

УДК 669.162.231

Грес Л.П. – д-р техн. наук, проф., НМетАУ

Миленина А.Е. – мл. науч. сотр., НМетАУ

Щурова Н.И. – науч. сотр., НМетАУ

Карпенко С.А. – председатель правления концерна «Союзэнерго»

Науменко А.А. – технический директор концерна «Союзэнерго»

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОЗМОЖНОСТИ ИСКЛЮЧЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ОТОПЛЕНИИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Рассмотрены вопросы использования теплоты отходящих дымовых газов для подогрева компонентов горения с целью исключения природного газа или значительного сокращения его доли в природно-доменной смеси при отоплении воздухонагревателей доменных печей. Изучено влияние влагосодержания доменного газа на необходимые для обеспечения температуры дымовых газов, входящих в насадку, доли природного газа в природнодоменной смеси. Выполнено сравнение параметров работы воздухонагревателя с использованием подогрева компонентов горения и с использованием природного газа на его отопление.

Введение

В современных высокотемпературных воздухонагревателях требуемая температура дымовых газов, входящих в насадку, обеспечивается при работе на смеси доменного газа с природным газом. Такой способ при прежнем уровне цен на энергоносители был экономически оправданным.

При отоплении воздухонагревателей доменных печей средняя температура продуктов сгорания составляет 250 – 280 °С при расходе 180 – 220 тыс. м³/час. Данный потенциал отходящих дымовых газов является достаточным для нагрева доменного газа и воздуха горения с целью сокращения доли или исключения природного газа из отопления воздухонагревателей.

С 1977 года за рубежом, в связи с дефицитностью и высокой ценой природного газа, используют теплоту отходящих дымовых газов воздухонагревателей для предварительного нагрева компонентов горения, идущих на отопление воздухонагревателей. Это позволяет в зависимости от теплоты сгорания доменного газа поддерживать темпе-

ратуру дутья 1200 – 1250 °С без добавки природного газа к доменному либо снижать количество подмешиваемого природного газа.

Состояние вопроса

Для подогрева компонентов горения за рубежом [1] используют различные способы утилизации отходящей теплоты: регенеративные, рекуперативные и комбинированные. Установка теплообменников за воздухонагревателями способствует повышению их КПД на 4 – 5 %. Подогрев компонентов горения обеспечивает возможность исключения природного газа из отопления воздухонагревателей или значительному сокращению его доли в природнодоменной смеси при сохранении калориметрической температуры горения и, соответственно, температуры горячего дутья, что приводит к снижению себестоимости производства чугуна. В ряде случаев возможно повышение калориметрической температуры горения, что приводит к повышению температуры горячего дутья, снижению удельного расхода кокса и увеличению производительности доменной печи. Повышение температуры дутья на 100 °С снижает удельный расход кокса, а также увеличивает производительность доменной печи на 2,8 %.

В связи с небольшим тепловым потенциалом уходящих продуктов сгорания и значительными расходами теплоносителей: дыма 47 – 61 м³/с (170 – 220 тыс. м³/час), доменного газа 28 – 42 м³/с (100 – 150 тыс. м³/час), воздуха горения 22 – 33 м³/с (80 – 120 тыс. м³/час) использование традиционных рекуператоров «газ – газ» (трубчатых и пластинчатых) затруднено из-за их значительных габаритов и отсутствия свободных площадей на существующих блоках воздухонагревателей. Предпочтительней использование системы теплообменников с промежуточным жидким теплоносителем. Данная система обеспечивает лучшую теплопередачу и более высокую степень использования теплоты по сравнению с рекуператорами «газ – газ», обеспечивает возможность оптимального регулирования теплового потока и его распределения по отдельным потребителям. Однако стоимость данной системы выше и при эксплуатации она сложнее.

В конце 2004 г. на доменной печи № 2 ОАО «Запорожсталь» впервые в Украине была введена в работу система утилизации теплоты отходящих дымовых газов. Это позволило при температуре под куполом воздухонагревателей 1350 °С исключить природный газ на обогащение доменного и обеспечить температуру дутья 1200 °С. Система утилизации теплоты состоит из двух гладкотрубных рекуперативных теплообменников типа «газ – газ» с перекрестно – противоточной схемой движения теплоносителей для подогрева воздуха горения и доменного газа до температур 170 – 180 °С.

В 2007 году на доменной печи № 5 ОАО «Енакиевский металлургический завод» была введена в строй аналогичная система утилизации теплоты, рассчитанная на получение температуры под куполом воздухонагревателей 1350 °С и температуры горячего дутья 1200 °С. На данном заводе планируется реконструкция доменной печи № 3 с установкой системы утилизации теплоты.

