказанное, определим основные составляющие энергосберегающего эффекта от обогащения кислородом дутьевого воздуха, применяемого при сжигании газообразного топлива.

Для упрощения расчета сделаем некоторые допущения. Так как суммарное количество примесей в воздухе не превышает 1% и они не оказывают существенного влияния на количественные показатели и физико-химические процессы горения топлива, будем считать, что воздух состоит только из азота (79 %) и кислорода (21 %).

Примем следующие обозначения:  $\delta_0$  – 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 кис-

лорода;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $q_0$  – теплотворная способность 1 моля газообразного топлива, Дж/моль;  $t_{yx}$ ,  $t_0$ ,  $t_{o.c.}$  – 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).

В общем случае стехиометрическое количество кислорода, которое необходимо для сжигания 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива, можно определить по формуле [3]:

$$V_{O_2} = 0,01 \left[ 0,5 \cdot (CO + H_2) + 1,5 H_2 S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right]. \quad (1)$$

Численно  $V_{O_2}$  будет равен стехиометрическому коэффициенту  $k$  перед кислородом в суммарной реакции горения 1 моля газообразного топлива.

Тогда количество подаваемой смеси воздуха и кислорода составит

$$V_n = k_{O_2} \alpha + k_{O_2} \alpha \cdot \left( \frac{1}{\delta} - 1 \right) = \frac{k_{O_2} \alpha}{\delta}, \text{ моль}. \quad (2)$$

Теоретический объем продуктов полного сгорания, образующихся при сжигании 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива при стехиометрическом соотношении с окислителем, будет равен:

$$V_{yx} = 0,01 \left[ (CO + H_2) + 2 H_2 S + \sum \left( m + \frac{n}{2} \right) C_m H_n + C O_2 + N_2^p \right] + \left[ \frac{(1 - \delta)}{\delta} \right] V_{O_2} \quad (3)$$

В данном выражении не учитывается наличие паров воды в воздухе.

Для случая сжигания 1 моля топлива примем, что первое слагаемое, т.е. количество продуктов сгорания всех компонентов топлива и азота, который изначально содержался в топливе, равно  $k_{yx}$ . Причем данная величина не изменяется при обогащении воздуха кислородом. С учетом коэффициента избытка смеси (по кислороду)  $\alpha$  запишем:

$$V_{yx} = k_{yx} + k_{O_2} \left[ \frac{\alpha(1 - \delta)}{\delta} \right] + k_{O_2} (\alpha - 1). \quad (3)$$

Как уже отмечалось ранее, при обогащении воздуха кислородом объем продуктов сгорания уменьшается, что приводит к снижению тепловых потерь с уходящими газами. Сказанное можно выразить следующим образом:

$$\Delta E_1 = c_p(N_2) \cdot [m_{N_2}^{возд}(t_{yx}^{возд}) - t_0] - m_{N_2}^{смесь}(t_{yx}^{смесь} - t_0), \text{ Дж}, \quad (5)$$

где  $\Delta E_1$  – количество энергии (теплоты), освободившееся за счет снижения тепловых потерь с дымовыми газами, Дж;  $c_p(N_2)$  – удельная теплоемкость азота при температуре  $t_{yx}$ ; (Дж/(кг·К));  $m_{N_2}^{возд}$  и  $m_{N_2}^{смесь}$  – масса балластного азота, содержащегося в воздухе и в воздушно-кислородной смеси, подаваемых на горение, кг.;  $t_{yx}^{возд}$  и  $t_{yx}^{смесь}$  – температура дымовых газов на выходе из энергетической установки (котла) либо нагревательной печи, °С;  $t_0$  и  $t_0$  – начальная температура подогрева соответственно воздуха и смеси, °С.

