



*Assesses the efficiency of the use of excess oxygen produced by the oxygen-compressor station in order to reduce the flow of oxygen gas and specific consumption of fuel, for the conditions of JSC «BSW».*

С. М. КАБИЦОВ, И. А. ТРУСОВА, П. Э. РАТНИКОВ, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, БНТУ

УДК 669.44

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВКАХ НА ПРИМЕРЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ОАО «БМЗ» ПУТЕМ ОБОГАЩЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ КИСЛОРОДОМ

В настоящее время существуют различные способы сокращения непроизводительных потерь и улучшения технико-экономических показателей нагревательных устройств. В первую очередь, к ним следует отнести применение высокоэффективных устройств утилизации теплоты отходящих газов, совершенствование конструкции печей, использование современных горелочных устройств, снижение потерь теплоты за счет применения современных теплоизоляционных и огнеупорных материалов, а также обогащение воздуха горения кислородом.

В связи с вводом в 2001 г. на ОАО «БМЗ» кислородно-компрессорной станции возникла необходимость оценки возможности применения кислорода для интенсификации процессов нагрева в печах прокатного производства с целью уменьшения потребления топлива и снижения количества экологически вредных выбросов.

Специалистами НИЛ ТТМП БНТУ проведена оценка эффективности использования избытка кислорода, вырабатываемого на кислородно-компрессорной станции, с целью уменьшения расхода природного газа и удельного расхода условного топлива применительно к условиям ОАО «БМЗ».

Как отмечают многие исследователи, использование кислорода при сжигании природного газа в нагревательных печах металлургического производства – один из путей снижения потребления топлива. Но, без сомнения, на основании анализа сведений, приведенных в технической литературе [1–3], сложно однозначно оценить эффективность применения данного метода в конкретной ситуации. Корректное решение поставленной задачи возможно с учетом конструктивных особенностей печи и газогорелочных устройств, температурных

режимов нагрева, особенностей технологии и других факторов.

С целью определения экономии топлива при частичной замене воздуха кислородом проведен сравнительный расчет процесса горения природного газа для двух вариантов: при использовании в качестве окислителя воздуха и кислородно-воздушной смеси.

Вместе с этим необходимо отметить следующее. Очевидно, что при добавлении кислорода общий объем кислородно-воздушной смеси уменьшается, что приводит к изменению соотношения «газ – кислородно-азотная смесь». Это, в свою очередь, влияет на работу горелочных устройств. Учитывая, что в нагревательных печах станов 150, 320 и 850 установлены горелки, диапазон устойчивой работы которых ограничен минимальным соотношением «газ-воздух» 1:8, рассчитаем максимально допустимое количество кислорода.

Так как количество кислорода в смеси принимается постоянным, а изменяется лишь его концентрация, то для обеспечения соотношения «газ-воздух, обогащенный кислородом» 1:8, необходимо  $8 \text{ м}^3$  кислородно-воздушной смеси, равноценной по своим окислительным свойствам  $9,82 \text{ м}^3$  воздуха (коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,05$ ) (расчет требуемого количества воздуха и кислорода представлен ниже). В результате получаем, что доля кислорода в данной смеси составит 26,25%. Чтобы получить такую концентрацию, необходимо к  $1 \text{ м}^3$  воздуха добавить  $0,071 \text{ м}^3 \text{ O}_2$ .

При дальнейших расчетах примем, что количество кислорода в смеси равно 25%, т. е. соотношение «газ:смесь» будет равным 1:8,25. При таком соотношении, согласно техническим характеристикам оборудования нагревательных печей ста-

нов 850,150 и 320, газогорелочные устройства работают бесперебойно.

При расчетах примем состав природного газа, используемого в качестве топлива на ОАО «БМЗ», следующим:  $\text{CH}_4 - 98,5\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_4 - 0,5$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,3$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,2\%$ ; прочие примеси –  $0,5\%$ ; влажность –  $20 \text{ г/м}^3$ .

Пересчитаем состав природного газа с учетом содержания водяного пара по формуле

$$X^{\text{вл}} = X^{\text{сух}} \frac{100}{100 + 0,1242W},$$

где  $W$  – влажность газа.

