

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Энергосберегающие мероприятия, ведущие к снижению потребления топлива как за счет его прямой экономии (снижения удельных расходов), так и в результате структурных изменений в экономике, в общем случае (при прочих равных условиях) ведут к снижению вредных выбросов в окружающую среду [1-3].

1. Энергосбережение и вредные выбросы в окружающую среду

Энергосберегающие мероприятия, ведущие к прямой экономии топлива, т. е. за счет снижения его удельных расходов на единицу продукции, должны оцениваться с учетом их воздействия на экологические показатели производства. В частности, рекуперация теплоты отходящих газов теплотехнологических агрегатов за счет подогрева дутья с неизбежностью ведет к росту образования оксидов азота в единице дымовых газов [3]. Поэтому этот путь энергосбережения должен, по крайней мере, вести к такому снижению удельного расхода топлива, при котором массовый выход оксидов азота не должен превышать исходного. Если же при этом исходный массовый выход оксидов азота уже превышал допустимый уровень, то одновременно правомерна постановка вопроса о снижении объемов производства.

Структурные изменения в производстве, не ведущие к прямой экономии топлива, обеспечивают снижение вредных выбросов вследствие сокращения объемов потребляемого топлива.

Основной причиной, ведущей к повышенному выбросу вредных веществ, является то, что набор даже совершенных, с точки зрения удельных расходов топлива, теплотехнологических агрегатов не гарантирует соответствующего снижения суммарного удельного расхода топлива на конечный продукт. Это связано с многократными повторными теплотехническими процессами, в которых начальное теплосодержание материала в агрегате, как правило, существенно ниже его конечного теплосодержания в предыдущем агрегате [4], а также с повышенными расходами исходных материалов на конечную продукцию. Дополнительно следует также отметить, что конечный продукт любого производства используется при температуре окружающей среды. Следовательно, необходима организация таких топливной и тепловой схем технологического процесса, которые обеспечивали бы это условие.

Топливокислородные источники энергии также являются одним из радикальных средств снижения массовых выбросов вредных веществ [5,6].

Реализация этих принципов позволит снизить прямое потребление первичного топлива в теплотехнологических агрегатах не на 18÷20% (что является общепризнанным), а на 60÷70% и соответственно приведет (без дополнительных мероприятий по снижению образования вредных выбросов и их подавлению) к такому же снижению вредных выбросов в окружающую среду.

Рассмотрим этот вопрос с общих позиций.

Массовые годовые выбросы вредных веществ при сжигании органического топлива можно определить в общем виде как:

$$M = \sum_{q=1}^Q \left[\sum_{i=1}^n m_i \times v_i \times b_i \times P_i \right]_q = \sum_{q=1}^Q \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (m_i \times v_i \times \mathcal{E}_i^*) \right] \mathcal{E}_q^* \right\}_q, \quad (1)$$

г/год,

где:

$$\mathcal{E} = \sum_{q=1}^Q \left(\sum_{i=1}^n b_i \times P_i \right) \quad - \text{годовая энергопотребность страны в органическом топливе, кг/год,}$$

$$\mathcal{E}_q^* = \frac{\mathcal{E}_q}{\mathcal{E}} = \frac{\mathcal{E}_q}{\sum_{q=1}^Q \mathcal{E}_q} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i}{\sum_{q=1}^Q \left(\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i \right)_q} = \frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_i^* \sum_{q=1}^Q \left(\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i \right)_q}.$$

АЛБУЛ Величин Павлович - кандидат технических наук, главный научный сотрудник ОАО «Газпром промгаз», академик МАНЭБ.

Адрес: 117420, г. Москва, ул. Наметкина, 6
e-mail: V.Albul@promgaz.gazprom.ru

ДРОЗДОВ Сергей Викторович - ведущий инженер ОАО «Газпром промгаз».