На доменной печи № 4 «Северсталь» (г. Череповец) эксплуатируется рекуперативная система утилизации теплоты.

На большинстве металлургических комбинатов в Украине и странах СНГ в настоящее время отсутствуют системы утилизации теплоты отходящих дымовых газов воздухонагревателей доменных печей. В связи с этим для достижения температуры под куполом 1300 – 1350 °С доменный газ обогащают природным газом в количестве 15 – 45 млн. м³/год на печь объемом 1513 – 2300 м³.

Результаты исследований.

Зависимость влагосодержания доменного газа от его температуры и состава

В настоящее время в связи с использованием оборотного цикла водоснабжения в системе очистки доменного газа, дефицитом воды из водоемов, неудовлетворительной работой градирен температура чистого доменного газа возросла до 40 – 60 °С. Доменный газ, поступающий на горение, имеет избыточное давление 5000 – 10000 Па. В связи с использованием мокрого способа очистки доменного газа, его влажность составляет 30 – 150 г/м³ и соответствует состоянию насыщения при конечных температуре и давлении. При расчетах температур подогрева компонентов горения необходимо проводить расчет влажности доменного газа с учетом его температуры, давления и состава.

Влагосодержание влажных газов в кг/кг определяют, пользуясь соотношением:

$$d = \frac{\mu_{\text{П}}}{\mu_{\text{Г}}} \cdot \frac{P_{\text{П}}}{P_{\text{Г}}} = \frac{\mu_{\text{П}}}{\mu_{\text{Г}}} \cdot \frac{P_{\text{П}}}{P - P_{\text{П}}}, \quad (1)$$

где P – давление влажного газа, $P_{\text{П}}$ и $P_{\text{Г}}$ – парциальные давления водяных паров и сухого газа, $\mu_{\text{П}}$ и $\mu_{\text{Г}}$ – молекулярные массы водяного пара и сухого газа. Давление влажного газа P согласно закону Дальтона определяется, как сумма давлений сухого газа и водяного пара. Молекулярную массу $\mu_{\text{Г}}$ вычисляли по его объемному составу.

В расчетах горения газообразного топлива используется влагосодержание f в г/м³ сухого газа [2]. Связь между d и f устанавливается зависимостью:

$$f = 1000 \cdot d \cdot \rho_0^{\text{сух}}, \quad (2)$$

где $\rho_0^{\text{сух}}$ – плотность сухого газа при нормальных условиях.

В случае, когда влажный газ является ненасыщенным (воздух горения), парциальное давление водяных паров определяли согласно уравнению:

$$P_{\text{П}} = 0,01 \cdot P_{\text{С}} \cdot \varphi, \quad (3)$$

где φ – относительная влажность влажного газа, %, $P_{\text{С}}$ – давление насыщенного пара при температуре влажного газа.

Если влажный газ является насыщенным (доменный газ после мокрой газоочистки), парциальное давление водяных паров $P_{\text{П}}$ равно давлению насыщенного пара $P_{\text{С}}$ при температуре влажного газа:

$$P_{\text{П}} = P_{\text{С}}. \quad (4)$$

Давление насыщения водяных паров $P_{\text{С}}$ определяли согласно формуле Антуана с уточненными коэффициентами для диапазона температур $-20 \text{ }^{\circ}\text{C} - +35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].

На основе усовершенствованной методики расчета горения топлива составлена программа расчета горения топлива, включающая блок вычисления влагосодержания доменного газа по его составу, температуре и давлению и воздуха горения по его температуре, относительной влажности и давлению.

Выполнены расчеты по исследованию зависимости влагосодержания доменного газа от его температуры, давления и состава. На рис. 1 приведена зависимость влагосодержания доменного газа следующего объемного состава $\text{CO}_2 = 17,7 \%$, $\text{CO} = 22,4 \%$, $\text{H}_2 = 6,3 \%$, $\text{N}_2 = 53,6 \%$ от его температуры и давления.

Так, при изменении температуры доменного газа с 30 до $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении доменного газа 107638 Па (избыточное давление 8996 Па) влагосодержание возрастает с $30,05 \text{ г/м}^3$ до $151,37 \text{ г/м}^3$, то есть в $5,04$ раза. При увеличении давления доменного газа с 100972 Па (избыточное давление 2330 Па) до 120971 Па (избыточное давление 8996 Па) при температуре доменного газа $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ влагосодержание уменьшается с $32,14 \text{ г/м}^3$ до $30,05 \text{ г/м}^3$, при температуре доменного газа $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ влагосодержание уменьшается с $95,61 \text{ г/м}^3$ до $88,87 \text{ г/м}^3$, что составляет 7% в обоих случаях. Таким образом, температура доменного газа оказывает сильное влияние на величину его влагосодержания. Влияние изменения давления доменного газа в рабочем диапазоне при расчетах можно не учитывать.

