

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 536.46:662.954

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВЛАГИ ТОПЛИВА НА ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ГАЗОВ

Воробьев Н.В.

Институт газа

Национальной академии наук Украины,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

С использованием методов равновесной термодинамики проведены исследования энергетических и экологических характеристик влияния увлажнения реагирующего потока на процессы сжигания смесей технологических газов (коксового и доменного) с воздушным окислителем. Установлена возможность значительного улучшения экологических характеристик процесса горения при увлажнении газо-воздушной смеси, что вызвано уменьшением образования оксидов азота NO_x . Однако, наличие влаги неизбежно приводит к снижению КПД использования топлива в энергетическом агрегате. Удельные выбросы на единицу полезной энергии рассчитываются с учетом КПД по термодинамическим данным.

Ключевые слова: водяной пар, двуокись углерода, КПД использования топлива, технологические газы, оксиды азота.

Постановка проблемы. В последнее время получают распространение системы и устройства, обеспечивающие сжигание различных видов топлива при подаче воды или водяного пара (процессы «wet combustion») в камеры сгорания (КС) двигателей, турбин, котлоагрегатов, а также в когенерационные установки. В частности, технологии увлажнения воздуха нашли место от использования психрометрического эффекта в цикле Майсоценко (M-cycle) [1, 2] до утилизации теплоты в системе «паровой насос» («WVP – water vapor pump») [3, 4]. Развитие научных основ «wet combustion» при соответствующей разработке систем сжигания и утилизации теплоты обусловлено эксплуатационными, экологическими и в отдельных случаях – энергетическими преимуществами использования увлажненного воздуха горения. С другой стороны имеется немало случаев получения увлажненных топлив, например, после очистки от пыли технологических газов или в результате газификации влажной биомассы.

До 2013–14 г. Украина занимала лидирующее положение в Европе по использованию технологических газов в экономике. Так, обработка данных Государственного комитета энергосбережения Украины позволяет сделать вывод, что доля биогаза в 2014 г. была в 443 раза меньше, чем технологических газов (доменного BFG, коксового COG, топлива газовых заводов и других утилизируемых газов), из которых коксовый и доменный газ составляют свыше 98% их общего расхода. В то же время доля производства технологических газов (derived gases, recovered gases) по отношению к природному газу составляет 13,3%.

Особенностью коксового и доменного технологических газов является их использование как топлива после «мокрой» очистки, с внесением в процесс дополнительной влаги топлива [5].

Важным достоинством сжигания увлажненной горючей смеси являются экологические преимущества, обусловленные существенным снижением выхода оксидов азота NO (NO_x) и возможностью определенного сокращения образования оксида углерода CO . В данной работе будем рассматривать только влияние влаги топлива на образование NO_x .

Задачей настоящей работы является определение общих тенденций влияния привнесенной влаги на энергетические и экологические аспекты сжигания увлажненных технологических газов.

Определение влагосодержания газовых топлив.

Когда давление насыщения для рассматриваемого газа (водяного пара) становится равным или превышает внешнее давление, испарение переходит в кипение. Если внешнее давление равно атмосферному, то точка пересечения кривой $p_{sat}(T)$ с ординатой $p = p_{bar}$ (по барометрическому давлению) соответствует температуре кипения T_b при атмосферном давлении. Следует указать, что практически T_b для H_2O превосходит точку кипения любого из компонентов газовых топлив, то-есть при «положительных» температурах ($T > 273 \text{ K}$) в условиях атмосферного давления каждый из этих компонентов (например, N_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , NH_3) при индивидуальном рассмотрении находится в газовой фазе. Тем более пребывание в газовой фазе каждой составляющей топлива справедливо, учитывая парциальные давления p_i отдельных из перечисленных компонент, каждое из которых меньше (для отдельных смесей – существенно) общего давления p_{Σ} смесевое горючего газа, в т.ч. увлажненного многокомпонентного.

Поскольку приведенные величины относятся к топливам со 100% влажностью, можно полагать, что указанные температуры соответствуют точкам росы технологических газов в условиях производства.

