

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.331

**О РАВНОВЕСИИ ОТВАЛЬНОЙ КОНСОЛИ  
ШАГАЮЩЕГО ОТВАЛООБРАЗОВАТЕЛЯ**

Казаченко Г.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Неверовская Я.Б. (ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь)

*Рассмотрено равновесие отвальной консоли шагающего отвалообразователя, состоящей из шарнирно соединенных секций подвешенных на вантах. Получены зависимости, позволяющие определить усилия в вантах и шарнирах, соединяющих секции при статическом равновесии консоли.*

**Введение**

Ряд горных машин для выполнения открытых горных работ (драглайны, экскаваторы, отвалообразователи и т.п.) имеют крупные габаритные размеры и большие массы. Эти машины представляют собой большие и сложные электромеханические системы [2], в которых отдельные части могут перемещаться относительно друг друга. Для изучения их движений целесообразно выделить какую-либо основную единицу и рассматривать движение остальных частей относительно нее. В [1] за такую условную часть для машины с шагающим ходовым устройством выбрана опорная база. Точно так же для машин на гусеничном ходу в качестве основного механизма может быть взят гусеничный ход. В настоящей статье рассматривается равновесие отвальной консоли отвалообразователя относительно поворотного круга в стационарном рабочем положении (поворотная платформа неподвижна относительно базы).

**Результаты исследования**

Отвальную консоль представим (рисунок 1) как механическую систему, состоящую из абсолютно твердых секций, на которых расположен ленточный конвейер с движущейся вместе с ним горной массой. Секции консоли соединены между собой шарнирно с возможностью поворота друг относительно друга и опираются посредством вант на пилон, который при помощи трособлочной системы поворачивается вокруг общей с отвальной консолью оси. Рассмотрим сначала равновесное положение отвальной консоли под действием сил тяжести самой консоли и перемещаемой массы флотационных и галургических отходов после переработки калийных солей. При этом будем считать, что в таком положении углы поворота секций относительно друг друга равны 0, т.е. осевые линии их совпадают.

Запишем уравнения равновесия секций консоли в виде систем, включающих реакции всех сил в проекции на ось консоли и перпендикулярную к ней ось, а также суммы моментов сил относительно оси шарниров соединения секций.