Получим:  $\text{CH}_4 - 96,11\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_4 - 0,49$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,29$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,195$ ;  $\text{H}_2\text{O} - 2,43$ ; прочие примеси –  $0,485\%$ .

Низшая рабочая теплота сгорания природного газа данного состава, рассчитанная по методике [4], определяется по выражению

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 358\text{CH}_4 + 590\text{C}_2\text{H}_4 + 913\text{C}_3\text{H}_8 + 1185\text{C}_4\text{H}_{10}, \text{ кДж/м}^3. \quad (1)$$

Здесь и далее при расчетах под обозначениями  $\text{C}_n\text{H}_m$  принимаем процентное содержание данного компонента в природном газе. Низшая теплота сгорания природного газа:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 35193 \text{ кДж/м}^3.$$

Объем кислорода, теоретически необходимого для сгорания  $1 \text{ м}^3$  природного газа:

$$V_{\text{O}_2} = 0,01(2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10}), \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2)$$

$$V_{\text{O}_2} = 1,964 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Следовательно, теоретический расход воздуха составит

$$L_0 = V_{\text{O}_2} \cdot 100/21 = 9,35 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем смеси с содержанием кислорода  $25\%$ :

$$L_{0\text{с}} = V_{\text{O}_2} \cdot 100/25 = 7,856 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Действительный расход воздуха при  $\alpha = 1,05$ :

$$L_{\alpha} = L_0 \cdot 1,05 = 9,82 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Действительный расход смеси:

$$L_{\alpha} = L_{0\text{с}} \cdot 1,05 = 8,25 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Далее определим количественный состав продуктов сгорания, получаемых при сжигании природного газа с воздухом при  $\alpha = 1,05$ :

$$V(\text{CO}_2) = 0,01(\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10}), \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = 0,01(2\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_4 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{C}_4\text{H}_{10} + \text{H}_2\text{O}), \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V(\text{N}_2) = 3,762V_{\text{O}_2}\alpha, \text{ м}^3/\text{м}^3 -$$

при сжигании природного газа с воздухом;

$$V(\text{N}_2) = (75/25)V_{\text{O}_2}\alpha, \text{ м}^3/\text{м}^3 -$$

при сжигании газа с кислородно-воздушной смесью ( $25\% \text{ O}_2$ );

$$V(\text{O}_2) = (\alpha - 1)V_{\text{O}_2}, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Состав уходящих газов при различном содержании кислорода в окислителе

Состав уходящих газов	Относительный объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$	
	воздух	воздух+кислород
$V(\text{CO}_2)$	0,987	0,987
$V(\text{H}_2\text{O})$	1,977	1,977
$V(\text{N}_2)$	7,758	6,188
$V(\text{O}_2)$	0,098	0,098
Итого	10,82	9,25

Рассчитаем теплосодержание продуктов сгорания для каждого из вариантов:

$$i_{0(\alpha=1,05)} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} / V_{\alpha} = 3252,06 \text{ кДж/м}^3 \quad (\text{при использовании воздуха}),$$

$$i_{0\text{с}(\alpha=1,05)} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} / V_{\alpha\text{с}} = 3804,54 \text{ кДж/м}^3 \quad (\text{при использовании смеси}).$$

На основании полученных данных определим calorиметрическую температуру горения для каждого из исследуемых вариантов.

Задаемся значением calorиметрической температуры  $T_{\text{к}} = 2273 \text{ К}$  для случая сжигания природного газа с воздухом. Рассчитаем энтальпию продуктов сгорания при данной температуре:

$$i_{T_{\text{к}}} = (i_{T_{\text{к}}\text{CO}_2}V(\text{CO}_2) + i_{T_{\text{к}}\text{H}_2\text{O}}V(\text{H}_2\text{O}) + i_{T_{\text{к}}\text{N}_2}V(\text{N}_2) + i_{T_{\text{к}}\text{O}_2}V(\text{O}_2))/V_{\text{д}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{д}}$  – объем дыма, образующегося при сжигании  $1 \text{ м}^3$  природного газа:

$$i_{2273} = 3240,5 \text{ кДж/м}^3.$$

Так как полученное значение меньше расчетной энтальпии продуктов сгорания  $i_0 (\alpha = 1,05)$ , принимаем  $T_{\text{к}} = 2373 \text{ К}$ .

