Горные стационарные установки и машины.
Записки Ленинградского горного института. Л., 1988. Т.117

УДК 621.335.2

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ НА ЭВМ

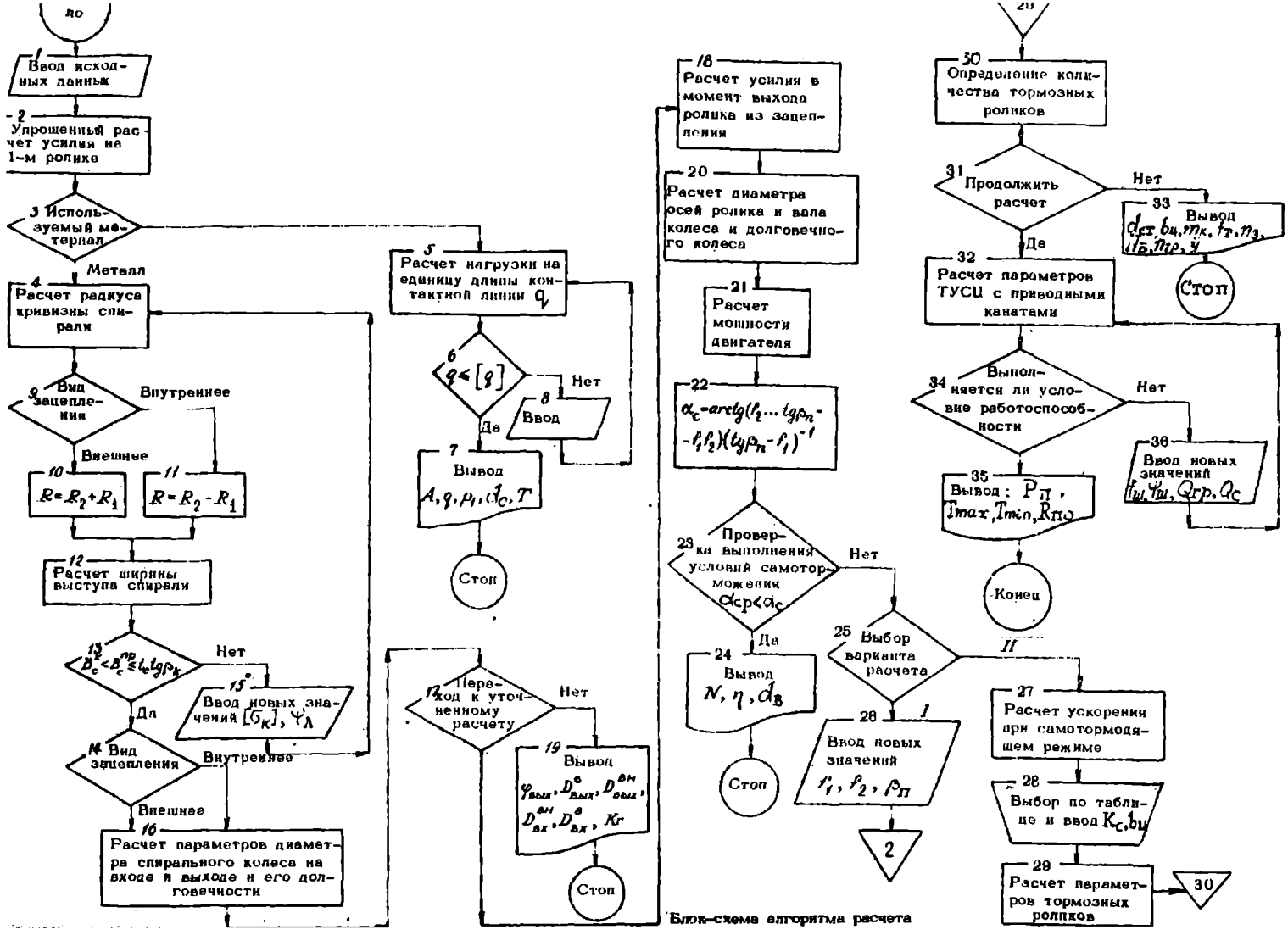
Н.П.БОЙЦОВ, Л.Н.ЗУЕВА

На основании результатов теоретического и экспериментального исследований подъемных установок с тяговым устройством спирально-цевочного типа (ТУСЦ)[x], выполненных в Ленинградском горном институте, были получены расчетные зависимости конструктивных и эксплуатационных параметров. Для определения оптимальных значений этих параметров на ЭВМ разработана блок-схема алгоритма расчета (см. рисунок).