Адрес: 117420, г. Москва, ул. Наметкина, 6
e-mail: S.Droz dov@promgaz.gazprom.ru

СТЕПАНОВА Татьяна Александровна - кандидат технических наук, профессор, доцент, заведующая кафедрой «Энергетика высокотемпературных технологий»,

первый проректор ФГБОУ ВПО «НИУ "МЭИ"», академик МАНЭБ.

Адрес: 111250, г. Москва, Е-250,
Красноказарменная улица, 14
e-mail: Stepanovata@trei.ru

ТУМАНОВСКИЙ Виктор Александрович - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий НИЛ кафедры «Энергетика высокотемпературных технологий» ФГБОУ ВПО «НИУ "МЭИ"», академик МАНЭБ.

Адрес: 111250, г. Москва, Е-250,
Красноказарменная улица, 14
e-mail: Tumanovskiyva@trei.ru

$$\mathcal{E}_i^* = \frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_q} = \frac{\mathcal{E}_i}{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i} \quad (2)$$

В уравнениях выше:

$m_i = (m_a + m_b + \dots)_i$ - сумма различных компонентов вредных выбросов в i -ом производстве, г/м³, продуктов сгорания, выбрасываемых в атмосферу¹;

v_i - удельный выход продуктов сгорания на единицу топлива, м³/кг;

b_i - удельный расход топлива на единицу i -й продукции, кг/т/ед. продукции;

P_i - годовой объем выпускаемой i -производством продукции, ед./год;

Q - количество топливопотребляющих отраслей (комплексов) в экономике страны;

n - номенклатура выпускаемой q -ой отрасли (комплексом) продукции;

$\mathcal{E}_q, \mathcal{E}_q^*$ - энергопотребность q -ой отрасли народного хозяйства и ее удельный вес в энергопотребности страны, соответственно;

$\mathcal{E}_i, \mathcal{E}_i^*$ - энергопотребность i -го производства и ее удельный вес в энергопотребности q -ой отрасли народного хозяйства, соответственно.

Массовые выбросы вредных веществ и энергопотребность в q -ой отрасли будут определяться зависимостями:

$$M_q = \mathcal{E}_q \sum_{i=1}^n (m_i \times v_i \times \mathcal{E}_i^*), \quad \mathcal{E}_q = \sum_{i=1}^n b_i \times P_i \quad (3)$$

Массовые выбросы и энергопотребность i -го производства будут определяться зависимостями:

$$M_i = \mathcal{E}_i \times m_i \times v_i, \quad \mathcal{E}_i = b_i \times P_i.$$

Очевидно, что отношение M/\mathcal{E} будет характеризовать собой средневзвешенную величину вредных выбросов в годовом разрезе в граммах на килограмм использованного топлива

$$\frac{M}{\mathcal{E}} = \sum_{q=1}^Q \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (m_i \times v_i \times \mathcal{E}_i^*) \right] \mathcal{E}_q^* \right\}_q \quad (4)$$

в масштабах страны (региона);

$$\left(\frac{M}{\mathcal{E}} \right)_q = \mathcal{E}_q^* \sum_{i=1}^n (m_i \times v_i \times \mathcal{E}_i^*) \quad (5)$$

в масштабах отрасли (комплекса);

$$\left(\frac{M}{\mathcal{E}} \right)_i = m_i \times v_i \quad (6)$$

в масштабах конкретного производства.

Величина M/\mathcal{E} оценивается в настоящее время в 35 г на 1 кг использованного топлива.

¹При сжигании твердых топлив количество образовавшейся золы также должно быть пересчитано на единицу продуктов сгорания.

²Более общий случай рассмотрен в [7].

Рассмотрим изменение массовых выбросов за некоторый период в результате изменения энергопотребности страны и средневзвешенной величины вредных выбросов при условии, что количество отраслей и номенклатура продукции неизменны.

$$\bar{M} = \frac{M''}{M'} = \frac{\mathcal{E}''}{\mathcal{E}'} \times \frac{\sum_{q=1}^Q \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (m_i'' \times v_i'' \times \mathcal{E}_i^{*''}) \right] \mathcal{E}_q^{*''} \right\}_q}{\sum_{q=1}^Q \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (m_i' \times v_i' \times \mathcal{E}_i^{*'}) \right] \mathcal{E}_q^{*'} \right\}_q} \quad (7)$$

В уравнении (7) индекс «'» означает начало периода, индекс «''» - конец периода.

