



УДК 697.2

В.А. Бройда

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Производственные процессы нередко сопровождаются образованием нагретых газов, продуктов горения, имеющих достаточно высокую температуру, которые часто просто выбрасываются в атмосферу. Можно снизить энергетические затраты на отопление производственных помещений, утилизируя остаточную теплоту отработанных газов с помощью протяженного теплопередающего газохода. Для перемещения газов по газоходу требуется вентилятор, преодолевающий аэродинамическое сопротивление газохода.

В зависимости от количества, температуры, регулярности и продолжительности поступления горячих газов, их физических свойств такая система отопления может быть основной или дополнительной к основной, использующей другой источник тепловой энергии. Конкретное воплощение теплоутилизационного отопления может быть различно: при высокой температуре горячих газов - это вариант лучистого отопления, типа газоздушного лучистого отопления; либо газоход, проложенный в нижней зоне помещения с преимущественно конвективной теплоотдачей при невысокой температуре газов.

Целью данной статьи является энергетическое и экономическое обоснование рациональности использования остаточной теплоты отработанных газов с помощью теплоутилизационного газохода.

Основу расчета энергетической эффективности такого устройства составляет решение дифференциального уравнения изменения температуры горячих газов t при их перемещении по круглому газоходу, происходящем вследствие передачи тепла через его стенку в воздушную среду помещения [1]:

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{4k(t-t_B)}{c\Gamma w d} \quad (1)$$

где: x , d - соответственно, продольная координата по длине газохода и его диаметр, м;

w - средняя скорость горячих газов в сечении газохода, м/с;

Γ - плотность горячих газов, для воздуха

$$\Gamma = \frac{353}{273+t}, \text{ кг/м}^3;$$

c - теплоемкость горячих газов, кДж/(кг $^{\circ}$ С);

t_B - температура воздуха в помещении, $^{\circ}$ С;

k - коэффициент теплопередачи от горячих газов к воздушной среде помещения, Вт/(м 2 С).

Коэффициент теплопередачи определяется выражением

$$k = \frac{1}{1/a_B + d_{CT}/I_{CT} + 1/(a_K + a_L)}, \quad (2)$$

где: a_B - коэффициент конвективной теплоотдачи от горячих газов к стенке газохода, Вт/(м 2 С);

d_{CT} - толщина стенки газохода, м;

I_{CT} - коэффициент теплопроводности материала стенки, для стали - $I_{CT} = 52$ Вт/(м $^{\circ}$ С);

a_K , a_L - соответственно, коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи от стенки газохода в помещение, Вт/(м 2 С).

По данным [2] для течений в каналах применимы формулы:

$$a_B = \frac{Nu_{\Gamma} \cdot I}{d} \quad (3)$$

$$Nu_{\Gamma} = 0,018 \cdot Re^{0,8} \quad (4)$$

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (5)$$

где: Nu_{Γ} , Re - соответственно, критерии Нуссельта и Рейнольдса для течения внутри газохода;

I - коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м $^{\circ}$ С);

ν - коэффициент кинематической вязкости газа, м 2 /с;

Величины u зависят от состава газа и его температуры. В диапазоне от 30 до 280 $^{\circ}$ С их значения для воздуха приближенно могут быть рассчитаны по формулам:

$$I = (2,44 + 0,0072t) \cdot 10^{-2} \quad (6)$$

$$\nu = (12,275 + 0,1135t) \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

Величина определяется критериальными уравнениями [2]:



$$a_K = \frac{Nu \cdot l}{d} \quad (8)$$

$$Nu = 0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \text{ при условии} \quad (9)$$

$$10^3 \leq Gr \cdot Pr \leq 10^8 \quad (9)$$

$$Gr = \frac{b d^3 g (t - t_B)}{n^2} \quad (10)$$

где: Nu, Gr, Pr - соответственно, критерии Нуссельта, Грасгоффа и Прандтля для внешнего теплообмена;

b - коэффициент объемного расширения, для воздуха, $b = \frac{1}{273+t}$, $1/^\circ\text{C}$;

g - ускорение свободного падения, м/с^2 .