Исходными данными являются следующие параметры:

$a_Б$ – допускаемое по ТБ ускорение движения, м/с^2;
$b_c^{пр}$ – проектная ширина выступа спирали, м;
$b_ц$ – толщина цапфы, м;
$d_р$ – диаметр ролика, м;
$d_{ст}$ – диаметр ступицы, м;
E – модуль продольной упругости, Па;
$E_{пр}$ – приведенный модуль упругости контактной пары, Па;
f – коэффициент сцепления неметаллических роликов со спиралью;
f_1 – коэффициент трения несущих колес;
f_2 – коэффициент трения направляющих элементов;
f_3 – коэффициент трения элементов, поддерживающих приводные и хвостовые канаты;
$f_ш$ – коэффициент трения каната со шкивом;
g – ускорение свободного падения, м/с^2;
$G_{Кр}$ – модуль кручения проволоки, Па;
H – максимальная длина отвеса приводного каната, м;
$I_{вк}$ – момент инерции поперечного сечения вала спирального колеса, м^3;
$I_{ор}$ – момент инерции поперечного сечения оси ролика, м^3;
i – минимальное передаточное отношение механизма;
K_c – коэффициент толщины ступицы;
$K_{ст}$ – статический запас прочности приводных канатов;
$\ell_о$ – длина оси ролика, м;
$\ell_в$ – длина вала, м;
m – масса движущихся частей и груза, кг;

[x] Н.П.Бойцов, А.Б.Незаметдинов. Расчет тягового устройства спирально-цевочного тип Зап.ЛГИ. Т.88. 1981.
Н.П.Бойцов, Е.Т.Скаленкий. Исследование работы самоходного подъемника ким данным стендовых испытаний // Горный журнал. 1982. № 4.



Блок-схема алгоритма расчета

$m_ц$ – масса цилиндра, кг;
$n_{оп}$ – количество транспортных операций в сутки;
$n_{рг}$ – количество рабочих дней в году;
$n_ц$ – количество циклов, соответствующее условному пределу выносливости;
$n_т$ – коэффициент запаса прочности по пределу текучести;
$n_с$ – количество витков спирали, $n_с$ = I для грузового подъема; $n_с$ = 2 для грузолюдского подъема;
$n_{дв}$ – частота вращения двигателя, $с^{-I}$;
$n_у$ – коэффициент запаса при переменных напряжениях;
$\rho_к$ – плотность материала колеса, кг/м^3;
$\rho_х$ – масса I м хвостовых канатов, кг;
$Q_с$ – масса грузонесущей платформы, кг;
$Q_{гр}$ – масса груза, кг;
$[q]$ – допустимая нагрузка, приходящаяся на ролики из неметаллических материалов, Н/м;
R_1 – радиус ролика, м;
$r_ц$ – радиус цилиндра, м;
$T_в$ – тяговое усилие при движении вверх, Н;
$T_н$ – тяговое усилие при движении вниз, Н;
v – скорость поступательного движения подъемника, м/с;
α – угол подъема спирали, град;
$\beta_к$ – угол наклона оси спирального колеса, град;
$\beta_п$ – угол наклона пути, град;
γ – угол трения ТУСЦ, град;
$\Delta_с$ – зазор между роликом и последующим витком спирали, м;
$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \ldots, \Delta t_n$ – монтажные отклонения роликов, м;
$\eta_р$ – коэффициент полезного действия редуктора;
$\eta_{дв}$ – коэффициент полезного действия двигателя;
$\lambda_{св}$ – коэффициент свивки каната;
$[\sigma_к]$ – допускаемое контактное напряжение, Па;
$\sigma_в$ – временное сопротивление, Па;
$[\sigma_и]$ – допустимое напряжение при изгибе осей роликов и вала колеса, Па;
$\tau_к$ – период колебания колеса, с (определяется экспериментальным путем);
$\tau_ц$ – период колебания эталонного цилиндра, с;
$\psi_ш$ – угол обхвата ведущего шкива приводным канатом, град;
$\psi_л$ – коэффициент межосевого расстояния по ширине ролика.

