

С целью экономии места значения конструктивных параметров ГМСП не приводятся. В таблице приведен фрагмент частотного спектра ГМСП (три частоты из двадцати), находящийся в диапазоне рабочих оборотов ДВС.

**Таблица**

№ п/п	Гц	рад/с	об/мин
2	15.198993	95.498090	911.939580
3	32.441925	203.838626	1946.515491
4	51.857877	325.832653	3111.472636

На рис. 2 представлена АЧХ инерционного и АЧХ упругого элементов ГМСП.

### 6. Выводы

В статье демонстрируется универсальность приведенного метода аналитического и численного моделирования динамики дискретных систем на примере силовых передач транспортных машин с объемным гидроприводом и дифференциальными механизмами.

*Исследуется динамика подъемника с канатом, имеющим распределенную массу и без неё; определяется погрешность вычислений по частоте и перемещению клетки.*

### 1. Введение

Динамические переходные процессы в подъемниках, имеющих канаты (шахтные подъемные установки, лифты, башенные, стреловые и мостовые краны и др.), исследуют с различными допущениями. К ним относятся: пренебрежение массой каната или присоединение её к лежащим рядом дискретным массам, пренебрежение изменением длины канатов при подъёме груза и другие [1, 2, 3]. Ряд авторов указывают на значительную погрешность по амплитуде колебаний [4]. Другие авторы считают, что погрешность незначительна [3]. По поводу погрешности по частоте колебаний в работе [5] указывается, что она не превышает 1%. Рекомендации по поводу указанной погрешности для конкретных типов подъемных установок при их различных параметрах в литературе не даются. В настоящей работе ставится задача определения погрешности по

### Литература

1. Александров Е.Е. и др. Автоматизированное управление гидрообъемными трансмиссиями и механизмами поворота гусеничных машин. Харьков, ХГПУ, 1995. – 176 с.
2. Вейц В.Л., Кочура А.Е., Мартыненко А.М. Динамические расчеты приводов машин. – Л.: Машиностроение, 1971. – 352 с.
3. Дружинин Е.И., Штейнвольф Л.И. Динамические модели силовых цепей машин с гидрообъемными передачами. Теория механизмов и машин. 1984, Вып. 36, С. 95–101.
4. Дружинин Е.И., Штейнвольф Л.И. Определение демпфирующих характеристик аксиально-плунжерных гидрообъемных машин. Теория механизмов и машин. 1984, Вып. 37. С. 47–53.
5. Пасынков Р.М., Гайцгори М.М. Расчет гидрообъемных трансмиссий с учетом динамических нагрузок. Вестник машиностроения, 1967, №10, С. 47–51.

УДК 622.647:53.088

## ПОГРЕШНОСТЬ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПРИСОЕДИНЕНИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МАССЫ КАНАТА К ПОДЪЕМНОМУ СОСУДУ

**А.П. Нестеров**

Доктор технических наук, профессор кафедры\*  
Контактный тел.: (057)733–78–18

**Т.Н. Осипова**

Магистр, аспирант кафедры\*

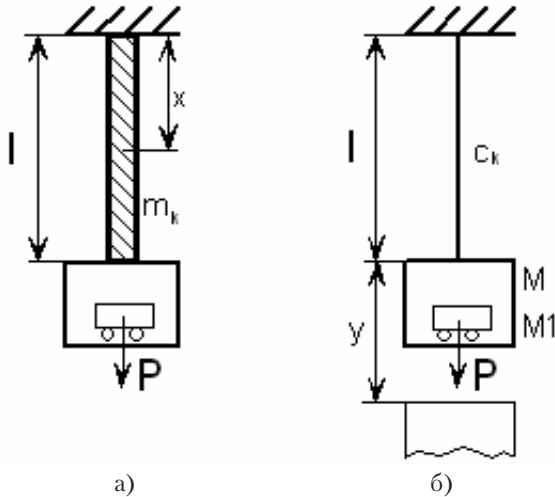
\*Кафедра «Промышленный и автомобильный транспорт»  
Украинской инженерно-педагогической академии  
ул. Университетская, 16, г. Харьков,

перемещению клетки и частоте её колебаний на канате для конкретной шахтной подъемной установки, оборудованной качающимися площадками, с распределённой массой каната и без неё при изменении высоты подъёма во время обслуживания различных горизонтов.

