



$T_2$ , возникающих в точках касания шаров с тарелками при радиальных перемещениях этих шаров.

Кроме того, величина  $E$  зависит от направления движения шаров в данный момент времени ( $E'$  — при расхождении шаров, когда  $\frac{dy}{dt} > 0$  и  $E''$  — при схождении шаров, когда  $\frac{dy}{dt} < 0$ ).

Для случая расхождения шаров (удаления их от оси вала регулятора  $\frac{dy}{dt} > 0$ ) имеем (фиг. 1а)

$$\begin{aligned} T_1' + T_2' \sin \beta + N' \cos \beta &= C_x + Q_x, \\ E' - N' \sin \beta + T_2' \cos \beta &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $N'$  — суммарное нормальное давление всех шаров на коническую (неподвижную) тарелку.

Полагаем

$$\left. \begin{aligned} T_1' &= \mu_1 E', \\ T_2' &= \mu_2 N', \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , соответственно, коэффициенты трения между шаром и плоской, и конической тарелками.

Теперь из (2)

$$N' = \frac{E'}{\sin \beta - \mu_2 \cos \beta}$$

и

$$E' = \frac{C_x + Q_x}{\frac{\cos \beta + \mu_1 \sin \beta}{\sin \beta - \mu_2 \cos \beta} + \mu_1}.$$

Аналогичным образом для случая схождения шаров ( $\frac{dy}{dt} < 0$ ) можно получить (фиг. 1б)

$$E'' = \frac{C_x + Q_x}{\frac{\cos \beta - \mu_2 \sin \beta}{\sin \beta + \mu_2 \cos \beta} - \mu_1}.$$

При отсутствии трения ( $\mu_1 = \mu_2 = 0$ ) суммарное давление всех шаров на плоскую тарелку определяется выражением (фиг. 2)

$$E_0 = (C_x + Q_x) \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (3)$$

независимо от направления радиального движения шаров.

Теперь, учитывая (3), имеем

$$E' = \frac{1}{\left[ \frac{\cos \beta + \mu_2 \sin \beta}{\sin \beta - \mu_2 \cos \beta} + \mu_1 \right] \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot E_0$$

$$E'' = \frac{1}{\left[ \frac{\cos \beta - \mu_2 \sin \beta}{\sin \beta + \mu_2 \cos \beta} - \mu_1 \right] \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot E_0$$

или пренебрегая слагаемыми, содержащими произведения  $\mu_1, \mu_2$  приближенно:

$$E' = E_0 \frac{\sin \beta - \mu_2 \cos \beta}{\cos \beta + (\mu_1 + \mu_2) \sin \beta} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (4)$$

$$E'' = E_0 \frac{\sin \beta + \mu_2 \cos \beta}{\cos \beta - (\mu_1 + \mu_2) \sin \beta} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что

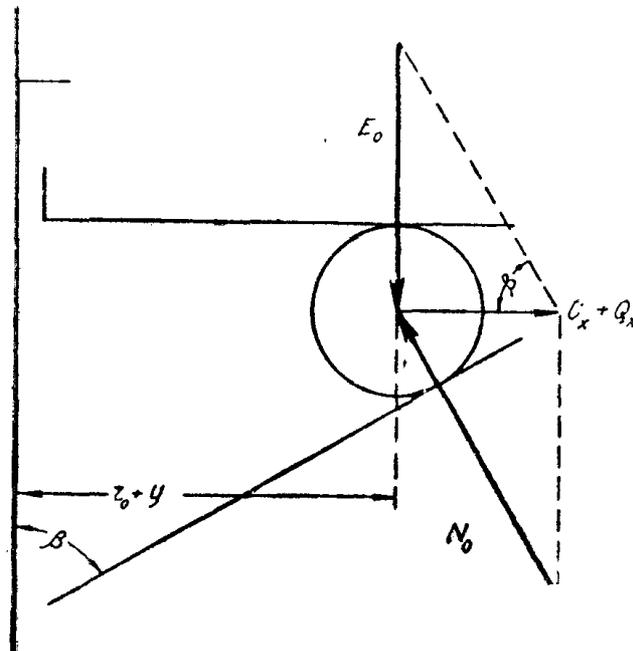
$$E' < E_0 < E''.$$

Очевидно, что разности

$$R' = E_0 - E', \quad (6)$$

$$R'' = E'' - E_0 \quad (7)$$

представляют собою приведенные к муфте суммарные силы трения шаров, соответственно для случаев расхождения ( $R'$ ) и схождения ( $R''$ ) этих шаров.



Фиг. 2

Из (4) и (6)

$$R' = E_0 \frac{\mu \sin \beta + \frac{\mu_2}{\sin \beta}}{\cos \beta + (\mu_1 + \mu_2) \sin \beta} \quad (8)$$

и аналогично из (5) и (7)

$$R'' = E_0 \frac{\mu_1 \sin \beta + \frac{\mu_2}{\sin \beta}}{\cos \beta - (\mu_1 + \mu_2) \sin \beta}. \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) следует, что

$$R' < R''.$$

Эта „асимметрия“ сил трения возрастает с увеличением коэффициентов трения  $\mu_1$  и  $\mu_2$  и угла  $\beta$ . Но при малых  $\mu_1$  и  $\mu_2$  и не слишком большом  $\beta$  различие между  $R'$  и  $R''$  незначительно. Здесь, согласно (8) и (9), для обоих ходов муфты можно принять одинаковое значение силы трения

$$R = E_0 \left( \mu_1 \operatorname{tg} \beta + \frac{2 \mu_2}{\sin 2 \beta} \right). \quad (10)$$

Зависимости (8) — (10) для силы  $R$  были получены на основе соотношения (2), то есть в предположении, что силы трения  $T_1$  и  $T_2$  в точках контакта шаров с тарелками подчиняются закону Кулона. Но действительные законы трения шаров в рассматриваемом регуляторе значительно более сложны и требуют особого рассмотрения с учетом влияния смазки, размеров шаров, сложной кинематики их движения во время колебаний муфты регулятора и т. д. Анализ этих законов не входит в задачи этой статьи.

