УДК 338.45:30.10

МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МАГИСТРАЛЬНОГО ТОПЛИВА

Галкин Л.А., Гордиенко Л.В.

Существующие методы контроля теплоты сгорания топлива осуществляются путем периодического отбора определенного объема топлива из магистрали либо “танка”, последующего его сжигания и измерения теплового эффекта, полученного в результате. Таковы известные бомбовый и калориметрический методы, имеющие некоторые разновидности конструктивной реализации. В ряде случаев, в основном для транспортных средств, используется детонаторный метод определения теплоты сгорания, позволяющий на качественном уровне установить пригодность к использованию топлива: сжиженного газа или жидкого (бензин, соляра) и определить октановое число по мощности, развиваемой уменьшенной физической моделью ДВС.

Постоянный, текущий контроль теплоты сгорания на газо- и нефтепроводах ведется косвенным методом по совокупности параметров: расходу, перепаду давления, температуре (для газов), что не позволяет сколь-нибудь корректно оценить теплотворную способность, так как не учитываются следующие факторы:

а) влажность, которая в зависимости от условий сжигания топлива определяет высшую и низшую теплоту сгорания, связь между которыми выражается соотношением [1]:

$$Q_b^p - Q_m^p = G_{H_2O} \cdot g_u, \qquad (1)$$

где Q_b^p – высшая теплота сгорания, МДж/кг;

Q_m^p – низшая теплота сгорания, МДж/кг;

G_{H_2O} – масса влаги, образованная при окислении водорода, кг;

g_u – количество тепла, необходимое для нагрева 1 кг воды от 273°К до 373°К, с учетом скрытой теплоты парообразования без теплоты, выделяющейся при охлаждении пара от 373°К до 273°К, принятое равным 2,51 МДж/кг;

б) состав, от процентного содержания компонентов которого зависит суммарный тепловой эффект / табл. 1/. Например, типичный состав коксового газа: 50,6% H_2; 30,8% CH_4; 7,4% CO; 4,3% C_nH_m; 4,3% N_2; 2,4% CO_2; 0,2% O_2. Теплота сгорания Q = 20 МДж/м^3.

Методы контроля требуют точного учета количества окислителя, при недостатке которого (n<1) возникает необходимость определения состава продуктов неполного сгорания: CO_2, CO, H_2O, H_2. В этом случае основной становится реакция:

$$CO_2 + H_2 = H_2O + CO, \qquad (2)$$

равновесие которой смещается в зависимости от температуры и "n" в ту или иную сторону. Изменением "n" регулируется температура горения t_g, следовательно, количество и химический состав продуктов сгорания (см. Табл. 1).

Таблица 1. Тепловые эффекты реакции горения.

Реакция	Тепловой эффект	
	МДж/кг	МДж/м^3
$C + CO_2$	34,07	
$CO + 1/2\ O_2 = CO_2$		12,64
$H_2 + 1/2\ O_2 = (H_2O)_{жидк}$	143,1	12,77
$H_2 + 1/2\ O_2 = (H_2O)_{пар}$	121,0	10,76
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + (2H_2O)_{пар}$	-	35,82
$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + (2H_2O)_{пар}$	-	59,07
$C_2H_6 + 7/2\ O_2 = 2CO_2 + (3H_2O)_{пар}$	-	63,75
$C_3H_6 + 9/2\ O_2 = 3CO_2 + (H_2O)_{пар}$	-	86,00
$H_2S + 3/2\ O_2 = SO_2 + (H_2O)_{пар}$	-	1473,00

Количество окислителя определяет условия протекания реакции горения. Поэтому сомнительна точность (0,5÷1%), приписываемая указанным выше методам контроля теплотворной способности топлива,

связанная, например, с количеством окислителя, загружаемого (подаваемого) вместе с единичным объемом (массой) топлива в бомбу (калориметр).

Проанализируем соотношения (1) и (2), оценивая возможности разработки метода измерения теплоты сгорания, например, газа на трубопроводе.

По соотношени (1) измерительная процедура должна содержать операции:

- измерение влажности горючей смеси и определение количества влаги, по этим результатам измерения, в единичном объеме сжигаемой горючей смеси;
- определение теплопотерь от образовавшегося объема воды при сжигании;
- определение состава газа для установления необходимого объема окислителя и получения горючей смеси;
- сжигание горючей смеси единичного объема, содержащего влагу в своем составе, и определение теплового эффекта реакции горения;
- удаление влаги и сжигание горючей смеси единичного объема. Определение теплового эффекта для "сухой" горючей смеси:

$$Q = M \cdot C_T (t_g - t_H), \qquad (3)$$

- где M – масса теплоносителя, кг ($м^3$);

c_T – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/кг ^{0}К;

$t_{g,H}$ – температура, соответственно конечная и начальная, теплоносителя, ^{0}К.