Коэффициент лучистой теплоотдачи может вычисляться по формуле [2]:

$$a_{\text{л}} = e \cdot c_0 \cdot 10^{-8} ((273+t)^4 - (273+t_B)^4) / (t - t_B) \quad (11)$$

где: e, c_0 - соответственно, приведенная степень черноты обменивающейся системы и коэффициент излучения абсолютно черного тела, для стальных окисленных поверхностей, $e \cdot c_0 = 4,7 \text{ Вт/}(\text{м}^2\text{К}^4)$ [3].

Решение дифференциального уравнения (1) находится численно, методом Рунге-Кутты при граничном условии:

$$\text{при } x = 0, t = t_{\text{Г}} \quad (12)$$

где: $t_{\text{Г}}$ - температура горячего газа в начале газохода, $^\circ\text{C}$.

Энергетическую эффективность использования остаточной теплоты отработанных газов для отопления помещений можно оценить показателем h :

$$h = \frac{t_{\text{Г}} - t}{t_{\text{Г}} - t_B} \quad (13)$$

который рассчитывается на основе решения дифференциального уравнения (1).

За меру оценки экономической эффективности принимается срок окупаемости затрат (год), на устройство и использование теплоутилизационного газохода с вентилятором

$$N = \Delta K / \Delta \mathcal{E}, \quad (14)$$

где: ΔK - увеличение капитальных вложений, связанное с устройством теплоутилизационного газохода, руб;

$\Delta \mathcal{E}$ - уменьшение эксплуатационных годовых затрат, руб/год.

Уменьшение эксплуатационных затрат обусловлено, в основном, экономией затрат на тепловую энергию (руб/год) и одновременно учитывает некоторое возрастание затрат на электроэнергию, расходуемую на работу вентилятора (руб/год). Другие виды эксплуатационных затрат в данной модели не рассматриваются как существенно меньшие. Тогда

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta T - \Delta \mathcal{E}_{\text{л}}. \quad (15)$$

В свою очередь, уменьшение затрат на тепловую энергию рассчитывается по формуле:

$$\Delta T = \frac{Q \cdot h \cdot (t_B - t_{\text{ОТ}}) \cdot 8 \cdot sm \cdot Dn \cdot z_{\text{ОТ}} \cdot c_{\text{Т}}}{(t_B - t_{\text{Н}}) \cdot 7} \quad (16)$$

где Q - количество тепла, поступающего с горячими газами в теплоутилизационный газоход, кВт;

$t_{\text{Н}}, t_{\text{ОТ}}$ - соответственно, расчетная для отопления температура наружного воздуха и средняя температура наружного воздуха за отопительный период [4], $^\circ\text{C}$;

$z_{\text{ОТ}}$ - продолжительность отопительного периода [4], сут;

sm - число рабочих смен в сутки;

Dn - число рабочих дней в неделю;

$c_{\text{Т}}$ - стоимость тепловой энергии, которую замещает тепло утилизации, руб/кВт-час (руб/Гкал).

Количество тепла (кВт), поступающего в газоход, рассчитывается по формуле:

$$Q = w_{\text{Н}} \cdot \frac{p \cdot d^2}{4} \cdot c_{\text{Г}} \cdot r_{\text{Г}} \cdot (t_{\text{Г}} - t_B), \quad (17)$$

где: $w_{\text{Н}}$ - скорость газов в начале газохода, м/с;

$c_{\text{Г}}, r_{\text{Г}}$ - соответственно, теплоемкость и плотность горячих газов в начале газохода, $\text{кДж/}(\text{кг}^\circ\text{C})$, кг/м^3 .

Увеличение годовых затрат на электроэнергию, связанных с работой вентилятора, определяется выражением (используется модель одноставочного тарифа):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л}} = Ne \cdot 8 \cdot sm \cdot \frac{Dn}{7} \cdot z_{\text{ОТ}} \cdot c_{\text{Е}}, \quad (18)$$

где: Ne - электрическая мощность, потребляемая вентилятором, кВт;

$c_{\text{Е}}$ - стоимость электроэнергии, руб/кВт-час.

