

Шевченко Н.А., Шевченко Д.Н., Колин С.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЧЕРПЫВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КАНАТНЫХ ГРЕЙФЕРОВ

Изложены результаты исследования на математической модели процесса зачерпывания влияния параметров канатного грейфера на его зачерпывающую способность. Предложены рекомендации по выбору параметров грейфера при его проектировании и модернизации.

Ключевые слова: грейфер, исследование, математическая модель, параметр, зачерпывающая способность, рекомендации, проектирование.

Постановка проблемы. Основными задачами теории канатного грейфера, по мнению большинства авторов [1, 2, 3], являются определение траектории, описываемой кромкой челюсти в материале (так называемой "кривой зачерпывания"), и нахождение действительной зачерпывающей способности грейфера по заданным его конструктивным параметрам и свойствам зачерпываемого материала, которая определяет производительность грейферного крана. Важным также является определение текущего значения усилия в замыкающем канате грейфера, что определяет энергоемкость процесса зачерпывания.

Анализ последних исследований и публикаций. Решение этих задач по известным методикам [1, 2, 3] затрудняет статическая неопределимость грейфера, а также невозможность в этих методиках учесть важное свойство автоматического саморегулирования процесса зачерпывания, присущее канатному грейферу. Чтобы обойти эти вопросы, авторы использовали различные искусственные приемы, упрощающие физическую картину процесса зачерпывания и делающие решения условными. Геометрические параметры грейфера влияют на его зачерпывающую способность [1, 2, 3]. Рекомендации специалистов по выбору значений этих параметров не всегда совпадают. Причем, как правило, они опираются на эмпирические данные, не всегда подтверждаемые в теоретических и экспериментальных исследованиях.

Цель статьи. Целью работы является разработка математической модели процесса зачерпывания материала с учетом параметров грейфера, свойств сыпучего материала и характеристик привода механизма замыкания. Провести на этой модели исследование влияния параметров канатного грейфера на его зачерпывающую способность. По результатам исследований разработать рекомендации по выбору параметров грейфера при его проектировании и модернизации.

Материалы и результаты исследования. Для расчета траектории движения челюстей в материале и нахождения зачерпывающей способности грейфера по заданным его конструктивным параметрам и свойствам зачерпываемого материала будем рассматривать совместную работу грейфера с приводом механизма замыкания, образующую механическую систему «грейфер –

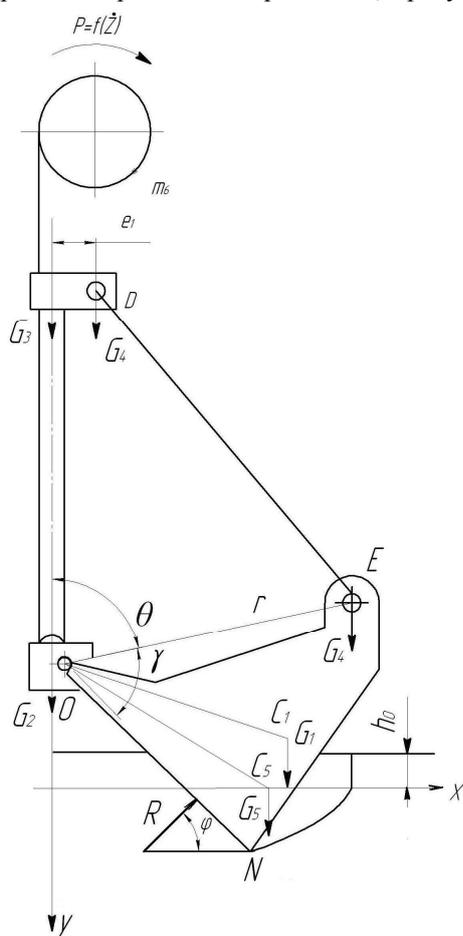


Рис. 1. Расчетная схема грейфера

двигатель», которая без учета гибкости замыкающего каната будет иметь две степени свободы. Расчетная схема такой системы приведена на рис. 1. Так как система симметрична, будем рассматривать равновесие правой половины грейфера.

Положение элементов системы в процессе зачерпывания определяется следующими не зависимыми между собой переменными: θ – угол поворота челюсти; h – вертикальные перемещения траверсы от начала процесса зачерпывания.

