

ДИАГРАММЫ ЭНТАЛЬПИЙ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

М.Н. Никитин, А.И. Щелоков

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

В статье рассмотрены методики построения диаграмм энтальпий парогазовых смесей в отношении нормального кубического метра сжигаемого газа и килограмма получаемой смеси. Приведены диаграммы энтальпий для частного случая парогазовой смеси, построенные по предлагаемым методикам.

Ключевые слова: *теплоносители, парогазовые смеси, энтальпия, продукты сгорания.*

Требования к повышению энергоэффективности промышленного производства стимулируют исследования и внедрение новых энергоносителей, а также поиск новых областей применения существующих. Для расширения областей использования теплоносителей, как правило, требуется их дополнительное исследование, в том числе разработка методик построения диаграмм, позволяющих быстро и с достаточной степенью точности осуществлять теплотехнические расчеты теплоносителей.

В данной статье предлагается методика построения диаграмм энтальпий частного случая многокомпонентных теплоносителей – смеси продуктов полного сгорания природного газа и водяного пара (парогазовой смеси). Важным преимуществом парогазовых смесей перед водой и водяным паром в качестве теплоносителей является возможность достижения высоких температур при атмосферном давлении. По сравнению с продуктами сгорания и их смесями с воздухом парогазовые смеси обладают большим теплосодержанием при равных температурах. Кроме того, добавление водяного пара к продуктам сгорания позволяет осуществлять гибкое и оперативное регулирование температуры (и, следовательно, теплосодержания) изменением количества подмешиваемого пара. Более того, впрыск воды вместо пара не существенно снижает температуру получаемой парогазовой смеси, но позволяет исключить необходимость дополнительной выработки водяного пара. Все это делает парогазовые смеси идеальными теплоносителями для термовлажностной обработки материалов.

В основу предлагаемой методики положена существующая методика построения диаграмм для влажного воздуха, предложенная профессором МВТУ Л.К. Рамзиным в 1918 г. [1, стр. 168].

Основной задачей при построении диаграммы энтальпий является определение энтальпии среды во всем диапазоне влагосодержаний и температур. В расчете энтальпии заключается основное отличие предлагаемой методики ввиду отличия метода формирования парогазовой смеси от метода формирования водяного пара.

В рамках предлагаемой методики используются две базовые величины: килограмм сухих дымовых газов и нормальный кубический метр природного газа. В первом случае диаграмма энтальпий может быть использована для дальнейшего исследования характеристик парогазовых смесей, во втором случае – применима для прикладных расчетов.

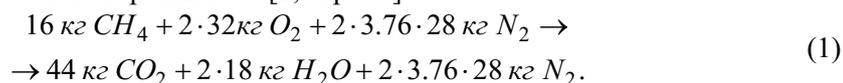
Для описания предлагаемой методики построения H-d-диаграмм для парогазовых смесей (ПГС) здесь будет использоваться следующий частный случай:

*Максим Николаевич Никитин – аспирант.
Анатолий Иванович Щелоков – д.т.н., профессор.*

- способ получения парогазовой смеси – впрыск воды (20 °С) в поток продуктов полного сгорания природного газа непосредственно после камеры сгорания;
- природный газ [2, стр. 61]:
 - газопровод «Уренгой – Ухта»;
 - содержание метана $\text{CH}_4 = 98.72\%$;
 - содержание этана $\text{C}_2\text{H}_6 = 0.12\%$;
 - содержание пропана $\text{C}_3\text{H}_8 = 0.01\%$;
 - содержание углекислого газа $\text{CO}_2 = 0.14\%$;
 - содержание азота $\text{N}_2 = 1.00\%$;
 - плотность газа $\rho_{\text{газа}} = 0.724 \text{ кг/м}^3 (0^\circ\text{C}, 1 \text{ ат})$;
 - плотность метана $\rho_{\text{CH}_4} = 0.717 \text{ кг/м}^3 (0^\circ\text{C}, 1 \text{ ат})$;
 - адиабатическая температура горения $T_{\text{ад}} = 2030 \text{ }^\circ\text{C}$.

h-d-диаграмма для парогазовой смеси на 1 кг сухих дымовых газов. Аналогично методике построение диаграммы влажного воздуха [1, стр. 168] сначала строится сетка из вертикальных прямых постоянных влагосодержаний ($d = \text{const}$) и косых постоянных энтальпий ($H = \text{const}$) под углом 45° к ним. Далее наносятся изотермы (прямые) по двум точкам с известными параметрами: влагосодержание (d), энтальпия (H) и температура (T).