Тогда энтальпия равна

$$i_{2373} = 3505,1 \text{ кДж/м}^3.$$

Таким образом, calorиметрическая температура сгорания при использовании в качестве окислителя воздуха равна:

$$T_{\text{к}}^{\text{н}} = 2273 + 100 (i_{0(\alpha=1,05)} - i_{2273}) / (i_{2373} - i_{2273}) = 2277,4 \text{ К}.$$

По этой же методике рассчитаем calorиметрическую температуру горения при использовании смеси воздуха с кислородом ( $\text{O}_2 = 25\%$ ).

В результате получим

$$T_{\kappa}^{д(к)} = 2496,8 \text{ К.}$$

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что за счет повышения содержания кислорода в воздухе от 21 до 25% калориметрическая температура горения возрастает на 219,4 градуса.

Для оценки влияния обогащения воздуха кислородом на расход топлива запишем упрощенное уравнение теплового баланса для исследуемых вариантов.

Для базового варианта (окислитель-воздух):

$$BQ_{\text{H}}^{\text{P}} + L_0 i_{\text{B}} = P i_{\text{Me}} + V_{\text{д}} i_{\text{д}} + Q_{\text{пот}} \quad (4)$$

В случае, когда при сжигании используется воздух, обогащенный кислородом ( $O_2 = 25\%$ ):

$$B_{\kappa} Q_{\text{H}}^{\text{P}} + L_{0\text{c}} i_{\text{c}} = P i_{\text{Me}} + V_{\text{д(с)}} i_{\text{д(с)}} + Q_{\text{пот}}^{\text{K}} \quad (5)$$

где  $B, B_{\kappa}$  – соответственно расход природного газа в первом и втором случаях;  $i_{\text{B}}, i_{\text{c}}$  – энтальпии воздуха и кислородно-воздушной смеси при температуре подогрева;  $P$  – производительность печи;  $Q_{\text{пот}}^{\text{P}}, Q_{\text{пот}}^{\text{K}}$  – прочие потери (через ограждающие конструкции, с охлаждающей водой, окалиной, излучением через окна печи и др.).

Будем считать, что производительность печи, температурный режим нагрева, температура подогрева воздуха (смеси), температура уходящих газов и конечная температура металла одинаковы для обоих вариантов. Дополнительно примем, что  $Q_{\text{пот}}^{\text{K}} \approx Q_{\text{пот}}^{\text{P}}$  так как не изменяются температуры по зонам печи.

Вычтем из первого уравнения второе. Предварительно определим теплосодержание подогретого воздуха, обогащенного кислородом смеси и уходящих газов для обоих вариантов.

Принимая во внимание вышеизложенное, после преобразований получаем:

$$B - B_{\kappa} = \frac{B(V_{\alpha} i_{\text{д}} - L_{\alpha} i_{\text{B}}) - B_{\kappa}(V_{\alpha\kappa} i_{\text{дк}} - L_{\alpha\kappa} i_{\text{BK}})}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}, \quad (6)$$

где  $L$  и  $V$  – количество воздуха (смеси) при  $\alpha = 1,05$  и объем продуктов сгорания, отнесенные к  $1 \text{ м}^3$  природного газа (индекс «к» указывает на то, что данная величина получена для случая сжигания природного газа с кислородно-воздушной смесью).

Разделив правую и левую части уравнения на  $B$ , определим величину  $B/B_{\kappa}$ , показывающую на сколько изменится расход природного газа в случае применения обогащенной кислородом смеси по сравнению со случаем, когда в качестве окислителя используется воздух:

$$\frac{B_{\kappa}}{B} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}} - V_{\alpha} i_{\text{д}} + L_{\alpha} i_{\text{B}}}{Q_{\text{H}}^{\text{P}} - V_{\alpha\kappa} i_{\text{дк}} + L_{\alpha\kappa} i_{\text{BK}}}. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет оценить, какой эффект оказывает обогащение воздуха кислородом на расход топлива.

Задаваясь конкретными значениями температур подогрева воздуха (смеси) и уходящих газов для нагревательных печей прокатных стансов ОАО «БМЗ», построим зависимости  $B_{\kappa}/B$  от содержания кислорода в окислителе. Расчеты проведем для двух вариантов:

*Вариант 1:*  $T_{\text{B}} = 480 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{д1}} = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{д1}} = 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{д1}} = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (изменяем температуру дыма при постоянной температуре подогрева воздуха (смеси)).