Механическая система «грейфер –двигатель» приводится в движение под действием внешних сил:

- P – силы двигателя, приложенной к замыкающему канату;
- G_i – сил тяжести звеньев и зачёрпнутого материала;
- R – равнодействующей сил сопротивления зачерпываемого материала.

$$P = A \cdot \frac{v - \dot{z}}{B + (v - \dot{z})^2}, \quad (1)$$

где A, B – коэффициенты, определяемые параметрами двигателя и привода механизма замыкания грейфера;

v – скорость приведенной к ободу барабану массы механизма замыкания m_6 , соответствующая синхронному числу оборотов двигателя;

\dot{z} – текущая скорость массы m_6 .

На рис. 1 приняты обозначения: G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – силы тяжести соответственно челюсти, половины траверсы, половины головки, штанги, зачерпываемого материала, опирающегося на челюсть.

Положение системы в период зачерпывания определяется лагранжевыми координатами θ, h . Уравнение движения системы составим в виде дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода. Например, для обобщенной координаты θ уравнение Лагранжа имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} = - \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} + Q_\theta, \quad (2)$$

где T, Π – соответственно кинетическая и потенциальная энергии системы;

Q_θ – обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате θ .

Кинетическая энергия системы:

$$T = T_1 + T_2^*,$$

где T_1 – кинетическая энергия звеньев грейфера;

T_2^* – кинетическая энергия зачерпываемого материала.

Выражение кинетической энергии звеньев грейфера и вращающихся масс привода имеет вид [4]:

$$2T_1 = m_1 [\dot{h}^2 + (\dot{\theta} r_1)^2 - 2\dot{h}\dot{\theta} r_1 \sin(\theta + \gamma - \gamma_1)] + m_2 \dot{h}^2 + J\dot{\theta}^2 + (m_3 + m_4)(\dot{\theta} \cdot M - \dot{h})^2 + m_4 [\dot{h}^2 + (\dot{\theta} \cdot r)^2 - 2\dot{h}\dot{\theta} \cdot r \sin \theta] + m_6 \dot{z}^2, \quad (3)$$

где m_i – массы отдельных частей грейфера в соответствии с принятыми обозначениями сил тяжести G ;

J – момент инерции челюсти относительно оси, проходящей через ее центр тяжести C_1 ;

m_6 – масса вращающихся частей привода, приведенная к ободу барабана.

Абсолютная скорость приведенной массы m_6 имеет вид:

$$\dot{z} = \dot{\theta} \cdot (n-1) \cdot M + \dot{h}, \quad (4)$$

где n – кратность замыкающего полиспаста.

$$M = r \left[\sin \theta + \cos \theta \frac{r \sin \theta - e_1 + e_2}{\sqrt{l^2 - (r \sin \theta - e_1 + e_2)^2}} \right].$$

Кинетическая энергия зачерпываемого материала:

$$2 \cdot T_2^* = m_5 \cdot \mathcal{G}_{c_5}^2 + J_5 \dot{\theta}^2,$$

где m_5 – масса материала, зачерпнутого челюстью;

\mathcal{G}_{c_5} – скорость ц.т. массы m_5 ;

J_5 – момент инерции массы m_5 относительно оси, проходящей через ц.т. C_5 этой массы перпендикулярно плоскости чертежа.

Скорость:

$$\mathcal{G}_{c_5}^2 = \dot{h}^2 + (\dot{\theta} \cdot r_5)^2 - 2\dot{h}\dot{\theta} \cdot r_5 \sin(\theta + \gamma - \gamma_5),$$

где $r_5 = OC_5$; $\gamma_5 = \angle C_5ON$ – координаты ц.т. зачерпываемого материала, опирающегося на челюсть.

При дифференцировании кинетической энергии материала T_2^* введем специальные операции дифференцирования. При выполнении этих операций считаем, что система мгновенно “затвердевает”, то есть ее масса перестает изменяться [5].