### 2. Основное содержание

Рассмотрим случай загрузки клетки вагонетками на нижнем и верхнем горизонтах, когда орган навивки заторможен механическими тормозами, а клеть свободно висит на канате, так как подъем оборудован качающимися площадками.

Динамическая схема подъемника представлена канатом с распределенной массой (см. рис. 1а) и невесомым канатом (см. рис. 1б), на котором находится дискретная масса, состоящая из клетки и вагонетки, при



**Рисунок 1.** Динамическая схема подъемника при вкатывании вагонетки в клеть: а) канат с распределённой массой  $m_k$ ; б) канат невесомый с жесткостью  $c_k$ ;  $P$  – сила тяжести вагонетки;  $l$  – длина каната;  $M_1$  – масса порожней вагонетки;  $M_2$  – масса клетки;  $M$  – концевая масса;  $m = M + m_3$  – приведенная масса концевого груза;  $m_3$  – масса каната, присоединенная к клетке ( $m_3 = 1/3m_k$ )

вкатывании которой в клеть к ней мгновенно прикладывается постоянная сила тяжести вагонетки  $P$ .

Колебания клетки на канате будем рассматривать из состояния равновесия, то есть при нулевых начальных и граничных условиях.

Вынужденные колебания клетки на канате с распределенной массой, вызванные постоянной силой  $P$ , внезапно приложенной к его нижнему концу (см. рис. 1а), описываются следующим выражением [5]:

$$(u)_{x=l} = \frac{4gPl}{Aa^2\gamma} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \beta_i}{\beta_i(2\beta_i + \sin 2\beta_i)} \left( 1 - \cos \frac{a\beta_i t}{l} \right), \quad (1)$$

- где  $u$  – перемещение нижнего конца каната и клетки;
- $g$  – ускорение свободного падения;
- $A$  – площадь поперечного сечения проволок каната;
- $\gamma$  – вес единицы объема каната;
- $\beta_i$  – собственные числа [6];
- $i$  – количество собственных чисел;
- $x$  – координата рассматриваемого сечения каната;
- $a$  – скорость распространения деформации в канате;
- $t$  – время.

Максимальное перемещение клетки при использовании только одного (первого) собственного числа вычисляется по формуле (1)

$$(u)_{\max} = \frac{2 \cdot 4gPl}{Aa^2\gamma} \frac{\sin^2 \beta_1}{\beta_1(2\beta_1 + \sin 2\beta_1)} \quad (2)$$

где  $\cos \frac{a\beta_1 t}{l} = -1$

Вынужденные колебания клетки на невесомом канате, вызванные внезапно приложенной постоянной силой  $P$  в результате вкатывания вагонетки в клеть, описываются следующим обыкновенным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами:

$$m\ddot{y} + c_k y = P \quad (3)$$

где  $m$  – приведенная масса концевого груза.

Решение уравнения (3) найдем в виде

$$y = y_0 \cos pt + \frac{\dot{y}_0}{p} \sin pt - \frac{P}{c_k} \cos pt + \frac{P}{c_k}, \quad (4)$$

где  $p$  – частота колебаний,  $p = \sqrt{\frac{c_k}{m}}$

При исследовании колебаний клетки при нулевых начальных условиях  $t=0, y(0)=0, \dot{y}(0)=0$  получим