Очевидно, что массовые выбросы вредных веществ при $\frac{M''}{M'} > 1,0$ - возрастают,

$$\frac{M''}{M'} < 1,0 \quad - \text{снижаются,}$$

$$\frac{M''}{M'} = 1,0 \quad - \text{остаются на прежнем уровне.}$$

Изменение массовых выбросов в масштабе q -ой отрасли (комплекса):

$$\bar{M}_q = \left(\frac{M''}{M'} \right)_q = \frac{\sum_{i=1}^n b_i'' P_i''}{\sum_{i=1}^n b_i' P_i'} \times \frac{\sum_{i=1}^n (m_i'' v_i'' \mathcal{E}_i^{*''})}{\sum_{i=1}^n (m_i' v_i' \mathcal{E}_i^{*'})} \quad (8)$$

и в масштабе i -го производства

$$\bar{M}_i = \left(\frac{M''}{M'} \right)_i = \frac{b_i'' \times P_i''}{b_i' \times P_i'} \times \frac{m_i'' \times v_i''}{m_i' \times v_i'} = \bar{b}_i \times \bar{P}_i \times \bar{m}_i \times \bar{v}_i \quad (9)$$

Из приведенных зависимостей следует, что при прочих равных условиях увеличение энергопотребности приводит к прямо пропорциональному росту массовых выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Величина $\mathcal{E}'' = \mathcal{E}' + \Delta\mathcal{E}$, где $\Delta\mathcal{E}$ - изменение энергопотребности страны за рассматриваемый период. Величина $\Delta\mathcal{E}$ может быть представлена как сумма

$$\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}_1 + \Delta\mathcal{E}_2 = (\Delta\mathcal{E}_1^c + \Delta\mathcal{E}_1^n) + (\Delta\mathcal{E}_2^c + \Delta\mathcal{E}_2^n), \quad (10)$$

где $\Delta\mathcal{E}_1$ - величина, связанная с ростом потребности в первичном органическом топливе как вследствие роста объемов производства ($\Delta\mathcal{E}_2^c$), так и вследствие возможного увеличения удельных расходов топлива ($\Delta\mathcal{E}_1^n$);

$-\Delta\mathcal{E}_2$ - величина, связанная с экономией первичного топлива как за счет изменения внутри- и межотраслевой структуры народного хозяйства ($\Delta\mathcal{E}_2^c$), так и за счет прямой экономии топлива в результате снижения удельных расходов топлива на единицу продукции в результате совершенствования техники и технологии ($\Delta\mathcal{E}_2^n$).

Очевидно, что энергосбережение является решающим фактором оздоровления окружающей среды. Очевидно также, что стабилизация энергопотребно-

сти (и, соответственно, добычи первичного органического топлива) является первостепенной как энергетической, так и экологической задачей.

Рассмотрим более подробно отдельно взятое производство. Относительное изменение энергопотребности и массовых выбросов вредных веществ конкретного производства будет определяться зависимостью:

$$\bar{\mathcal{E}}_i = \left(\frac{\mathcal{E}''}{\mathcal{E}'}\right)_i = 1 + \frac{(\Delta\mathcal{E}_1)_i + (\Delta\mathcal{E}_2)_i}{\mathcal{E}'_i} = 1 + \frac{(P_i'' - P_i')b_i' + (b_i'' - b_i')P_i''}{P_i'b_i'} = 1 + \left(\frac{P_i''}{P_i'} - 1\right) + \left(\frac{b_i''}{b_i'} - 1\right)\frac{P_i''}{P_i'} \quad (11)$$

$$\bar{M}_i = \left[1 + \left(\frac{P_i''}{P_i'} - 1\right) + \left(\frac{b_i''}{b_i'} - 1\right)\frac{P_i''}{P_i'}\right] \frac{m_i''}{m_i'} \times \frac{v_i''}{v_i'} \quad (12)$$

