

УДК 622.673

Ерофеева Наталья Валерьевна, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)

Natalya V. Erofeeva, Associate Professor, Candidate of engineering sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

**К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ТАХОГРАММЫ,
ГРАФИКОВ УСКОРЕНИЙ И ДВИЖУЩИХ УСИЛИЙ
ШАХТНОГО СКИПОВОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОДЪЕМА**

**ON THE QUESTION OF CONSTRUCTING A TACHOGRAM,
ACCELERATION GRAPHS AND GRAPH OF THE DRIVING FORCES
OF MINE SKIP VERTICAL LIFTING INSTALLATIONS**

Аннотация. Приведена методика расчетов семипериодной тахограммы скиповой подъемной установки и движущих усилий на барабане подъемной машины.

Annotation. The author gave in the article a method for calculating the seven-period tachogram of a skip lifting unit and showed the calculation of the driving forces on the drum of the lifting machine.

В известной методике расчета двухскиповой одноканатной подъемной установки производится расчет основных параметров и выбор подъемного сосуда, каната, шкива, подъемной машины, электропривода, расчет кинематики и динамики подъема [1].

В самом простейшем случае диаграмма изменения скорости (тахограмма) имеет трапецевидную форму, называемая трехпериодной тахограммой [2]. Существуют диаграммы, содержащие большее количество периодов. В источнике [1] подробно описана методика расчета шестипериодной диаграммы и вскользь затронута семипериодная диаграмма. В современной литературе также хорошо описаны пяти- и шестипериодные тахограммы, что в принципе является неверным, поскольку отраслевые нормы технологического проектирования ОНТП 5–86 требуют применение семипериодных тахограмм для шахтного подъема. Согласно временным нормам технологического проектирования ВНТП 1–92 допускается принимать трехпериодную тахограмму подъема, но, при условии применения скипов с автономным приводом открывания-закрывания затвора. Так, в источнике [3] описана методика построения трехпериодной тахограммы. Кроме трехпериодной приведены расчеты для пятипериодных тахограмм, хотя в этом же источнике сказано о рекомендации отраслевых норм, в которых для шахтных подъемов следует применять семипериодные тахо-

граммы. К тому же реальные тахограммы имеют сложный характер, но форма их приближена к семипериодной. Поэтому возникает сложность при проектировании шахтных вертикальных скиповых подъемных установок в соответствии с нормами ОНТП 5–86 и необходимость приведения порядка расчета и построения семипериодных тахограмм, а также движущих усилий на барабане подъемной машине при семипериодной тахограмме.

Каждый период семипериодной тахограммы соответствует следующим моментам: первый – трогание скипа с места, второй – движение скипа в разгрузочных кривых с постоянной скоростью, третий – разгон до максимальной скорости, четвертый – движение с постоянной максимальной скоростью, пятый – торможение до ползучей скорости дотягивания, шестой – движение с постоянной скоростью в кривых, седьмой – стопорение по окончании цикла подъема (рис. 1).

ОНТП 5–86 предъявляет следующие требования к семипериодной тахограмме:

- 1) величина основного ускорения a_1 и замедления a_3 не должна превышать $0,75 \text{ м/с}^2$;
- 2) скорость равномерного движения сосуда на втором V_0 и шестом V_a участках тахограммы следует принимать не более $0,5 \text{ м/с}$;
- 3) ускорение a_0 при трогании с места и замедление a_a при стопорении не должно превышать $0,3 \text{ м/с}^2$;
- 4) суммарный путь $h'_{\text{р кр}}$ движения для первого и второго участков следует принимать для скипов, равным длине разгрузочных кривых $h_{\text{р кр}}$, увеличенной на $0,5 \text{ м}$;
- 5) суммарный путь движения на шестом и седьмом участках следует принимать $h''_{\text{р кр}}$ равным для скипов удвоенной длине кривых $h_{\text{р кр}}$.

Правила безопасности в угольных шахтах определяют максимальную скорость V_{max} для скипового подъема проектом.

Методика построения семипериодной тахограммы приведена ниже.