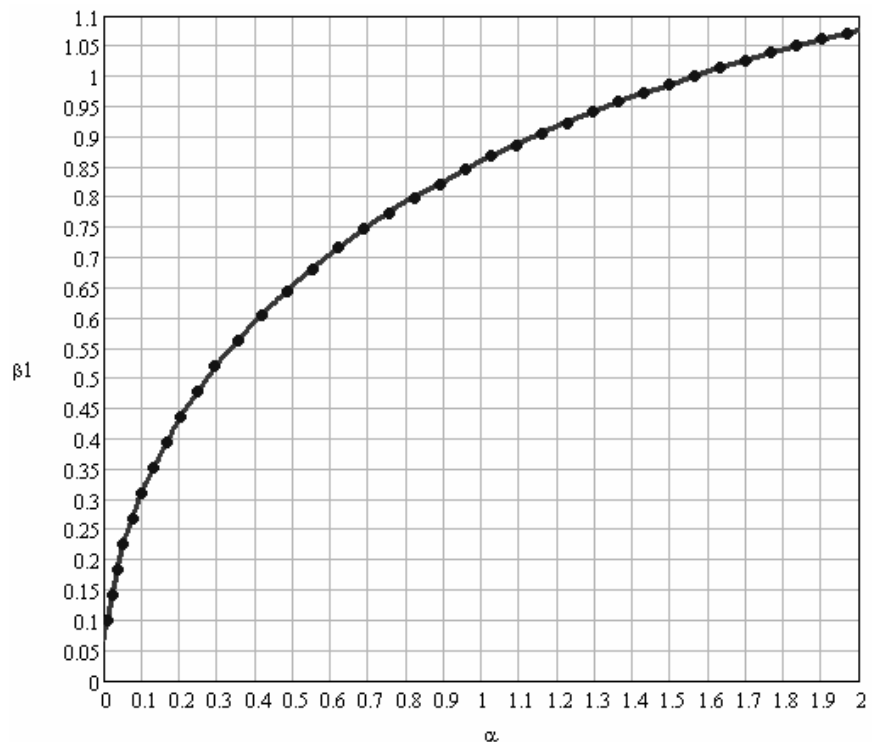
$$y = \frac{P}{c_k} - \frac{P}{c_k} \cos pt, \quad (5)$$

Максимальное перемещение клетки при колебаниях будет при  $\cos pt = -1$

$$y_{\max} = \frac{P}{c_k} + \frac{P}{c_k} = 2 \frac{P}{c_k}, \quad (6)$$

то есть равно удвоенному статическому удлинению каната под действием силы тяжести вагонетки с грузом или без него.

Рассмотрим ряд примеров. Общие исходные данные для двухэтажной клетки для всех примеров следующие:  $l = 135 \dots 735$  м;  $E = 1,2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>;  $A = 1169,44 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $a = 3923$  м/с;  $\gamma = 76,52 \cdot 10^3$  Н/м<sup>3</sup>;  $M_1 = 1078$  кг;  $M_2 = 9240$  кг;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $m/ = 10,95$  кг/м – погонная масса каната;



**Рисунок 2.** Собственное число каната  $\beta_1 = f(\alpha)$

$Q_{гр} = 4000$  кг – масса груза одной вагонетки.

Частота колебаний клетки на весомерном канате

$$P_1 = \frac{b_1 a}{l} \quad (7)$$

Масса всей длины каната

$$m_k = m/l \quad (8)$$

Вычисление собственного числа  $\beta_1$  выполняется по методике [3, 5, 6] в зависимости от отношения массы каната к массе грузовой клетки  $\alpha$  с использованием графика (см. рис. 2).

**Пример 1.** Вкатывание в клеть нижнего горизонта одной порожней вагонетки:  $M = 10318$  кг;  $P = 10575,18$  Н. Данные расчетов сведены в табл. 1.

**Пример 2.** Вкатывание в клеть нижнего горизонта одной грузовой вагонетки:  $M = 14318$  кг;  $P = 49815,18$  Н;  $M_{г/} = 5078$  кг – масса грузовой вагонетки. Данные расчетов сведены в табл. 2.

**Пример 3.** Вкатывание в клеть нижнего горизонта двух грузовой вагонеток. Данные расчетов сведены в табл. 3.

**Пример 4.** Вкатывания порожней вагонетки в клеть, находящуюся на верхней приемной площадке:  $l = 86$  м. Данные расчетов сведены в табл. 4.

**Пример 5.** Вкатывания одной грузовой вагонетки в клеть, находящуюся на верхней приемной площадке. Данные расчетов сведены в табл. 5.

**Пример 6.** Вкатывание двух грузовой вагонеток в клеть, находящуюся на верхней приемной площадке. Данные расчетов сведены в табл. 6.