Параметры, входящие в блок-схему, условно обозначены следующим образом:

A – минимальное межосевое расстояние;
$a_с$ – постоянная спирали;
$b_с^к$ – ширина спирали из условия прочности по контактным напряжениям;
c – жесткость оси ролика;
d_0 – диаметр осей роликов;
$d_в$ – диаметр вала колеса;
$D^в_{вых}$ – диаметр спирального колеса при внешнем зацеплении на выходе;

$D_{вых}^{вн}$ – диаметр спирального колеса при внутреннем зацеплении на выходе;
$D_{вх}^{в}$ – диаметр спирального колеса при внешнем зацеплении на входе;
$D_{вх}^{вн}$ – диаметр спирального колеса при внутреннем зацеплении на входе;
$D_{н}^{в}$ – наружный диаметр спирального колеса при внешнем зацеплении;
$D_{н}^{вн}$ – наружный диаметр спирального колеса при внутреннем зацеплении;
$D_{т}^{в}$ – диаметр технологической окружности колеса при внешнем зацеплении;
$D_{т}^{вн}$ – диаметр технологической окружности колеса при внутреннем зацеплении;
$f_{т}$ – расчетный коэффициент трения тормозных роликов;
$H_{б}$ – минимальное расстояние безопасного торможения;
$i_{р}$ – передаточное отношение редуктора;
$J_{к}$ – момент инерции колеса относительно оси;
$J_{ц}$ – момент инерции цилиндра;
$k_{д}$ – динамический коэффициент;
$k_{г}$ – срок годности спирального колеса;
$m_{к}$ – масса спирального колеса;
N – потребляемая мощность;
$n_{сн}$ – коэффициент снижения нагрузки при движении вниз;
$n_{з}$ – коэффициент запаса прочности;
$n_{тр}$ – количество роликов с учетом коэффициента $k_{д}$;
$q_{п}$ – масса I м приводного каната;
P_{1} – усилие на первом ролике;
q – нагрузка, приходящаяся на единицу длины контактной линии кинематической пары из неметаллических материалов;
R_{2} – радиус кривизны спирали;
R_{1} – радиус ролика;
R – нагрузка на коренной части подъемника;
T – тяговое усилие;
$t_{с}$ – шаг роликов;
T_{R} – радиальная составляющая на ролике в момент зацепления;
$T_{вых}$ – максимальное усилие на ролике;
T_{max} – максимальное натяжение каната;
T_{min} – минимальное натяжение каната;
$v_{кр}$ – критическая скорость при движении вниз;
$v_{р}$ – результирующая окружной и поступательной скоростей;
v_{0} – окружная скорость точки рабочего органа, взаимодействующей с роликом;
v_{R} – результирующая взаимодействия спирали с роликом в радиальном направлении;
$\ddot{y}$ – ускорение движения под действием сил тяжести;
$\alpha_{с}$ – расчетное значение угла подъема спирали для проверки выполнения условия самоторможения установки;
$\alpha_{ср}$ – среднее значение угла подъема спирали;
$\alpha_{вх}$ – угол подъема спирали в момент входа ролика в зацепление;

δ_c – толщина спирали;

$\Delta\varphi$ – угол, образованный линией поступательного движения и направлением радиуса-вектора в момент зацепления спирали ролика;

η – коэффициент полезного действия ТУСЦ;

$æ$ – перекрытие спирального зацепления;

$\rho_{вых}$ – радиус-вектор спирали в момент выхода роликов из зацепления;

$\rho_{вх}$ – радиус-вектор спирали в момент входа роликов в зацепление;

$\varphi_{вх}$ – угол поворота радиуса-вектора $\rho_{вх}$;

$\varphi_{вых}$ – угол поворота радиуса-вектора $\rho_{вых}$.