Продолжительность (с) периода ускорения в кривых при спуске порожнего скипа, и путь (м), пройденный скипом за этот период, определяют по формулам

$$t'_0 = \frac{V_0}{a_0} \quad \text{и} \quad x'_0 = \frac{V_0^2}{2a_0}. \quad (1)$$

Путь (м), пройденный скипом в кривых в период равномерной скорости, и время (с):

$$x''_0 = h'_{\text{р кр}} - x'_0 \quad \text{и} \quad t''_0 = \frac{x''_0}{V_0}. \quad (2)$$

Продолжительность (с) периода замедления в кривых, и путь (м), пройденный скипом за этот период:

$$t'_a = \frac{V_a}{a_a} \quad \text{и} \quad x'_a = \frac{V_a^2}{2a_a}. \quad (3)$$

Путь (м), пройденный скипом в кривых в конце подъемной операции в период равномерной скорости, и время (с) (период дотягивания):

$$x''_a = h''_{\text{кр}} - x'_a \quad \text{и} \quad t''_a = \frac{x''_a}{V_a}. \quad (4)$$

Продолжительность (с) периодов основного ускорения и замедления:

$$t_1 = \frac{V_{\max} - V_0}{a_1} \quad \text{и} \quad t_3 = \frac{V_{\max} - V_a}{a_3}. \quad (5)$$

Путь (м), пройденный скипом в период основного ускорения и замедления:

$$x_1 = \frac{V_{\max} + V_0}{2} t_1 \quad \text{и} \quad x_3 = \frac{V_{\max} + V_a}{2} t_3. \quad (6)$$

Путь (м), пройденный скипом с максимальной скоростью и продолжительность (с) периода максимальной скорости

$$x_2 = H - (h''_{\text{кр}} + x_1 + x_3 + h'_{\text{кр}}) \quad \text{и} \quad t_2 = \frac{x_2}{V_{\max}}. \quad (7)$$

где H – высота подъема, м.

Действительное время (с) подъема

$$T_0 = t'_0 + t''_0 + t_1 + t_2 + t_3 + t''_a + t'_a. \quad (8)$$

Средняя скорость (м/с) подъема

$$V_{\text{ср}} = \frac{H}{T_0}. \quad (9)$$

Продолжительность (с) цикла при длительности паузы θ

$$T_{ц} = T_0 + \theta. \quad (10)$$

Для определения движущих усилий на ободе барабана подъемной машины используют динамическое уравнение для двухконцевого вертикального подъема акад. М. М. Федорова [1, 4]

$$F_{дв} = (KQ - m_k[H - 2x])g \pm \Sigma m'a, \quad (11)$$

где K – коэффициент шахтных сопротивлений (для скиповой подъемной установки равен 1,15); Q – грузоподъемность скипа, кг; m_k – погонная масса одного метра каната, кг/м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\Sigma m'$ – приведенная к окружности барабана масса подъемной установки, кг; x – путь, пройденный сосудом от начала подъема, м; a – ускорение (замедление) подъемного сосуда, м/с².

Приведенную к окружности барабана диаметром $D_б$ массу (кг) подъемной установки определяют как сумму приведенной массы всей системы:

$$\Sigma m' = Q + 2m_{ск} + 2m_k L_k + m'_б + m'_{рот} + m'_{ред} + 2m'_{шк}, \quad (12)$$

где L_k – полная длина одной ветви подъемного каната, м; $m'_б$, $m'_{рот}$, $m'_{ред}$, $m'_{шк}$ – приведенная масса соответственно барабана, ротора, редуктора и шкива, кг, $m_{ск}$ – собственная масса скипа, кг

Полная длина одной ветви подъемного каната [1]

$$L_k = H_0 + \frac{\pi D_{шк}}{2} + L_{стр} + n_{тр} \pi D_б + h_{исп}, \quad (13)$$

где H_0 – длина отвеса каната при самом нижнем положении скипа в стволе до оси направляющего шкива, м; $n_{тр} \pi D_б$ – длина витков трения каната количеством $n_{тр}$, м; $L_{стр}$ – длина струны, м; $h_{исп}$ – резервная длина каната, предназначенная для взятия проб на испытание, м; $\frac{\pi D_{шк}}{2}$ – длина каната, огибающая направляющий шкив диаметром $D_{шк}$, м.

Приведенная масса (кг) соответственно подъемной машины, направляющего (копрового) шкива и редуктора

$$m'_б = \frac{1}{g} \frac{GD_б^2}{D_б^2}, \quad m'_{шк} = \frac{1}{g} \frac{GD_{шк}^2}{D_б^2} \quad \text{и} \quad m'_{ред} = \frac{1}{g} \frac{GD_{ред}^2}{D_б^2}, \quad (14)$$

где $GD_{\text{б}}^2$, $GD_{\text{шк}}^2$, $GD_{\text{ред}}^2$ – маховый момент соответственно барабана подъемной машины (без редуктора, двигателя), шкива, редуктора, Н·м².

