Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXIX, вып. 3, 1961 г.

О ТЕМПЕРАТУРНОМ ПРЕДЕЛЕ РАСШИРЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА В ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИНАХ

В. Д. Зиневич

Фактические процессы в пневматических двигателях горных машин протекают при неполном расширении воздуха. Главная причина выпуска в атмосферу еще работоспособного воздуха заключается в необходимости ограничить снижение температуры внутри цилиндра определенным пределом, чтобы предотвратить затвердевание смазки и образование льда [1, 2].

Отсутствие термодинамических исследований изменения температуры газа в резервуаре, из которого воздух вытекает в атмосферу или в который воздух втекает под давлением, очевидно, и способствовало неправильному представлению, будто температура воздуха прекращает снижаться, если расширение его внутри замкнутого объема заменяется расширением путем свободного выпуска в среду с меньшим давлением. Исходя из этих представлений, самой низкой температурой в цилиндре считалась температура в конце расширения. Снижение температуры в конце расширения рекомендовалось ограничивать величиной —50° [3].

Далее в первом приближении показано изменение температуры воздуха в резервуаре, из которого часть воздуха выпускается или, напротив, в который впускается сжатый воздух.

Исходные предпосылки. 1. Рассмотрим идеальный газ, внутренняя энергия которого однозначно определяется температурой

$$u = \frac{ART}{k-1}, \qquad (1)$$

а весовое количество уравнением состояния

$$G = \frac{PV}{RT}, \qquad (2)$$

где u — удельная внутренняя энергия, *ккал/кг*;
A — тепловой эквивалент работы, *ккал/кгм*;
R — газовая постоянная, *кгм/кг·град*;
T — температура по абсолютной шкале, *град*;
G — вес газа объемом V *м*^{3}, *кг*;
P — давление, *кг/м*^{2};
k — показатель адиабаты, $k = 1{,}4$.

2. Предположим, что герметичная и теплоизолированная система образована двумя резервуарами, сообщение между которыми устанавливается краном. Первый резервуар имеет постоянный объем V и представляет модель цилиндра двигателя для периода свободного выпуска и периода наполнения вредного пространства. Второй резервуар, значительно большего объема, представляет модель атмосферного пространства и сети сжатого воздуха для соответствующих периодов.

Изменение температуры. Обозначим начальные и конечные параметры газа в первом резервуаре: P_1 и P_2 — давление, T_1 и T_2 — температура, v_1 и v_2 — удельный объем, u_1 и u_2 — удельная внутренняя энергия и, наконец, G_1 и G_2 — вес.

Во втором резервуаре вес газа до сообщения резервуаров между собой обозначим $G_н$, а после сообщения (и вновь разобщения) — $G_к$. Остальным параметрам газа во втором резервуаре дадим те же обозначения, что и в первом, но без индексов, так как они предполагаются неизменными.

Учитывая исходные предпосылки, можно записать уравнение первого закона термодинамики для рассматриваемой системы двух резервуаров, получивших кратковременное сообщение между собой:

$$\Delta U + AL = 0, \tag{3}$$

где ΔU — изменение внутренней энергии системы, *ккал*;
L — внешняя работа системы, *кгм*.

Облекая в математическую форму исходные предпосылки, получаем

$$\Delta U = G_2 u_2 - G_1 u_1 + (G_к - G_н) u; \tag{4}$$

$$G_2 - G_1 + G_к - G_н = 0; \tag{5}$$

$$u_1 = \frac{ART_1}{k-1}; \quad u_2 = \frac{ART_2}{k-1}; \quad u = \frac{ART}{k-1} \tag{6}$$

$$G_1 = \frac{P_1 V}{RT_1}; \quad G_2 = \frac{P_2 V}{RT_2}. \tag{7}$$

Преобразуя уравнение (4) подстановкой величин из уравнений (5), (6) и (7), находим

$$\Delta U = \frac{AV}{k-1}\left(P_2 - P_1 + P_1 \frac{T}{T_1} - P_2 \frac{T}{T_2}\right). \tag{8}$$