Упрощенный расчет ТУСЦ ведется по следующей методике[x]:

$$T = mg(f_1\cos\beta_п + \sin\beta_п)(f_2\,\mathrm{tg}(\alpha+\gamma)+1+0{,}11\,a_Б;$$

$$\alpha_0 = (10T\ell_0[\sigma_и]^{-1}\cos^{-1}(\alpha+\gamma))^{1/3}$$

$$P_1 = (T+3EI_{ср}\ell_0^{-3}(n_c\Delta t_1 + \sum_{i=2}^{n-1}\Delta t_i)n_c^{-1};\quad A = d_р;$$

$$q = (P_1(\mathrm{tg}(\alpha+\gamma)\,d_р(i+1)(2fA\,b_c^{пр})^{-1};$$

$$\ell_c = (3{,}06P_1[\sigma_и]^{-1}\cos(\alpha+\gamma))^{1/2}\cdot\quad t_c = (d_р+\delta_c+\Delta_c)\cos\beta_к$$

$$\varphi_{вых} = \pi(d_р\cos\beta_к + 0{,}5\,t_c + 2\,b_c^{пр}\sin\beta_к)t_c^{-1}$$

$$a_c = ((d_р+\delta_c+\Delta_c)\cos\beta_к)(2\pi)^{-1};\qquad \rho_{вых} = a_c\varphi_{вых}$$

$$R_2 = a_c(\varphi_{вых}^2+1)^{3/2}(\varphi_{вых}^2+2)^{-1}.$$

$$A = (0{,}418[\sigma_к]^{-1})^2\,2P_1E_{пр}(R_1\pm R_2)(\Psi_1\cos(\alpha+\gamma)R_1R_2)^{-1};\quad c^2 =$$

$$D_{вых}^{в} = 2A+(2\,t_c-d_р)\cos\beta_к;\quad D_{вых}^{вн} = 2A+(2\,t_c+d_р+2\delta_c$$

$$D_{вх}^{в} = D_{вых}^{в}+2\,t_c\,n_c\cos\beta_к;\quad D_{вх}^{вн} = D_{вых}^{вн}+2\,t_c\,n_c\cos\beta_к$$

Уточненный расчет ТУСЦ проводится с учетом перекрытия спирального зацепления и динамического воздействия взаимодействующих элементов:

$$æ = 3P_1\,b_c^{пр}((2\cos(\alpha+\gamma)[\sigma_и]\,\delta_c^2)^{-1};\quad \rho_{вх} = a_c(\varphi_{вых}$$

$$D_н^{в} = D_{вх}^{в}+2a_c(\arcsin(æ\rho_{вых}^{-1})+\arcsin(æ\rho_{вх}^{-1}))$$

$$D_н^{вн} = D_{вх}^{вн}+2a_c(\arcsin(æ\rho_{вых}^{-1})+\arcsin(æ\rho_{вх}^{-1}));$$

---

[x] Н.П.Бойков, А.Б.Незаметдинов. Расчет тягового устройства спирально

$$D_T^{В} = D_{ВЫХ}^{В} + 2a_c \arcsin\left(æ \rho_{ВЫХ}^{-1}\right);\quad \alpha_{ВЫХ} = \operatorname{arctg} 2a_c \left(D_T^{ВН} - 2\delta_c\right)^{-1};$$

$$D_T^{ВН} = D_{ВЫХ}^{ВН} + 2a_c \arcsin\left(æ \rho_{ВЫХ}^{-1}\right);$$

$$T_{ВЫХ} = mg\left(f_1 \cos\beta_П + \sin\beta_П\right)\left(f_2 \operatorname{tg}\left(\alpha_{ВЫХ} + \gamma\right)\right);$$