Для сохранения величины $\bar{M}=1$ при росте производства, например, на 20% $P_i''/P_i'=1,2$ необходимо при том же значении величины $m_i v_i$ обеспечить снижение удельного расхода топлива на 17% ($b_i''/b_i'=0,83$). Если же соответствующего снижения расхода топлива не будет обеспечено, необходимо снижение величины $\frac{m_i''}{m_i'} \times \frac{v_i''}{v_i'}$ на 17%, что при постоянных объемах дымовых газов $v_i''=v_i'$ потребует соответственно снижения концентрации вредных веществ в дымовых газах на 17%.

Если в технологическую линию конкретного производства входит несколько агрегатов, имеющих удельные расходы топлива b_{1i}, b_{2i} , производительности P_{1i}/P_{2i} , и соответствующие значения m_{1i}, m_{2i}, \dots , величины M_i и \mathcal{E}_i будут, очевидно, определяться как

$$M_i = \sum_{i=1}^k (m_i \times v_i \times b_i \times P_i)_i, \quad \mathcal{E}_i = \sum_{i=1}^k (b_i \times P_i)_i \quad (13)$$

где k - количество агрегатов, входящих в технологическую линию.

Величина $m_i \times v_i \times b_i = q_{\Sigma}$ представляет собой выброс в окружающую среду на единицу продукции и является обобщенным энергоэкологическим показателем производства и с этой точки зрения является более предпочтительным экологическим показателем в сравнении с показателем концентрации вредных выбросов в дымовых газах - m_i .

2. Влияние объемов производства на вредные выбросы в окружающую среду

Рассмотрим влияние спада производства на энергопотребность и выбросы в окружающую среду.

Если бы спад производства не сопровождался одновременным ростом удельных расходов топлива на производство единицы продукции, то есть $b_i'' = b_i'$, то относительная энергопотребность была бы прямо пропорциональна изменению производства $\mathcal{E}_i = p_i''/p_i'$, а массовые выбросы при прочих равных

условиях также были бы прямо пропорциональны спаду производства $M_i = \frac{P_i''}{P_i'}$. (14)

Спад производства в промышленности с 1990 по 1997 гг. составил 56% ($p''/p' = \bar{p} = 0,756$), а потребление первичного топлива снизилось только на 24,4% ($\mathcal{E}''/\mathcal{E}' = \bar{\mathcal{E}} = 0,756$). Снижение вредных выбросов составило соответственно $M''/M' = \bar{M} = 0,44$, то есть 24,4%.

Очевидно, что величина M/\mathcal{E} сохранилась на том же уровне - 35 г/кг топлива.

$$\frac{M''/M'}{\mathcal{E}''/\mathcal{E}'} = \bar{M}/\bar{\mathcal{E}} = 1. \quad (15)$$

Вместе с тем резко возросло потребление энергии на единицу промышленной продукции:

$\frac{\mathcal{E}''/\mathcal{E}'}{p''/p'} = \bar{\mathcal{E}}/\bar{p} = 1,72$, то есть на 72%, и экологическая нагрузка в расчете на единицу промышленной продукции

$$\frac{M''/\mathcal{E}'}{p''/p'} = \bar{M}/\bar{p} = 1,72, \quad \text{то есть на 72\%.$$

Изменение производительности энергопотребляющего агрегата при прочих равных условиях ведет к изменению удельного расхода топлива.

Изменение общего потребления энергии (топлива) агрегатом

$$\bar{\mathcal{E}}_i = \bar{b}_i \times \bar{p}_i = \frac{\bar{P}_i + \frac{Q_{oc}}{Q_{пол}}}{1 + \frac{Q_{oc}}{Q_{пол}}}, \quad (16)$$

где $\frac{Q_{oc}}{Q_{пол}}$ - отношение потерь тепла в окружающую среду к полезному теплу.