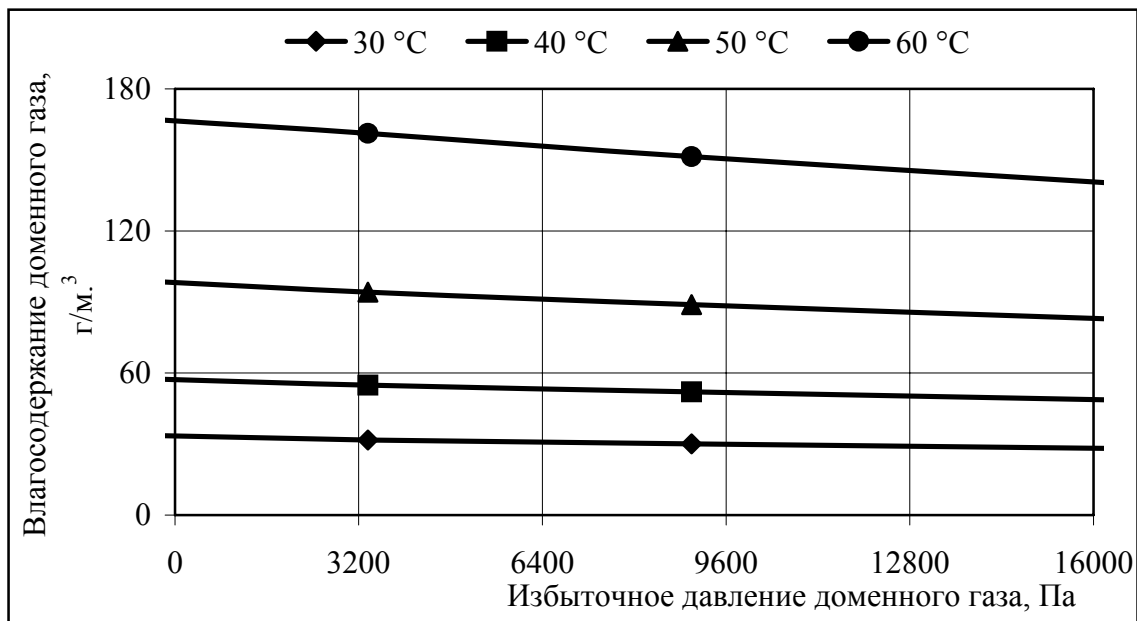


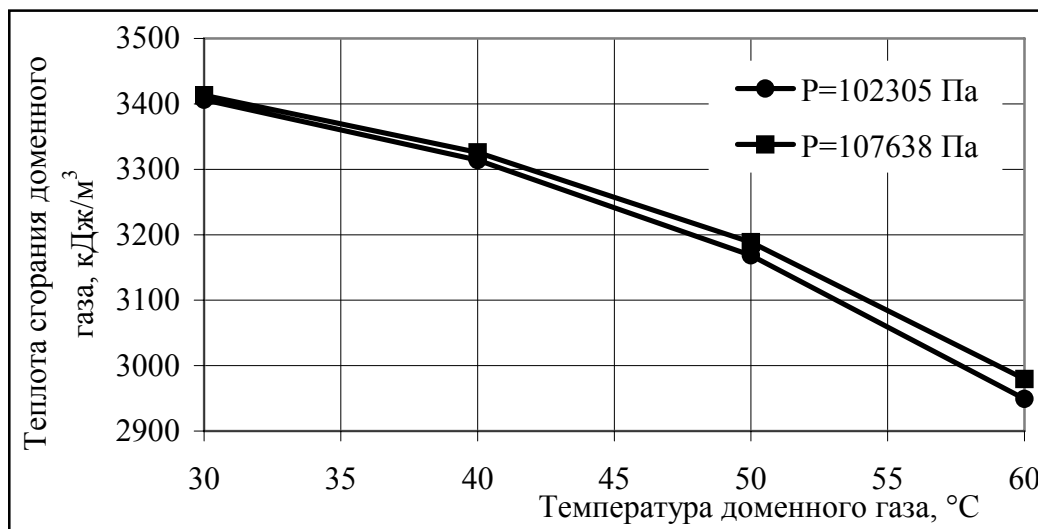
Рис. 1. Зависимость влагосодержания доменного газа от его температуры и давления

В реальных условиях состав доменного газа не является стабильным. Выполнены расчеты по изучению зависимости влагосодержания доменного газа от его состава для диапазона изменения температуры доменного газа 30 – 60 °С. Содержание горючих компонентов изменялось в пределах: водород 3,3 – 7,3 %, оксид углерода СО 21,4 – 23,4 %. В указанном диапазоне изменения состава максимальное изменение влагосодержания доменного газа составило 4,2 % для температуры доменного газа 60 °С.

