Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им.Г.В.Плеханова, т.LXIX, вып.1, 1975 г.

СТАТИЧЕСКОЕ УРАВНОВЕШИВАНИЕ НАКЛОННЫХ ПОДЪЕМНИКОВ С РУДНИЧНЫМИ МНОГОКАНАТНЫМИ ПОДЪЕМНЫМИ МАШИНАМИ

В.А.КАБАНОВ, В.А.ЯНУШ

Многоканатные подъемные машины со шкивами трения, достаточно широко применяющиеся в горной промышленности для рудничного подъема по вертикальным стволам, способны решить проблему транспортирования уникальных по величине грузов со значительных глубин.

Расширением области возможного их использования является подъем и перевозка судов через плотины гидроэлектростанций по береговым наклонным путям. С увеличением высоты плотин гидроэлектростанций целесообразно и эффективно в ряде случаев применять судоподъемники различных типов вместо шлюзов. В Советском Союзе на Красноярском гидроузле с напором 100 м сооружается наклонный продольный судоподъемник с самоходной неуравновешенной судовозной камерой. За рубежом созданы наклонные судоподъемники, судовозные камеры которых уравновешены противовесами, с использованием многоканатных подъемных машин с канатоведущими шкивами трения: Ронкьер в 1969 г. в Бельгии [3], Арзвилль в 1972 г. во Франции [1]. Для крупнейших гидроэлектростанций, сооружаемых на реках Сибири и Дальнего Востока, проектантами рассматривается в качестве возможного варианта оборудование судоподъемников многоканатными рудничными подъемными машинами со шкивами трения отечественного производства.

Специфическими особенностями наклонных многоканатных судоподъемников вызваны особые требования к подъемным установкам: к их принципиальной схеме, к статике, кинематике и динамике установки.

Для судоподъемника Зейской ГЭС в Ленгидропроекте в качестве исходной была рассмотрена принципиальная схема, показанная на рис. 1. Судовозная камера и противовесы перемещаются по наклонным рельсовым путям с уклоном $i = 0{,}1$. В этой схеме неудовлетворительно решен вопрос уравновешивания собственного веса канатов на пути перемещения

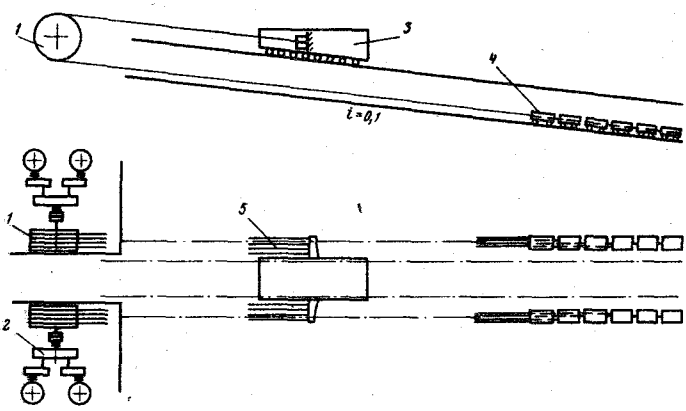


Рис.1. Судоподъемник Зейской ГЭС (проектный вариант)
1 – шахтные многоканатные подъемные машины со шкивами трения; 2 – редукторный привод; 3 – водонаполненная судовозная камера; 4 – секционированные противовесы; 5 – подъемные канаты

концевых грузов.[x)] Такой же дефект имеется и в аналогичных зарубежных судоподъемниках, упомянутых выше.

В процессе работы над основной схемой было внесено предложение устроить пути противовеса с криволинейным профилем. Это может обеспечить эффект полного статического уравновешивания системы без уравновешивающих (хвостовых) канатов или органов навивки переменного радиуса, к применению которых обычно прибегают в практике рудничного подъема. Требуемый эффект уравновешивания системы обеспечивается за счет изменения составляющей веса противовеса, которая направлена вдоль пути криволинейного профиля и создает переменное натяжение ветвей канатов противовеса, компенсирующее изменение натяжения ветвей канатов со стороны судовозной камеры из-за изменяющейся их длины.