Материальный баланс горения газа [2, стр. 39]:



В рассматриваемом частном случае в 1 м^3 природного газа содержится $0.9872 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$ (0.7078 кг CH_4). По материальному балансу горения природного газа (1): при сжигании 1 кг метана образуется $36/16 = 2.25 \text{ кг}$ водяного пара. Следовательно, при стехиометрическом сжигании 1 м^3 природного газа (0.7078 кг CH_4) образуется $2.25 \cdot 0.7078 = 1.59 \text{ кг}$ водяных паров и $1.9465 + 9.3147 = 11.2612 \text{ кг}$ сухих дымовых газов ($\text{CO}_2 + \text{N}_2$).

Так как в продуктах сгорания всегда содержится водяной пар (1.59 кг/м^3 газа), минимальное значение влагосодержания ПГС составит $1.59/11.2612 = 0.141 \text{ кг/кг}$ сух. ДГ.

Удельная энтальпия ПГС (кДж/кг ПГС) [1, стр. 166]:

$$h = (h_{\text{сух. ДГ}} + h_{\text{H}_2\text{O}} + (d - 0.141) \cdot h_{\text{пара}}) / (12.8512 + m_{\text{впр. воды}}). \quad (2)$$

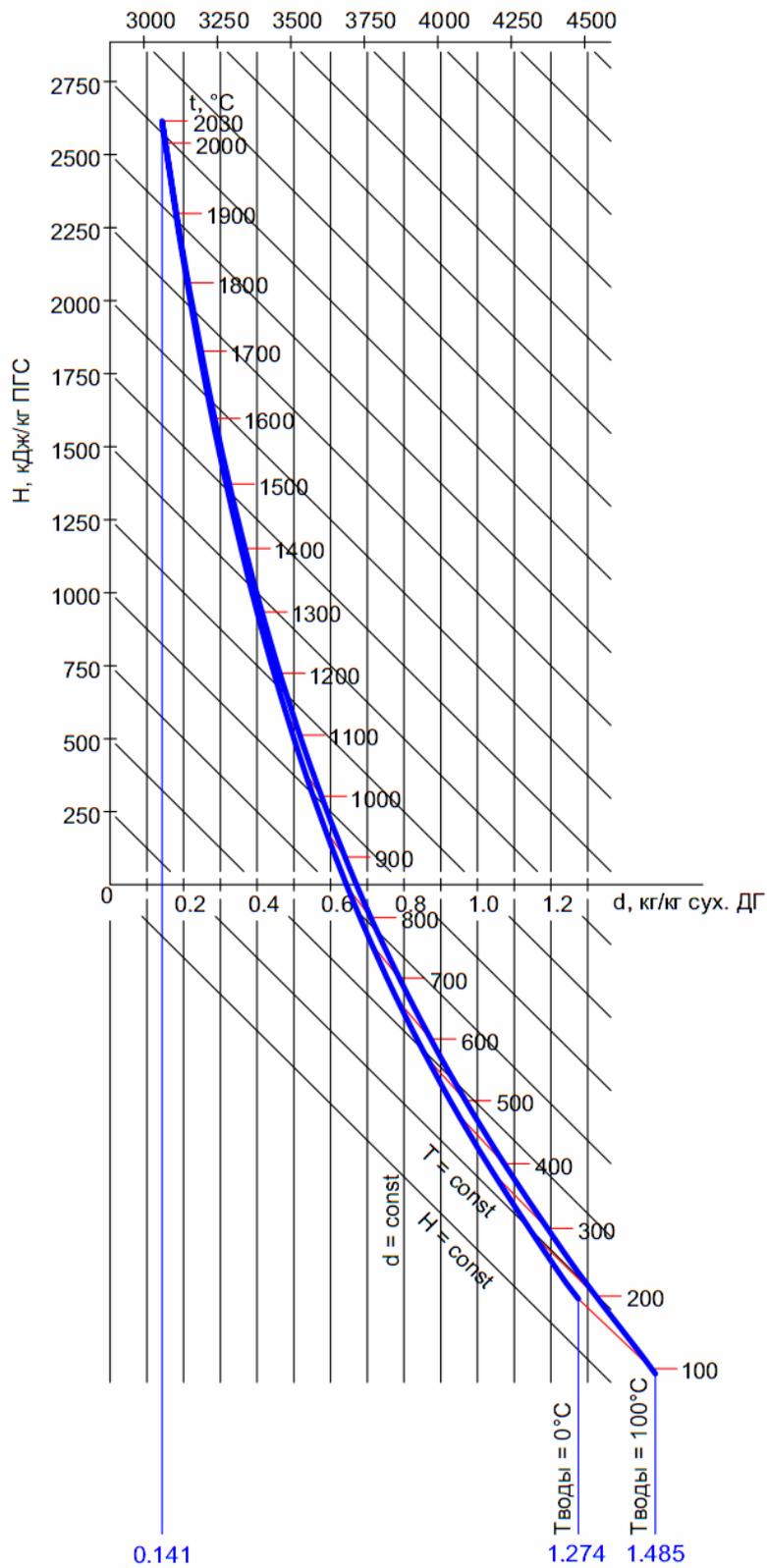
Здесь $h_{\text{сух. ДГ}}$ и $h_{\text{H}_2\text{O}}$ – энтальпии сухих дымовых газов и водяных паров соответственно, сумма которых составляет энтальпию продуктов сгорания природного газа (кДж/м³ газа); $h_{\text{пара}}$ – энтальпия водяных паров, образующихся при впрыске воды (кДж/кг); $m_{\text{впр. воды}}$ – масса впрыскиваемой в поток дымовых газов воды (кг/м³ газа). Безразмерный множитель $(d - 0.141)$ показывает наличие неснижаемого количества влагосодержания в рассматриваемом случае парогазовой смеси. Сумма в знаменателе отображает общую массу парогазовой смеси, получаемой при сжигании 1 м^3 газа.