Зависимость теплоты сгорания доменного газа от его влагосодержания

Содержание влаги в топливе понижает его теплоту сгорания вследствие уменьшения содержания горючих компонентов топлива и увеличения расхода теплоты на испарение воды. Так как температура и давление доменного газа влияют на величину его влагосодержания и, как следствие, на величину теплоты сгорания, были выполнены расчеты по изучению влияния изменения температуры и давления доменного газа на величину его теплоты сгорания. На рис. 2 представлена зависимость теплоты сгорания доменного газа объемного состава, %: СО₂ = 17,7, СО = 22,4, Н₂ = 6,3, N₂ = 53,6 от его температуры (влагосодержания) и давления. Получено, что для давления доменного газа 107638 Па (избыточное давление 8996 Па) при изменении температуры доменного газа с 30 °С до 60 °С теплота сгорания доменного

газа уменьшается с $3413,23 \text{ кДж/м}^3$ до $2979,62 \text{ кДж/м}^3$, то есть на 13 %. При уменьшении давления доменного газа с 107638 Па (избыточное давление 8996 Па) до 102305 Па (избыточное давление 3663 Па) (на 5,2 %) максимальное увеличение теплоты сгорания доменного газа составляет 1 % для температуры доменного газа $60 \text{ }^\circ\text{C}$.



*Рис. 2. Зависимость теплоты сгорания доменного газа состава 1 (теплота сгорания сухого газа 3541 кДж/м^3) от его температуры (влажностердержания) и давления.
 $P = 107638 \text{ Па}$ (избыточное давление 8996 Па),
 $P = 102305 \text{ Па}$ (избыточное давление 3663 Па).*

Зависимость температур подогрева компонентов горения от температуры, давления и состава доменного газа

На рис. 3 и 4 представлены расчетные зависимости необходимых температур подогрева компонентов горения для летнего и зимнего периодов соответственно. Если принять температуру подогрева доменного газа $160 \text{ }^\circ\text{C}$ (ограничена стойкостью резинового уплотнения газового дросселя), то для достижения температуры под куполом воздухонагревателя $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ необходимо подогревать воздух горения зимой до $120 - 170 \text{ }^\circ\text{C}$, а летом – до $150 - 290 \text{ }^\circ\text{C}$, в зависимости от температуры холодного доменного газа. Видно, что значения необходимых температур подогрева доменного газа и воздуха горения зависят от температуры и влажности атмосферного воздуха.

Изучено влияние состава доменного газа на необходимые температуры подогрева компонентов горения. Получено, что изменение состава доменного газа оказывает заметное влияние на величину подогрева компонентов горения вследствие изменения теплоты сгорания топлива (особенно, если изменяются доли горючих компонентов H_2 и CO).

