

## К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ В ШАХТЕ НА ТЕМПЕРАТУРУ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА

Б. М. ТИТОВ

Правила технической эксплуатации, действующие в СССР, предусматривают, чтобы температура рудничного воздуха в очистных и подготовительных выработках не превышала  $25^{\circ}\text{C}$ , поэтому в связи с переходом работ на некоторых шахтах Донбасса (а в будущем и на шахтах Кузбасса) на глубину до 1000 м и больше чрезвычайно актуальным становится вопрос борьбы с высокими температурами в шахтах.

Наряду с другими факторами на температуру рудничного воздуха оказывает влияние применяемая в шахте энергия. Например, принято считать, что применение электрической энергии вызывает нагревание рудничного воздуха, а пневматической — охлаждение, но достоверных цифровых величин этого нагревания в литературе, как правило, не приводится.

Рассматривая работу шахтной пневматической установки аналогично работе воздушного компрессорного холодильного агрегата, работающего с непрерывным обновлением рабочего тела, можно ожидать, что применение пневматической энергии в шахте приведет к заметному охлаждению рудничного воздуха.

Для определения охлаждающего действия пневматической энергии нами предлагается использовать энтропийную диаграмму и вычисления вести следующим образом.

Примем, что сжатый воздух в месте входа трубопровода в шахтный ствол имеет давление  $P_1 = 6,0 \text{ атм}$ , температуру  $t_1 = 80^{\circ}\text{C}$  и падение давления в трубопроводе от компрессора до потребителей равно  $1,5 \text{ атм}$ .

Параметры рудничного (вентиляционного) воздуха в месте работы пневматических механизмов примем  $P_{ш} = 1,1 \text{ атм}$ ,  $t_{ш} = 24^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_{ш} = 85\%$ .

Предполагая, что во время движения воздуха по трубопроводу его температура понижается до температуры окружающей среды  $t_{ш} = 24^{\circ}\text{C}$  при постоянном давлении [1,424], определим количество тепла, которое передается рудничному воздуху

$$Q_1 = c_p(T_1 - T_{ш}) = 0,24(353 - 297) = 13,5 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$$

Перемещаясь по трубопроводу, воздушный поток преодолевает его сопротивление, и вследствие этого давление воздуха падает (рис. 1) от величины  $p_1$  до  $p_2$ . Если бы воздух расширился от давления  $p_1$  до  $p_2$  адиабатически, то его температура понизилась бы до величины  $T_{2ад}$ , и в дальнейшем на его нагревание от окружающей среды было бы отнято количество тепла

$$Q_0 = c_p(T_{ш} - T_{2ад}).$$

В действительности дело обстоит иначе [2,361]. Воздух, расширяясь от давления  $p_1$  до  $p_2$ , совершает работу, которая расходуется на 1) преодоление

ление сопротивлений в трубопроводе и ускорение воздушного потока вследствие увеличения удельного объема воздуха.

Работа на преодоление сопротивлений в трубопроводе, подобно работе трения твердых тел, превращается в тепло и нагревает сжатый воздух (рис. 1) до температуры  $T_2$ .

$$Q_{тр} = c_p(T_2 - T_{2ад}).$$

При нагревании удельный объем воздуха увеличивается от  $v_{2ад}$  до  $v_2$  и он совершает дополнительную работу, идущую на преодоление сопротивлений в трубопроводе и эквивалентную количеству тепла  $Q_z$ , (рис. 1).