Энтальпия сухих дымовых газов (кДж/м³ газа) [2, стр. 70-71]:

$$h_{\text{сух. ДГ}} = 0.99 \cdot (c_p \text{ CO}_2 \cdot T) + 7.46 \cdot (c_p \text{ N}_2 \cdot T). \quad (3)$$

Энтальпия водяного пара, содержащегося в дымовых газах (кДж/м³ газа) [2, стр. 70-71]:

$$h_{\text{H}_2\text{O}} = 2.13 \cdot c_p \text{ H}_2\text{O} \cdot T. \quad (4)$$



Р и с. 1. Диаграмма энтальпий парогазовой смеси на 1 кг сухих дымовых газов

Энтальпия водяного пара, образующегося при впрыске воды в поток дымовых газов (кДж/кг ПГС):

$$h_{пара} = c_{р\ воды} \cdot T_{нас} + r + (h_{H_2O\ T_{ПГС}} - h_{H_2O\ T_{нас}}). \quad (5)$$

Масса впрыскиваемой воды (кг/кг сух. ДГ):

$$m_{впр. воды} = (d - 0.141) \cdot 11.2612. \quad (6)$$

Максимальное влагосодержание d_{max} при впрыске воды определяется из баланса:

$$h_{ДГ\ 2030C} + (d - 0.141) \cdot h_{воды} = h_{сух. ДГ\ T_{ПГС}} + h_{H_2O\ T_{ПГС}} + (d - 0.141) \cdot h_{пара\ T_{ПГС}};$$

$$d_{max} = (h_{ДГ\ 2030C} - h_{сух. ДГ\ T_{ПГС}} - h_{H_2O\ T_{ПГС}}) / (h_{пара\ T_{ПГС}} - h_{воды}) + 0.141.$$

Энтальпия впрыскиваемой воды (кДж/кг):

$$h_{воды} = c_{р\ воды} \cdot T_{воды}. \quad (7)$$

Рассчитанные значения энтальпий позволяют построить диаграмму энтальпий парогазовой смеси. Следует отметить, что температура впрыскиваемой воды оказывает влияние на максимальное влагосодержание ПГС и, следовательно, ее теплосодержание. Поэтому имеет смысл указать диапазон температур (0÷100 °С) впрыскиваемой воды при построении диаграммы (рис. 2). Указание диапазона температур заключается в нанесении двух или более изотерм температур впрыскиваемой воды, которые в отличие от прямых изотерм ПГС будут кривыми. Точки в указанном диапазоне будут соответствовать реальному физическому состоянию теплоносителя, а вне его будут носить теоретический характер.