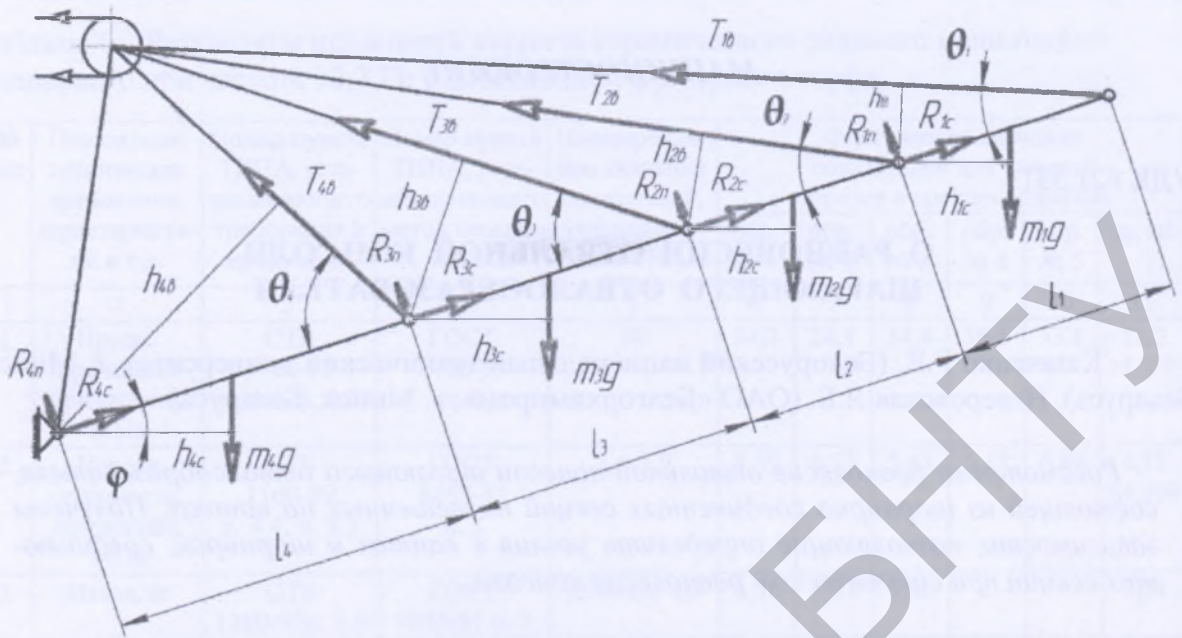


Рисунок 1 – Схема отвальной консоли отвалообразователя

Тогда для определения усилий в вантах и шарнирах первой секции имеем систему:

$$\begin{aligned} T_{1b} \cos \theta_1 - R_{1c} + (m_1 + m_{r1}) g \sin \varphi &= 0 \\ T_{1b} \cdot h_{1b} - (m_1 + m_{r1}) g \cdot h_{1c} + R_{1c} \cdot k &= 0 \\ T_{1b} \sin \theta_1 - (m_1 + m_{r1}) g \cos \varphi - R_{1n} &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

- второй секции:

$$\begin{aligned} T_{2b} \cos \theta_2 + R_{1c} - R_{2c} + (m_2 + m_{r2}) g \sin \varphi &= 0 \\ T_{2b} \cdot h_{2b} - (m_2 + m_{r2}) g \cdot h_{2c} + M_{c2} - M_{c1} &= 0 \\ T_{2b} \sin \theta_2 - (m_2 + m_{r2}) g \cos \varphi - R_{1n} + R_{2n} &= 0; \end{aligned} \quad (2)$$

- третьей секции:

$$\begin{aligned} T_{3b} \cos \theta_3 + R_{2c} - R_{3c} + (m_3 + m_{r3}) g \sin \varphi &= 0 \\ T_{3b} \cdot h_{3b} - (m_3 + m_{r3}) g \cdot h_{3c} + M_{c3} - M_{c2} &= 0 \\ T_{3b} \sin \theta_3 - (m_3 + m_{r3}) g \cos \varphi - R_{2n} + R_{3n} &= 0; \end{aligned} \quad (3)$$

- четвертой секции:

$$\begin{aligned} T_{4b} \cos \theta_4 + R_{3c} - R_{4c} + (m_4 + m_{r4}) g \sin \varphi &= 0 \\ T_{4b} \cdot h_{4b} - (m_4 + m_{r4}) g \cdot h_{4c} + M_{c4} - M_{c3} &= 0 \\ T_{4b} \sin \theta_4 - (m_4 + m_{r4}) g \cos \varphi - R_{4n} + R_{4n} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

- где  $T_{iB}$  – усилие в  $i$ -ой ванте, Н;  
 $R_{iC}$  – осевая реакция в шарнире, соединяющем  $i$ -ую секцию с  $i+1$  секцией, Н;  
 $R_{iN}$  – нормальная к оси реакция в шарнире, соединяющем  $i$ -ую секцию с  $i+1$  секцией, Н;  
 $R_i$  – полная реакция в  $i$ -ом шарнире, Н;  
 $m_i$  – масса  $i$ -ой секции, кг;  
 $m_{гi}$  – масса груза, находящегося на  $i$ -ой секции, кг;  
 $\varphi$  – угол наклона отвальной консоли, град.;  
 $k_i = f \frac{d_i}{2}$  – приведенный коэффициент сопротивления повороту в  $i$ -ом шарнире;  
 $f$  – коэффициент трения в шарнире;  
 $d_i$  – диаметр  $i$ -го шарнира, м;  
 $\theta_i$  – угол между  $i$ -ой вантой и продольной осью отвальной консоли, град.;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $h_{iB} = l_i \sin \theta_i$  – плечо силы  $T_{iB}$  относительно  $i$ -ого, м;  
 $h_{iC} = \frac{1}{2} l_i \sin \varphi$  – плечо силы тяжести секции, м;  
 $l_i$  – длина  $i$ -ой секции, м;  
 $i = \overline{1, 4}$  – порядковый номер секции отвалообразователя, начиная с крайней.