Операции, вносящие максимальные погрешности в данную измерительную процедуру из-за несовершенства контрольно-измерительных приборов:

- погрешность измерения влажности (3÷5)%;
- погрешность определения необходимого количества окислителя ≅3%, которое существенно определяет характеристики горения.

По соотношеию (2) измерительная процедура предусматривает измерение:

- температуры газа и окислителя на входе;
- теплоемкости газа, окислителя и продуктов сгорания;
- температуры сгорания топлива;
- учет потерь тепла при горении.

Максимальные погрешности возникают в этом случае при следующих измерениях:

- измерение влажности газа, которая изменяется вместе с изменением состава в процессе горения топлива, в особенности для продуктов сгорания;
- несовершенством средств и методов учета потерь тепла при горении.

Теплоемкости газа и окислителя можно с малыми погрешностями определить динамическим методом, измеряя температуру горючей смеси и окислителя при поддержании постоянства расходов и мощности подогревателя в процессе прогрева смешиваемых компонентов. Остаются две измерительных операции: измерение теплоемкости продуктов сгорания и учет тепловых потерь при сжигании топлива,- определяющие наибольшие суммарные погрешности измерения теплоты сгорания.

Таким образом, реализация принципа измерения теплоты сгорания по соотношению (2) для трубопроводов конструктивно и технологически разрешима. Реализация контроля по соотношению (1) проблематична из-за размещения на магистральной трубе системы оценки теплового эффекта по температуре теплоносителя при сжигании единичного объема горючей смеси и ее теплоизоляции.

Учет тепловых потерь при горении требует рассмотрения всех тепловых потоков, действующих в зоне горения и за факелом. Для этого уравнение теплового баланса реакции горения преобразуем в уравнение баланса тепловых потоков:

$$Q_C = Q_U + Q_{\alpha C} + Q_{\lambda C} + Q_{y.n.}, \qquad (4)$$

где Q_C – вносимое тепло;

Q_U – тепло, уносимое излучением;

$Q_{\alpha C}$ – тепло, уносимое конвекцией в окружающую среду;

$Q_{\lambda C}$ - тепло, уходящее за счет теплоотдачи конструкции

$Q_{y.n}$ - тепло, уносимое продуктами сгорания.

Объединение соотношений (2) и (4) и преобразование (2) в уравнение тепловых потоков, вносящих в зону горения и выносящих из нее тепло, позволяет реализовать метод "измерительной горелки" непосредственно на трубопроводе для постоянного или периодического текущего контроля теплоты сгорания поступающего газового (жидкого) топлива. В этом случае необходима стабилизация процесса горения, то есть стабилизация следующих условий, определяющих точность контроля:

- стабильность объемного содержания окислителя в горючей смеси (стехиометричность состава), определяющая полноту сгорания смеси и состав продуктов сгорания;
- качество смешения газа и окислителя, определяющее температуру и длину факела;
- скорость потока горючей смеси, определяющей распределение температур по телу горелки, то есть ее тепловой баланс;
- мощность запальника, определяющая время разогрева смеси и, следовательно, единые условия воспламенения для плохо перемешанных участков потока газовой смеси.

Оценим возможности конструктивного решения устройства для контроля теплоты сгорания газа и, тем самым, оценки качества газового топлива.

Для практического решения вопроса измерения теплотворной способности горючих газов непосредственно на газопроводах наиболее предпочтительной является реализация наиболее общего подхода к определению калорийности на основе уравнения теплового баланса реакции горения, которое имеет следующий вид [1, 2]:

$$\gamma \cdot Q_H^P + c_G \cdot (T_G - T_H) + c_0 \cdot (T_0 - T_H) = c_c \cdot (T_G - T_H), \qquad (5)$$

где γ - коэффициент полноты горения (γ=0.90 - 0.98);

Q_H^P - низшая теплота сгорания топлива, кДж/м ;

c_G, c_0, c_c - теплоемкости соответственно горючего, окислителя, продуктов сгорания, кДж/м К;

T_G, T_0 - температуры соответственно горючего и окислителя, К;

T_H - некоторая заданная начальная температура всех исходных и конечных продуктов, по отношению к которой ведется расчет, К.

Учет потерь при горении требует рассмотрения всех тепловых потоков, действующих в зоне горения и за факелом. Тепловые потери, определяющие работу “измерительной горелки” складываются из:

- тепла от химической неполноты сгорания смеси (при беспламенном сжигании потери тепла практически отсутствуют, а при пламенном сжигании в отходящих газах содержится от 0.3 до 3% несгоревших CO и H);
- тепла от утечек газа через неплотности в конструкции горелки;
- тепла, уходящего за счет теплоотдачи через тело горелки;
- тепла, отводимого излучением из сопла горелки;
- тепла, затраченного на нагрев горелки и его аккумуляцию в теле горелки.