$$c = 48EI_{ОР}\ell_0^{-3} \quad v_0 = 2\pi\rho_{ВХ}t_c^{-1} \quad \Delta\varphi = a_c d_p + \left(a_c^2 d_p^2 + 4\rho_{ВХ}^2 d_p \Delta t\right)^{1/2} 2\rho_{ВХ}^{-2};$$

$$v_p = \left(v_0 + v^2 + 2v_0 v \sin\Delta\varphi\right)^{1/2};\quad \alpha_{ВХ} = \operatorname{arctg} 2a_c \left(D_T^{ВН} - 2\delta_c\right)^{-1}.$$

$$v_R = v_p \cos\left(\arcsin\left(\left(v_0^2 + v_p - v^2\right)\left(2v_0 v_p\right)^{-1}\right) + \alpha_{ВХ} \arcsin\left(\left(d_p - 2a_c\Delta\varphi - 2\Delta t\right) d_p^{-1}\right)\right);$$

$$T_R = T\sin\left(\arcsin\left(d_p - 2a_c\Delta\varphi - 2\Delta t\right) d_p^{-1}\right) + T\operatorname{tg}\left(\alpha_{ВХ} + \gamma\right)\cos\left(\arcsin d_p - 2a_c\Delta\varphi - 2\Delta t\right) d_p^{-1} + \Delta\varphi\Big);$$

$$k_Д = \left(1 + cmv_R^2 T_R^{-1}\right)^{1/2};\quad d_0 = \left(10T_R \ell_0 k_Д \left[\sigma_И\right]^{-1} \cos^{-1}\left(\alpha_{ВХ} + \gamma\right)\right);$$

$$d_В = \left(10T_R \ell_В k_Д \left[\sigma\right]^{-1} \cos^{-1}\left(\alpha_{ВХ} + \gamma\right)\right)^{1/3}.\quad k_Т = 0{,}5\, n_Ц t_c H^{-1} n_{ОП} n_{РГ}^{-1}.$$

Для определения мощности двигателя подъемника вычисляется среднее значение угла подъема спирали

$$\varphi_{ВХ} = \rho_{ВХ} / a_c;$$

$$\alpha_{СР} = \left(\varphi_{ВХ} - \varphi_{ВЫХ}\right)^{-1}\left(\varphi_{ВХ}\operatorname{arctg}\varphi_{ВХ}^{-1} - \varphi_{ВЫХ}\operatorname{arctg}\varphi_{ВЫХ}^{-1} + 0{,}5\ln\left(1+\varphi_{ВХ}^2\right)\left(1+\varphi_{ВЫХ}^2\right)^{-1}\right).$$

При направлении движения вниз

$$\eta = \sin\beta_П \operatorname{tg}\alpha_{СР}\left(\left(\sin\beta_П + f_1\cos\beta_П\right)\left(f_2\operatorname{tg}\left(\alpha_{СР} + \gamma\right) + 1\right)\operatorname{tg}\left(\alpha_{СР} + \gamma\right)\right)^{-1}.$$

При направлении движения вверх

$$\eta = \left(\sin\beta_П - f_1\cos\beta_П\right)\left(f_2\operatorname{tg}\left(\alpha_{СР} - \gamma\right) + 1\right)\operatorname{tg}\left(\alpha_{СР} - \gamma\right)\sin^{-1}\beta_П \operatorname{tg}^{-1}\alpha_{СР};$$

$$i_p = n_{ДБ} t_c \left(60v\right)^{-1};\qquad N = Tv\left(1000\,\eta_p\,\eta_{ДВ}\,\eta\right)^{-1}.$$

Ускорение поступательного движения и масса опирального колеса рассчитываются по формуле:

$$\alpha_c = \operatorname{arctg}\left(f_2 \operatorname{tg}\beta_П - f_1 f_2\right)\left(\operatorname{tg}\beta_П - f_1\right)^{-1}.$$