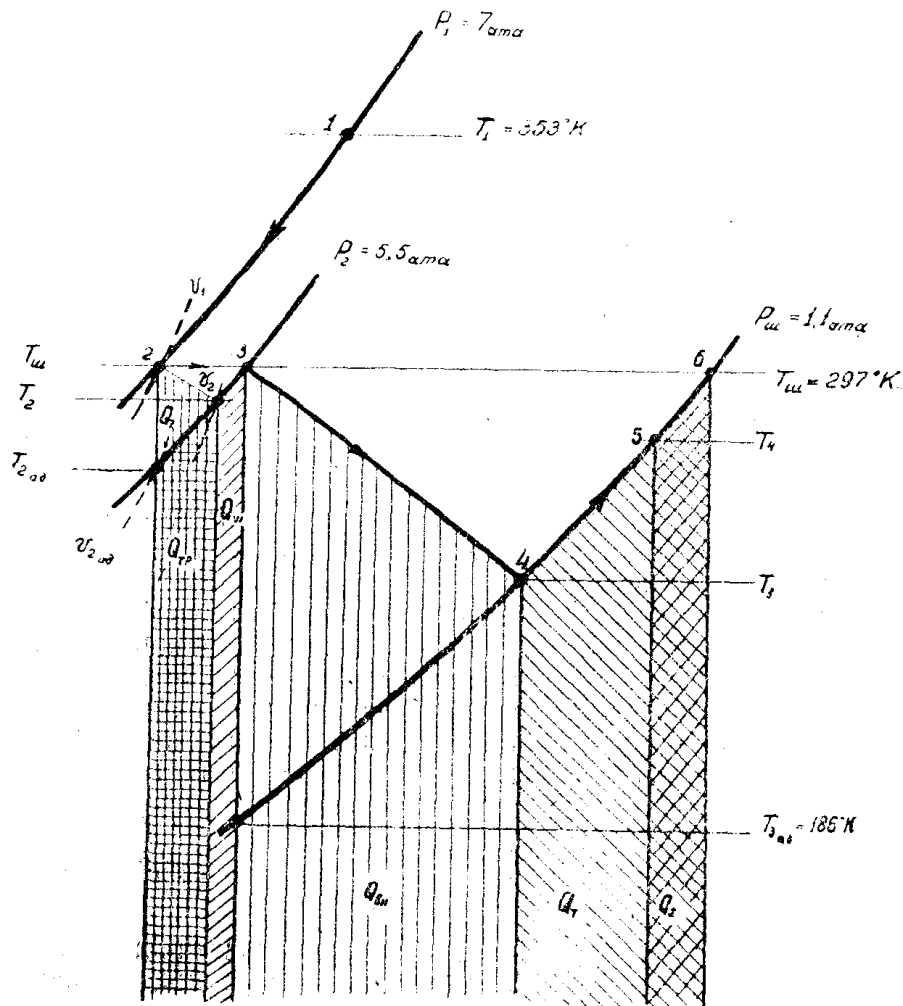


Рис. 1. Энтропийная диаграмма изменения состояния сжатого воздуха при его передаче по трубопроводу и расширении в потребителях пневматической энергии.

1—2 процесс охлаждения воздуха в трубопроводе; 2—3—процесс падения давления воздуха вследствие сопротивлений трения и завихрений в трубопроводе; 3—4—процесс расширения воздуха в потребителях пневматической энергии; 4—5—процесс нагревания расширившегося воздуха вследствие перехода полезной механической работы в тепло; 5—6—процесс нагревания расширившегося воздуха за счет тепла, отнимаемого от окружающей среды.

Работа, расходуемая на увеличение скорости движения воздушного потока от  $w_1$  до  $w_2$ , эквивалентна (рис. 1) количеству тепла

$$Q_w = A \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}$$

и, как показывают вычисления, в рудничных пневматических сетях не превышает  $0,001 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ .

Таким образом, при падении давления в трубопроводе от  $p_1$  до  $p_2$  от рудничного воздуха отнимается количество тепла  $(Q_w - Q_z)$ , но его в пределах точности нашего расчета можно не учитывать и считать, что температура воздуха в трубопроводе остается постоянной и равной температуре окружающей среды  $T_{ш}$ .

При транспортировании воздуха около 20% его [1.409] утекает через неплотности трубопровода. Процесс утечки воздуха через неплотности аналогичен процессу дросселирования газа, для которого, как известно [2,253], справедливо выражение

$$i_1 - i_2 = A \left( \frac{w_2^2}{2g} - \frac{w_1^2}{2g} \right),$$

где  $i_1, i_2$  — теплосодержание газа до и после дросселирования,  $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ ;

$w_1, w_2$  — скорость движения газового потока до и после дросселирования, м/сек.

