

## К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ ВРАЩЕНИЯ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

Ранее нами было показано, что управлять центробежными силами вращения можно только при наличии постоянной связи, удерживающей материальные тела при движении по круговой траектории. Такой связью является вращающийся цилиндр, на внутренней поверхности которого находится физическое тело.

Для того, чтобы использовать приобретенную энергию центробежных сил вращения этого физического тела, необходимо решить две задачи: как подать его на внутреннюю поверхность цилиндра и как освободить вращающееся физическое тело от связи в нужный момент.

Первая задача решается посредством вращающегося конуса. Пусть винтовая поверхность образована прямой линией  $a-a$ , пересекающей с осью  $o-o$  под углом  $\beta$ , совершающей равномерное вращательное движение. По винтовой линии  $AB$  движется со скольжением физическое тело массой  $m$ . Определим скольжение материала по наклонной поверхности конуса с вертикальной осевой линией. Отнесем движение к осям координат  $x$  и  $t$  с началом в точке  $o$ , где материал поступает на поверхность конуса. Чтобы написать уравнение относительного движения, надо отнести их к подвижным осям координат, перемещающимся с переносной скоростью  $U$  вдоль оси  $x$ . В начальный момент относительная скорость  $W_0 = U$ . В последующие моменты времени сила трения  $F_{\text{тр}}$  будет замедлять эту скорость; обозначим относительную скорость в некоторый момент времени  $t$  через  $W$ . Движущая сила, определяемая величиной силы тяжести  $F_T$  минус сила трения  $F_{\text{тр}}$ , сообщит материалу относительное ускорение:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{F_T}{m} \sin \alpha - \frac{F_{\text{тр}}}{m},$$

или, подставив  $F_T = mg$  и  $F_{\text{тр}} = mg \cdot f \cdot \cos \alpha$ , получим

$$\frac{dW}{dt} = g \sin \alpha - fg \cos \alpha = g \sin \alpha \left(1 - \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha}\right). \quad (1)$$

Отсюда следует, что в относительном движении ускорение постоянно и зависит от отношения  $\frac{f}{\operatorname{tg} \alpha}$ .

Проинтегрировав (1), получим выражение относительной скорости

$$g = g \sin \alpha \left(1 - \frac{f}{\text{tg} \alpha}\right) t + c_w.$$

В начале движения, когда  $t=0$ ,  $W=W_0=U$ , постоянная интегрирования  $C_w=U$ .

Скорость скольжения материала будет

$$g = g \sin \alpha \left(1 - \frac{f}{\text{tg} \alpha}\right) t + U$$

или

$$g = U - g \sin \alpha \left(\frac{f}{\text{tg} \alpha} - 1\right) t = \frac{dg}{dt} \quad (2)$$

Следовательно, относительная скорость  $W$  будет изменяться по линейному закону относительно времени. Здесь возможны случаи:

1.  $\frac{f}{\text{tg} \alpha} > 1$ , что соответствует условию  $f = \text{tg} \varphi > \text{tg} \alpha$ , т.е.  $\alpha < \varphi$ .

В этом случае относительная скорость  $W$  будет уменьшаться от  $W_0=U$  до  $W=0$ ; прекращение скольжения произойдет по истечении времени  $t_1$ , определяемого по уравнению:

$$g=0=U - g \sin \alpha \left(\frac{f}{\text{tg} \alpha} - 1\right) t_1,$$

откуда

$$t_1 = \frac{U}{g \sin \alpha \left(\frac{f}{\text{tg} \alpha} - 1\right)} \quad (3).$$

2.  $\frac{f}{\text{tg} \alpha} = 1$ ; в этом случае  $\alpha = \varphi$  и относительная скорость будет постоянной  $g=U=const$ .

3.  $\frac{f}{\text{tg} \alpha} < 1$ , что соответствует  $\alpha > \varphi$ .

В этом случае

$$g = g \sin \alpha \left(1 - \frac{f}{\text{tg} \alpha}\right) t + U,$$

скольжение будет возрастать.

Чтобы определить относительное перемещение материала, нужно проинтегрировать уравнение (2)

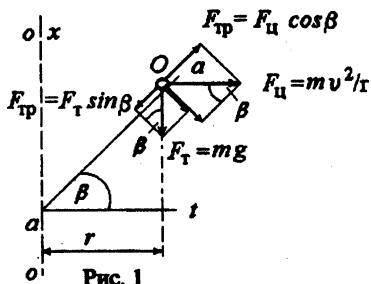
$$X_g = Ut - \frac{1}{2} g \sin \alpha \left( \frac{f}{tg \alpha} - 1 \right) t^2 = c_x.$$

Для начала движения  $t=0$ ,  $X_g=0$ , следовательно  $C_x=0$ .

Итак движение происходит по закону:

$$X_g = Ut - \frac{1}{2} g \sin \alpha \left( \frac{f}{tg \alpha} - 1 \right) t^2. \quad (4)$$

Однако, при движении физического тела по винтовой линии будет действовать сила трения, возникающая за счет нормальной составляющей центробежной силы.