Силы тяжести звеньев грейфера и зачерпываемого материала являются потенциальными. Потенциальная энергия сил тяжести [4]:

$$\begin{aligned} \Pi = & G_1 [h + r_1 \cos(\theta + \gamma - \gamma_1)] + G_2 h + G_4 (h + r \cos \theta) + \\ & + (G_3 + G_4) \cdot (h + C_i) + G_5^* [h + r_5^* \cos(\theta + \gamma - \gamma_5^*)], \end{aligned} \quad (5)$$

где C_i – расстояние между головкой и траверсой грейфера.

$$C_i = r \cdot \cos \theta + \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin \theta - e_1 + e_2)^2},$$

где e_1, e_2 – эксцентриситеты шарниров на головке и траверсе грейфера;

l – длина штанги.

Обобщенные силы соответствующих обобщенных координат:

$$Q_\theta = P \frac{\eta^n - \eta}{\eta - 1} M + R \cdot \rho \cdot k_\rho \cdot \cos(\theta + \gamma + \varphi),$$

где η – КПД блока замыкающего полиспаста;

ρ – длина вертикального ножа челюсти;

k_ρ – коэффициент, учитывающий смещение силы R от горизонтального ножа челю-

сти;

φ – угол наклона силы R к горизонту.

$$Q_h = P + R \sin \varphi.$$

Выполнив операции дифференцирования кинетической T и потенциальной Π энергий системы по обобщенным координатам и скоростям согласно (2), получим с учетом обобщенных сил систему двух дифференциальных уравнений механической системы относительно искомым функций θ, h, z . Для замкнутости системы к упомянутым уравнениям следует присоединить уравнение кинематической связи (4):

$$\begin{aligned} A_1 \ddot{\theta} + A_2 \cdot \ddot{h} + A_3 \cdot \ddot{z} + A_4 \dot{\theta}^2 &= A_5 + Q_\theta ; \\ B_1 \ddot{\theta} + B_2 \cdot \ddot{h} + B_3 \cdot \ddot{z} + B_4 \dot{\theta}^2 &= B_5 + Q_h ; \\ \dot{Z} &= \dot{\theta} \cdot (n-1) \cdot M + \dot{h}. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты $A_1, B_1, \dots, A_5, B_5$ зависят от параметров грейфера, характеристик привода механизма замыкания и свойств зачерпываемого материала.

Усилие в замыкающем канате определяется из общего уравнения динамики, составленного для приведенной массы механизма замыкания:

$$S = P - m_6 \ddot{z}. \quad (7)$$

Площадь половины выемки

$$\begin{aligned} F &= \int_0^l [\rho \cos(\theta + \gamma) + h_1 + h] \rho \cos(\theta + \gamma) \dot{\theta} \cdot dt - \\ &- 0,5 y^2 \operatorname{tg}(\theta + \gamma) + [L - e_2 + (h_1 + h - 0,5 h_0) \operatorname{tg}(\theta + \gamma)] h_0, \end{aligned}$$

где L – полуразмах грейфера;

h_0 – начальная глубина погружения челюсти.

Масса зачерпнутого материала Q , входящая в уравнения движения механической системы (6), определяется выражением:

$$Q = \frac{2 \cdot F \cos(\theta + \gamma + \tau) \sin(\theta + \gamma + \gamma_2) B \cdot \gamma_m}{\sin \gamma_2 \cdot \cos \tau}, \quad (8)$$

где B – ширина челюсти;

γ_m – объемная масса материала;

γ_2 – «угол челюсти» между боковым ножом ON и дном;

τ – угол естественного откоса зачерпываемого материала в движении.

Конечное значение Q определяет зачерпывающую способность грейфера.

Представляет интерес исследование с помощью полученной математической модели процесса зачерпывания влияния геометрических параметров грейфера r, γ, e_1 (рис. 1) на его зачерпывающую способность. Обработка и анализ полученных данных позволит выявить влияние отдельных геометрических параметров и их сочетаний на зачерпывающую способность грейфера, дать основные рекомендации по выбору оптимальных значений этих параметров.

В качестве объекта исследования выбран наиболее распространенный канатный грейфер длиннозвенного типа объемом $1,5 \text{ м}^3$. Зачерпываемый материал – песок.

Ниже приводится порядок проведения теоретических исследований [6].

1. Вместо геометрических параметров (r, γ, e_l) вводятся нормированные z_1, z_2, z_3 и относительные x_1, x_2, x_3 параметры. Пределы изменения параметров z и x приведены в табл. 1. Следовательно, взамен действительной величины вводится ее нормированное отклонение x , а зависимость $Q_p = f(z_1, z_2, z_3)$ заменяется выражением $Q_p = f(x_1, x_2, x_3)$.