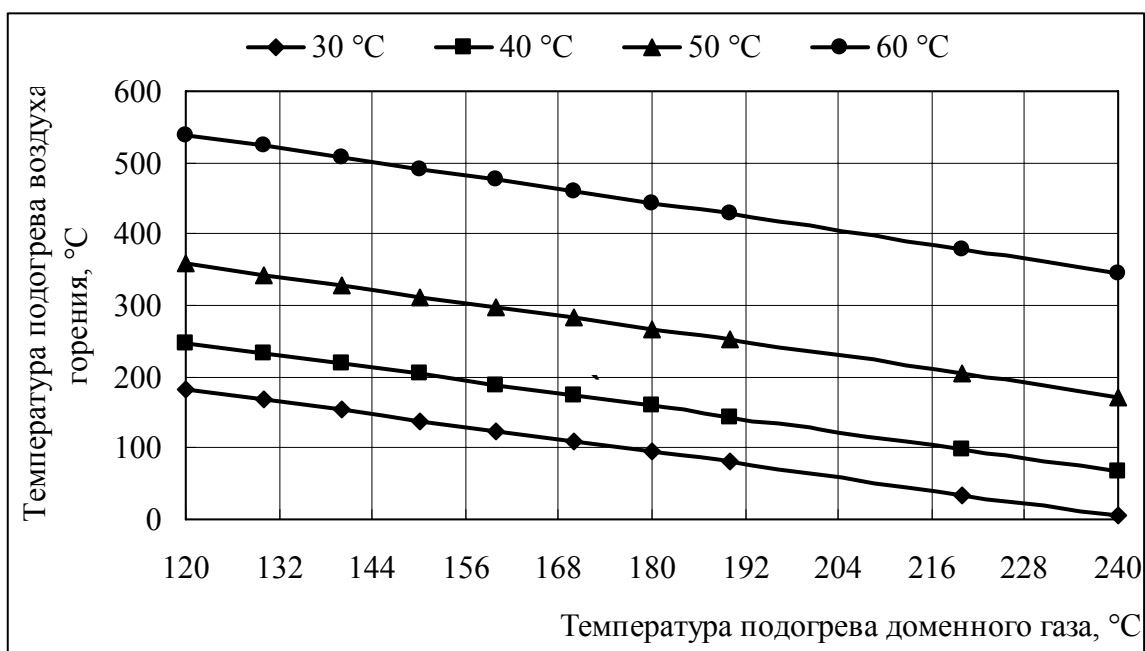


Рис. 3. Зависимость температур подогрева компонентов горения от температуры (влажности) доменного газа при температуре воздуха 33 °С, его относительной влажности 40 %

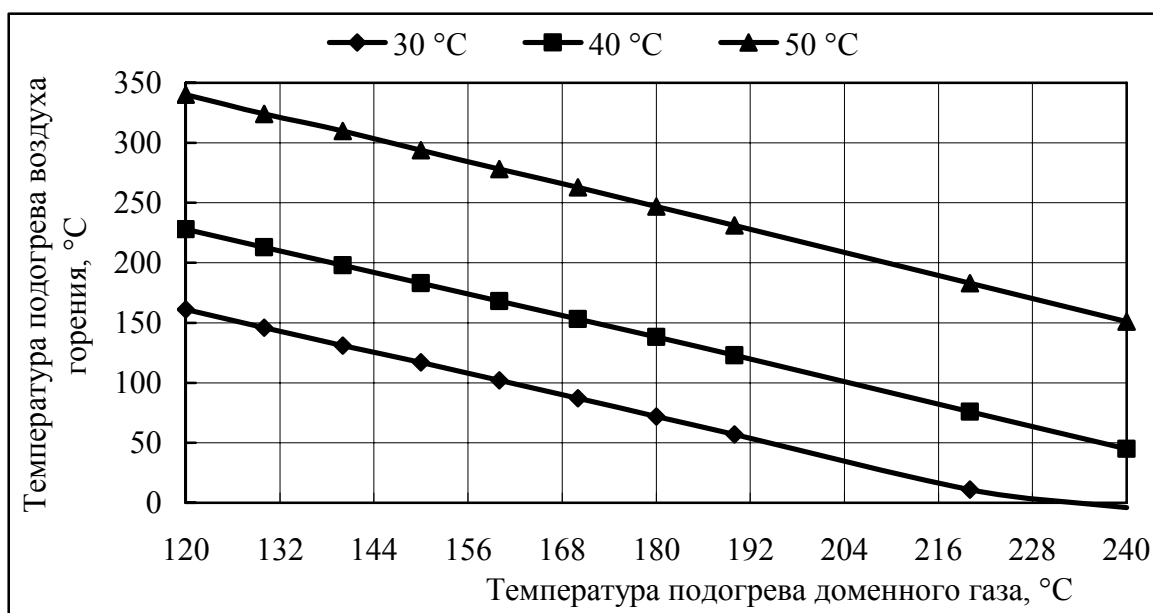


Рис. 4. Зависимость температуры подогрева компонентов горения от температуры (влажности) доменного газа при температуре воздуха 3 °С, его относительной влажности 80 %

Принимали: температура доменного газа 50 °С, температура воздуха 33 °С, его относительная влажность 40 %, атмосферное давление 101308 Па, избыточное давление доменного газа 4900 Па, температура под куполом воздухонагревателя 1350 °С. Уменьшение доли H_2 с 6,3 % до 3,3 % приводит к необходимости увеличения температуры подогрева воздуха горения с 297 °С до 515 °С при подогреве доменного газа до 160 °С, то есть в 1,73 раза. Увеличение доли CO с 22,4 % до 23,4 % при подогреве доменного газа до 160 °С приводит к уменьшению температуры подогрева воздуха горения с 297 °С до 221 °С, то есть на 25,6 %. Уменьшение доли CO с 22,4 % до 21,4 % при подогреве доменного газа до 160 °С приводит к увеличению температуры воздуха горения с 297 °С до 346 °С, то есть на 16,5 %.

