

Усреднение показаний газоанализатора и вычисление потерь с дымовыми газами в печах периодического действия.

СУТЬ ВОПРОСА

Во всех существующих методиках определения КПД печей потери с отходящими газами вычисляются по усреднению показаний газового анализа (ГА). Математически такое усреднение некорректно т.к. величины потерь, получаемых с ГА – это текущие потери, и они должны быть как-то привязаны к доле топлива, сгорающего в данный момент.

Так усреднять можно только в случае, если мощность горения (количество сгораемого топлива в единицу времени) остается постоянной на всем интервале усреднения, как, например, в аппаратах постоянного действия.

В бытовых печах, напротив, скорость горения меняется в широких пределах, и обычное усреднение будет некорректным. Поэтому, для получения более-менее адекватных данных из интервала усреднения вырезают начало и конец, что тоже приводит к некоторым ошибкам (а также к спорам – о том, какой именно промежуток выбирать). Более того, если печь топится в несколько закладок, то стоило бы исключать и интервал перед новой закладкой, однако об этом нет указаний ни в одной из методик.

КАК ЖЕ БЫТЬ?

Можно определить потери с уходящими газами с помощью анемометра и термопары ([см. Методичку](#)). Однако это может вызвать сложности инструментального характера – необходим точный калиброванный анемометр, желательно со специальным тарированным коробом для измерения потока. Это можно рекомендовать при отсутствии газоанализатора. При его наличии целесообразно доработать процедуру усреднения так, чтобы учесть неравномерность тепловыделения в печи по времени. Т.е. ввести нормировочные (весовые) коэффициенты для величины текущих потерь, и усреднять уже нормированную (на постоянную скорость горения) величину потерь. Ниже мы введем такие коэффициенты и математически покажем, что это правомерно.

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПОТЕРЬ

Можно различить два вида потерь – интегральные, то есть общие потери за период времени Δt и текущие потери, в момент времени t . Когда говорят об общем КПД печи (потерях), то имеют ввиду интегральную величину. Моментальная величина потерь характеризует эффективность процесса поглощения тепла печью в момент времени t безотносительно к его количеству. И очень важно заметить, что интегральный КПД не может быть получен усреднением η^t по времени. Относительные потери (как и КПД) – **величина не аддитивная**. Подробнее об этом можно прочесть в «Методичке».

Интегральные потери за период времени $\Delta t = t_2 - t_1$ можно определить по формуле:

$$\text{Loss} = \frac{1}{Mq^w} \int_{t_1}^{t_2} W_{\text{отх}}(t) dt \quad (1)$$

Текущие потери, в момент времени t:

$$\text{Loss}^t(t) = \frac{W_{\text{отх}}(t)}{W_{\text{гор}}(t)} \quad \text{где} \quad (2)$$

- $W_{\text{отх}}(t)$ - тепловая мощность потерь с отходящими газами, Вт
 $W_{\text{гор}}(t)$ - тепловая мощность выделяемая при горении топлива, Вт
 M - масса сожженных дров, кг
 q^w - удельная теплота сгорания дров влажностью w , Дж/кг.

Развернутые выражения для потерь выглядят следующим образом:

$$\text{Loss} = \frac{(1+w)}{M(q^0 - 583w)} \int_{t_1}^{t_2} c\Delta T \cdot F(t) \cdot \left(1 + \frac{\beta}{\alpha(t)}\right) dt \quad (3)$$

$$\text{Loss}^t(t) = \frac{c\Delta T \cdot V^0}{q^0 - 583w} (\alpha(t) + \beta) \quad \text{где} \quad (4)$$

- w - влажность дров, как отношение массы воды к массе сух. древесины в образце, доли
 C - теплоемкость воздуха Дж/нм³С
 ΔT - разность т-р на выходе и входе в печь
 V^0 - стехиометр. объем воздуха для горения абс. сухой. древесины, нм³/кг
 $F(t)$ - поток входящего воздуха, нм³/с
 $\alpha(t)$ - коэффициент избытка воздуха
 β - безразмерный коэффициент, характеризующий изменение теплосодержания дымовых газов по отношению к теплосодержанию входящего воздуха

$$\beta = \frac{c_{\text{отх}}^w}{c_{\text{возд}}} \frac{V_{\text{отх}}^0 + wV_{\text{H}_2\text{O}}^w}{V_{\text{возд}}^0} - 1 \quad (5)$$

Выражение (2) принято называть формулой Зигерта, именно по ней происходят вычисления потерь в ГА. В руководстве по ГА она приводится в несколько ином виде – выраженная через концентрации O₂ или CO₂ и две константы А и В.

НОРМИРОВОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Теперь попробуем получить выражение для интегральных потерь Loss, через потери текущие. Перепишем (1) так:

$$\begin{aligned} \text{Loss} &= \frac{1+w}{M(q^0 - 583w)} \int_{t_1}^{t_2} c\Delta T \cdot \frac{F(t)}{\alpha(t)} \cdot (\alpha(t) + \beta) dt = \\ &= \frac{1+w}{MV^0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{F(t)}{\alpha(t)} \cdot \frac{c\Delta T \cdot V^0}{q^0 - 583w} (\alpha(t) + \beta) dt \end{aligned} \quad (6)$$

Частное от деления потока входящего воздуха на коэффициент избытка воздуха – это поток сгораемого воздуха, скорость горения воздуха (пропорциональная скорости горения топлива). Обозначим его через $G(t)$:

$$G(t) = \frac{F(t)}{\alpha(t)} \quad (7)$$

Теперь выражение для потерь можно переписать так:

$$\text{Loss} = \frac{1+w}{MV^0} \int_{t_1}^{t_2} G(t) \cdot \text{Loss}^t(t) dt \quad (8)$$

Для дальнейших преобразований нам потребуется средняя величина скорости горения воздуха. Она находится усреднением $G(t)$ за исследуемый промежуток времени, математически это можно записать так:

$$\bar{G} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt \quad (9)$$

Поскольку \bar{G} - это константа (а не функция времени), то ее можно внести под знак интеграла, соответственно помножив и предынтегральное выражение:

$$\text{Loss} = \frac{1+w}{MV^0} \cdot \bar{G} \int_{t_1}^{t_2} \frac{G(t)}{\bar{G}} \cdot \text{Loss}^t dt \quad (10)$$

Подставим (9) в (10) и посмотрим что получится:

$$\text{Loss} = \frac{1+w}{MV^0} \cdot \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{G(t)}{\bar{G}} \cdot \text{Loss}^t(t) dt \quad (11)$$

Интеграл от скорости горения воздуха по времени (первый в формуле), как нетрудно догадаться, - это объем сгоревшего воздуха. А предынтегральный множитель $(1+w)/MV$ равен $1/Vst$, где Vst – стехиометрический объем воздуха, требуемый для сгорания массы дров M , с влажностью w . О, чудо! – формула существенно упрощается:

$$\text{Loss} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{G(t)}{\bar{G}} \cdot \text{Loss}^t(t) dt \quad (12)$$

Обозначим через $N(t)$ отношение скорости горения воздуха к ее средней величине и соответственно перепишем (12):

$$N(t) = \frac{G(t)}{G} \quad (13)$$

$$\text{Loss} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} N(t) \cdot \text{Loss}^t dt \quad (14)$$

Или, по определению средней величины:

$$\text{Loss} = \overline{N(t) \cdot \text{Loss}^t(t)} \quad (15)$$

Ура, все упростилось проще простого. $N(t)$ – это и есть искомый нормировочный (или весовой) коэффициент. Физический смысл его состоит в том, что в общей сумме потерь доля потерь в каждый момент времени учитывается пропорционально количеству сгорающего в этот момент топлива. Произведение $N(t) \cdot \text{Loss}^t(t)$ можно назвать текущими потерями, нормированными на постоянную скорость горения.

Интересно отметить, что величина нормировочного коэффициента $N(t)$ не зависит от абсолютного значения потока воздуха, а важны лишь его изменения – это вытекает из (13). Например, если поток за время топки возрос линейно в два раза, то все равно было это $100/200 \text{ м}^3/\text{час}$ или $200/400 \text{ м}^3/\text{час}$ – значения $N(t)$ не изменятся. Или если поток оставался постоянным – то не имеет значение его абсолютная величина.

Таким образом, требования к анемометру снижаются – важна лишь его линейность. А при расчетах необязательно рассчитывать поток, в (13) можно подставлять и скорость входящего воздуха.