Таблица 1

Составы и основные характеристики сухих газовых топлив и воздуха горения на МК «Запорожсталь», % объемные

Компонент	Природный газ	Доменный газ	Коксовый газ	Воздух
Метан CH ₄	93,53	-	26,7	-
Этан C ₂ H ₆	3,51	-	-	-
Пропан C ₃ H ₈	0,82	-	-	-
Бутан C ₄ H ₁₀ (сумма изомеров)	0,20	-	-	-
Пентан C ₅ H ₁₂ (сумма изомеров)	0,05	-	-	-
Гексан C ₆₊ и выше	0,03	-	-	-
Непредельные углеводороды, C _n H _m	-	-	2,6	-
Водород H ₂	-	3,62	57,1	-
Окись углерода, CO	-	25,37	2,9	-
Диоксид углерода, CO ₂	0,56	19,45	4,2	-
Азот N ₂	1,29	51,56	6,5	79,06
Кислород O ₂	0,01	-	-	20,94

Об этом свидетельствуют зависимости $p_{sat,i}(T)$ на равновесных кривых испарения. По этой причине справедлив закон Дальтона для влажного газа:

$$\sum_{(i)} p_i + p_w = p_{\Sigma}; \quad (1)$$

где, $p_{gas,dry} = \sum_{(i)} p_i$. Для определения влагосодержания влажного газа справедливы следующие выражения:

$$p_w + p_{gas,dry} = p_{\Sigma} \quad (2)$$

$$\frac{p_w}{p_{gas,dry}} = \frac{p_w}{1 - p_w} = \frac{m_w \cdot M_{gas,dry}}{m_{gas,dry} \cdot M_w} = d_{w,gas} \frac{M_{gas,dry}}{M_w}; \quad (3)$$

$$\frac{p_w}{p_{gas,dry}} = \frac{n_w}{n_{gas,dry}} = \frac{D_w}{D_{gas}}; \quad (4)$$

$$d_{w,gas} = \frac{p_{sat,gas}(T_g)}{1 - p_{sat,gas}(T_g)} \cdot \frac{M_w}{M_{gas,dry}}; \quad (5)$$

где $p_w = p_{sat}(t_{gas})$.

Конечной точкой на равновесной кривой испарения является критическая точка, определяющая давление и температуру: для H₂O соответственно 22 МПа и 643,3 К. Эта точка определяет критическое состояние «жидкость – пар».

В число режимных параметров сжигания топлива входят температура, влажность окружающего воздуха, атмосферное давление и скорость ветра. Изменение этих условий как таковых, а также учет их влияния на параметры, определяющие концентрацию O₂, позволяют установить результирующее воздействие переменных во времени климатических условий на энергоэкологические характеристики процесса сжигания и сопутствующие образование NO_x и CO.

Оценка энергетической эффективности процесса сжигания топлива. Методика определения КПД использования топлива в идеальной печи в термических полных энтальпиях по аналогии с теоремой Карно [6] имеет вид:

$$\eta_f = \frac{I_m - I_{fl,ex}}{\Delta I_{g,T^*}} = \frac{i_{CH_4} m_{CH_4} + i_a m_a + i_{H_2O} m_{H_2O} - i_{fl,ex} m_g}{\Delta i_{g,T^*} \cdot m_{in}}; \quad (6)$$

здесь $I_m, I_{fl,ex}$ – полная энтальпия потока исходных компонентов горения на входе в топочную камеру и потока продуктов сгорания на выходе из нее – соответственно (с учетом latent heat – скрытых теплот физических и химических превращений) кВт; i – удельная (на 1 кг потока компонента или продуктов сгорания) полная энтальпия; кДж/кг; $\Delta i_{g,T^*}$ – удельная избыточная энтальпия единицы массы стехиометрических продуктов сгорания при теоретической температуре горения T^* по сравнению с таковой при стандартной температуре $T_0 = 298$ К:

$$\Delta I_{g,T^*} = I_{g,T^*} - I_{g,T_0} = Q_{T_0}, \quad (7)$$

где Q_{T_0} – тепловой эффект реакции горения потока исходных компонентов при стандартной температуре $T_0 = 298$ К.