Разрешая эти системы относительно  $T_{iB}$ ,  $R_{iC}$ , получим:

$$T_{1B} = \frac{m_{01}g(h_{1C} - k_1 \sin \varphi)}{h_{1B} + k_1 \cos \theta_1}, \quad (5)$$

$$R_{1C} = \frac{m_{01}g(h_{1C} - k_1 \sin \varphi)}{h_{1B} + k_1 \cos \theta_1} \cdot \cos \theta_1 + m_{01}g \sin \varphi, \quad (6)$$

$$R_{1N} = m_{01}g \cos \varphi - T_{1B} \sin \theta_1; \quad (7)$$

$$T_{2B} = \frac{m_{02}g(h_{2C} - k_2 \sin \varphi) - R_{1C}(k_2 - k_1)}{h_{2B} + k_2 \cos \theta_2}, \quad (8)$$

$$R_{2C} = \frac{m_{02}g(h_{2C} - k_2 \sin \varphi) - R_{1C}(k_2 - k_1)}{h_{2B} + k_2 \cos \theta_2} \cdot \cos \theta_2 + R_{1C} + m_{02}g \sin \varphi, \quad (9)$$

$$R_{2N} = R_{1N} + m_{02}g \cos \varphi - T_{2B} \sin \theta_2; \quad (10)$$

$$T_{3B} = \frac{m_{03}g(h_{3C} - k_3 \sin \varphi) - R_{2C}(k_3 - k_2)}{h_{3B} + k_3 \cos \theta_3}, \quad (11)$$

$$R_{3C} = \frac{m_{03}g(h_{3C} - k_3 \sin \varphi) - R_{2C}(k_3 - k_2)}{h_{3B} + k_3 \cos \theta_3} \cdot \cos \theta_3 + R_{2C} + m_{03}g \sin \varphi, \quad (12)$$

$$R_{3N} = R_{2N} + m_{03}g \cos \varphi - T_{3B} \sin \theta_3; \quad (13)$$

$$T_{4в} = \frac{m_{04}g(h_{4с} - k_4 \sin \varphi) - R_{3с}(k_4 - k_3)}{h_{4в} + k_4 \cos \theta_4}, \quad (14)$$

$$R_{4с} = \frac{m_{04}g(h_{4с} - k_4 \sin \varphi) - R_{3с}(k_4 - k_3)}{h_{4в} + k_4 \cos \theta_4} \cdot \cos \theta_4 + R_{3с} + m_{04}g \sin \varphi, \quad (15)$$

$$R_{4н} = R_{3н} + m_{04}g \cos \varphi - T_{4в} \sin \theta_4; \quad (16)$$

где  $m_{0i} = m_i + m_{ri}$  – масса  $i$ -ой секции, кг.

Полная реакция в  $i$ -ом шарнире выражается формулой:

$$R_i = \sqrt{R_{ic}^2 + R_{in}^2}. \quad (17)$$

Приведенные зависимости значительно упрощаются при равенстве приведенных коэффициентов сопротивления повороту в шарнирах. В этом случае  $k_i = k$ , формулы для определения усилий в шарнирах принимают вид:

$$R_{1с} = m_{01}g \sin \varphi \frac{l_1(0,5 + tg\theta_1)}{l_1 tg\theta_1 + k}; \quad (18)$$

$$R_{2с} = m_{02}g \sin \varphi \frac{l_2(0,5 + tg\theta_2)}{l_2 tg\theta_2 + k}; \quad (19)$$

$$R_{3с} = R_{2с} + m_{03}g \sin \varphi \frac{l_3(0,5 + tg\theta_3)}{l_3 tg\theta_3 + k}; \quad (20)$$