Стоит обратить внимание, что средняя величина $N(t)$ за исследуемый период должна равняться единице (по определению нормировочного коэффициента, иначе расчет будет на иную массу топлива) – это происходит автоматически, но для этого пределы вычислений нужно выбирать до расчета $N(t)$ и потерь Loss по (15).

Таким образом, расчеты производятся в следующей последовательности.

- 1) записываем в таблицу величины потерь $\text{Loss}(t)$ (с ГА, или вычисляем их по (2)), избытка воздуха, потока входящего воздуха
- 2) определяем пределы расчетов, т. е. промежуток времени горения
- 3) добавляем в таблицу графу $G=F/\text{Alfa}$ и вычисляем ее среднее за принятый промежуток времени
- 4) добавляем в таблицу графу $N = G/G_{\text{средн}}$
- 5) добавляем графу $N\text{Loss} = N(t) \cdot \text{Loss}(t)$
- 6) Вычисляем ее среднее - это и есть интегральные потери за искомый период.

ОШИБКИ МЕТОДА

Методы вычисления потерь по формуле Зигерта (4), или по (15) в применении к печам периодического действия имеют следующий недостаток. В этих выражениях значения теплоты сгорания топлива Q и стех. количества воздуха V^0 принимаются постоянными по

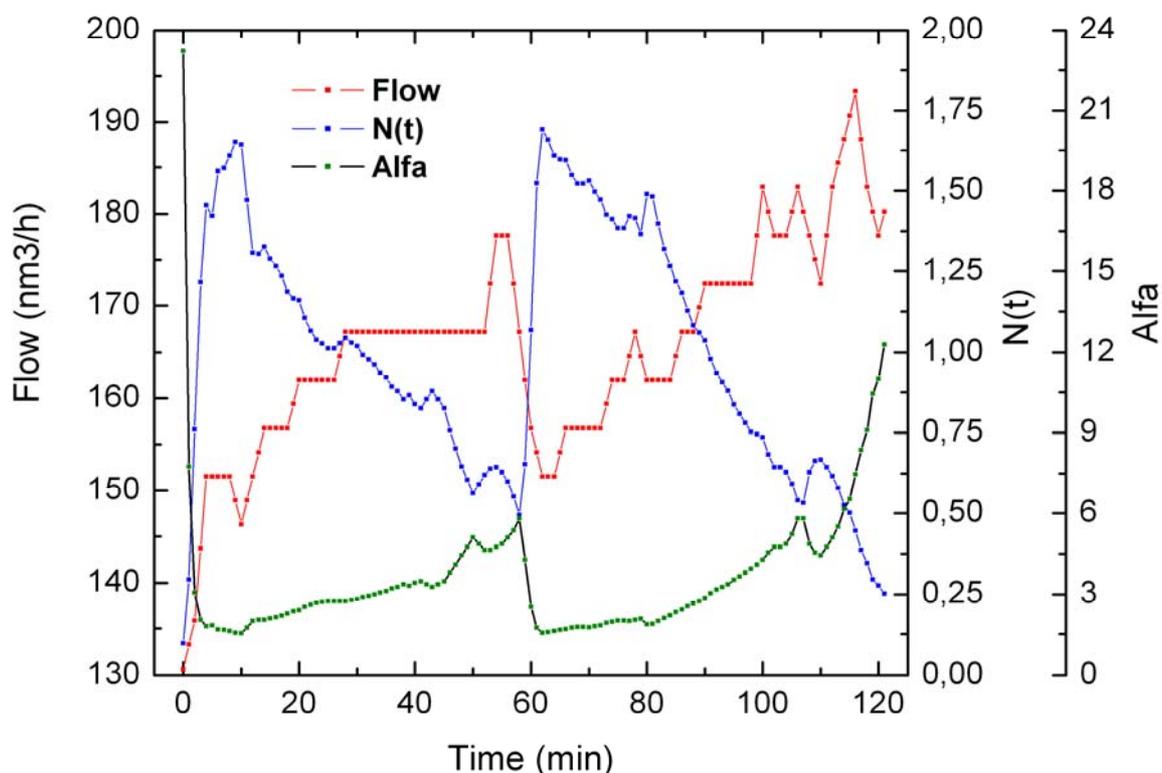
времени, но это справедливо только для топок постоянного горения. А в случае печей периодического действия сначала из дров выгорают летучие, а потом сгорает угольный остаток, соответственно эти величины меняются со временем (и возможно сильно). Например, средняя теплота сгорания дров 3300 ккал/кг, а древесного угля – 8000 ккал/кг, соответственно в начальный период горения теплота сгорания топлива д. б. существенно ниже 3300 ккал/кг. Со стех. объемом воздуха ситуация обратная – при горении летучих воздуха нужно больше, а для горения угля меньше.