В качестве начальных данных к расчету были использованы газы комбината «Запорожсталь», где при реконструкции цеха холодной прокатки была предусмотрена возможность работы термических печей на природном газе или технологических смешанных газах (коксовом и доменном). Составы газов МК «Запорожсталь» приведены в табл. 1.

В летний период предусматривается работа термических печей на коксо-доменной смеси, в зимний период на природно-доменной смеси. В соответствии с данными «Запорожстали» среднегодовая температура коксового газа 35° С (минимум 20° С, максимум 45° С), относительная влажность 100% при рабочей температуре, среднегодовая температура доменного газа 35° С (минимум 20° С, максимум 65° С), относительная влажность 100% при рабочей температуре, расчетная температура природного газа 10° С, газ сухой, среднегодовая температура смешанного газа 45° С (минимум 30° С, максимум 75° С), относительная влажность 100% при рабочей температуре.

На рис. 1 представлена зависимость КПД использования топлива в печи (в топочной камере) η_f в зависимости от температуры влажного (насыщенного) горючего газа – для смеси влажного 50%/50% коксо-доменного, а также 50% доменного и 50% природного газа.

Из рис. 1 видно, что при рассматриваемом уровне температур t_f использование природно-доменной смеси приводит к незначительному (~1%) понижению КПД с ростом t_f , обусловленному влагой в одной составляющей топлива (доменном газе). В свою очередь для коксодоменной смеси падение КПД использования топлива при таком росте t_f составляет ~6,4%. Во втором случае пар, насыщающий газ, содержится в обоих составляющих топлива. Более высокие значения η_f при использовании природно-доменной смеси, чем коксодоменной, несмотря на более низкую теоретическую температуру горения T_T связано с меньшим влагосодержанием первого из топлив. Из рис. 1 следует, что КПД η_f падает по мере роста температуры влажного газа t_f вследствие повышения абсолютного влагосодержания газа с ростом t_f при $\phi_f = const$. Более крутое снижение $\eta_f(t_f)$ для коксодоменной смеси также определяется более высоким абсолютным влагосодер-

жанием этого газа в условиях насыщения ($\phi_f = 100\%$), нарастающим с ростом температуры t_f .

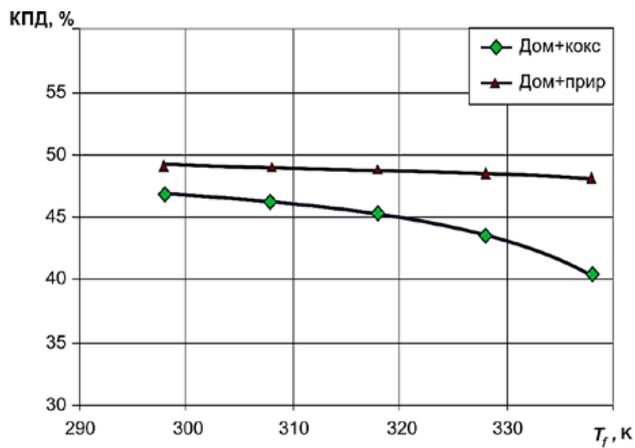


Рис. 1. Зависимость КПД использования топлива η_f от температуры t_f горючего газа при относительной влажности коксового и доменного газа $\phi_f = 100\%$.

Воздух – сухой $\phi_a = 0\%$, природный газ сухой $\phi_{NG} = 0\%$. Температура на выходе из топочной камеры (рабочая температура): $t_{fl} = 1000^\circ C$

Определение экологических характеристик сжигания для увлажненных топливных смесей. Для анализа влияния состава топливоокислительной смеси на образование вредных веществ: оксидов азота NO_x как основных токсичных газов и CO_2 как основного парникового газа был использован метод энергоэкологического анализа. Суть его состоит в определении удельного выхода NO_x и CO_2 по данным расчетов термодинамически равновесного состава и свойств продуктов сгорания, а также при учете КПД использования топлива η_f .