### 3. Выводы

Анализ численных данных таблиц с использованием метода наименьших квадратов показал, что

1. средняя погрешность при решении задач динамики канатных подъемников с невесомыми канатами составляет по частоте для длинного каната от 6,3 % до 7,8 %, а для короткого – зависит от концевой массы груза и лежит в пределах от 5 % до 9,5 %;

2. средняя погрешность по перемещению клетки для длинного каната зависит от массы концевой груза

**Таблица 1.** Характеристика динамической системы для примера 1

Длина каната l, м	Масса каната, т, кг	Приведенная масса концевой груза m, кг	$\alpha$	$\beta_1$	Максимальное перемещение, м		Частота, с <sup>-1</sup>		Погрешность, %	
					$u_{max}$	$y_{max}$	$P_1$	$P$	По перемещению	По частоте
135	1478	10810,7	0,14	0,36	0,02	0,0203	10,46	9,8	0,038	6,26
235	2573	11175,7	0,25	0,47	0,353	0,354	7,84	7,31	0,113	6,83
335	3668	11540,7	0,35	0,55	0,05	0,0505	6,44	6,02	0,215	6,45
435	4763	11905,7	0,46	0,62	0,065	0,655	5,59	5,2	0,354	6,897
535	5858	12270,7	0,57	0,68	0,08	0,081	4,98	4,62	0,52	7,27
635	6953	12635,7	0,67	0,73	0,095	0,0957	4,51	4,18	0,7	7,26
735	8048	13000,7	0,78	0,78	0,109	0,11	4,163	3,83	0,927	7,94

**Таблица 2.** Характеристика динамической системы для примера 2

Длина каната l, м	Масса каната, m <sub>к</sub> , кг	Приведенная масса концевой груза m, кг	$\alpha$	$\beta_1$	Максимальное перемещение, м		Частота, с <sup>-1</sup>		Погрешность, %	
					$u_{max}$	$y_{max}$	$P_1$	$P$	По перемещению	По частоте
135	1478	14810,7	0,1	0,31	0,0958	0,096	9,01	8,377	0,021	6,99
235	2573	15175,7	0,18	0,4	0,1667	0,167	6,68	6,273	0,058	6,05
335	3668	15540,7	0,25	0,47	0,237	0,238	5,56	5,19	0,118	6,658
435	4763	15905,7	0,33	0,54	0,308	0,309	4,82	4,5	0,192	6,65
535	5858	16270,7	0,41	0,59	0,378	0,379	4,32	4,01	0,288	7,187
635	6953	16635,7	0,48	0,63	0,449	0,45	3,92	3,64	0,39	7,08
735	8048	17000,7	0,56	0,68	0,519	0,522	3,63	3,35	0,52	7,66

**Таблица 3.** Характеристика динамической системы для примера 3

Длина каната l, м	Масса каната, m <sub>к</sub> , кг	Приведенная масса концевой груза m, кг	$\alpha$	$\beta_1$	Максимальное перемещение, м		Частота, с <sup>-1</sup>		Погрешность, %	
					$u_{max}$	$y_{max}$	$P_1$	$P$	По перемещению	По частоте
135	1478	19888,7	0,07	0,27	0,095	0,096	7,84	7,23	0,012	7,85
235	2573	20253,7	0,13	0,35	0,166	0,167	5,84	5,43	0,034	7,61
335	3668	20618,7	0,19	0,41	0,237	0,238	4,86	4,5	0,068	7,25
435	4763	20983,7	0,24	0,47	0,308	0,309	4,24	3,92	0,113	7,49
535	5858	21348,7	0,3	0,52	0,37	0,38	3,79	3,5	0,167	7,53
635	6953	21712,7	0,35	0,56	0,449	0,45	3,46	3,19	0,232	7,78
735	8048	22078,7	0,41	0,6	0,52	0,522	3,2	2,94	0,308	8,168

**Таблица 4.** Характеристика динамической системы для примера 4

Длина каната l, м	Масса каната, m <sub>к</sub> , кг	Приведенная масса концевой груза m, кг	$\alpha$	$\beta_1$	Максимальное перемещение, м		Частота, с <sup>-1</sup>		Погрешность, %	
					$u_{max}$	$y_{max}$	$P_1$	$P$	По перемещению	По частоте
86	941,7	10632	0,09	0,3	0,012	0,013	13,7	12,4	0,018	9,467

