

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СТРУИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

© 2007 В. А. Зубарев<sup>1</sup>, Р. Ю. Шафеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Приволжско-Уральский региональный центр МЧС России

<sup>2</sup>Отряд государственной противопожарной службы №22  
Республики Башкортостан при МЧС России

В статье представлено экспериментальное и теоретическое исследование термодинамического эффекта температурного разделения газовой струи при ее высокоскоростном истечении, а также рассмотрены области его применения в народном хозяйстве.

Известны исследования высокоскоростных газовых струй, в результате которых установлен эффект температурного разделения газовой струи - термодинамический эффект [1].

Предысторией настоящих исследований явились исследования причин самовоспламенения газовых фонтанов при их глушении. Воспламенение природного газа возможно в смеси с воздухом при температурах более 600°C. Объяснить появление таких температур законами аэродинамики оказалось невозможным.

Были проведены стендовые и промышленные экспериментальные исследования этого явления, в результате которых было установлено, что при падении газовой струи на плоскость под углом  $\alpha = 75-80^\circ$  (критический угол атаки) и приближении  $h$  соплового устройства диаметром  $d$  к этой плоскости при соотношении  $h/d=0,7..2,0$  (критический коэффициент приближения) происходит скачок температурного разделения газовой струи (рис. 1), на остром углу - горячий, а на тупом - холодный потоки.

При исследовании зависимости температуры от скорости газовой струи установлено, что кривые горячего и холодного потоков представляют собой параболы (рис. 2) с фокальными параметрами, соответственно:

$$P_T = 120 \text{ и } P_X = 480.$$

На основании чего выведены экспериментальные формулы расчета горячих и холодных потоков [1]:

$$t_T = 4 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 + t_0, \quad (1)$$

$$t_X = -1 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 - t_0, \quad (2)$$

где  $V$  - скорость газовой струи, м/с,  $t_0$  - исходная температура, °С.

Это явление объясняется теоретическими исследованиями. При ударе газовой струи о плоскость по законам аэродинамики из уравнения Бернулли [2] образуется повышение температуры:

$$t_c = \frac{V^2}{2g \cdot i \cdot c_p} + t_0, \quad (3)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения;  $i$  - энтальпия;  $c_p$  - теплоемкость двухвалентного газа.

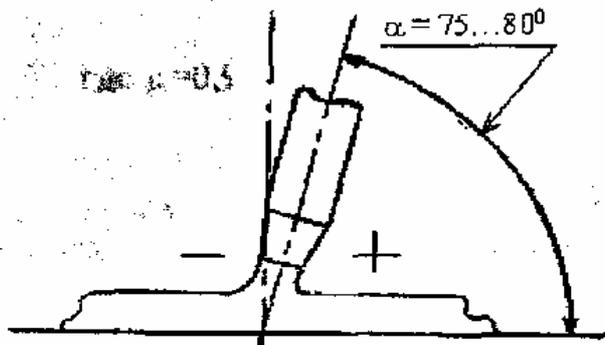


Рис. 1. Схема разделения газовой струи на горячий и холодный потоки при ударе о плоскость

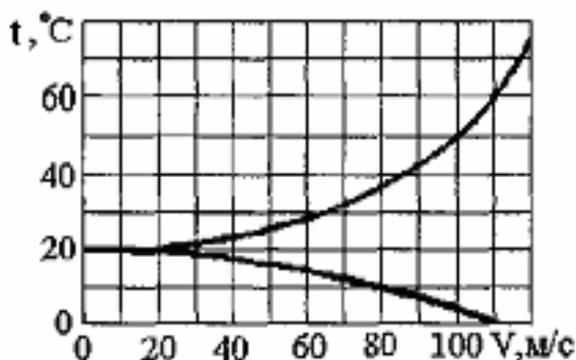


Рис. 2. 1 график зависимости температурного разделения газовой струи от скорости истечения

После удара о плоскость газовая струя с температурой  $t_c$  на критическом угле атаки закручивается в жесткий вихрь, в котором возникает эффект Ранка [2, 3]. Из теплового баланса вихревой трубы, в соответствии с работой [3], следует повышение температуры горячего воздуха

$$t_r = t_c + \frac{mDt_x}{(1-m)}, \quad (4)$$

где  $m=0,9$  - массовая доля холодного потока;  $\Delta t = (\Delta t_{x_{вл}}) + (\Delta t_x)$  - эффективность нагрева;  $(\Delta t_{x_{вл}}) = t_c - t_x$  - расчетная температура холодного потока;  $t_x = -1^\circ\text{C}$ ;  $s(\Delta t_x) = 6^\circ\text{C}$  - потери температуры на испарение влаги при влажности газа 100%.