Для оценочного определения и сравнения выбросов оксидов азота C''_{NO_x} и углекислоты C''_{CO_2} , отнесенных к единице полезно воспринятой теплоты, использовались следующие расчетные зависимости, исходя из значений определяющей температуры:

$$C''_{CO_2}(T_{g,ex}) = \frac{10^{-2} D_{CO_2} M_{CO_2}}{(\Delta I_{g,T} - \Delta I_{g,ex}) M_{g,ex}}; \quad (8)$$

$$C''_{NO_x}(T_T) = \frac{10^{-2} (D_{NO} M_{NO} + D_{NO_2} M_{NO_2})}{(\Delta I_{g,T} - \Delta I_{g,ex}) M_{g,T}}, \quad (9)$$

C''_Y – удельный выход компонента $Y \equiv NO_x$ (NO, NO_2), CO_2 , отнесенный к единице полезной теплоты, кг/кДж; D_Y – объемная доля компонента Y (концентрация объемная, молярная), % об.; $\Delta I_{g,T}, \Delta I_{g,ex}$ – полная избыточная энтальпия 1 кг продуктов сгорания – при T_T и температуре уходящих продуктов сгорания $T_{g,ex}$, принимаемой равной технологической температуре – соответственно. Представительные температуры и молярные массы смеси: для CO_2 – при $T_{g,ex}$ К, для NO_x – T_T ; M_Y – молярная масса (для компонента Y и условная для продуктов сгорания (индекс «g»)).

На рис. 2 представлено изменение C''_{CO_2} и C''_{NO_x} в зависимости от температуры t_f газа увлажненного до насыщения в условиях очистки коксового и доменного газа. Видно, что увеличение абсолютного влагосодержания технологических газов с температурой увеличивает выбросы двуокиси углерода C''_{CO_2} и снижает C''_{NO_x} на единицу полезной тепловой энергии.

При этом, коксодоменный газ характеризуется большими выбросами C''_{NO_x} по сравнению с природно-доменной смесью, поскольку коксовый газ ($[H_2] \approx 57\%$ об.) имеет наибольшую теоретическую температуру горения, обуславливающую максимальную эмиссию оксидов азота (NO_x).

Выводы. В результате проведенных расчетных исследований установлено, что при использовании смесей влажных технологических газов КПД использования топлива η_f падает по мере роста температуры влажного газа t_f вследствие повышения абсолютного влагосодержания газа с ростом t_f при $\phi_f = const$. В тоже время, отмечается увеличение выбросов двуокиси углерода C''_{CO_2} и снижение C''_{NO_x} на единицу полезной тепловой энергии при увеличении абсолютного влагосодержания технологических газов с температурой.