На рис.1 можно видеть, что нормальная составляющая центробежной силы равна  $F_Ц \cdot \sin \beta$  и определит дополнительную силу трения  $F_T^y = f F_Ц \cdot \sin \beta = f \sin \beta \frac{m g^2}{r}$ .

Итак, с учетом формулы (1):

$$\frac{d\vartheta}{dt} = g \sin \alpha \left( 1 - \frac{f}{tg \alpha} \right) - f \sin \beta \frac{g^2}{r} \quad (5)$$

По мере увеличения скорости

ускорение уменьшается и при некоторой величине ее доходит до нуля  $\frac{d\vartheta}{dt} = 0$ :

$$g \sin \alpha \left( 1 - \frac{f}{tg \alpha} \right) = tg \varphi \frac{g^2}{r} \sin \beta = \frac{g \sin(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi};$$

отсюда 
$$\vartheta = \sqrt{gr \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}}. \quad (6)$$

Движение физического тела становится равномерным.

Если начальная скорость  $\vartheta_n = 0$ , то уравнение (5) определит максимальное ускорение

$$\left( \frac{d\vartheta}{dt} \right)_{max} = g \sin \alpha \left( 1 - \frac{f}{tg \alpha} \right) = \frac{g \sin(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi};$$

Через некоторое время  $t$ , ускорение уменьшится до нуля  $\left( \frac{d\vartheta}{dt} \right)_{min} = 0$ .

Среднее ускорение определится как

$$\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_{cp} = \frac{1}{2}g \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi} = j_{cp}.$$

В таком случае путь  $S$  определится

$$S = \frac{g^2}{2j_{cp}} = \frac{g^2 \cos \varphi}{g \sin(\alpha - \beta)}. \quad (7)$$

Высота  $H$  определится как  $H = S \sin \alpha$ . Подставив значения  $S$  (7) и  $\vartheta$  (6) получим

$$H = \frac{r \cdot \sin \alpha}{f \cdot \sin \beta}.$$

Например, если принять  $f=0,3$ , что соответствует углу трения  $\varphi \cong 17^\circ$ , то, чтобы осуществить равномерное движение по спирали со скоростью  $\vartheta = 1 \text{ м/с}$  на расстоянии  $r=0,2 \text{ м}$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{F_y}{F_T} = \frac{g^2}{gr} = 0,509; \quad \beta = 27^\circ.$$

Угол подъема спирали определится по формуле

$$\sin(\alpha - \varphi) = \sin \varphi \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta} = \sin \varphi \frac{\operatorname{tg}^2 \beta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} = 0,067.$$

Отсюда  $(\alpha - \varphi) \cong 3^\circ 50'$  и  $\alpha = 20^\circ 30' \cong 21^\circ$

$$H_{\min} = \frac{0,2 \sin 21^\circ}{0,3 \sin 27^\circ} = 0,53 \text{ м}. \quad \text{При } r=0,1 \text{ м}; \quad H_{\min} \cong 0,35 \text{ м}.$$

Энергия физического тела при выходе с конической поверхности на цилиндрическую определяется известной формулой

$$E_x = 0,5mr^2 \omega^2.$$

При анализе этой формулы можно видеть, что энергия центробежной силы зависит от радиуса вращения, при увеличении которого энергия возрастает по парабо-

ле. Сама же центробежная сила изменяется по прямолинейному закону. При переходе физического тела с конической поверхности на цилиндрическую можно влиять на изменение энергии в большую или меньшую сторону в зависимости от поставленной задачи. Решение такой задачи будет рассмотрено.

УДК. 629.463.3

А. В. Пуцяго

## **КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОТЛА ЖЕЛЕЗНО- ДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS**

*Белорусский государственный университет транспорта*

*Гомель, Беларусь*

Статистические данные, собранные на различных участках сети отечественных железных дорог [1, 2], показывают, что значительное число отказов цистерн вызвано аварийным состоянием котлов. В процессе эксплуатации вследствие воздействий окружающей среды происходит коррозионный износ материала, а переменные динамические нагрузки вызывают появление усталостных трещин. Для принятия решения о дальнейшем использовании котла цистерны необходимо иметь информацию о его напряженно-деформированном состоянии. С этой целью было выполнено исследование, основанное на использовании метода конечных элементов.

Котел железнодорожной цистерны представляет собой оболочечную конструкцию, установленную с помощью элементов крепления на раме вагона. Особенности рассматриваемой конструкции заключаются в наличии элементов с различными радиусами кривизны, а также в присутствии люка, предназначенного для загрузки перевозимого продукта. Котел цистерны крепится к раме с помощью фасонных лап и дополнительно опирается на деревянные бруски.

С целью учета описанных особенностей конструкции котла его объем был разделен на 80 составных частей со сходными геометрическими параметрами. Среди них, в свою очередь, можно выделить 5 групп, в пределах которых параметры конечных элементов идентичны (рис. 1).