При условии $G_{КР}$ известно

$$J_К = \tau_К^2 G_{КР}\left(4\pi^2\right)^{-1}.$$

При условии $G_{кр}$ неизвестно

$$J_{ц} = 0{,}5\, m_{ц}\, r_{ц}^{2};\quad J_{К} = J_{ц}\,(\tau_{К}/\tau_{ц})^{2};$$

$$\ddot{y} = mg\,\rho_{вых}\,(\sin\beta_{п} - f_1\cos\beta_{п})(1 - f_2\,ctg\,\alpha_{вых})(f_2 J_{К} a_{с}^{-1}\quad \alpha_{вых} +$$

$$+\ \rho_{вых}(m + J_{К}\,a_{с}^{-2})(1 - f_2\ ctg\ \alpha_{вых}))^{-1}.$$

$$m_{К} = \pi\rho_{К}((0{,}25 d_{ст}^{2} - 0{,}25 d_{в}^{2})\,\ell_{в} + b_{ц}(\rho_{вх}^{2} + \rho_{вых}^{2})\cos\beta_{К}) + 0{,}5 a_{с}\delta_{с}\rho_{К}(b_{с} +$$

$$+\Delta_{с})((\varphi_{вх}(1+\varphi_{вх}^{2})^{1/2} + \arcsin\varphi_{вх}) - ((\varphi_{вых}(1+\varphi_{вых}^{2})^{1/2} + \arcsin\varphi_{вых}));$$

$$= (\ddot{y}\,v(m\rho_{вых} + \rho_{вых} J_{К} a_{с}^{-2}) - v^{2}\rho_{вых}(\sin\beta_{п} - f_1\cos\beta_{п}))(v^{2} mg\rho_{вых} ctg\alpha_{вых} \times$$

$$\times(f_1\cos\beta_{п} - \sin\beta_{п}) - v^{2}(J_{К} a_{с}^{-1}\ \sin^{-2}\alpha_{вых} + m\rho_{вых} ctg\,\alpha_{вых} + \rho_{вых} a_{с}^{-2} ctg\,\alpha_{вых}))^{-1}.$$

Количество тормозных роликов определяется из отношений:

$$n_{сн} = T_{в}\,T_{н}^{-1}.\quad n_{э} = n_{т}\,n_{сн}\,n_{у}\,k_{д}$$

$$v_{кр} = ((n_{э}^{2} - 1)\,T_{н}\,c^{-1}\,m^{-1})^{1/2};\quad H_{Б} = (v_{кр}^{2} - v)(2a_{Б})^{-1}.$$

$$n_{тр} = H_{Б}\,(2a_{с}\,\pi)^{-1}$$

Расчет основных параметров подъемника с приводными канатами водится по формулам:

$$\rho_{п} = (Q_{гр} + Q_{с})(1 + f_2\,tg(\alpha_{ср} + \gamma))\,tg(\alpha_{ср} + \gamma)(\lambda_{св}\,\sigma_{в}\,K_{ст} - H)^{-1};$$

$$R_{по} = \rho_{п} H + (Q_{с} + Q_{гр})\,tg(\alpha_{ср} + \gamma) + (\rho_{х} H + Q_{с})\,tg(\alpha_{ср} - \gamma);$$

$$T_{max} = (Q_{гр} + Q_{с})(f_1\cos\beta_{п} + \sin\beta_{п})(1 + f_2\,tg(\alpha_{ср} + \gamma))\,tg(\alpha_{ср} + \gamma) + \rho_{п} H(f_3\cos\beta_{п} + \sin\beta_{п});$$

$$T_{min} = ((\rho_{х} H + Q_{с})(\sin\beta_{п} - f_1\cos\beta_{п})(1 - f_2\,tg(\alpha_{ср} - \gamma)) + f_3\rho_{х}\cos\beta_{п})\,tg(\alpha_{ср} - \gamma).$$

Таким образом, предложенный алгоритм расчета подъемной установки позволяет получить сравнительно большой объем параметров создаваемого объекта с ТУСЦ, выполненного из металла и неметалла, предназначенного для подъема груза и опускания, с внутренним спиральным зацеплением роликов и с внешним, в самотормозящем исполнении и в несамотормозящем, с приводом на подъемном сосуде и стационарным с гибким приводным органом.

Программа расчета подъемной установки на ЭВМ составлена на языке фортран.