Экспериментальные исследования сопротивлений в регуляторах двигателей Д-6 и Д-12, проведенные Е. В. Коваленок в лаборатории двигателей внутреннего сгорания Томского политехнического института показали, что при  $\omega = \text{const}$  приведенная к муфте сила трения  $R$  практически прямо пропорциональна мгновенной скорости осевого движения муфты.<sup>1)</sup>

Это дает нам основания принять, что коэффициенты трения  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , в соотношениях (2) прямо пропорциональны скоростям радиального перемещения по тарелкам точек контакта шаров с этими тарелками

$$\mu_1 = \Psi \frac{dy}{dt},$$

$$\mu_2 = \frac{\Psi}{\sin \beta} \frac{dy}{dt},$$

где  $\Psi$  — некоторый коэффициент, зависящий от характеристик смазочного масла, качества обработки поверхностей шаров, тарелок и т. п.

Следовательно, вместо (10) можно написать

$$R = - \Psi E_0 \left( \mu_1 \operatorname{tg} \beta + \frac{2 \mu_2}{\sin 2 \beta} \right) \cdot \frac{dy}{dt} \quad (11)$$

или в общем виде

$$R = - k \frac{dx}{dt}, \quad (12)$$

где

$k$  — приведенный к муфте коэффициент линейного (вязкого) трения в регуляторе,

$\frac{dx}{dt}$  — мгновенная скорость перемещения муфты вдоль оси вала регулятора.

Теперь для свободных колебаний муфты регулятора, отключенного от двигателя и топливного насоса и вращающегося с постоянной угловой

<sup>1)</sup> Исследования проводились на маятниковой установке, сходной с установкой, разработанной В. Крутовым в НАМИ.

скоростью  $\omega$  (например, от электромотора—при испытаниях регулятора на маятниковой установке) можно написать

$$(M + m_{ш} \operatorname{tg}^2 \beta) \frac{d^2 x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} + (c - m_{ш} \omega^2 \operatorname{tg}^2 \beta) x = 0,$$

где

$M$  — приведенная к муфте масса всех, двигающихся при осевых перемещениях муфты, деталей регулятора (исключая шары),  
 $m_{ш}$  — суммарная масса всех шаров,  
 $m_{ш} \operatorname{tg}^2 \beta$  — масса шаров, приведенная к муфте,  
 $c - m_{ш} \omega^2 \operatorname{tg}^2 \beta$  — так называемый фактор устойчивости регулятора.

Из (11) и (12)

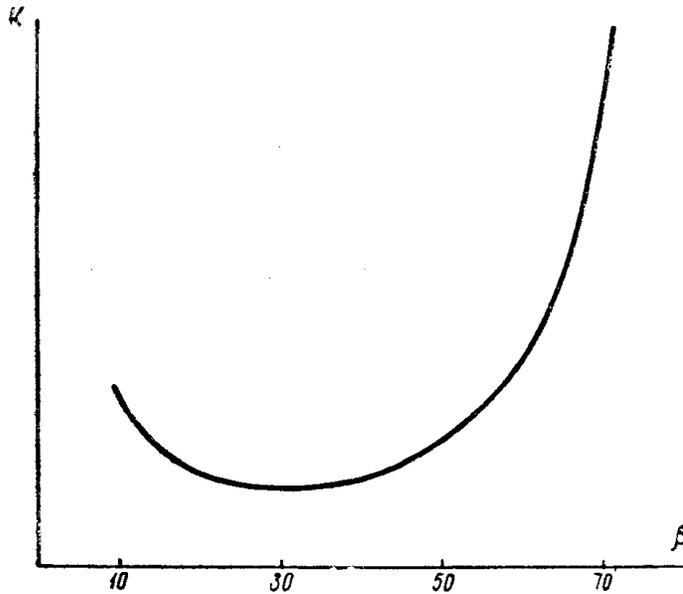
$$k = \Psi E_0 \left( \operatorname{tg}^2 \beta + \frac{1}{\sin \beta \cdot \cos^2 \beta} \right) \quad (13)$$

и

$$k = \Psi \left( C_x + Q_x \right) \left( \operatorname{tg}^3 \beta + \frac{1}{\cos^3 \beta} \right)$$

или при  $Q_x \ll C_x$

$$k \cong \Psi C_x \left( \operatorname{tg}^3 \beta + \frac{1}{\cos^3 \beta} \right).$$



Фиг. 3

Таким образом, коэффициент  $k$  при  $E_0 = \text{const}$  быстро возрастает с увеличением угла  $\beta$  наклона образующей конуса тарелки к оси вала регулятора. Например, увеличение угла  $\beta$  от 60 до 70° приводит к увеличению коэффициента  $k$  на 104% (фиг. 3).

Поэтому опытные данные по коэффициенту  $k$ , полученные при испытаниях одного регулятора, нельзя без соответствующих пересчетов пере-

носить на такой же регулятор, отличающийся от первого только углом  $\beta$ . Этот пересчет следует производить на основе выражения (13).

Наконец, сильная зависимость коэффициента  $k$  от угла  $\beta$  дает конструктору некоторые возможности управлять сопротивлениями в системе регулирования двигателя с целью получения желательных характеристик качества регулирования. Принимая различные значения угла  $\beta$ , можно получить различные величины  $k$  при неизменных качестве смазки, качестве обработки шаров и поверхностей качения и т. п.

---