$$R_{4с} = R_{3с} + m_{04}g \sin \varphi \frac{l_4(0,5 + tg\theta_4)}{l_4 tg\theta_4 + k}; \quad (21)$$

$$R_{1н} = m_{01}g \left( \cos \varphi - \sin \varphi \frac{0,5l_1 - k}{l_1 + kctg\theta_1} \right); \quad (22)$$

$$R_{2н} = R_{1н} + m_{02}g \left( \cos \varphi - \sin \varphi \frac{0,5l_2 - k}{l_2 + kctg\theta_2} \right); \quad (23)$$

$$R_{3н} = R_{2н} + m_{03}g \left( \cos \varphi - \sin \varphi \frac{0,5l_3 - k}{l_3 + kctg\theta_3} \right); \quad (24)$$

$$R_{4н} = R_{3н} + m_{04}g \left( \cos \varphi - \sin \varphi \frac{0,5l_4 - k}{l_4 + kctg\theta_4} \right), \quad (25)$$

а для определения усилий в вантах имеем зависимости:

$$T_{1в} = \frac{m_{01}g \sin \varphi (0,5l_1 - k)}{l_1 \sin \theta_1 + k \cos \theta_1}; \quad (26)$$

$$T_{2в} = \frac{m_{02}g \sin \varphi (0,5l_2 - k)}{l_2 \sin \theta_2 + k \cos \theta_2}; \quad (27)$$

$$T_{3в} = \frac{m_{03}g \sin \varphi (0,5l_3 - k)}{l_3 \sin \theta_3 + k \cos \theta_3}; \quad (28)$$

$$T_{4в} = \frac{m_{04}g \sin \varphi (0,5l_4 - k)}{l_4 \sin \theta_4 + k \cos \theta_4}. \quad (29)$$

Наконец, самый простой вид имеют выражения для приближенных ориентировочных значений реакций в шарнирах и усилий в вантах, которые получаются при пренебрежении некоторыми малыми величинами, например при  $k \ll 0,5l_i$ :

$$R_{ic} = R_{(i-1)c} + m_{0i}g \sin \varphi l_i \left( 1 + \frac{0,5}{\operatorname{tg} \theta_i} \right); \quad (30)$$

$$R_m = R_{(i-1)n} + m_{0i}g (\cos \varphi - 0,5 \sin \varphi); \quad (31)$$

$$T_m = 0,5m_{0i}g \frac{\sin \varphi}{\sin \theta_i}. \quad (32)$$

Полученные выражения можно использовать для изучения равновесных состояний отвальной консоли и прочностных расчетов отдельных ее элементов. Особое значение при этом имеет исследование влияния производительности на нагруженность секций и вант.

Нами в системе Mathcad проведен расчет по определению усилий в вантах и нагрузок, действующих в шарнирах отвалообразователя ОШ-75 при его работе в условиях, соответствующих технической характеристике. Некоторые результаты этих расчетов представлены на рисунке 2 и рисунке 3.

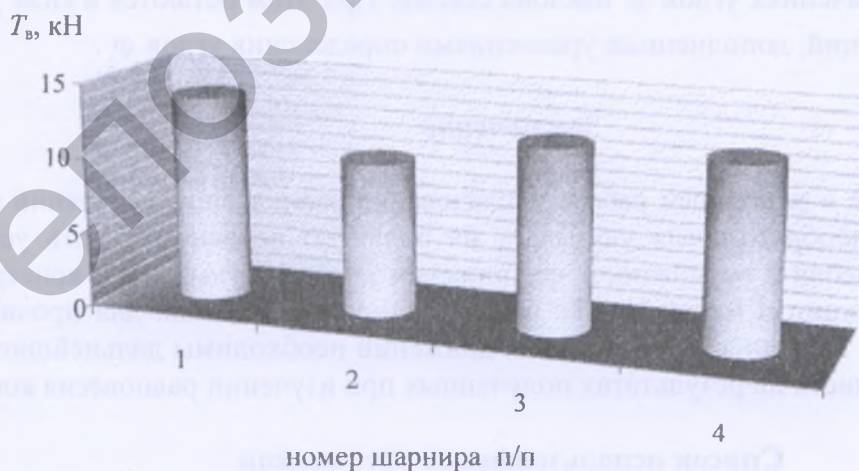


Рисунок 2 – Результат определения усилий в вантах отвальной консоли отвалообразователя ОШ-75