Приведенная масса (кг) ротора приводного электродвигателя (электродвигателей количеством n) при условии соединения с валом барабана через редуктор

$$m'_{\text{рот}} = n \frac{1}{g} \frac{GD_{\text{рот}}^2}{D_{\text{б}}^2} i^2, \quad (15)$$

где $GD_{\text{рот}}^2$ – маховый момент ротора двигателя, Н·м².

Величину ускорения выбирают из условия максимального использования перегрузочной способности двигателя в период пуска. Определение величин основного ускорения и замедления (м/с²) для неуравновешенной системы подъема хорошо описано в методике источника [4].

Движущее усилие (Н) (при соответствующих значениях x и a):
в начале подъема ($x = 0$, $a = a_0$)

$$F_1 = (KQ - m_{\text{к}}H)g + \Sigma m'a_0;$$

в конце периода ускорения – $x = x'_0$, $a = a_0$

$$F_2 = (KQ - m_{\text{к}}[H - 2x'_0])g + \Sigma m'a_0;$$

в начале периода равномерной скорости в разгрузочных кривых ($x = x'_0$, $a = 0$)

$$F_3 = (KQ - m_{\text{к}}[H - 2x'_0])g;$$

в конце периода равномерной скорости в разгрузочных кривых ($x = x'_0 + x''_0$, $a = 0$)

$$F_4 = (KQ - m_{\text{к}}[H - 2(x'_0 + x''_0)])g;$$

в начале периода нормального ускорения ($x = x'_0 + x''_0$, $a = a_1$)

$$F_5 = (KQ - m_{\text{к}}[H - 2(x'_0 + x''_0)])g + \Sigma m'a_1;$$

в конце периода нормального ускорения ($x = x'_0 + x''_0 + x_1$, $a = a_1$)

$$F_6 = (KQ - m_{\text{к}}[H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1)])g + \Sigma m'a_1;$$

в начале периода равномерной скорости ($x = x'_0 + x''_0 + x_1, a = 0$)

$$F_7 = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1)])g;$$

в конце периода равномерной скорости ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2, a = 0$)

$$F_8 = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2)])g;$$

в начале периода нормального замедления ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2, a = -a_3$)

$$F_9 = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2)])g - \Sigma m'a_3;$$

в конце периода нормального замедления ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3, a = -a_3$)

$$F_{10} = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3)])g - \Sigma m'a_3;$$

в начале периода равномерной скорости в момент входа в разгрузочные кривые ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3, a = 0$)

$$F_{11} = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3)])g;$$

в конце периода равномерной скорости в момент входа в разгрузочные кривые ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a, a = 0$)

$$F_{12} = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a)])g;$$

в начале периода стопорения ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a, a = -a_a$)

$$F_{13} = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a)])g - \Sigma m'a_a;$$

в конце подъема ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a + x'_a, a = -a_a$)

$$F_{14} = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a + x'_a)])g - \Sigma m'a_a.$$

Эффективное усилие (Н) подъема определяют как

$$F_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{\Sigma F^2_t}{T_{\text{эфф}}}}, \quad (16)$$

где F и t – соответственно усилие и продолжительность для каждого периода, H и c ; $T_{\text{эфф}}$ – эквивалентная продолжительность цикла, т. е. время, в течение которого двигатель, вращающийся с максимальной скоростью, отдал бы окружающей среде такое же количество тепла, как и за время одного цикла.

Для общего случая семипериодной тахограммы

$$T_{\text{эфф}} = \beta_1(t'_0 + t''_0 + t_1 + t_3 + t'_a + t''_a) + t_2 + \beta_2\theta, \quad (17)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты, учитывающие ухудшение охлаждения двигателя в периоды соответственно неустановившегося движения и во время паузы (для асинхронных двигателей $\beta_1 = 0,5$ и $\beta_2 = 0,25$) [метод].

Величину F^2t определяют из графика движущих усилий. Для периода с продолжительностью t_2 и прямолинейным изменением усилия от F_7 до F_8 рассчитывают по формуле

$$F^2t = \left(F_7^2 + F_7F_8 + F_8^2\right)\frac{t_2}{3}. \quad (18)$$

При небольшой разности между усилиями, а также при незначительной продолжительности периода принимают

$$F^2t = \left(F_5^2 + F_6^2\right)\frac{t_1}{2}. \quad (19)$$

Если усилия на участке имеют отрицательные значения, то при расчете ΣF^2t эти участки пропускают (в этих периодах двигатель не нагревается).