При оценке эффекта обогащения воздуха кислородом для различных газопотребляющих агрегатов (котлов, печей) будем считать, что температура уходящих газов и температура подогрева смеси при использовании кислорода не изменяется. С учетом данного допущения и уравнения (4) можем записать, что количество тепловой энергии, освободившейся за счет снижения доли балласта при нагреве печных газов до температуры  $t_{yx}$  и выбросе их в атмосферу, для случая сжигания 1 моля газообразного топлива составит:

$$\Delta E_1 = c_m(N_2) \cdot k_{O_2} \alpha \cdot \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1}{\delta} \right) \cdot (t_{yx} - t_0), \text{ (Дж/моль)}, \quad (6)$$

где  $\delta$  – доля кислорода в обогащенном воздухе;  $c_m(N_2)$  – молярная теплоемкость азота при температуре  $t_{yx}$ , Дж/(моль·К).

Фактически данная величина эквивалентна теплоте сгорания некоторого количества газа  $\Delta V_1$  и доле теплоты, вносимой подогретой смесью воздуха и кислорода. Будем считать, что прочие статьи уравнения теплового баланса газопотребляющего агрегата при использовании кислорода не изменяются. На основании сказанного запишем:

$$\Delta V_1 (q_0 + k_{O_2} \alpha [c_m(O_2) + c_m(N_2) \frac{1-\delta}{\delta}] (t_0 - t_{0.c.})) = c_m(N_2) \cdot k_{O_2} \alpha \cdot \frac{1}{\delta_0} - \frac{1}{\delta} \cdot (t_{yx} - t_0)$$

Обозначим  $(t_0 - t_{0.c.})$  как  $\Delta t_0$ , а  $(t_{yx} - t_0)$  как  $\Delta t_{yx}$ . Тогда

$$\Delta V_1 = \frac{c_m(N_2) \cdot k_{O_2} \alpha \cdot \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1}{\delta} \right) \cdot \Delta t_{yx}}{q_0 + k_{O_2} \alpha [c_m(O_2) + c_m(N_2) \frac{1-\delta}{\delta}] \Delta t_0}, \text{ моль}. \quad (7)$$

С помощью формулы (7) можно рассчитать количество газа, которое будет сэкономлено за счет обогащения воздуха кислородом до концентрации  $\delta$  при сохранении количественных и качественных показателей полезной нагрузки (тепловая мощность котла, производительность и температура нагрева металла в печи и т.п.).

Экономия энергии при снижении объема (массы) подаваемого в зону горения воздуха может быть оценена исходя из уравнения течения идеальной жидкости (уравнение Бернулли) без учета в силу малости диссипации энергии, связанной с вязкостью азота и потерями в дутьевом механизме. Для реальных условий следует учесть коэффициент повышения мощности  $k_2$  в зависимости от условий работы (при температуре окружающей среды  $t_{0.c.} = 20$  °С и высоте над уровнем моря до 1000 м  $k_1 = 1,2$ ), коэффициент запаса по производительности и напору ( $k_2 = 1,2$ ), а также КПД дутьевого вентилятора (примем  $\eta_s = 0,7$ ):

$$\Delta E_2 = p \cdot \Delta V_{возд} \frac{k_1 k_2}{\eta_s} = 2,06 \cdot p \cdot \Delta V_{возд}$$

Определим  $\Delta V_{возд}$ . При сжигании газа с воздухом объем последнего составляет

$$V_{возд} = k_{O_2} \alpha \frac{1}{\delta_0} \text{ (моль)}.$$

Так как на выходе из любой воздухоразделительной установки кислород имеет давление, достаточное для подачи через редуцирующее устройство в горелку, то будем считать, что при обогащении воздуха кислородом последний подается в воздуховод после воздуходувки. Следовательно, электроэнергия затрачивается лишь на подачу воздуха для получения концентрации кислорода на входе в горелку равной  $\delta$ .