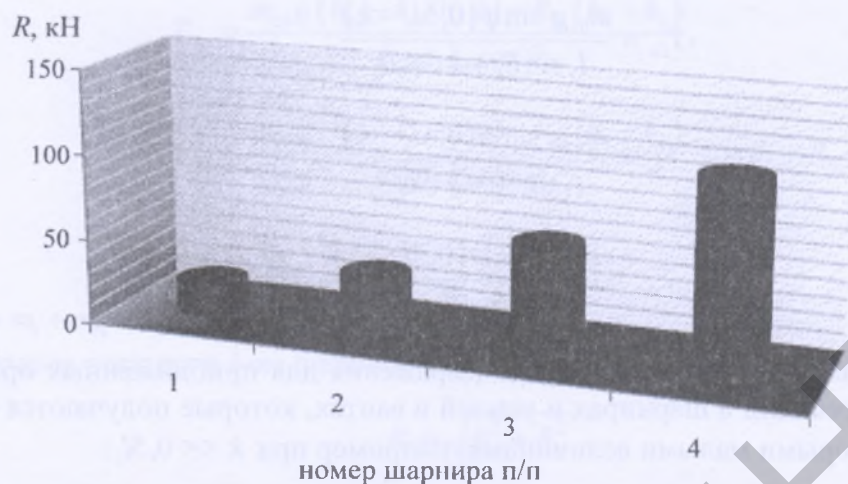


Рисунок 3 – Результат определения усилий в шарнирах отвальной консоли отвалообразователя ОШ-75

Данные для выполнения расчетов взяты, как уже сказано, из технической характеристики ОШ-75.

Масса груза на  $i$ -ой секции отвальной консоли определялась по формуле:

$$m_{гi} = G \frac{l_i}{v}, \quad (33)$$

где  $G$  – производительность конвейера, кг/с;

$v$  – скорость конвейера, м/с.

Не менее важным следствием проведенного исследования является определение начальных условий для изучения неравновесных движений отвальной консоли при переменных внешних нагрузках. В некоторых ситуациях внешние нагрузки могут быть приложенными в течение довольно длительных периодов времени, например гололедные нагрузки. В этом случае равновесное положение отвальной консоли устанавливается при других значениях углов  $\varphi$  наклона секций. При этом остаются в силе уравнения равновесия секций, дополненные уравнениями определения углов  $\varphi_i$ .

### Заключение

Проведенное в настоящей работе исследование равновесных состояний отвальной консоли отвалообразователя указывает на большую неравномерность усилий в вантах подвеса консоли и возможность ее снижения за счет оптимизации конструктивных параметров секции и механизма ее подвеса. Вместе с тем, как для прочностных расчетов, так и для изучения колебательных движений необходимы дальнейшие исследования, базирующиеся на результатах полученных при изучении равновесия консоли.

### Список использованных источников

1. Казаченко, Г.В. Особенности отвалообразователей и некоторые результаты исследования их статической устойчивости / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, Я.Б. Неверовская, А.А. Ярмолинская // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 75-83.

2. Панкратов, С.А. Динамика машин для открытых горных и земляных работ / С.А. Панкратов. – М.: Машиностроение, 1967. – 448 с.

**Kazachenko G.V., Neverovskaya Ja.B.**

**Concerning the equilibrium of the spreading arm of a walking spreader**

*The equilibrium of the spreading arm of a walking spreader consisting of sections joined by hinges which are hung up by the stay ropes is considered. Dependences are obtained allowing determination of strengthening in the stay ropes and hinges, joining sections at static equilibrium of the spreading arm.*

Поступила в редакцию 08.08.2013 г.