В нашем случае скорость движения воздушного потока в направлении утечки до и после щели в трубопроводе равна нулю, поэтому:

$$i_1 = i_2.$$

В области подчинения газов закону

$$p \cdot v = RT$$

одинаковому теплосодержанию соответствует одинаковая температура, следовательно, поглощения тепла из окружающей среды или выделения его при утечках сжатого воздуха не происходит.

Часть воздуха, дошедшая с давлением  $p_2$  до потребителей пневматической энергии, расширяется в них и совершает полезную работу, например: бурение, отбойку, перемещение полезного ископаемого, подачу вентиляционного воздуха и т. д. Если бы процесс расширения воздуха в пневматических механизмах протекал адиабатически, без подогрева, за счет внутренних потерь энергии на трение, завихрение и утечку, то температура воздуха в конце расширения была

$$T_{зад} = T_{ш} \left( \frac{p_{ш}}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 297 \cdot \left( \frac{1,1}{5,5} \right)^{0,286} = 186^\circ \text{К}.$$

В действительности за счет дросселирования частичной утечки воздуха через неплотности в потребителях пневматической энергии и теплопроводности стенок корпуса температура воздуха в конце расширения будет не  $T_{зад}$ , а  $T_3$ . Эти внутренние потери энергии не нагревают и не охлаждают рудничного воздуха.

Величину внутренних потерь энергии принято учитывать адиабатическим коэффициентом мощности, который в лучшем случае не превышает величины  $\eta_{ад} = 0,5$ .

Следовательно, количество тепла, эквивалентное совершенной механической работе, равно

$$\begin{aligned} Q_{мех} &= (1 - K_{ут}) \eta_{ад} \cdot c_p \cdot (T_{ш} - T_{зад}) = \\ &= (1 - 0,2) \cdot 0,5 \cdot 0,24 \cdot (297 - 186) = 10,6 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}, \end{aligned}$$

где  $K_{ут}$  — коэффициент, учитывающий утечку воздуха из пневматической сети.

Одна часть этой работы, идущая на преодоление трения в механизмах, подачу вентиляционного воздуха, перемещение грузов по горизонтальному направлению, полностью переходит в тепло  $Q_m$  и нагревает охладившийся при расширении воздух (рис. 1) до температуры  $T_4$ ; другая часть работы, идущая на перемещение груза по вертикали и разрушение межмолекулярных связей, в тепло не переходит. Соотношение между этими частями работы в каждом отдельном случае будет различным, и пока достоверно неизвестно, но все-таки можно утверждать, что в основном работа, совершаемая сжатым воздухом, переходит в тепло. Ориентировочно примем часть механической работы, переходящую в тепло, равной 80%.

Таким образом, на нагревание воздуха, расширившегося в пневматических механизмах до температуры  $T_m$  от окружающей среды, отнимается следующее количество тепла

$$Q_2 = (1 - K_{\text{мех}}) Q_{\text{мех}} = (1 - 0,8) \cdot 10,6 = 2,1 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}},$$

где  $K_{\text{мех}}$  — коэффициент, учитывающий, какая часть механической работы превращается в тепло.

Значительно больше на охлаждение рудничного воздуха влияет увлажнение его после расширения.

При сжатии в компрессоре и последующем охлаждении относительная влажность сжатого воздуха увеличивается, а абсолютная уменьшается за счет выделения влаги в промежуточном и последующем холодильниках, воздухохранилище и пневматической сети.

После расширения и нагревания воздуха до температуры окружающей среды относительная влажность его, в связи с увеличением объема, резко уменьшается, а затем за счет испарения влаги, находящейся в горных выработках, сравнивается с влажностью рудничного воздуха. На испарение влаги затрачивается скрытая теплота парообразования, которая отнимается от окружающей среды и тем самым снижает температуру рудничного воздуха.