За счет уменьшения потребления газа на  $\Delta V_1$  объем подаваемой на горение смеси, а, следовательно, и воздуха уменьшится:

$$V_{возд}^{(смесь)} = k_{O_2} \alpha \frac{1-\delta}{\delta(1-\delta_0)} (1 - \Delta V_1)$$

Тогда

$$\Delta V_{возд} = k_{O_2} \alpha \cdot \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1-\delta}{\delta(1-\delta_0)} \right) (1 - \Delta V_1).$$

Учитывая, что объем, занимаемый одним молекул азота, при нормальных условиях приблизительно равен 0,0224 м<sup>3</sup>/моль, получим:

$$\Delta E_2 = 2,06 \cdot p \cdot \Delta V_{возд} = 2,06 \cdot p \cdot 0,0224 \cdot k_{O_2} \alpha \cdot$$

$$\left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1-\delta}{\delta(1-\delta_0)} \right) (1 - \Delta V_1) p, \text{ Дж}, \quad (8)$$

где  $p$  – давление воздуха (смеси) перед горелкой, Па.

В переводе на расход газа можем записать, что доля экономии составит

$$\Delta V_2 = 0,0461 \cdot \frac{k_{O_2} \alpha p}{q_0} \cdot \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1-\delta}{\delta(1-\delta_0)} \right) (1 - \Delta V_1). \quad (9)$$

Рассматривая целесообразность применения кислорода для обогащения дутья, следует учитывать, что эксплуатируемые в настоящее время дутьевые механизмы, как правило, приводятся в действие электромоторами, а первичным топливом при выработке электроэнергии в условиях Беларуси является природный газ. Следовательно, необходимо оценить экономию первичного топлива с учетом КПД тепловых электростанций и потерь электроэнергии при транспортировке к потребителю, трансформации, а также непосредственно в приводе самого механизма. С учетом указанных потерь в среднем для энергосистемы Беларуси этот коэффициент равен  $\eta \approx 0,4$ .

Тогда доля полной экономии энергии  $\Delta \dot{V}_2$  будет равна:

$$\Delta \dot{V}_2 = 0,0461 \cdot \frac{k_{O_2} \alpha p}{q_0 \eta} \cdot \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1-\delta}{\delta(1-\delta_0)} \right) (1 - \Delta V_1). \quad (10)$$

Для удаления дымовых газов могут использоваться дымососы. Тогда при условии, что дымовые газы перед дымососом не разбавляются воздухом для понижения температуры (как это иногда делается в высокотемпературных печах), величину экономии за счет уменьшения потребления электроэнергии двигателем дымососа можно рассчитать аналогично формулам (9), (10).

Так как во многих энергетических установках и пламенных печах дымовые газы удаляются за счет естественной тяги, образующейся от высотной разности давлений на выходе из топки и в устье дымовой трубы, то при оценке эффективности применения кислорода на данном этапе экономии энергии в системе дымоудаления учитывать не будем.

Дополнительный расход энергии на выработку кислорода для обогащения дутьевого воздуха может быть рассчитан следующим образом:

$$\Delta E_3 = \alpha \cdot k_{O_2} \cdot E_0 \cdot \frac{\delta - \delta_0}{\delta - \delta_0} (1 - \Delta V_1), \text{ (Дж)}, \quad (11)$$

где  $E_0$  – удельный расход энергии на выработку кислорода, Дж/моль.

Согласно работе [4] удельный расход энергии на производство 1 моля кислорода при использовании наиболее распространенных в настоящее время способов разделения воздуха (криогенного, адсорбционного и мембранного) составляет от 26611 Дж/моль до 69349 Дж/моль.

Тогда по аналогии с уравнением (9) дополнительный расход энергии на получение кислорода эквивалентен

$$\Delta V_3 = \frac{\alpha \cdot k_{O_2} \cdot E_0}{q_0} \cdot \frac{\delta - \delta_0}{\delta - \delta \delta_0} (1 - \Delta V_1), \quad (12)$$

С учетом затрат на производство электроэнергии на электростанции и потерь на транспортировку и трансформацию фактически затраты на производство кислорода составят:

$$\Delta \dot{V}_3 = \frac{\alpha \cdot k_{O_2} \cdot E_0}{\eta \cdot q_0} \cdot \frac{\delta - \delta_0}{\delta - \delta \delta_0} (1 - \Delta V_1). \quad (13)$$