Обычно в технических заданиях на проектирование, связанных с расчетами горения топлива, задается средний состав доменного газа. Однако изменение состава доменного газа, особенно его горючих компонентов, оказывает заметное влияние на необходимые температуры подогрева компонентов горения. Следовательно, необходимо задавать также границы изменения состава доменного газа, особенно его горючих компонентов.

Влияние влагосодержания доменного газа на долю природного газа в природнодоменной смеси

Выполнены расчеты зависимости доли природного газа в природнодоменной смеси от влагосодержания доменного газа в случае отсутствия подогрева компонентов горения. Принимали: коэффициент расхода воздуха 1,05, температура воздуха горения 5 °С, его относительная влажность 80 %, объемный состав сухого доменного газа $CO_2 = 18 \%$, $CO = 24,1 \%$, $H_2 = 5,7 \%$, $N_2 = 52,2 \%$, теплота сгорания сухого доменного газа 3693 кДж/м³, объемный состав природного газа $CH_4 = 94,5 \%$, $CO_2 = 0,24 \%$, $C_2H_6 = 2,09 \%$, $N_2 = 2,45 \%$, $C_4H_{10} = 0,71 \%$, $O_2 = 0,01 \%$, теплота сгорания природного газа 36004 кДж/м³. Расчеты выполнены для трех случаев калориметрической температуры горения 1400 °С, 1450 °С и 1500 °С. Влагосодержание доменного газа изменялось с 32,99 г/м³ (соответствующая температура доменного газа 30 °С) до 182,5 г/м³ (соответствующая температура доменного газа 60 °С). Результаты расчетов приведены на рис 5.

Получено, что при увеличении влагосодержания доменного газа с 32,99 г/м³ (соответствующая температура доменного газа 30 °С) до 182,5 г/м³ (соответствующая температура доменного газа 60 °С) для обеспечения калориметрической температуры горения $T_{КАЛ} = 1400 \text{ °С}$ необходимо увеличивать долю природного газа в природнодоменной

смеси с 1,12 % до 3,78 %; при этом теплота сгорания природнодоменной смеси увеличивается с 3909 кДж/м³ до 4249 кДж/м³. А для обеспечения калориметрической температуры горения $T_{\text{КАЛ}} = 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ необходимо увеличивать долю природного газа в природнодоменной смеси с 4,36 % до 7,24 %; при этом теплота сгорания природнодоменной смеси увеличивается с 4953 кДж/м³ до 5383 кДж/м³.

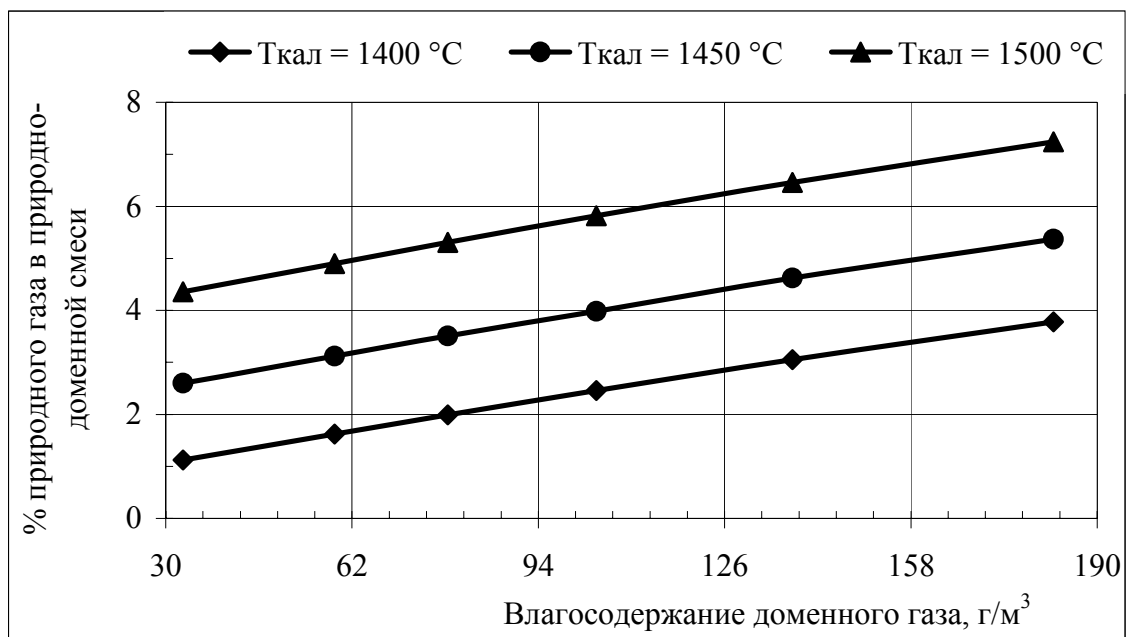


Рис. 5. Зависимость доли природного газа в природнодоменной смеси от влагосодержания (температуры) доменного газа