*Вариант 2:*  $T_{\text{д}} = 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{B1}} = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{B2}} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{B3}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (изменяем температуру подогрева воздуха (смеси) при  $T_{\text{д}} = \text{const}$ ).

Результаты представлены на рис. 1, 2.

Анализируя полученные графики, можно отметить, что:

Применение кислорода тем эффективнее, чем выше температура уходящих газов (рис. 1) и ниже температура подогрева окислителя (рис. 2), т. е. при большей разнице  $T_{\text{дыма}} - T_{\text{воздуха}}$ . Это дает основание утверждать следующее: положительный эффект от обогащения воздуха горения кислородом больше в агрегатах с невысоким КПД.

На практике содержание кислорода в исходной смеси-окислителе можно ограничить 45–55%. Дальнейшее повышение относительного количества  $O_2$  не дает такой экономии природного газа (кривые, на рис. 1, 2 при содержании  $O_2 > 45\text{--}55\%$  имеют более пологий характер).

При обогащении воздуха до 25%  $O_2$  (вариант, приемлемый для нагревательных печей ОАО «БМЗ») расход топлива снижается на 1,6–2,7%.

### Выводы

1. Обогащение воздуха кислородом при сжигании природного газа позволяет добиться экономии топлива. Из рис. 1, 2 видно, что при содержании 25% кислорода в окислителе расход топлива уменьшается на 1,6–2,7%.

2. За счет уменьшения количества азота в исходной смеси и объема уходящих газов снизится и количество  $NO_x$ , что также немаловажно, учитывая повышение требований в области экологии.

3. Как отмечают многие исследователи, применение смеси, обогащенной кислородом, приводит к более полному сжиганию топлива (в уходящих газах практически отсутствуют CO и несгоревшие углеводороды).

При этом следует отметить, что обогащение воздуха горения кислородом приводит к необходимости реконструкции отдельных узлов печи, что вызывает увеличение капитальных затрат. Так как нормы техники безопасности не допускают ис-

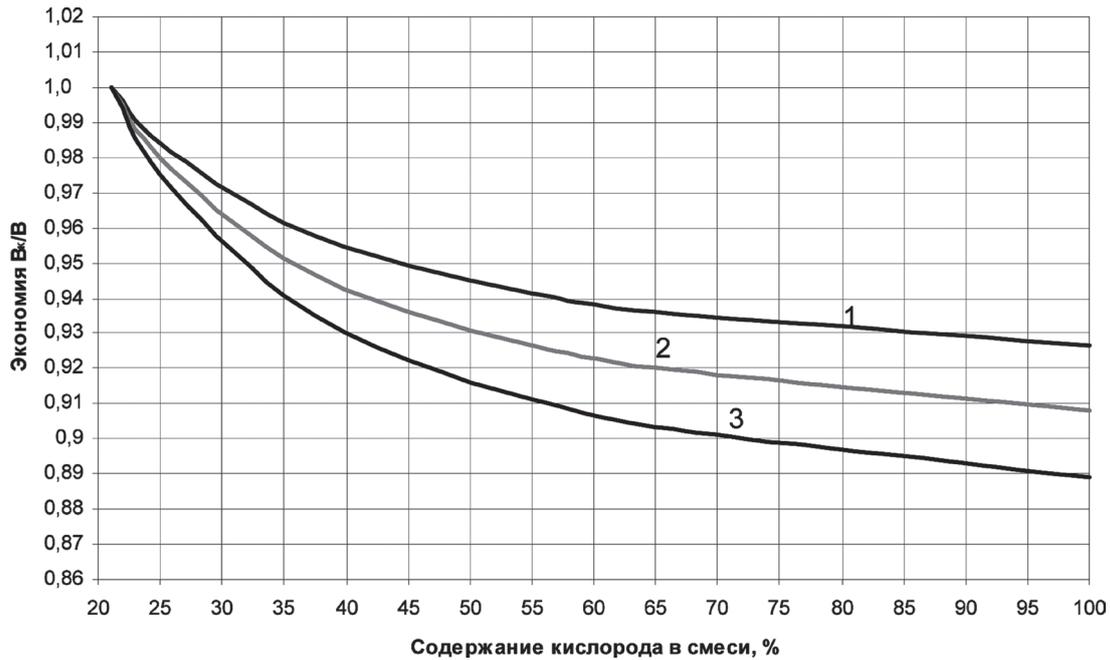


Рис. 1. Зависимость экономии природного газа от содержания кислорода в окислителе при температуре подогрева воздуха (окислителя) 480 °С и различных температурах дыма: 1 –  $T_{\text{дыма}} = 700$  °С; 2 – 750; 3 – 800 °С