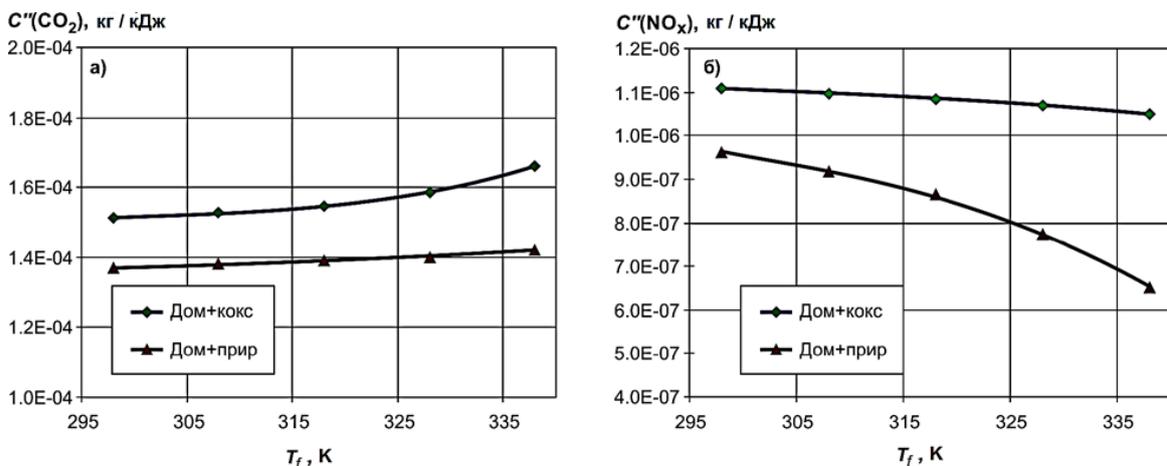


Рис. 2. Зависимость отнесенных к единице полезной теплоты выбросов углекислоты C''_{CO_2} (а) и выбросов оксидов азота C''_{NO_x} (б) от температуры t_f смешанного газа при относительной влажности $\phi_f = 100\%$. Температура на выходе из топочной камеры (рабочая температура): $t_{fl} = 1000^\circ C$.

Список литературы:

1. Gillan L., Maisotsenko V. Maisotsenko open cycle used for gas turbine power generation / L. Gillan, V. Maisotsenko // Proc. ASME Turbo Expo 2003 (June 16–19, 2003, Atlanta, USA). – P. 75–84.
2. Maisotsenko V. The Maisotsenko cycle for power generation, waste energy recovery, and water reclamation / V. Maisotsenko, L. Gillan, A. Kozlov // Proc. Clean Energy Supercluster Forum (October 25, 2010, Fort Collins, USA) – 41 p.
3. Guillet R. Vapor pump and condensing heater / R. Guillet // Gas Wärme Int. – 40, H. 6. 1991. – S. 248–252.
4. Guillet R. Wet way combustion: energy efficiency, environmental protection / R. Guillet // Elsevier, 2000, Paris. – 137 p.
5. Юдашкин М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии / М.Я. Юдашкин // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.
6. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей о диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди // Пер. с англ. Ю.А. Данилова и В.В. Белого, под ред. А.П. Агеева. – М.: Мир. – 2002. – 461 с.

Воробйов М.В.

Інститут газу
Національної академії наук України,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВОЛОГИ ПАЛИВА НА ЕНЕРГОЕКОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПАЛЮВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ГАЗІВ

Анотація

З використанням методів рівноважної термодинаміки проведено дослідження енергетичних та екологічних характеристик впливу вологи на процеси спалювання сумішей технологічних газів (кокового і доменного) з повітряним окислювачем. Встановлено можливість значного покращення екологічних характеристик процесу горіння при зволоженні газоповітряної суміші, що викликано зменшенням утворення оксидів азоту NO_x . Однак, наявність вологи неминуче призводить до зниження ККД використання палива в енергетичному агрегаті. Питомі викиди на одиницю корисної енергії розраховуються з урахуванням ККД по термодинамічним даним.

Ключові слова: водяна пара, двоокис вуглецю, ККД використання палива, технологічні гази, оксиди азоту.

Vorobyov M.V.

Gas Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine,
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

EVALUATION OF INFLUENCE TECHNOLOGICAL FUEL HUMIDITY ON ENERGY AND ECOLOGICAL COMBUSTION CHARACTERISTICS OF ALTERNATIVE GAS FUELS

Summary

With using the methods of equilibrium thermodynamics, the study of the energy and environmental characteristics of the influence of humidity on the combustion processes of technological gases mixtures (coke and blast furnace gases) with air oxidation was carried out. The possibility of significant improvement of the environmental characteristics of the combustion process during the humidification of the gas-air mixture caused by the reduction of NO_x formation of nitrogen oxides has been established. However, the presence of humidity inevitably leads decrease the efficiency of fuel using in the power plant. Specific emissions per unit of energy are calculated taking into account the efficiency of the thermodynamic data.

Keywords: water vapor, carbon dioxide, fuel using efficiency, technological gases, nitrogen oxides.