Предлагаемый наклонный уравновешенный судоподъемник (рис. 2) работает следующим образом. При вращении в ту или другую сторону ведущего органа 1 (барабана или шкива трения, либо уравновешивающего шкива – при использовании судовозных камер) во встречных направлениях перемещаются судовозная камера 3 и противовес 6, связанные между собой гибким органом (канатами) 2. Судовозная камера движется прямолинейно по наклонному пути 5 с уклоном $i_к = const$, а противовес – по пути 7, имеющему криволинейный профиль, уклон которого переменный

[x)] Для Зейской ГЭС перепад статических сопротивлений за счет неуравновешенных частей канатов определился в 320 и 440 кН в зависимости от конструкции канатов и запасов прочности

($i_п = var$). В связи с этим изменяется натяжение ветвей гибкого органа 2 в точках набегания и сбегания на ведущем органе I. Криволинейный профиль пути обеспечивает такой характер изменения натяжения ветвей со стороны противовеса, при котором разность натяжения ветвей гибкого органа отвечает любому, наперед заданному, закону изменения статических сопротивлений F_s , например, их постоянству на всем протяжении пути перемещения. Для поддержания провисающих под действием собственного веса ветвей гибкого органа 2 предусматриваются путевые ролики 4.

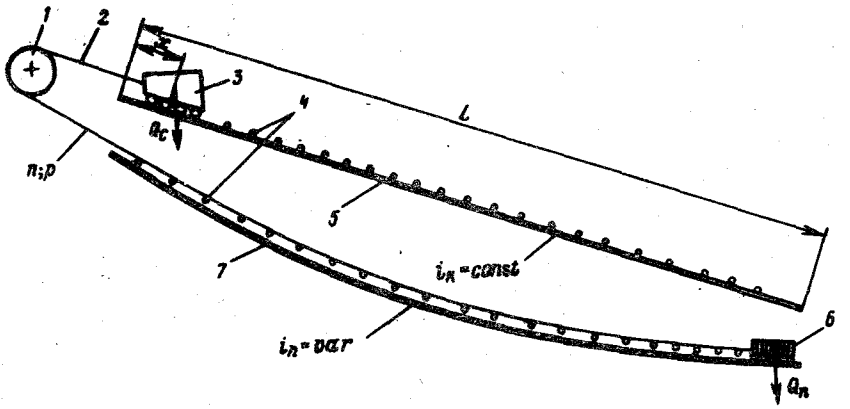


Рис. 2. Принципиальная схема судоподъемника с криволинейным профилем пути для противовеса
1 – ведущий орган; 2 – подъемные канаты; 3 – судовозная камера; 4 – путевые ролики; 5 – пути для камеры; 6 – противовес; 7 – криволинейные пути для противовеса

Перемещающийся по криволинейному пути противовес уравновешивает как подъемный сосуд, так и его изменяющиеся по длине канаты, что встречается впервые в технике подъема.

Преимущества предлагаемой системы: 1) отпадает надобность в уравновешивающих (хвостовых) канатах или в применении органов навивки переменного радиуса; 2) уменьшается разность статических натяжений канатов на ведущем органе, что удешевляет подъемную машину и ее привод; 3) облегчается пусковой режим работы привода благодаря снижению начального значения статических сопротивлений; 4) уменьшаются тормозные усилия в период замедления; 5) повышается степень безопасности против скольжения канатов в наиболее тяжелый период разгона; 6) упрощается автоматизация управления (при условии сохранения постоянства статических сопротивлений в период подъема).

На рис. 3 прямыми 1, 2 и 3 представлены графики изменения статических сопротивлений в функции пути $F_s = f(x)$ для различной степени статической уравновешенности как за счет применения уравновешивающих канатов, так и за счет кривизны профиля пути противовеса.

Определить необходимый уклон пути противовеса $i_п$ в зависимос-

ти от проходимого пути x можно приравниванием величины статических сопротивлений при переменном уклоне пути противовеса $i_п$ и постоянном пути судовозной камеры $i_к$ среднему значению статических сопротивлений для момента встречи концевых грузов. При этом необходимо учесть оба хода судовозной камеры, т.е. подъем и спуск ее.