Внешняя работа системы L обусловлена изменением объема второго резервуара вследствие изменения в нем весового количества газа, параметры которого не менялись:

$$L = RT(G_к - G_н). \tag{9}$$

С помощью уравнений (5) и (7) преобразуем правую часть равенства (9)

$$L = V\left(P_1 \frac{T}{T_1} - P_2 \frac{T}{T_2}\right). \tag{10}$$

Подставим равенства (8) и (10) в уравнение (3) первого закона термодинамики

$$\frac{AV}{k-1}\left(P_2 - P_1 + P_1 \frac{T}{T_1} - P_2 \frac{T}{T_2}\right) + AV\left(P_1 \frac{T}{T_1} - P_2 \frac{T}{T_2}\right) = 0. \tag{11}$$

Отсюда получаем общую зависимость конечной температуры газа в первом резервуаре от параметров газа в системе

$$T_2 = T \frac{k}{\frac{P_1}{P_2}\left(k\frac{T}{T_1} - 1\right) + 1}. \qquad (12)$$

Для частного случая, когда начальная температура газа в резервуарах одинакова ($T_1 = T$), формула (12) упрощается

$$T_2 = T_1 \frac{k}{\frac{P_1}{P_2}(k-1) + 1}. \qquad (13)$$

Сравнивая полученную зависимость (13) с известным соотношением между температурой и давлением при адиабатических процессах, протекающих в замкнутых объемах,

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}, \qquad (14)$$

можно заметить, что при одинаковых отношениях давления $\frac{P_2}{P_1} \neq 1$ конечная температура по зависимости (13) оказывается всегда ниже — безразлично, вытекает ли газ из первого резервуара во второй $\left(\frac{P_2}{P_1} < 1\right)$ или, наоборот, поступает в него $\left(\frac{P_2}{P_1} > 1\right)$. Например, при снижении давления газа в резервуаре с 5 до 1 *ата* путем адиабатического выпуска в другой резервуар, где поддерживается давление 1 *ата,* температура снижается с $T_1 = 273°$ до $T_2 = 127°$, тогда как при адиабатическом расширении газа в замкнутом резервуаре, если давление уменьшается в пять раз, температура снижается с 273 только до 174°.

При повышении давления газа в резервуаре с 1 до 5 *ата* путем адиабатического впуска того же газа из другого резервуара, где поддерживается давление 5 *ата,* температура газа поднимается с 273 только до 354°, тогда как при адиабатическом сжатии газа в замкнутом резервуаре, если давление увеличивается в пять раз, температура поднимается с 273 до 434°.

Проведенное в первом приближении термодинамическое исследование температуры идеального газа, изменившего свое состояние под влиянием выпуска (и, наоборот, впуска) части первоначального количества, дает основание оценивать температуру воздуха в цилиндрах пневматических машин, когда уже закончилось расширение и идет выпуск отработавшего воздуха (или когда происходит заполнение сжатым воздухом цилиндра при неподвижном поршне).

Выводы

1. В цилиндрах пневматических двигателей неполное расширение сжатого воздуха не предотвращает дальнейшего снижения его температуры, если за расширением следует свободный выпуск отработавшего воздуха. Поэтому все пневматические двигатели распространенных типов, несмотря на отсутствие расширения сжатого воздуха в цилиндрах, при длительной работе подвержены обмерзанию.

2. При проектировании пневматических двигателей необходимо оценивать не только температуру в конце расширения, а общее понижение температуры в цилиндре в результате свободного выпуска по уравнению (12) с учетом того, что начальная температура при наличии расширения снизилась в соответствии с уравнением (14).

Экспериментальное исследование температурного режима в рабочих цилиндрах при современном уровне измерительной техники не представляет непреодолимых трудностей, поэтому испытания пневматических машин следует сопровождать регистрацией не только давления, но и температуры воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман А. П. Применение сжатого воздуха в горном деле. ОНТИ, 1933.
2. Ильичев А. С. Рудничные пневматические установки. Собр. гр., т. I. Углетехиздат, 1953.
3. Борисенко К. С. Пневматические двигатели горных машин. Углетехиздат, 1958.