Для промышленных печей это отношение равно $0,8 \div 1,0$, для энергетических котлов $0,002 \div 0,01$, для отопительных котлов $0,02 \div 0,05$.

Для энергетических котлов, имеющих очень низкое значение $\frac{Q_{oc}}{Q_{пол}}$ (высокая тепловая герметичность),

величина $\bar{\mathcal{E}}_q \cong \bar{p}_q$, то есть спад производства на 23% ($p_q = 0,77$) практически пропорционально привел к спаду энергопотребления на те же 23% и при прочих равных условиях (без реализации мероприятий по снижению вредных выбросов) привел к снижению выбросов в окружающую среду на те же 23% ($\bar{\mathcal{E}}_q \cong \bar{p}_q \cong \bar{M}_q$).

Для промышленных печей черной металлургии, где спад производства составил 47% ($\bar{p}_q = 0,53$).

$$\bar{\mathcal{E}}_q = \frac{0,53 + 1}{1 + 1} = 0,765,$$

то есть спад производства на 47% привел к спаду энергопотребности на 23,5% и к снижению вредных выбросов на те же 23,5% ($\bar{M}_q = 0,765$). Однако, если для энергетических котлов параметры $\bar{M}_q/\bar{\mathcal{E}}_q$, $\bar{\mathcal{E}}_q/\bar{p}_q$ и \bar{M}_q/\bar{p}_q остались равными единице, то есть нагрузка на окружающую среду не возросла, то для промышленных печей черной металлургии $\bar{M}_q/\bar{\mathcal{E}}_q = 1$; $\bar{\mathcal{E}}_q/\bar{p}_q = 0,765/0,53 = 1,44$; $\bar{M}_q/\bar{p}_q = 0,765/0,53 = 1,44$,

то есть потребление первичного топлива на единицу продукции возросло на 44%, а экологическая нагрузка в расчете на единицу продукции также возросла на 44%.

3. Влияние регенерации теплоты отходящих газов на образование оксидов азота

Регенерация теплоты отходящих газов агрегатов - один из радикальных путей снижения удельного расхода топлива. Она может быть осуществлена как за счет нагрева дутьевого воздуха, так и за счет предварительного нагрева технологического материала или их совместного нагрева [3].

Вместе с тем подогрев воздуха, идущего на горение природного газа, ведет к росту образования оксидов азота в продуктах сгорания. С точки зрения экологии, обобщенным показателем экологической чистоты производства является не содержание оксидов азота в единице продуктов сгорания, а их массовый выброс в данной географической точке, который может быть определен следующими зависимостями:

$$M = [NO_x]_{v_{or}} \times b \times P = [NO_x]_{v_{or}} \times B = [NO_x]_V = [NO_x]_{\Sigma} P, \quad (17)$$

где: M - массовый выброс оксидов азота;
 v_{or} - удельный выход продуктов сгорания, м³/кг (м³/М);
 b - удельный расход топлива на единицу продукции, кг/т (м³/т);

P - производительность агрегата по конечной продукции, т/ч;

B - расход топлива, кг/ч (м³/ч);

V - выход продуктов сгорания, м³/ч.

Величина $[NO_x]_{v_{or}} \times b = [NO_x]_{\Sigma}$ представляет собой выход оксидов азота на единицу продукции, мг/т. Его удобно представить в относительном виде, приняв в качестве базовых значения параметров, соответствующие работе агрегата при отсутствии регенерации теплоты отходящих газов и содержании кислорода в дутье 21% (воздушное дутье)³:

$$\bar{M} = \frac{M}{M_0} = [NO_x]_{v_{or}} \times \bar{b} \times \bar{P} = [NO_x]_{v_{or}} \times \bar{B} = [NO_x]_V = [NO_x]_{\Sigma} \bar{P} \quad (18)$$