При подъеме судовозной камеры и спуске противовеса статические сопротивления для произвольного положения концевых грузов можно выразить зависимостью

$$F_{s\,пд} = S - s = Q_c(i_к + f) \pm W + \\ + np(L-x)(i_к + f') - Q_п(i_п - f) - npx(i_п - f'), \quad (1)$$

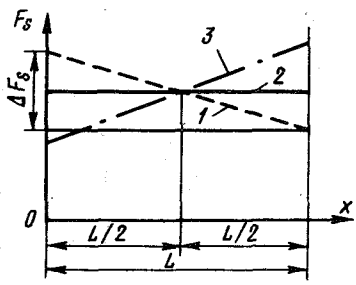


Рис. 3. Статические сопротивления при различной степени уравновешенности системы
1 – при статически неуравновешенной (без хвостовых канатов и при прямолинейных путях); 2 – при статически уравновешенной (с равновесными хвостовыми канатами или, при криволинейном профиле пути противовеса – по предлагаемому решению); 3 – при тяжелом хвостовом канате или при криволинейном профиле пути противовеса (по предлагаемому решению, но с другим характером кривой профиля)

где Q_c и $Q_п$ – номинальная сила тяжести соответственно судовозной камеры с судном и водой и противовеса; L – длина наклонного пути; f и f' – сопротивление движению соответственно камеры с противовесом и канатов по роликам; n – число канатов; p – сила тяжести 1 м каната; W – ветровая нагрузка на судовозную камеру; S и s – сила натяжения соответственно поднимающихся и опускающихся ветвей канатов.

Среднее значение статических сопротивлений для момента встречи концевых грузов, когда уклон пути противовеса становится равным уклону пути камеры ($i_п = i_к = i$), а $x = L/2$:

$$F_{ср}\Big|_{x=\frac{L}{2}} = (Q_c - Q_п)i + (Q_c + Q_п)f \pm W + npLf'. \quad (2)$$

Приравняв выражения (1) и (2), а также полагая, что при водонаполненной камере ее сила тяжести Q_c равна силе тяжести противовеса $Q_п$, найдем уклон противовеса для случая подъема камеры

$$i_{п\,пд} = \frac{Q_c + np(L-x)}{Q_п + npx} \cdot i_к \quad . \quad (3)$$

При спуске судовозной камеры и подъеме противовеса выражение для статических сопротивлений имеет вид

$$F_{s\,сп} = S - s = Q_п(i_п + f) + np(L-x)(i_п + f') - Q_c(i_к - f) \mp W - npx(i_к - f'). \quad (4)$$

Приравнивая выражения (2) и (4), найдем уклон противовеса для случая спуска камеры

$$i_{\text{п сп}} = \frac{Q_c + npx}{Q_п + np(L-x)} \cdot i_к . \qquad (5)$$

Из сопоставления выражений (3) и (5) следует, что величина уклона пути противовеса зависит от концевых грузов, числа канатов и их сил тяжести, величины уклона судовозного пути и местонахождения концевых грузов.

В связи с вогнутым профилем пути противовеса возникает опасение, что канаты будут приподниматься над путевыми роликами, а это недопустимо, так как приведет к осложнениям при их эксплуатации. Ниже приводятся расчетные зависимости для определения максимальных стрел провеса и прогиба для средней точки пути, где эти величины достигают максимума.

Максимальную стрелу провеса подъемных канатов в середине пролета можно подсчитать по приведенной А.И.Дукельским [2] формуле

$$f'_{max} = \frac{npL^2}{8T\cos\alpha} , \qquad (6)$$

где $T = T_{ср}$ – среднее натяжение всех канатов; α – угол наклона пути, град.

Например, для условий Зейской ГЭС $n = 20$, $p = 100$ Н/м, $\alpha = 6^0$ ($\cos 6^0 \cong 1$), $T = 545 \cdot 10^4$ Н, следовательно, в соответствии с формулой (6), $f'_{max} = 29{,}3$ м.

Для определения стрелы прогиба рельсового пути можно найти выражение на основе следующих соображений. Уклон пути как тангенс угла наклона касательной в данной точке пути представляет собой первую производную от перемещения. Интегрируя выражения (3) и (5), установим характер профиля и определим стрелу прогиба профиля пути противовеса.