Следует учесть, что наиболее рационально устанавливать вентилятор в конце газохода, так как в этом случае протяженный газоход находится под разряжением, снижается вероятность просачивания горячих газов в воздушную среду помещения и



вентилятор находится под воздействием остывших газов. Потребляемая вентилятором электрическая мощность (кВт) определяется по формуле:

$$Ne = \frac{P \cdot w \cdot p \cdot d^2}{4 \cdot 1020 \cdot КПД}, \quad (19)$$

где: P - аэродинамические потери давления в газоходе, Па;

$КПД$ - полный коэффициент полезного действия вентилятора.

Аэродинамические потери давления в газоходе складываются из потерь по длине и потерь в местных сопротивлениях. Оба вида потерь давления зависят от изменяющейся температуры газов в газоходе и, следовательно, от продольной координаты

$$P = \int_0^l R dx + \sum_1^n (x_i \cdot r \cdot w^2 / 2), \quad (20)$$

где: R - удельная потеря по длине газохода, Па/м;

l - длина газохода, м;

x_i - коэффициент потери давления в местном сопротивлении;

n - общее число местных сопротивлений газохода.

Удельные потери по длине газохода рассчитываются по известным формулам аэродинамики с использованием коэффициента трения, определяемого по формуле Альтшуля [3].

Увеличение капитальных вложений, связанных с устройством теплоутилизационного газохода, обусловлено, в основном, затратами на материал, изготовление и монтаж самого газохода и затратами на вентилятор и его монтаж:

$$\Delta K = p \cdot d \cdot l \cdot c_F + Vent, \quad (21)$$

где: c_F - стоимость материала, изготовления и монтажа 1 м^2 газохода, руб/м²;

$Vent$ - стоимость вентилятора и его монтажа, руб.

Используя приведенные зависимости, можно рассчитать технико-экономические характеристики теплоутилизационного газохода и, в частности, энергетическую эффективность h и срок окупаемости N .

Пример расчета.

Вычисления произведены для климатических условий г. Казани [4]: $t_H = -32 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{OT} = -5,2 \text{ }^\circ\text{C}$,

$z_{OT} = 215$ сут. Температура внутреннего воздуха

$t_B = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, диаметры газохода $d_1 = 0,1 \text{ м}$ и $d_2 = 0,15 \text{ м}$, суммы коэффициентов местных потерь давления в начале и конце газохода приняты, соответственно, $x_1 = 2$,

$x_2 = 2$, эквивалентная шероховатость стенок, с учетом возможных отложений $K_3 = 0,001 \text{ м}$. Ценовые характеристики по условиям г. Казани на 1.07.2004 г.: $c_T = 0,251$ руб/кВт-час тепловой энергии (292,07 руб за 1 Гкал), $c_E = 1,34$ руб/кВт-час электроэнергии, стоимость стального газохода с толщиной стенки 1 мм составляет для $d_1 = 0,1 \text{ м}$ - 662 руб/м², для $c_F = 0,15 \text{ м}$ - 717 руб/м², ориентировочная стоимость вентилятора $Vent = 10000$ руб. Результаты расчета нескольких вариантов газохода представлены в таблице 1.

Результаты расчета показывают, что наряду с существенным изменением технических характеристик (таких как: температура газов, эффективность утилизации, расходуемая электрическая мощность и др.) существенно меняются и экономические характеристики (эксплуатационные затраты, капитальные вложения, срок окупаемости).

Из представленных данных следует, что экономичность варианта теплоутилизационного газохода существенно зависит от его конкретного технического исполнения (диаметра и длины, начальной скорости газов, их температуры), режимных параметров (числа рабочих смен и дней в неделю, когда производятся отработанные газы) и стоимостных характеристик тепловой и электроэнергии, а также используемых материалов и изделий. Причем, высокая энергетическая эффективность ($h = 0,85 - 0,75$) не совпадает с коротким сроком окупаемости, и, наоборот, высокая экономическая эффективность (срок окупаемости $N = 2,5 - 4$ года) соответствует ограниченной длине газохода и эффективности $h = 0,55 - 0,7$. Полученные в расчетах сроки окупаемости свидетельствуют об экономичности рассматриваемого способа теплоутилизации.