Определим, сколько поглощается тепла вследствие увлажнения расширившегося сжатого воздуха при установке за компрессором последующего холодильника и без него.

Если за компрессором не установлен последующий холодильник, то можно считать, что сжатый воздух поступает в шахту при относительной влажности  $\varphi_1 = 20\%$  ( $t_1 = 80^\circ\text{C}$  и  $p_1 = 7 \text{ атм}$ ), и его абсолютная влажность равна [1,14]

$$\gamma'_s = \varphi_1 \cdot \gamma_s = 0,2 \cdot 0,293 = 0,059 \text{ кг/м}^3.$$

При охлаждении до температуры  $T_m$  и расширении до давления  $P_m$  вследствие увеличения объема абсолютная влажность воздуха будет

$$\gamma'_{\text{вн}} = \gamma'_s \frac{p_m \cdot T_1}{p_1 \cdot T_m} = 0,059 \frac{1,1 \cdot 353}{7,297} = 0,011 \text{ кг/м}^3.$$

Абсолютная же влажность шахтного воздуха при  $\varphi_m = 85\%$  и  $t_m = 24^\circ\text{C}$  равна

$$\gamma''_{\text{в.п}} = \varphi_m \cdot \gamma_s'' = 0,85 \cdot 0,0218 = 0,0185 \text{ кг/м}^3,$$

следовательно, для доувлажнения расширившегося воздуха часть влаги должна будет испариться из окружающей среды и тем самым охладить

рудничный воздух, поглотив скрытую теплоту парообразования. Приняв, согласно  $p_{ш}$  и  $T_{ш}$ , удельный вес воздуха в шахте  $\gamma_{ш} = 1,26 \text{ кг/м}^3$ , получим

$$Q_3' = \frac{(\gamma'_{в.п} - \gamma''_{в.п}) \cdot r}{\gamma_{ш}} = \frac{(0,011 - 0,0185) \cdot 586}{1,26} = -3,5 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}},$$

где  $r$  — скрытая теплота парообразования,  $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ .

Выделение тепла от охлаждения конденсата на  $(T_1 - T_{ш})$  градусов, в пределах точности расчета, можно не учитывать.

Если за компрессором установить последующий холодильник и сжатый воздух подавать в шахту при  $\varphi_1 = 100\%$ ,  $t_1 = t_{ш} = 24^\circ\text{C}$  и  $p_1 = 7 \text{ атм}$ , то его абсолютная влажность в сжатом состоянии будет [1,14]:

$$\gamma_{s'} = 0,0218 \text{ кг/м}^3.$$

При расширении воздуха от давления  $p_1$  до  $p_{ш}$  и последующем нагревании до температуры окружающей среды  $T_{ш}$  абсолютная влажность его равна

$$\gamma'_{в.п} = \gamma_{s'} \cdot \frac{p_{ш}}{p_1} = 0,0218 \cdot \frac{1,1}{7,0} = 0,00343 \text{ кг/м}^3.$$

Абсолютная же влажность шахтного воздуха при принятых условиях, как нами уже было подсчитано, равна

$$\gamma''_{в.п} = 0,0185 \text{ кг/м}^3.$$

Следовательно, для доувлажнения расширившегося воздуха часть влаги будет испарена из окружающей среды и тем самым от рудничного воздуха отнимается следующее количество тепла:

$$Q_3'' = \frac{(\gamma'_{в.п} - \gamma''_{в.п}) \cdot r}{\gamma_{ш}} = \frac{(0,00343 - 0,0185) \cdot 586}{1,26} = -7,0 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}.$$

Таким образом, каждый килограмм сжатого воздуха, подаваемый в шахту с давлением 6 атм, отработав в пневматических механизмах, передает рудничному воздуху с температурой  $24^\circ\text{C}$  следующее количество тепла:

а) без установки последующего холодильника

$$\Delta Q' = Q_1 + Q_2 + Q_3' = 13,5 - 2,1 - 3,5 = +7,9 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}};$$