Используя выражение (3), обозначим

$$\frac{dy}{dx} = i_п = \frac{Q_c + np(L-x)}{Q_п + npx} \cdot i_к .$$

После интегрирования получим

$$y = i_к\left(-x + \frac{Q_п + Q_c + npL}{np} \cdot \ln\left|Q_п + npx\right|\right) + c . \qquad (7)$$

Постоянная c определяется из начальных условий $x = 0$, $y = 0$:

$$c = -i_к \frac{Q_п + Q_c + npL}{np} \cdot \ln\left|Q_п\right| .$$

Окончательно координаты профиля пути противовеса для случая подъема камеры связаны между собой уравнением

$$y = i_к\left[-x + \frac{Q_п + Q_c + npL}{np}\cdot ln\left|\frac{Q_п + npx}{Q_п}\right|\right]. \qquad (8)$$

Интегрирование выражения (5) и определение постоянной при начальных условиях ($x = 0$, $y = 0$, но при другом расположении координатных осей) приводит к уравнению для случая спуска камеры

$$y = i_к\left[-x + \frac{Q_п + Q_c + npL}{np}\cdot ln\left|\frac{Q_п + npL}{Q_п + np(L-x)}\right|\right] \qquad (9)$$

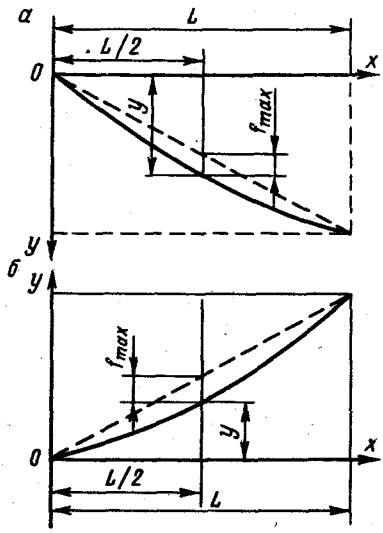


Рис. 4. Расположение координатных осей: а – при подъеме камеры; б – при спуске камеры

Координатные оси для обоих случаев ориентированы так, как показано на рис. 4.

В приведенных выше выводах сделано допущение о равноценности координат x как вдоль наклонного пути, так и вдоль оси абсцисс, что при малых уклонах пути ($i_к \approx 0{,}1$) не дает практически заметных расхождений. Например, для Зейской ГЭС вертикальная координата профиля пути противовеса в середине пролета при подъеме камеры по уравнению (8) $y = 40{,}7$ м; наибольший прогиб, с учетом схемы на рис. 4, а при координате прямолинейного пути в середине пролета, равной 40 м, составит $f_{max} = 40{,}7 - 40 = 0{,}7$ м. При спуске камеры по формуле (9) $y = 39{,}3$ м, соответствующий прогиб (схема по рис. 4,б) $f_{max} = 40 - 39{,}3 = 0{,}7$ м, т.е. для обоих случаев одинаков.

При сопоставлении стрелы провеса канатов (29,3 м) с прогибом пути (0,7 м) видно, что первая из них значительно превышает второй. Это обстоятельство обеспечивает плотное прилегание канатов к поддерживающим роликам при вогнутом профиле пути противовеса.

Снижение статических сопротивлений в период пуска за счет криволинейного профиля пути противовеса для условий Зейской ГЭС составило 16%.

Стандартные подъемные машины допускают максимальную статическую разность натяжений (статические сопротивления) не более 550 кН. Поэтому при обычном прямолинейном профиле пути для противовеса следовало принять три подъемных машины на нагрузку 1260 кН. При криволинейном профиле достаточно двух подъемных машин, так как статические сопротив-

ления снижаются до 1053 кН. Таким образом, в основу расчета экономической эффективности криволинейного профиля пути противовеса может быть положена экономия за счет исключения стоимости одной подъемной машины в размере 220 тыс.руб.

Применение наклонного подъемника с криволинейным профилем пути для противовеса решает проблему статического уравновешивания подъемной системы без применения хвостовых канатов или органов навивки переменного радиуса, при этом повышается степень безопасности по условиям скольжения канатов и обеспечивается значительный экономический эффект.

Литература

1. Виберман Ф. Судоподъемник на канале Рейн-Марна. Der Bauingenier. Berlin-Heidelberg, 1970, N 4.

2. Дукельский А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. М.-Л.,"Машиностроение", 1966.

3. Онохов П.П. Механическое оборудование шлюзов и судоподъемников. М., "Транспорт", 1973.