Н-d-диаграмма для парогазовой смеси на 1 нм³ природного газа. Отнесение основных термодинамических параметров парогазовых смесей к 1 кг сухих дымовых газов позволяет наглядно представить процесс генерации ПГС. Однако для оценки практической применимости данного теплоносителя в конкретном производстве такие зависимости мало подходят. Поэтому полезно представить полученные по указанному выше методу диаграммы в отношении к 1 нм³ природного газа, используемого для получения рассматриваемой ПГС.

Удельная энтальпия ПГС (кДж/кг ПГС) [1, стр. 166]:

$$h = h_{сух. ДГ} + h_{H_2O} + (d - 1.59) \cdot h_{пара}.$$

Здесь $h_{сух. ДГ}$ и h_{H_2O} – энтальпии сухих дымовых газов и водяных паров соответственно, сумма которых составляет энтальпию продуктов сгорания природного газа (кДж/нм³ газа); $h_{пара}$ – энтальпия водяных паров, образующихся при впрыске воды (кДж/кг). Множитель $(d - 1.59)$ показывает наличие неснижаемого количества влагосодержания в рассматриваемом случае парогазовой смеси.

Расчетные зависимости энтальпий (2) – (5), массы впрыскиваемой воды (6) и энтальпии впрыскиваемой воды $h_{воды\ 20C}$ (7) получены из материальных балансов горения топлива и действительны для любого представления рассматриваемого метода.

Максимальное влагосодержание d_{max} при впрыске воды определяется из баланса:

$$h_{ДГ\ 2030C} + (d - 1.59) \cdot h_{воды\ 20C} = h_{сух. ДГ\ T_{ПГС}} + h_{H_2O\ T_{ПГС}} + (d - 1.59) \cdot h_{пара\ T_{ПГС}}.$$