Т а б л и ц а 1

Значения нормированных параметров грейфера

№	Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Пределы изменения	Шаг, Δz
1	r	z_1 / x_1	м	0,85-1,28	0,215
2	γ	z_2 / x_2	рад.	1,08-1,36	0,14
3	e_l	z_3 / x_3	м	0,07-0,36	0,145

2. Зависимость зачерпывающей способности грейфера от параметров x_1, x_2, x_3 ищем в виде многочлена второй степени [6]:

$$Q_p = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3. \quad (9)$$

3. Проводится серия из 15 опытов (табл. 2), по результатам которой находят коэффициенты квадратичной аппроксимации действительной зависимости. Условимся решение системы дифференциальных уравнений (6) при фиксированном значении геометрических параметров грейфера называть опытом, а полученное при этом значение зачерпывающей способности для кратности называть опытным Q_o (в отличие от найденного по аппроксимирующему многочлену (10), которое назовем расчётным Q_p).

Т а б л и ц а 2

План и результаты теоретических исследований

	x_1	x_2	x_3	$z_1 (r)$, м	$z_2 (\gamma)$, рад	$z_3 (e_l)$, м	Q_o , кг	Q_p , кг	$\frac{Q_o - Q_p}{Q_o}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1,28	1,360	0,36	2516	2509	0,003
2	1	1	-1	1,28	1,36	0,07	2560	2565	-0,002
3	1	-1	1	1,28	1,08	0,36	2368	2385	0,007
4	1	-1	-1	1,28	1,08	0,07	2436	2422	0,006
5	-1	1	1	0,85	1,36	0,36	2280	2290	-0,005
6	-1	1	-1	0,85	1,36	0,07	2306	2293	0,006
7	-1	-1	1	0,85	1,08	0,36	2250	2250	0,000
8	-1	-1	-1	0,85	1,08	0,07	2230	2245	-0,007
9	0	0	0	1,065	1,22	0,215	2400	2400	0,000
10	1	0	0	1,28	1,22	0,215	2475	2482	-0,003
11	-1	0	0	0,85	1,22	0,215	2280	2279	0,001
12	0	1	0	1,065	1,36	0,215	2420	2440	-0,008
13	0	-1	0	1,065	1,08	0,215	2360	2352	0,003
14	0	0	1	1,065	1,22	0,36	2390	2385	0,002
15	0	0	-1	1,065	1,22	0,07	2400	2410	-0,001

4. Вычисляются расчетные значения Q_p при каждом опыте. Определяются отклонения между опытным и расчетным результатами $\Delta Q = Q_o - Q_p$ и относительные отклонения для оценки удовлетворительности аппроксимации.

В табл. 2 приведены план и результаты исследований. В колонках 2, 3, 4 помещены значения относительных параметров x_1, x_2, x_3 ; в колонках 5, 6, 7 – соответствующие им значения нормированных параметров z_1, z_2, z_3 . Опытное значение зачерпывающей способности помещено в колонке 8, а расчетное – в колонке 9. Относительное отклонение опытных и расчетных результатов приведено в колонке 10 и не превышает 1%, что позволяет считать найденную зависимость $Q_p = f(x_1, x_2, x_3)$ удовлетворительной.

Теоретический аппроксимирующий многочлен, описывающий зачерпывающую способность грейфера в заданной области существования факторов $r(x_1)$, $\gamma(x_2)$, $e_1(x_3)$, имеет вид:

$$Q_p = 2400 + 100,9x_1 + 44,8x_2 - 11,8x_3 + 22x_1x_2 - 13x_1x_3 - 3x_2x_3 - 20x_1^2 - 7,5x_2^2 - 3x_3^2. \quad (10)$$

Анализ полученной аппроксимации зачерпывающей способности грейферного механизма (10), полученной расчетным путем, позволяет выявить влияние отдельных геометрических параметров и их сочетаний в заданной области их существования на зачерпывающую способность грейфера и дать рекомендации по выбору оптимальных значений этих параметров.

1. Решающее влияние на зачерпывающую способность грейфера оказывает параметр $r(x_1)$, так как значение коэффициента a_1 относительно велико и равно 100,9. Максимальные значения зачерпывающей способности получены при $x_1 = 1$ (опыты с 1 по 4 и 10).