Подставляя в формулу (5) значение из формулы (4) получим формулы расчета потоков газа:

$$t_r = \frac{V^2}{2g \cdot i \cdot c_p} + \frac{mDt_x}{(1-m)} + t_0,$$

или

$$t_r = 5 \cdot 10^{-4} V^2 + 9Dt_x + t_0 \quad (5)$$

и соответственно

$$t_x = 5 \cdot 10^{-4} V^2 - 0,1Dt_r + t_0. \quad (6)$$

Для расчета температурных потоков правомерно применение формул (1; 2; 5 и 6).

В практических расчетах достаточно найти одну из температур потока, преимущественно горячего, и из теплового баланса газовой струи определить температуру другого потока.

Из сравнительного анализа по таблице 1 и графику (рис. 3) видно постоянное математическое опережение температуры горячего потока на  $63^\circ\text{C}$  относительно экспериментальной, что объясняется математической точностью расчета. Формулы (1; 3; 5 и 6) рекомендуется применять для расчета температур потоков газовой струи.

Настоящий термодинамический эффект температурного разделения газовой струи при высокоскоростном истечении может быть использован в летательных аппаратах и гидро- и ветроэнергетике, что представляет собой большое хозяйственное значение в сбережении ископаемых энергоресурсов и получении дешевой энергии (рис. 4).

Таблица 1

№	Скорость газового потока, м/с	Температура по математической формуле 5, °C	Температура по математической формуле 6, °C	$\Delta t$ , °C
1	50	93	30	63
2	100	123	60	63
3	200	243	180	63
4	300	443	380	63
5	340	543	480	63
6	400	723	660	63
7	500	1083	1020	63
8	600	1523	1460	63
9	700	2043	1980	63
10	800	2643	2580	63

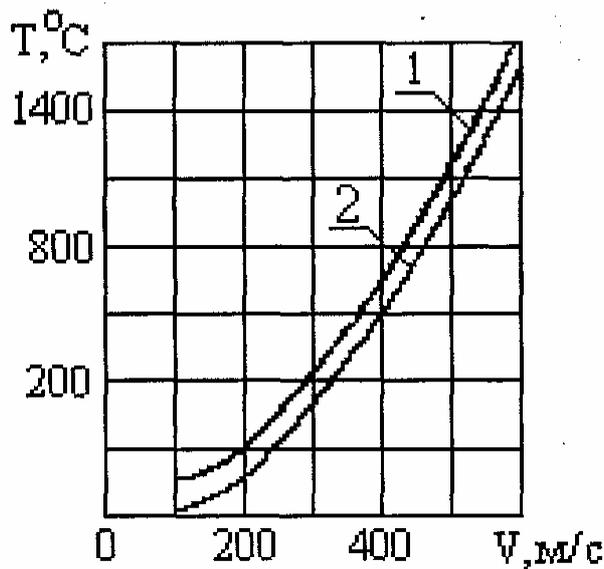


Рис. 3. Графики теоретической (1) и экспериментальной (2) температуры газового потока

Общей схемой таких тепловых установок является воздушный компрессор (К) с давлением нагнетания от 10 до 50 кг/см и более, мощностью до 500 кВт. Нагнетательный трубопровод компрессора (К) соединен с расширительным цилиндром (РЦ) малой емкости который сообщается с ресивером (Р). Из расширительного цилиндра (РЦ) производится подача воздуха под давлением на температурный разделитель (ТР), после которого трубопроводы горячего и холодного воздуха снабжены пробковыми кранами (ПК) выброса в атмосферу или подачи потребителю горячего (Г) или холодного (Х) воздуха. После потребителя воздух поступает в обратный трубопровод на всасывающий патрубок (ВП) компрессора. Т. е. компрессор (К) за-

кольцовывается тем или иным потоком для работы на себя. Горячий или холодный поток воздуха с соответствующим потенциалом температуры, многократно проходя через температурный разделитель (ТР), многократно увеличивает свой температурный потенциал до любых высоких или низких температур. Такая рекуперация тепловых потоков показывает преимущества перед преобразованием энергии в электричество. В эту пользу указывают простота эксплуатации таких установок, безопасность и отсутствие каких-либо регулирующих устройств, аккумуляция энергии. При расчете температур при рекуперации по общему балансу:

$$m_{\Gamma} t_{\Gamma} = m_{\text{X}} t_{\text{X}}, \quad (7)$$

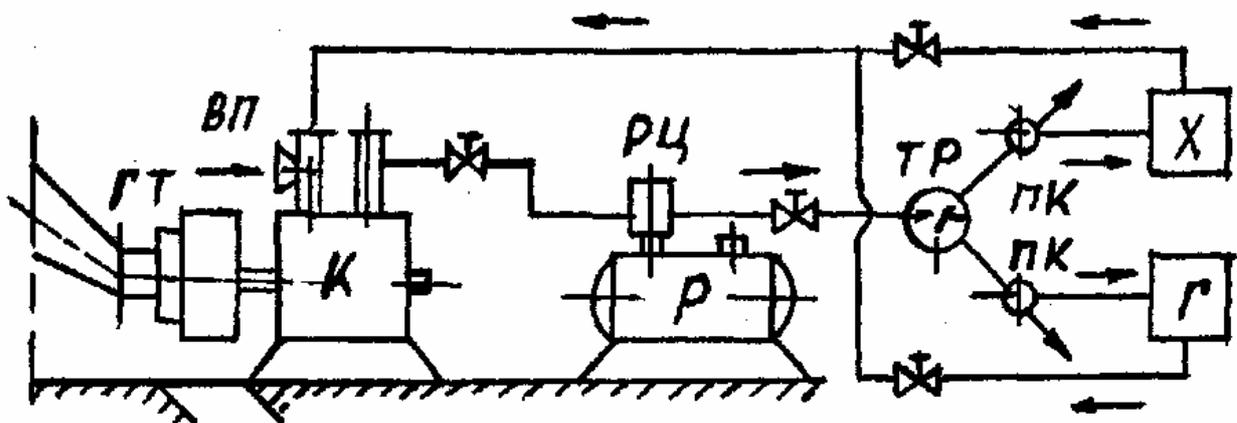


Рис. 4. Схема тепловой гидроустановки

где доли масс  $m_2$  и  $m_x$  определяются из теплового баланса вихревой трубы

$$MDt_x = (1 - m)Dt_G. \quad (8)$$

Для расчета горячего потока воздуха принимают  $m = 0,9$ , что соответствует углам наклона газовой струи к полости 75 ... 80.

На рис. 5 показана схема температурной рекуперации горячего и холодного пото-

ков воздуха в зависимости от скорости истечения и времени. Кривые температур рекуперации показывают прямую зависимость от производительности компрессора. Поэтому при выборе компрессора следует руководствоваться не только напором давления, но и производительностью.

Выбор компрессора производится по мощности установки, в частном гидротурбины (ГТ) или механического привода.

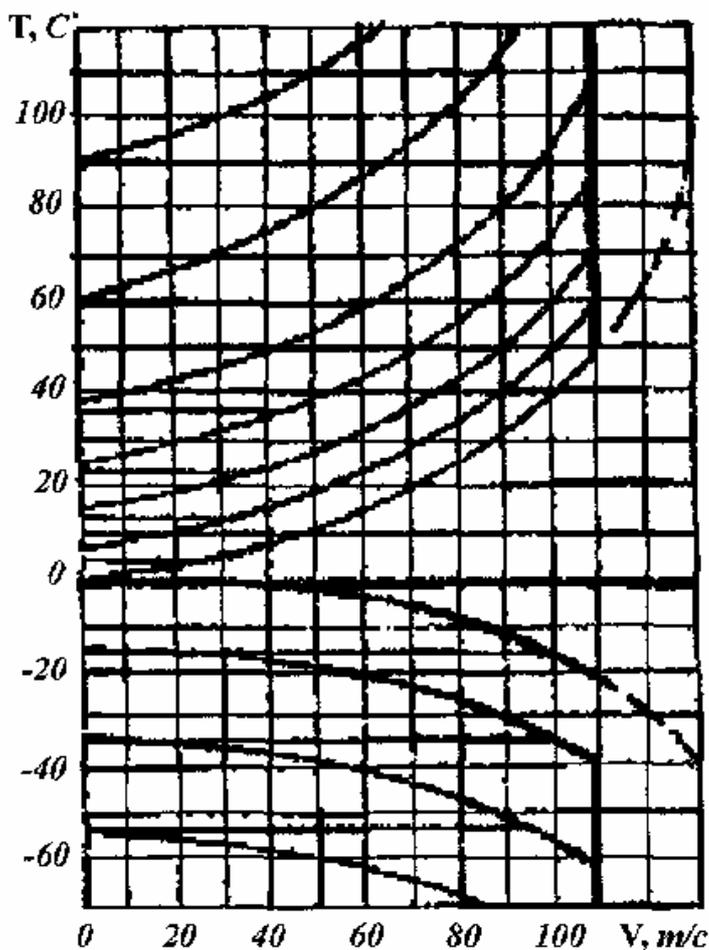


Рис. 5. Схема температурной рекуперации потоков воздуха

### Список литературы

1. Прокопов О. И. Исследование газовой струи при коптяже скважин // Известия ВУЗов: Нефть и газ. - 2000. - № 6. - С. 29-34.
2. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. - М.: Госиздат техн. теор. литературы, 1949. - 49 с.

3. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969. - 64 с.
4. Мартынов А. В. и др. Что такое вихревая труба. - М.: Энергия, 1976.