Подогрев воздуха ведет к повышению температуры горения топлива и содержания оксидов азота в единице продуктов сгорания, которое может быть определено зависимостью [8]:

$$[NO_x] = 0,091 + 0,153 \times 10^{-3} t_B + 0,225 \times 10^{-6} t_B^2, \quad (19)$$

или в относительном виде:

$$[\bar{NO}_x] = 1 + 3,435 \left(\frac{t_B}{t_{max}} \right) + 10,320 \left(\frac{t_B}{t_{max}} \right)^2, \quad (20)$$

где: t_B - температура подогрева воздуха, °С;
 t_{max} - максимальная температура горения топлива, °С.

Одновременно подогрев воздуха ведет к снижению удельного расхода топлива в зависимости от степени регенерации теплоты отходящих газов⁴:

$$\bar{b} = \frac{b}{b^0} = \frac{1 - \frac{v_{or}^0 \times C_{or}^0 \times t_{or}^0}{Q_n^p}}{1 - \frac{v_{or} \times C_{or} \times t_{or}}{Q_n^p} \times (1 - \beta)} \approx \frac{1 - \frac{t_{or}}{t_{max}}}{1 - \frac{t_{or}}{t_{кал}} \times (1 - \beta)},$$

где: $v_{or}^0 = 1 + 9,524\alpha'$ - удельный выход продуктов сгорания в базовом варианте⁵;

C_{or} - теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(м³ °С);

α - коэффициент избытка дутья;

$t_{кал}$ - калориметрическая температура горения топлива;

C_T^0 - удельный выход продуктов сгорания;

$[O_2]$ - объемная доля кислорода в дутье, %;

β - коэффициент регенерации теплоты отходящих газов.

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 = \frac{v_B \times C_B \times t_B}{v_{or} \times C_{or} \times t_{or}} + \frac{q_{MN}/q_{MK}}{1 - q_{MN}/q_{MK}} \times \quad (21)$$

$$\times \left(\frac{Q_n^p}{v_{or} \times C_{or} \times t_{or}} + \frac{v_B \times C_B \times t_B}{v_{or} \times C_{or} \times t_{or}} - 1 \right),$$

где: $v_B = 2\alpha(100/[O_2])$ - удельный расход воздуха на горение;

C_B - теплоемкость воздуха, кДж/(м³ °С);

q_{MN} и q_{MK} - начальное и конечное теплосодержание материала, кДж/кг.

Коэффициент β_1 характеризует степень регенерации теплоты отходящих газов за счет подогрева воздуха, а β_2 - за счет предварительного нагрева материала до теплосодержания q_{MN} . Предварительный нагрев материала не ведет к росту температуры горения и, следовательно, к росту образования оксидов азота. Поэтому с экологической точки зрения этот путь регенерации теплоты отходящих газов предпочтительнее.

Для печных агрегатов, где по технологии требуется температурный уровень, превышающий достигаемый при сжигании топлива в холодном воздухе, например, туннельные печи для высокотемпера-

³Выбор базовых значений параметров (базовой точки) носит произвольный характер. Здесь и далее индекс «б» означает базовые значения параметра.

⁴Знак приближения означает допущение постоянства теплоемкости продуктов сгорания от температуры и значения α , близких к 1.

⁵Здесь и далее все расчеты даны для природного газа, на 100% состоящего из метана ($t_{max} = 2043^\circ\text{C}$). Нет сложностей и для определения v_{or} при любом составе природного газа.

Относительный выход оксидов азота

Показатели	Удельный расход топлива \bar{b}					
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Температура подогрева воздуха $t_B, ^\circ\text{C}$	0	68,6	153,0	263,1	410,4	613,0
$[\overline{NO_x}]_\Sigma$	1,0	1,012	1,049	1,126	1,260	1,480
Температура предварительного подогрева материала $t_{MH}, ^\circ\text{C}$	0	120	240	360	480	600
$[\overline{NO_x}]_\Sigma$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5

турного обжига огнеупоров, подогрев воздуха необходим. В таких агрегатах следует использовать известные методы снижения образования оксидов азота за счет рециркуляции продуктов горения, многостадийного сжигания топлива и других методов, включая и запечные устройства очистки дымовых газов от оксидов азота перед выбросом их в атмосферу.