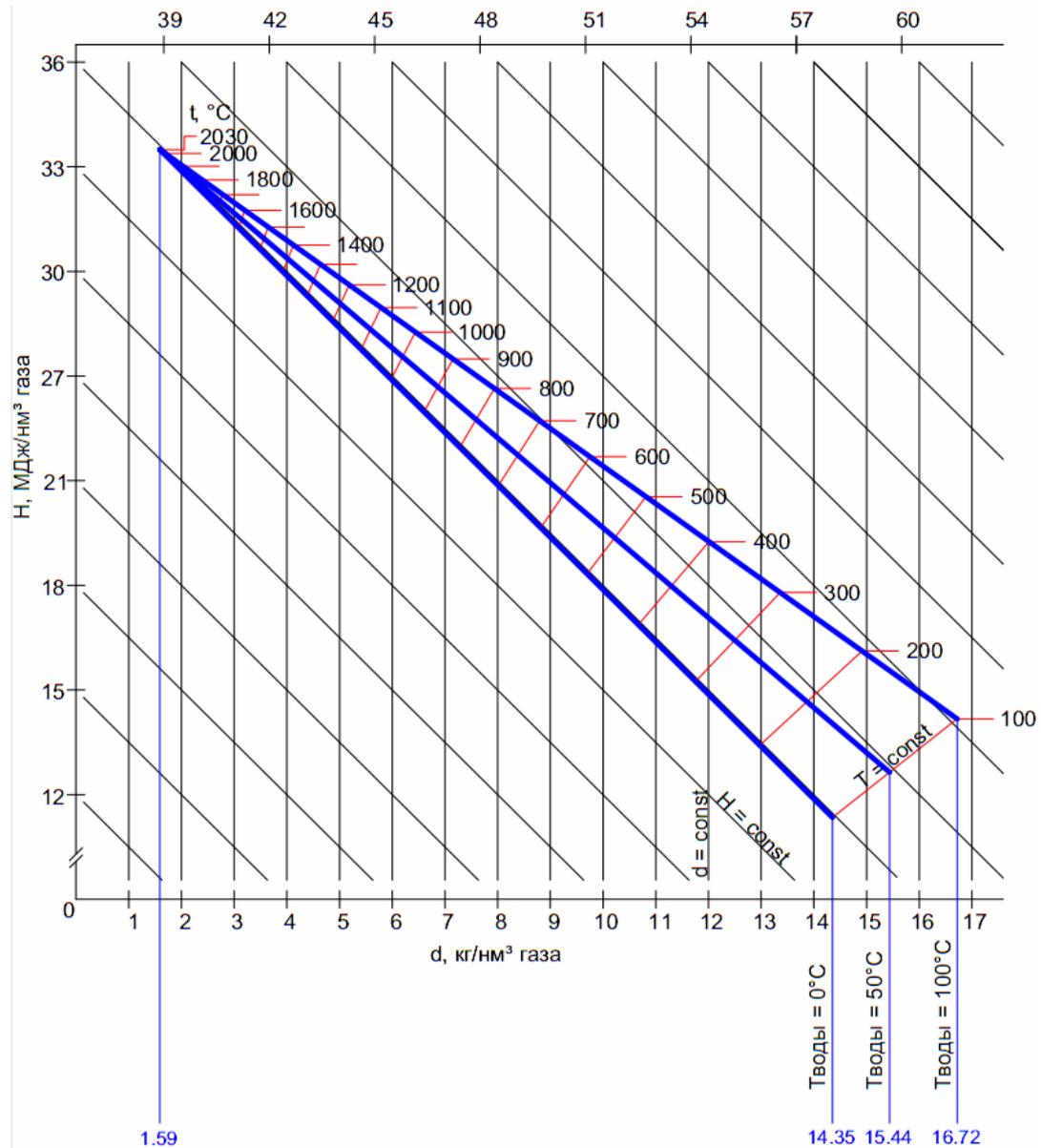
Тогда

$$d_{max} = (h_{ДГ\ 2030C} - h_{сух. ДГ\ T_{ПГС}} - h_{H_2O\ T_{ПГС}}) / (h_{пара\ T_{ПГС}} - h_{воды\ 20C}) + 1.59.$$

Рассчитанные значения энтальпий позволяют построить диаграмму энтальпий парогазовой смеси при температуре впрыскиваемой воды 20 °С. Аналогично описанному выше случаю имеет смысл указать диапазон температур (0÷100 °С) впрыскиваемой воды (рис. 2). Указание диапазона температур заключается в нанесении

двух или более изотерм температур впрыскиваемой воды. Точки в указанном диапазоне будут соответствовать реальному физическому состоянию теплоносителя, а вне его будут носить теоретический характер.

Предлагаемая методика является адаптацией существующего метода построения диаграммы влажного воздуха для парогазовых смесей. Она позволяет осуществлять построение диаграмм энтальпий любых парогазовых смесей как в отношении нормального кубического метра сжигаемого газа, так и в отношении килограмма получаемой смеси.



Р и с. 2. Диаграмма энтальпий парогазовой смеси на 1 м³ природного газа

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крутов В.И. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 1981. – 439 с.
2. Григорьев К.А. Технология сжигания органических топлив. Энергетические топлива. – СПб.: Изд-во политехнического университета, 2006. – 92 с.
3. Лебедев П.Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1970. – 408 с.
4. Клименко А.В. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. – М.: Издательство МЭИ, 2007. – 632 с.

Статья поступила в редакцию 2 июня 2010 г.

UDC 662.99:662.987.2:662.987.3

ENTHALPY CONTENT DIAGRAM FOR STEAM-AND-SMOKE MIXTURES

M.N. Nikitin, A.I. Shchelokov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

Methods of enthalpy content diagrams construction for steam-and-smoke mixtures applied to normal cubic meter of burned gas and the a kilogram of resulting mixture are considered. Enthalpy content diagrams for a special case of steam-and-smoke mixture constructed by offered methods are presented.

Keywords: *heat-carriers, steam-and-smoke mixtures, enthalpy, products of combustion.*

*Maksim N. Nikitin – Postgraduate student.
Anatoliy I. Shchelokov – Doctor of Technical Sciences, Professor.*