Учесть эти ошибки при расчете сложно. Представляется такой путь – задать вид функций $Q(t)$ и $V(t)$ аналитически, но так чтобы их средние значения за период горения равнялись теплоте сгорания древесины и стех. объему воздуха соответственно. Затем подставить их в (4) и (15) и оценить насколько изменится величина потерь. Но это тема для отдельной работы.

Об установке констант А и В в формуле Зигерта в газоанализаторе см. «[Методичку](#)».

ГРАФИЧЕСКИЕ ИЛЛЮСТРАЦИИ

Для примера взят реальный опыт и посчитан по предложенной методике усреднения. На графике: поток входящего воздуха, коэффициент избытка воздуха и нормировочный коэффициент.



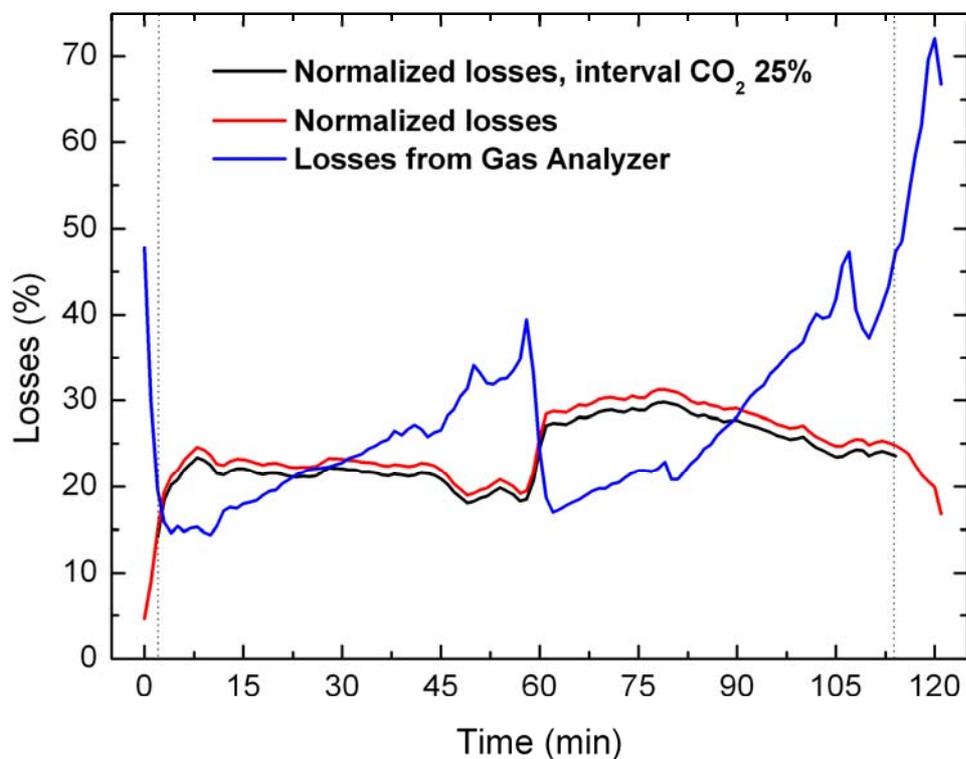
Ступеньки на графике потока вызваны низким разрешением анемометра – 0,1 м/с.

На следующем графике сопоставлены величины потерь, полученных непосредственно с ГА, и нормированных потерь. Последние приведены как для всего периода горения, так и для интервала $\text{CO}_2 > \text{CO}_{2\text{max}}$. Усредненные величины приведены в таблице.

| | Средн потери с ГА, % | Средн. норм. потери, % | Ошибка |
|--|-------------------------|---------------------------|--------|
| Весь период | 28,4 | 24,5 | 16 % |
| Период $\text{CO}_2 > 25\%\text{CO}_2$ | 26,2 | 23,8 | 10 % |
| Ошибка | 8 % | 3 % | |

Из таблицы можно сделать два вывода

- 1) Усреднение потерь без нормировки дает завышенные значения на 10 – 16%
- 2) Нормированные потери мене чувствительны к пределам усреднения



УСРЕДНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ CO

Усреднение концентрации CO в отходящих газах в печах периодического действия желательно проводить с учетом потока отходящих газов, т. к. в общем случае этот поток не является постоянной величиной и возрастает к концу топки. Усреднение без учета потока даст несколько заниженные значения, т. к. сама концентрация CO также возрастает к концу топки. Так, если например поток за время топки линейно возрастает в два раза, то это дает примерно +10% концентрации CO по сравнению с неизменным потоком.