Для семипериодной тахограммы обычно характерны отрицательные значения усилий F_9 и F_{10} , тогда

$$\begin{aligned} \Sigma F^2t = & \left(F_1^2 + F_2^2\right)\frac{t'_0}{2} + \left(F_3^2 + F_4^2\right)\frac{t''_0}{2} + \left(F_5^2 + F_6^2\right)\frac{t_1}{2} + \\ & + \left(F_7^2 + F_7F_8 + F_8^2\right)\frac{t_2}{3} + \left(F_{11}^2 + F_{12}^2\right)\frac{t''_a}{2} + \left(F_{13}^2 + F_{14}^2\right)\frac{t'_a}{2}. \end{aligned} \quad (20)$$

Эффективная мощность (кВт) подъема

$$P_{\text{эфф}} = \frac{F_{\text{эфф}}V_{\text{max}}}{1000\eta_p}. \quad (21)$$

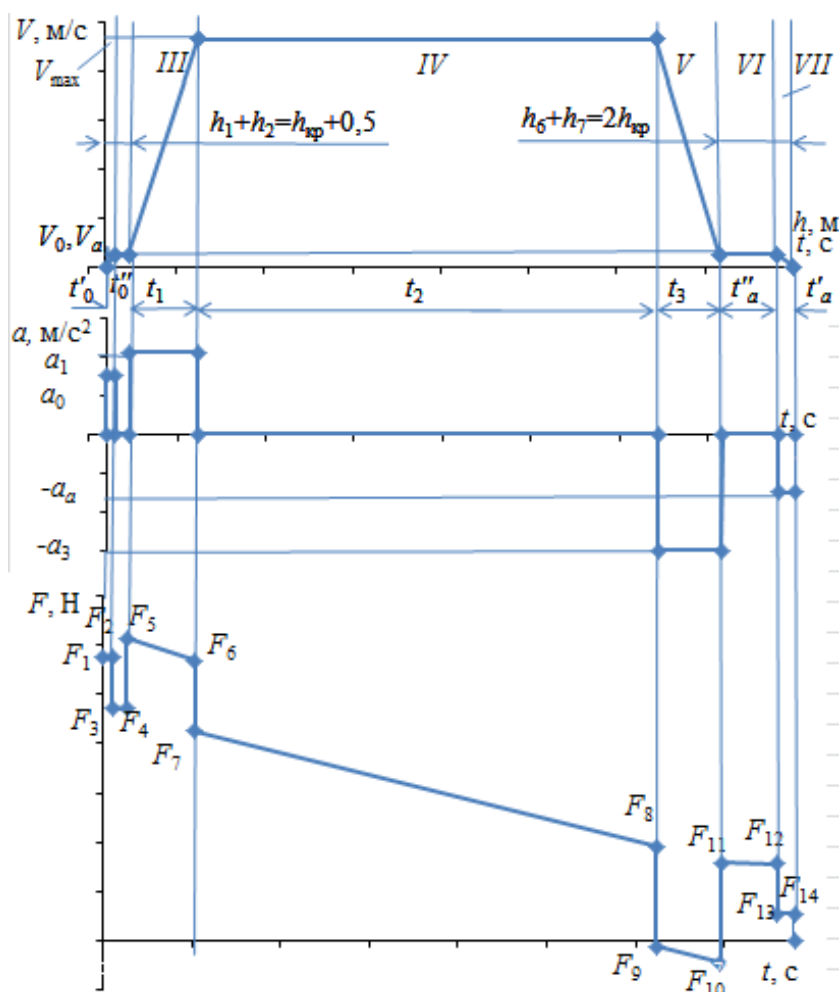


Рис. 1. Графики скорости, ускорений, движущих усилий во времени

Таким образом, используя вышеприведенные зависимости можно определить скорость движения сосуда, его ускорение во времени и рассчитать движущие усилия в каждый период времени, и в конечном счете эффективную мощность подъема, которая не должна превысить установленную.

Список литературы

1. Методика расчета двухскаповой одноканатной подъемной установки. – Москва, 1977. – 89 с.
2. Шахтный подъем : Научно-производственное издание / Бежок В. Р., Дворников В. И., Манец И. Г., Пристром В. А. ; общ. ред. Б. А. Грядущий, В. А. Корсун. – Донецк : ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. – 624 с
3. Методика эксплуатационного расчета шахтного подъема // Стационарные машины : учебник / Уральский государственный горный университет. – Москва : Издательский дом Академии Естествознания, 2017. – С. 236–276.
4. Песвианидзе, А. В. Расчет шахтных подъемных установок : учеб. пособие для вузов / А. В. Песвианидзе. – Москва : Недра, – 1992. – 250 с.