**Таблица 5.**

Характеристика динамической системы для примера 5

Длина каната $l$ , м	Масса каната, $m_k$ , кг	Приведенная масса канцевого груза $m$ , кг	$\alpha$	$\beta_1$	Максимальное перемещение, м		Частота, $c^{-1}$		Погрешность, %	
					$u_{max}$	$y_{max}$	$p_1$	$p$	По перемещению	По частоте
86	941,7	14632	0,06	0,25	0,061	0,0611	11,4	10,5	0,008	7,39

**Таблица 6.**

Характеристика динамической системы для примера 6

Длина каната $l$ , м	Масса каната, $m_k$ , кг	Приведенная масса канцевого груза $m$ , кг	$\alpha$	$\beta_1$	Максимальное перемещение, м		Частота, $c^{-1}$		Погрешность, %	
					$u_{max}$	$y_{max}$	$p_1$	$p$	По перемещению	По частоте
86	941,7	19709,9	0,05	0,21	0,06	0,061	9,58	9,1	0,0044	5,01

и равна: для максимальной массы – от 0 % до 0,3 %, для половинной – от 0 % до 0,5 %, для минимальной – от 0 % до 0,85 %; для короткого каната процент погрешности по перемещению клетки зависят от концевой массы, и лежит в пределах 0,0044 – 0,02 %. Полученные погрешности лежат в пределах, допустимых для инженерных расчетов.

Литература

1. Голубенцев А.Н. Динамика переходных процессов в машинах со многими массами. – М.: Машгиз, 1959. – 146 с.
2. Федорова З.М., Лукин И.Ф., Нестеров А.П. Подъемники. – Киев: Вища школа, 1976. – 296 с.
3. Степанов А.Г. Динамика шахтных подъемных установок. – Пермь: УРО РАН, 1994. – 263 с.
4. Вертикальный транспорт на горных предприятиях. Под ред В.Н. Потураева. – М.: Недра, 1975. – 351 с.
5. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: Машиностроение, 1959. – 439 с.
6. Флоринский Ф.В. Динамика шахтного подъемного каната. – М.: Углетехиздат, 1955. – 238 с.

УДК 669.162.216.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА БУРОВОЙ ШТАНГЕ МАШИНЫ ДЛЯ ВСКРЫТИЯ ЧУГУННОЙ ЛЕТКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОМ СПОСОБЕ БУРЕНИЯ.

**А.Н. Селегей**

Аспирант Национальной металлургической академии Украины  
 пр.Гагарина 4, г.Днепропетровск, Украина, 49005.  
 Контактный телефон: (056)3748317, 80979259360  
 e-mail: Selegey@ua.fm

**Ю.В. Мушенков**

Кандидат технических наук, профессор.  
 Заведующий кафедрой теоретической механики  
 Национальной металлургической академии Украины  
 пр.Гагарина 4, г.Днепропетровск, Украина, 49005.  
 Контактный телефон: (056)3748317,3748238, 474506

*Рассмотрена методика определения нагрузок на рабочий орган машины для вскрытия чугунной летки доменной печи. Разработанная в статье методика может быть использована при проектировании современной машины для вскрытия летки и позволяет учитывать геометрические параметры буровой коронки, характеристики ударно-вращательного механизма, а также физико-механические свойства леточных масс.*

### 1. Введение

Машина для вскрытия чугунной летки является важным звеном в ряде машин и механизмов, участвующих в выпуске жидкотекучих продуктов плавки доменной печи. Основными параметрами, которые необходимо задать для проектирования современной машины для вскрытия чугунной летки доменной печи являются крутящий момент, прилагаемый к буровой штанге, осевое усилие на штанге и ударные характе-

ристики для перфоратора, необходимые для быстрого и качественного открытия чугунной летки. Как отмечалось в работе [1], на современных машинах вскрытия летки применяется ударно-вращательный способ бурения. Это обусловлено тем, что новые леточные массы обладают повышенной прочностью и высокими показателями механических характеристик, поэтому вскрытие чугунной летки, особенно на конечных стадиях, необходимо вести с применением удара. Настоящая работа посвящена аналитическому расчету