Кроме обстоятельств, учтенных в представленной модели расчета, возможны различные технические ограничения, снижающие реальную энергетическую и экономическую эффективность утилизации тепла. К таковым могут относиться: длинные транзитные теплоизолированные участки газохода; ограничение конечной температуры как защита от возможной конденсации водяных паров газовой среды; устройство предохранительных клапанов на газоходе и пр. Тем не менее, используя приведенную методику расчета как основу, можно определять экономически целесообразную конструкцию теплоутилизационного газохода и добиваться наиболее рационального варианта утилизации тепловой энергии для целей отопления производственных помещений.



Таблица

Условия расчета	Расчетные величины	Значения величин при длине газохода 1 м				
		20	30	40	50	60
1	2	3	4	5	6	7
d=0,1 м w _H =12,0 м/с t _r =150 °С c _F =662 руб/м ² sm=3 Dn=7	t, °С	77,5	59,6	47,5	39,1	33,5
	h	0,55	0,68	0,77	0,83	0,87
	Q·h, кВт	8,9	11,1	12,6	13,6	14,3
	Ne, кВт	0,073	0,089	0,1	0,118	0,13
	ΔK, руб	14160	16239	18319	20399	22478
	ΔЭ, руб/год	4574	5723	6469	6959	7278
	N, год	3,1	2,83	2,83	2,93	3,09
d=0,15 м w _H =8,0 м/с t _r =150 °С c _F =717 руб/м ² sm=3 Dn=7	t, °С	85,3	6,74	54,7	45,5	38,6
	h	0,48	0,62	0,72	0,78	0,83
	Q·h, кВт	11,9	15,2	17,5	19,2	20,5
	Ne, кВт	0,04	0,044	0,05	0,056	0,06
	ΔK, руб	16758	20136	23515	26894	30273
	ΔЭ, руб/год	6536	8372	9669	10601	11280
	N, год	2,56	2,41	2,43	2,54	2,68
d=0,15 м w _H =12,0 м/с t _r =150 °С c _F =717 руб/м ² sm=2 Dn=5	t, °С	96,8	80,1	67,4	57,6	49,4
	h	0,4	0,52	0,62	0,69	0,75
	Q·h, кВт	14,7	19,3	22,8	25,5	27,6
	Ne, кВт	0,13	0,178	0,18	0,198	0,22
	ΔK, руб	16758	20136	23515	26894	30273
	ΔЭ, руб/год	3556	4731	5613	6284	6797
	N, год	4,71	4,26	4,19	4,28	4,45
d=0,15 м w _H =15,0 м/с t _r =110 °С c _F =717 руб/м ² sm=3 Dn=7	t, °С	81,1	70,7	62,3	55,4	49,6
	h	0,31	0,42	0,51	0,58	0,64
	Q·h, кВт	10,0	13,5	16,4	18,8	20,8
	Ne, кВт	0,31	0,37	0,43	0,49	0,55
	ΔK, руб	16758	20136	23515	26894	30273
	ΔЭ, руб/год	3549	5751	6400	7372	8123
	N, год	4,72	3,91	3,67	3,65	3,73

Примечание: жирным шрифтом выделены наиболее выгодные варианты, с наименьшими значениями срока окупаемости.

ЛИТЕРАТУРА

- Бройда В.А. Эффективное использование остаточной теплоты продуктов горения и сбросных газов для отопления помещений: Материалы 11 Международной научной конференции "Качество внутреннего воздуха и окружающей среды". Волгоград: ВолгГАСУ, 2003. - С.75-78.
- Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. - 318 с.
- Отопление и вентиляция. Ч.2. Вентиляция. /Под ред. В.Н. Богословского. М.: Стройиздат, 1976.- 439 с.
- СниП 23-01-99* Строительная климатология/Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. - 70 с.
- Богуславский Л.Д., Симонова А.А., Митин М.Ф. Экономика теплогоснабжения и вентиляции. М.: Стройиздат, 1988. - 351 с.