При оценке суммарной доли экономии топлива для промышленного предприятия не будем учитывать влияние на величину энергоэффекта затрат на производство, транспортировку и трансформацию электроэнергии, поскольку фактически это учтено действующими тарифами на природный газ и электроэнергию для потребителей-предприятий. В этом случае эффект от обогащения воздуха кислородом будет равен:

$$\begin{aligned} \Xi = \Delta V_1 + \Delta V_2 - \Delta V_3 = & \frac{c_m(N_2) \cdot k_{O_2} \alpha \cdot \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1}{\delta} \right) \cdot \Delta t_{yx}}{q_0 + k_{O_2} \alpha \left[ c_m(O_2) + c_m(N_2) \frac{1-\delta}{\delta} \right] \Delta t_0} + \\ & + \frac{0,0461 \cdot k_{O_2} \alpha p}{q_0} \cdot \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1-\delta}{\delta(1-\delta_0)} (1 - \Delta V_1) \right) - \\ & - \frac{\alpha \cdot k_{O_2} \cdot E_0}{q_0} \cdot \frac{\delta - \delta_0}{\delta - \delta \delta_0} (1 - \Delta V_1) \\ \Xi = \frac{\alpha k_{O_2}}{q_0} \left[ \frac{q_0}{\alpha k_{O_2}} \Delta V_1 + 0,0461 p \left( \frac{1}{\delta_0} - \frac{1-\delta}{\delta(1-\delta_0)} (1 - \Delta V_1) \right) - \right. \\ & \left. - E_0 \frac{\delta - \delta_0}{\delta - \delta \delta_0} (1 - \Delta V_1) \right] \quad (14) \end{aligned}$$

В качестве примера использования разработанной методики на рисунке 1 представлена зависимость экономии природного газа от степени обогащения дутьевого воздуха кислородом.

Как видим, обогащение воздуха кислородом в представленном случае позволяет добиться положительного эффекта во всем диапазоне концентраций  $O_2$  в воздухе. При этом эффект растет по мере увеличения доли добавляемого в воздух кислорода. Максимальный уровень экономии составляет около 16% при использовании фактически чистого кислорода ( $\delta=95\%$ ).

Таким образом, используя полученную зависимость, представляется возможным оценить влияние различных факторов на эффективность применения кислорода при сжигании различных газообразных топлив. В частности, очевидно, что на величину эффекта будут влиять:

- коэффициент избытка кислорода в смеси  $\alpha$ ;
- стехиометрическое количество кислорода  $k_{O_2}$ , необходимое для сжигания газообразного топлива;
- температура уходящих газов и температура подогрева воздушно-кислородной смеси;
- давление воздушно-кислородной смеси перед горелкой;
- энергозатраты на получение кислорода.

### Литература

1. Кабишов, С.М. Анализ эффективности технологических методов снижения выбросов  $NO_x$  при сжигании углеводородного топлива в теплоэнергетических установках / С.М. Кабишов, И.А. Трусова, П.Э. Ратников, Д.В. Менделев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений стран СНГ. Энергетика. — 2013. — №2. — С. 48—53.
2. Макий, А. Технология беспламенного горения // Оборудование. Технический альманах. — 2006. — №4. — С.14—17.
3. Губинский, В.И. Металлургические печи. Теория и расчеты. Учеб. в 2 т. Т.1. / В.И. Губинский, В.И. Тимошпольский, В.М. Ольшанский и др.; под общ. ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. — Минск: Белорусская наука, 2007. — 596 с.
4. Карп, И.Н. Использование кислорода и обогащенного кислородом воздуха в нагревательных печах, колодцах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей / Карп И.Н., Зайвый А.Н., Марцевой Е.П., Пьяных К.Е. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2012. — №3 — С. 18—29.

Статья поступила в редакцию 18.10.2013

**Рисунок 1. Зависимость экономии природного газа от доли обогащения дутьевого воздуха кислородом**

( $\alpha=1,05$ ;  $k_{O_2}=1,953$ ;  $\Delta t_{yx}=800^\circ C$ ;  $\Delta t_0=400^\circ C$ ;  $p=4000 \text{ Па}$ ,  $E_0=30000 \text{ Дж/моль}$ )