При влагосодержании доменного газа 32,99 г/м³ (соответствующая температура доменного газа 30 °C) увеличение калориметрической температуры горения с 1400 °C до 1500 °C приводит к росту доли природного газа в природнодоменной смеси с 1,12 % до 4,36 %, а при влагосодержании доменного газа 182,5 г/м³ (соответствующая температура доменного газа 60 °C) – к росту доли природного газа с 3,78 % до 7,24 %.

Сернокислотная коррозия, как фактор, ограничивающий степень утилизации теплоты отходящих дымовых газов

При определении минимальных температур дымовых газов после рекуператоров подогрева доменного газа и воздуха горения, которые определяют КПД рекуператоров, температуры подогрева компонентов горения, площади рекуператоров необходимо учитывать снижение температуры дымовых газов в результате их охлаждения в дымовой

трубе с тем, чтобы температура дымовых газов и температура внутренней стенки дымовой трубы оставались выше точки росы водяных паров с целью исключения конденсации водяных паров на поверхности дымовой трубы, и особенно в объеме дымовых газов.

Согласно проведенным расчетам точка росы водяных паров в дымовых газах составляет 45 – 60 °С. Дымовые газы могут содержать некоторое количество NO_x , SO , SO_2 , SO_3 , что повышает точку росы дымовых газов до 110 – 150 °С. По диаграмме фазового состояния системы $\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3$ [4] возможно определить температуру конденсации серной кислоты. Однако для этого требуются замеры количества SO_3 в дымовых газах.

При вхождении воздуха в трубчатку теплообменника при общей противоточной схеме движения дым – воздух температура стенки трубочек может быть ниже точки росы дымовых газов как водяного пара, так и промышленных кислот. При этом имеет место коррозия металлических поверхностей.

Если отводить дымовые газы выше 150 °С, то КПД теплообменников будут низкими, соответственно, будут низкими температуры подогрева газа и воздуха 140 – 160 °С. Вопросы сернокислотной коррозии в интервале температур до 150 °С для низкосернистых топлив изучены недостаточно. Данный вопрос подлежит уточнению.

Сравнение параметров работы воздухонагревателя с подогревом компонентов горения и без подогрева

Выполнено численное сравнение параметров работы воздухонагревателя с подогревом компонентов горения и без подогрева по методике [5]. В расчете приняты следующие начальные данные: продолжительность периодов дутья 3631 с, нагрева 6602 с, избыточное давление доменного газа – 600 мм. вод. ст., относительная влажность воздуха 80 %, атмосферное давление 748 мм. рт. ст., влагосодержание доменного газа 84,94 г/м³, состав доменного газа: $\text{CO}_2 = 18$, $\text{CO} = 23$, $\text{H}_2 = 7$, $\text{N}_2 = 52$, коэффициент расхода воздуха 1,1. В таблице 1 представлены результаты расчетов: вариант 1 – работа без подогрева компонентов горения с использованием природного газа; вариант 2 – работа с подогревом компонентов горения без природного газа.

Получено, что при работе с подогревом компонентов горения КИТ воздухонагревателя увеличивается с 83,5 % до 91,2 %, КПД увеличивается с 79 % до 86,3 %. Расход продуктов сгорания уменьшается с 21,273 м³/с до 21,047 м³/с. Тепловая мощность воздухонагревателя уменьшается с 48496,4 кВт до 44449,0 кВт.

Таблица 1

Сравнение параметров работы воздухонагревателя
с подогревом компонентов горения и без подогрева