б) при установке последующего холодильника

$$\Delta Q'' = Q_2 + Q_3'' = -2,1 - 7,0 = -9,1 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}.$$

Следовательно, охлаждение рудничного воздуха за счет применения пневматической энергии возможно только при установке за компрессором последующего холодильника. Если воздух в трубопроводе успевает охладиться до температуры окружающей среды, то количество тепла, поглощаемого сжатым воздухом непосредственно в месте потребления пневматической энергии, не зависит от установки последующего холодильника и равно

$$\Delta Q_{зад} = Q_2 + Q_3'' = -2,1 - 7,0 = -9,1 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}},$$

т. е. человек, находящийся непосредственно у пневматических механизмов, будет наблюдать охлаждающее действие пневматической энергии.

Сделаем пересчет нагревающего действия сжатого воздуха (если за компрессором не установлен последующий холодильник) на 1 квтч полезно израсходованной энергии, приняв [1,409], что расходу энергии в 1 квтч соответствует расход сжатого воздуха в свободном состоянии  $V = 97,5 \text{ м}^3$ ,

$$\Delta Q_{\text{пн}} = \Delta Q' \cdot V \cdot \gamma = 7,9 \cdot 97,5 \cdot 1,2 = 930 \frac{\text{ккал}}{\text{квтч.}}$$

Определим для сравнения количество тепла, передаваемого рудничному воздуху при применении в шахте электроэнергии.

Общий к.п.д. электроустановки равен

$$\eta = \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{с}} \cdot \eta_{\text{дв}} = 0,96 \cdot 0,95 \cdot 0,85 = 0,77,$$

где  $\eta_{\text{тр}}$  — к.п.д. трансформатора;

$\eta_{\text{с}}$  — к.п.д. шахтной сети;

$\eta_{\text{дв}}$  — средний к.п.д. электродвигателей.

Следовательно, выделение тепла при использовании в шахте электроэнергии с учетом перехода 80% полученной механической работы в тепловую составит:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{эл}} &= 102.3600 \text{ А} \left[ \left( \frac{N}{\eta} - N \right) + K_{\text{мех.}} \cdot N \right] = \\ &= \frac{102.3600}{427} \left[ \left( \frac{1,0}{0,77} - 1 \right) + 0,8 \cdot 1,0 \right] = 950 \frac{\text{ккал}}{\text{квтч.}} \end{aligned}$$

Таким образом, если за компрессором не установлен последующий холодильник, то пневматическая энергия нагревает рудничный воздух так же, как и электроэнергия.

## Выводы

1. Охлаждение рудничного воздуха при применении пневматической энергии происходит только в случае установки между компрессором и воздухоотборником последующего холодильника.

2. При охлаждении сжатого воздуха в трубопроводе до температуры окружающей среды выделение холода в местах работы потребителей пневматической энергии не зависит от установки за компрессором последующих холодильников и равно около 9 ккал на килограмм отработавшего компрессорного воздуха.

3. Для увеличения охлаждающего действия пневматической энергии необходимо сжатый воздух охлаждать и осушать на поверхности путем пропускания его через последующие холодильники.

4. Если за компрессором не установлен последующий холодильник, то пневматическая энергия нагревает рудничный воздух не меньше, чем электроэнергия.

5. Последующие холодильники должны не только устранить нагревание рудничного воздуха, но и уменьшить потерю давления в трубопроводе, которая, как известно, прямо пропорциональна скорости движения воздуха в квалрате.

6. Каждый килограмм сжатого воздуха, подаваемый в шахту при давлении 6 атм и установке за компрессором последующего холодильника, поглощает в среднем около 9 ккал тепла, а при работе компрессора без последующего холодильника выделяет в среднем 8 ккал тепла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ильичев А. С. Рудничные пневматические установки. Углетехиздат, 1953.
2. Шюле В. Техническая термодинамика. т. 1, кн. 1. ОНТИ, НКГП СССР, 1935.