2. Значение коэффициента a_{12} , полученное расчетным путем, равно 22. Физически положительное значение коэффициента означает, что параметры $r(x_1)$ и $\gamma(x_2)$ следует изменять одновременно в сторону их роста или уменьшения. При этом $a_2 > 0$, в то время как $a_{22} < 0$. Поэтому высокие значения зачерпывающей способности Q_p должны иметь место при больших значениях r и γ ($x_1 = x_2 = 1$). В опытах 1 и 2 (см. табл. 2) получены максимальные значения зачерпывающей способности (2516 и 2560 кг). Следовательно, при проектировании грейфера параметры r и γ необходимо увеличивать; при этом значение r , учитывая его ограничения профилем днища зачерпывания, рекомендуется принимать не более $(1 \dots 1,1) \cdot L$.

3. Как уже отмечено, коэффициент $a_2 > 0$. При этом $a_{22} < 0$, т.е. с увеличением угла γ его влияние на зачерпывающую способность грейфера падает. Поэтому значение "угла челюсти" γ рекомендуется принимать не свыше 65-70°.

4. Коэффициент $a_3 < 0$, одновременно коэффициент a_{23} , отражающий взаимное влияние на зачерпывающую способность грейфера параметров $\gamma(x_2)$ и $e_1(x_3)$, также меньше нуля. Поэтому целесообразно при больших значениях угла γ (на большинстве грейферов) эксцентриситет на головке e_1 принимать минимальным, и наоборот, при малых значениях угла γ (меньше 50°) параметр e_1 возможно увеличивать из конструктивных соображений.

Выводы. Составлены дифференциальные уравнения движения механической системы «грейфер – двигатель» с учетом параметров грейфера, свойств сыпучего материала и характеристик привода механизма замыкания, представляющих математическую модель процесса зачерпывания материала грейфером.

Проведены исследования влияния геометрических параметров грейфера на его зачерпывающую способность, на основании которых разработаны рекомендации по выбору этих параметров грейфера при его проектировании и модернизации.

Литература

1. Таубер Б.А. Грейферные механизмы. – М.: Машгиз, 1985. – 270 с.
2. Александров М.П. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана – Высшая школа, 2000. – 552 с.
3. Зенков Р.Л. Методика расчета грейферов // Труды ВНИИПТМАШ, 1966, вып. 8 (72). – 77 с.
4. Шевченко Н.А. Исследование процесса зачерпывания материала грейфером с рычажно-полиспастным механизмом замыкания // Подъемно-транспортная техника. – Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железн. тр-та им. акад. В.Лазаряна. – 2008. – № 4. – С. 11-18.
5. Бессонов А.П. Основы динамики машин с переменной массой звеньев. – М.: Наука, 1967. – 279 с.
6. Эрнесто Рафалес-Ламарка. Методология научно-технического исследования. – Луганск: Изд-во Лугань, 1992. – 218 с.

Шевченко М.О., Шевченко Д.М., Комін С.В. Дослідження зачерплювальної здатності канатних грейферів

Викладені результати дослідження на математичній моделі процесу зачерпування впливу параметрів канатного грейфера на його здатність зачерпувати. Запропоновані рекомендації по вибору параметрів грейфера при його проектуванні та модернізації.

***Ключові слова:** грейфер, дослідження, математична модель, параметр, здатність зачерпувати, рекомендації, проектування.*

Shevchenko N.A., Shevchenko D.N., Komin S.V. The investigation of the grabbing ability of rope grab buckets

The results of the investigation of the influence of rope grab buckets parameters on its grabbing ability made on the mathematical model of the grabbing process have been given. The recommendations for the choice of rope grab buckets parameters in its design and modernization have been made.

***Key words:** grab buckets, investigation, mathematical model, parameter, grabbing ability, recommendations, design.*

Шевченко Н.А.	к.т.н., доцент кафедри «Подъемно-транспортная техника» ВНУ им. В. Даля, г. Луганск, Украина.
Шевченко Д.Н.	студент ВНУ им. В. Даля, г. Луганск, Украина.
Комин С.В.	студент ВНУ им. В. Даля, г. Луганск, Украина.

Рецензент: д.т.н., проф. Утугов Н.Л.