| № п/п | Параметры работы | Вар. 1 | Вар. 2 |
|-------|--|---------|---------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. | Температура холодного дутья, °С | 127 | 127 |
| 2. | Температура горячего дутья, °С | 1290,6 | 1290,9 |
| 3. | Расход нагреваемого дутья, м ³ /с | 41,1503 | 41,1503 |
| 4. | Температура воздуха горения, °С | 10 | 154,2 |
| 5. | Температура газа, °С | 46 | 160 |
| 6. | Процент природного газа, % | 2,767 | 0 |
| 7. | Теплота сгорания сухого доменного газа, кДж/м ³ | 3693,1 | 3693,1 |
| 8. | Теплота сгорания влажного доменного газа, кДж/м ³ | 3340,5 | 3340,5 |
| 9. | Теплота сгорания природного газа, кДж/м ³ | 35788 | 0 |
| 10. | Теплота сгорания сухой смеси, кДж/м ³ | 4581,78 | 3693,1 |
| 11. | Теплота сгорания влажной смеси, кДж/м ³ | 4237,88 | 3340,5 |
| 12. | Калориметрическая температура горения, °С | 1395 | 1395 |
| 13. | Температура дымовых газов, входящих в насадку, °С | 1345 | 1345 |
| 14. | Действительный расход воздуха горения, м ³ /м ³ | 0,9002 | 0,6524 |
| 15. | Выход дыма на 1 м ³ топлива, м ³ /м ³ | 1,859 | 1,582 |
| 16. | Расход газа на отопление, м ³ /с | 11,443 | 13,304 |
| 17. | Расход воздуха горения, м ³ /с | 10,30 | 8,68 |
| 18. | Расход продуктов горения, м ³ /с | 21,273 | 21,047 |
| 19. | КПД, % | 79,0 | 86,3 |
| 20. | КИТ, % | 83,5 | 91,2 |
| 21. | Тепловая мощность, кВт | 48496,4 | 44449,0 |
| 22. | Средняя температура уходящего дыма, °С | 287,8 | 282,8 |
| 23. | Минимальная температура уходящего дыма, °С | 185 | 185 |
| 24. | Максимальная температура уходящего дыма, °С | 401 | 402 |

Выводы

1. За рубежом используют теплоту отходящих дымовых газов воздухонагревателей доменных печей для подогрева компонентов горения, что приводит к повышению КПД воздухонагревателей и позволяет снижать долю высококалорийного газа. Технология с проме-

жуточным теплоносителем находит широкое применение на существующих доменных печах, у которых ограниченные производственные площади исключают установку рекуператоров «газ – газ». Срок окупаемости системы с промежуточным теплоносителем составляет 1 – 2 года.

2. Влагосодержание доменного газа на большинстве металлургических предприятий отрасли значительное. Наличие влаги в доменном газе приводит к снижению температур горения и ухудшению стойкости камеры горения. Снижение влагосодержания доменного газа с 150 до 50 г/м³ вызывает увеличение теплоты сгорания доменного газа с 3000 до 3350 кДж/м³, что равнозначно экономии 4 млн. м³/год природного газа на блок воздухонагревателей.

3. Количество природного газа на одну доменную печь 15 – 22 млн. м³/год, которое экономится при подогреве компонентов горения значительно, и зависит от параметров доменного газа и воздуха горения. Необходимо рассчитывать температуры подогрева компонентов горения с целью исключения природного газа из отопления воздухонагревателей доменной печи для условий конкретного доменного цеха.

4. Необходимо дальнейшее изучение процессов сернокислотной коррозии для малосернистых топлив в диапазоне температур 110 – 150 °С и совершенствование методики определения точки росы серной и сернистой кислот.

5. При работе с подогревом компонентов горения КИТ воздухонагревателя увеличивается с 83,5 % до 91,2 %, КПД увеличивается с 79 % до 86,3 %. Расход продуктов сгорания уменьшается с 21,273 м³/с до 21,047 м³/с. Тепловая мощность воздухонагревателя уменьшается с 48496,4 кВт до 44449,0 кВт.

Список литературы

1. Ницкевич Е.А. Использование вторичных энергетических ресурсов при производстве чугуна за рубежом // Черные металлы, бюллетень ин-та «Черметинформация». – М., 1984. – Вып. 6. – С. 25 – 44.

2. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.И. Китаев, Б.Ф. Зобнин, В.Ф. Ратников и др. – М.: Металлургия, 1970. – 528 с.

3. Грес Л.П., Миленина А.Е., Щурова Н.И. Анализ зависимостей давления насыщения водяного пара от температуры при расчетах температур подогрева компонентов горения воздухонагревателей доменных печей // Металлургическая теплотехника: Сборник научных тру-

дов Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: «ПП Грек О.С.», 2007. – С. 122 – 129.

4. Дужих Ф.П., Осоловский В.П., Ладыгичев М.Г. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы. Справочное издание / Под ред. Дужих Ф.П. – М.: Теплотехник, 2004. – 464 с.

5. Грес Л.П., Свинолобов Н.П., Самойленко Т.В., Флейшман Ю.М. Методика поэлементного поверочного расчета доменных воздухонагревателей // Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: НМетАУ, 2002. – С. 27 – 33.

Рукопись поступила 01.05.2008 г.