При окончательном составлении уравнения для определения теплоты сгорания следует учитывать, что кроме тепловых потерь при работе “измерительной горелки” существует еще тепло, которое вносится в горелку потоками газа и окислителя. В окончательный вид уравнения слагаемые, определяющие тепловые потери, должны войти во знаком “плюс”, а слагаемые, определяющие вносимое в горелку тепло, со знаком “минус”.

Уравнение для определения низшей теплоты сгорания (водяной пар, содержащийся в газе, уходит в атмосферу вместе с продуктами сгорания) имеет вид:

$$Q_H^{\ P} = \sigma \cdot \left(\frac{T_P}{100}\right)^4 \cdot \frac{\Phi}{B_S} + \frac{T_P - T_{OS}}{h_{GR}/\lambda_{GR} + 1/\alpha} \cdot \frac{F_{GR}}{B_S} + \frac{m_{GR} \cdot c_{GR} \cdot T_{GR}}{\tau \cdot B_S} + \\ + c_c \cdot T_c \cdot \frac{B_c}{B_S} - c_G \cdot T_G \cdot \frac{B_G}{B_S} - c_0 \cdot T_0 \cdot \frac{B_0}{B_S} \quad (6)$$

где $Q_H^{\ P}$ - низшая теплота сгорания топлива, кДж/м;

σ - коэффициент лучеиспускания АЧТ=5.708 Вт/м К;

T_P - средняя температура пламени, К;

T_{OS}, T_{GR}, T_c, T_G, T_0 - температуры соответственно окружающей среды, нагрева горелки, продуктов сгорания, газа и окислителя, К;

B_S, B_c, B_G, B_0 - расход соответственно горючей смеси, продуктов сгорания, газа и окислителя, м /с;

h_{GR} - толщина тела горелки, м;

λ_{GR} - коэффициент теплопроводности материала горелки, Вт/м К;

α - коэффициент теплоотдачи от поверхности горелки в окружающую среду, Вт/м К;

F_{GR} - площадь поверхности горелки, м ;

m_{GR} - масса горелки, кг;

c_{GR} - средняя удельная теплоемкость материала горелки в диапазоне температур от T_{OS} до T_{GR}, кДж/кг К;

τ - продолжительность измерительного цикла, с;

c_c, c_G, c_0 - средняя удельная теплоемкость соответственно продуктов сгорания, газа и окислителя, кДж/м К.

Для достижения высокой точности измерения теплоты сгорания горючих газов необходима стабилизация процесса горения, что в свою очередь предполагает соблюдение ряда условий:

- Стабильность объемного содержания окислителя в горючей смеси, определяющая полноту ее сгорания и состав продуктов сгорания.
- Качество смешения газа и окислителя, определяющее температуру и длину факела.
- Скорость потока газовой смеси, определяющая распределение температур по телу горелки.
- Мощность запальника, определяющая время разогрева смеси и единые условия воспламенения для плохо перемешенных участков в потоке газовой смеси.

Таким образом, анализ выражения (6) и условий стабильности процесса горения дает возможность сделать вывод о приборной части устройства для реализации метода “измерительной горелки” для контроля теплоты сгорания газообразных топлив.

В устройство должно содержать: беспламенную горелку (она позволит максимально сократить потери тепла от химической неполноты сгорания); блок измерения расхода: газа, окислителя, горючей смеси и продуктов сгорания; блок измерений температуры: окружающей среды, газа, окислителя, продуктов сгорания; блок измерения перепада температур на горелке; блок периодического поджига газовой смеси (включающего в себя запальник определенной мощности); блок управления; блок алгебраического суммирования и обработки; регистратор.

Подвод газа и окислителя к камере смешения горелки может быть осуществлен таким образом, чтобы газ и окислитель подогревались теплом, аккумулируемым конструкцией горелки. Такой путь позволит стабилизировать поджиг горючей смеси при выходе из форсунки горелки и обеспечит зажигание газовой смеси даже при низком уровне смешения газа и окислителя, использовать полезно вторичное тепло. При этом расход газа в устройстве должен быть стабилизирован, а расход окислителя должен

регулироваться так, чтобы поддерживалась максимальная температура продуктов сгорания, что будет свидетельствовать о полноте сгорания горючей смеси.

В работе устройства предпочтителен циклический режим работы, что позволит исключить влияние колебаний температуры окружающей среды на точность значения теплоты сгорания горючей смеси. Длительность измерительного цикла должна ограничиваться длительностью процесса теплоотдачи в окружающую среду, так как этот процесс будет вносить значительные погрешности в конечный результат измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Г. Н. Общая теплотехника. - М.: Высш. шк., 1980.
2. Галкин Л.А. Расходомер с унифицированной градуировкой. Измерительная техника №5, 1993.
3. Гордиенко Л. В. К вопросу измерения теплотворной способности газа на магистральных трубопроводах // Придніпроіський науковий вісник, №12, лютий 1998 р.