Для учета потока также можно ввести нормировочный коэффициент, пропорциональный потоку отходящих газов.

$$N(t) = \frac{F_{\text{отх}}(t)}{F_{\text{отх}}}$$

$$F_{\text{отх}}(t) = F(t) \left[1 + \frac{1}{\alpha(t)} \cdot \frac{\Delta V}{V^0} \right] \quad \text{где} \quad (16)$$

$$\Delta V = V_{\text{отх}}^0 - V^0 + 1,24 \cdot w$$

V^0 и $V_{\text{отх}}^0$ – удельные стехиометрические объемы воздуха и дымовых газов, $\text{нм}^3/\text{кг}$.
 w – влажность, доли.

Для сравнения печей по СО необходимо привести концентрацию СО к неразбавленным дымовым газам (или выразить в абсолютных единицах). Потому что печи могут работать с разными избытками воздуха (из-за разной конструкции топки и/или особенностей эксплуатации). Для этого достаточно домножить получившуюся величину на текущий избыток воздуха.

Таким образом, нормированная концентрация СО в неразбавленных ДГ:

$$\text{CO}_{\text{undill}}^{\text{norm}}(t) = \text{CO}(t) \cdot N(t) \cdot \alpha(t) \quad (17)$$

Эту величину уже можно усреднять.

ПОТЕРИ ИЗ-ЗА ХИМИЧЕСКОЙ НЕПОЛНОТЫ ГОРЕНИЯ

Образование СО при горении вызывает потери тепла (Q_3 , по общепринятым обозначениям), т. к. сам монооксид углерода обладает значительной теплотой сгорания равной 67,7 ккал/моль [1]. Наиболее доходчиво о вычислении этих потерь рассказано в [2], но там речь о газе, мазуте и угле.

Выведем формулу для Q_3 для дров:

$$Q_3 = \frac{1}{Q^w [\text{ккал} / \text{кг}]} \cdot 67,7 [\text{ккал} / \text{моль}] \cdot \frac{1000 [\text{л} / \text{нм}^3]}{22,4 [\text{л} / \text{моль}]} \cdot V_{\text{отх}}^{\text{сух}} [\text{нм}^3 / \text{кг}] \cdot [\text{CO}] \quad \text{где} \quad (18)$$

Q^w - теплота сгорания древесины, влажностью w ,

$V_{\text{отх}}^{\text{сух}}$ - удельный стех. объем сухих продуктов горения древесины, влажностью w ,

$[\text{CO}]$ - концентрация СО в неразбавленных ДГ, доли.

Поскольку

$$Q^w = \frac{1}{1+w} (4500 - 583w) [\text{ккал} / \text{кг}] \quad (19)$$

$$V_{\text{отх}}^{\text{сух}} = \frac{1}{1+w} \cdot 4,55 [\text{нм}^3 / \text{кг}]$$

То выражение (18) можно свести к виду:

$$Q_3 = \frac{13741}{4500 - 583w} \cdot [\text{CO}] \quad (20)$$

Или пренебрегая небольшой поправкой на влажность (583w):

$$Q_3 = 3,05 \cdot [\text{CO}] \quad (21)$$

Величину концентрации CO надо подставлять приведенную к неразбавленным дымовым газам и в долях единицы, при этом величина потерь также получается в долях единицы.

К примеру, если $[\text{CO}] = 5000 \text{ ppm}$ (ppm = part per million), то потери на неполноту сгорания составят $3,05 \cdot 5000 \cdot 10^{-6} \cdot 100\% = 1,5\%$

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Краткая химическая энциклопедия, М., 1967 т. 5, стр. 318
- 2) Равич М. Б. Эффективность использования топлива, М., 1977 стр. 109

[А. Бацулин](#)