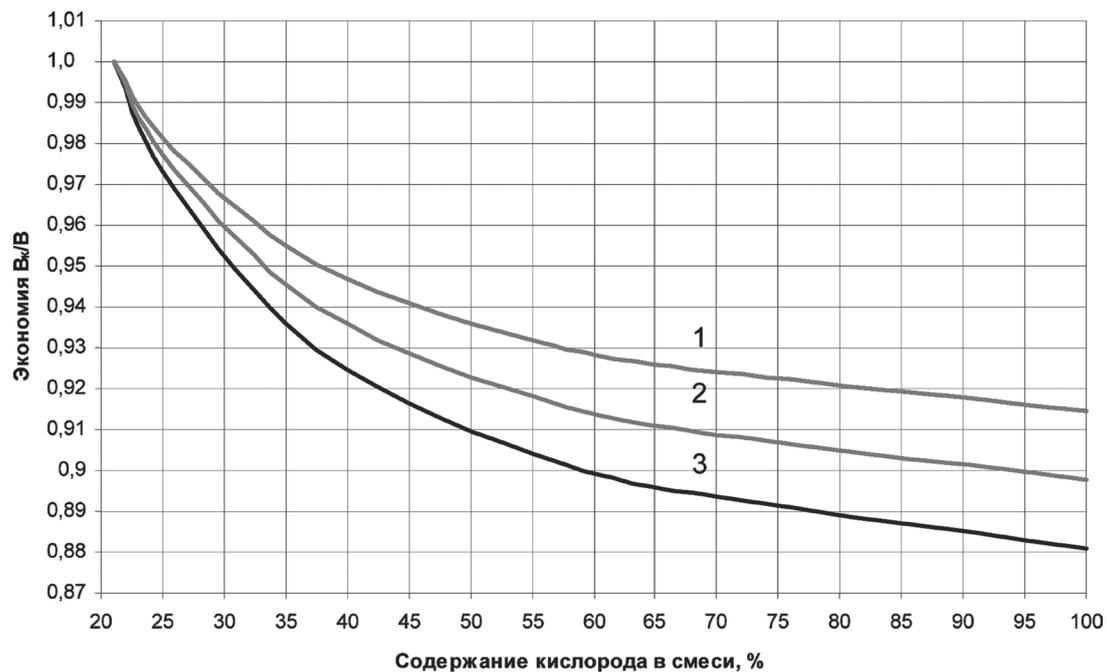


Рис. 2. Зависимость экономии природного газа от содержания кислорода в окислителе при температуре уходящих газов 750 °С и различных температурах подогрева окислителя: 1 – 400 °С; 2 – 450; 3 – 500 °С

пользование в одном агрегате технических масел и кислорода, то требуется выносить за пределы цеха воздухозаборник и смеситель, где к воздуху будет

добавляться кислород. Кроме того, при расчете экономического эффекта следует учесть и стоимость получения требуемого количества кислорода.

### Литература

1. Ревун М. П., Погорелов В. Н., Каюков Ю. Н. Оптимальный режим использования кислорода при нагреве металла // Изв. вузов. Черная металлургия. 1988. № 2. С. 125–127.
2. Применение кислорода в нагревательных колодцах с центральной горелкой / В. В. Зыряков, Г. Н. Мулько, Л. Е. Жданова и др. // Сталь. 1986. № 1. С. 97–98.
3. Опыт работы методической печи на воздухе, обогащенном кислородом / Г. А. Щапов, В. В. Макашов, В. М. Супрунюк и др. // Сталь. 1978. № 5. С. 469–471.
4. Расчеты нагревательных печей / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов и др. М.: Техника, 1969.