Выход продуктов сгорания зависит от степени обогащения дутья кислородом и коэффициента α и в относительном виде:

$$\bar{v}_{Or} = \frac{1 + 2\alpha \frac{100}{O_2}}{1 + 9,524\alpha^6} \quad (22)$$

Очевидно, что с обогащением дутья кислородом величина v_{Or} будет снижаться, что приведет при прочих равных условиях к снижению величины \bar{M} . Это направление развития топливосжигающей техники и систем отопления имеет принципиальное значение с точки зрения экономии топлива, экологии и конструкции агрегата.

Таким образом, вышеприведенные зависимости охватывают всю гамму энергетических и экологических параметров работы печных агрегатов, влияющих на массовый выброс оксидов азота, включая объемы производства.

В таблице 1 приведены значения относительного выхода оксидов азота на единицу продукции в зависимости от регенерации теплоты отходящих газов за счет подогрева воздуха и подогрева материала при условии одинакового снижения удельного расхода топлива и постоянной производительности для высокотемпературного печного агрегата ($t_{Or}/t_{max} = 0,7$; $t_{Or} = 1430^\circ\text{C}$, конечная температура материала $t_{MK} = 1200^\circ\text{C}$).

Учитывая, что производительность агрегата принята постоянной ($\bar{P} = 1$), относительный выход оксидов азота на единицу продукции $[\overline{NO_x}]_\Sigma$ соответствует массовому относительному выбросу оксидов азота \bar{M} .

Из таблицы видно, что подогрев материала имеет несомненное экологическое преимущество перед подогревом воздуха. Например, подогрев воздуха до 410°C ведет к увеличению выбросов на 26%, а эквивалентный подогрев материала до 480°C снижает их на 40%.

Очевидно, что подогрев материала потребует конструктивных изменений печного агрегата и соответствующих капиталовложений, равно как и установка рекуператоров. Поэтому окончательный выбор способа регенерации теплоты отходящих газов должен быть сделан на основе экономических расчетов, учитывающих затраты на денитрификацию уходящих газов при подогреве воздуха.

Литература:

1. Албул В.П., Минскер И.Д. Энергосбережение и вредные выбросы в окружающую среду // Газовая промышленность. - Июнь 1998. - С. 49-50.
2. Албул В.П., Захаров В.П., Калинин М.С. Энергосбережение как радикальный путь снижения вредных выбросов при сжигании органического топлива // Энергетика и электрификация. - 1991. - № 4. - С. 21-23.
3. Албул В.П. Влияние регенерации теплоты отходящих газов на образование оксидов азота // Газовая промышленность. - 1990. - № 12. - С. 41-42.
4. Албул В.П. О резервах экономии газа // Газовая промышленность. - 1988. - № 6. - С. 24-25.
5. Албул В.П., Ипполитов В.А. Газокислород-

- ные источники энергии как фактор экономии газа // Газовая промышленность. - 1992. - № 6. - С. 24-27.
6. Албул В.П., Гайнуллин Ф.Г., Ипполитов В.А., Розов В.Н. Топливо-кислородные системы отопления / Сер. Использование газа в народном хозяйстве. - М.: ИРЦ Газпром, 1993. - 61 с.
7. Албул В.П., Глушков В.П., Захаров В.П. Определение перспективной энергопотребности народного хозяйства // Газовая промышленность. - 1990. - № 11. - С. 54-58.
8. Медиокритский Е.Л., Зинченко А.А. Снижение вредных выбросов при сжигании природного газа и мазута в промышленных печах / Обзор информ. Сер. Использование газа в народном хозяйстве, вып. 10. - М.: ВНИИЭГазпром, 1985. - 42 с.