

УДК 621.9.048

DOI: 10.30987/article\_5d6cbe42464335.74212016

В.А. Лебедев, Г.В. Серга

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Представлены результаты исследований по повышению эффективности и увеличению технологических возможностей отделочно-упрочняющей обработки деталей машин. Предложены рабочие органы станков в виде комбинированных винтовых роторов с различной поверхностью по периметру. Конструкция и принцип работы оборудования на базе рабочих органов в виде комбинированных

винтовых роторов с треугольной поверхностью по периметру показаны на примере станка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки.

**Ключевые слова:** отделочно-упрочняющая обработка, рабочий орган, комбинированный ротор, треугольная поверхность, периметр, масса загрузки.

V.A. Lebedev. G.V. Serga

## INCREASE OF EFFECTIVENESS AND TECHNOLOGICAL POTENTIALITIES OF FINISHING-STRENGTHENING

The paper reports the results of investigations on the increase of effectiveness and productivity of machinery finishing-strengthening. The design search of combined screw rotors with the triangular surface along the perimeter was carried out by methods of descriptive geometry and engineering drawing with the aid of "Compass-3D" program complex. The design and operation principle of equipment on the basis of executive organs as combined screw rotors with the triangular surface along the perimeter are shown by the example of the plant for finishing-cleaning and streng-

thening. For the development of the procedure for calculation of such equipment there is carried out a theoretical investigation of the motion of parts under machining and particles of working environment in combined screw rotors. In the classification developed of equipment executive organs in the form of combined screw rotors there are presented different forms of their surface along the perimeter.

**Key words:** finishing-strengthening, executive organ, combined rotor, triangular surface, perimeter, charging mass.

### Введение

Комбинированные винтовые роторы с треугольной поверхностью по периметру позволяют придавать обрабатываемым предметам (деталям и средам) движение с большой амплитудой за счет своей оригинальной формы, что повышает производительность и качество обработки. Все пока-

занные в статье образцы оборудования, созданные методами начертательной геометрии и инженерной графики, являются, по классификации академика Л.Н. Кошкина, машинами четвертого класса, предметы обработки в которых обрабатываются пространством [1-12].

### Методы и пути совершенствования рабочих органов станков

На рис. 1 показана установка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки, состоящая из комбинированного винтового ротора 1, снабженного средствами для загрузки (2) и выгрузки (3) обработанных деталей, средства для выгрузки отходов производства 4 (облой, окалина, заусенцы). Привод на рис. 1 не показан. В комбинированном винтовом роторе 1 к торцевым стенкам при-

креплены цапфы 5 и 6, что обеспечивает возможность его вращения в подшипниковых опорах 7 и 8. Для создания условий бесперебойной подачи внутрь ротора предметов обработки носок 9 введен в отверстие цапфы 5. Средство для загрузки 2, подшипниковые опоры 7 и 8 вместе с комбинированным винтовым ротором 1 закреплены на платформе 10, которая с помощью четырех пружин 11

упруго закреплена на основании 12. В установке смонтировано приспособление, которое регулирует угол наклона оси вращения ротора относительно горизонта (на рис. 1 не показано). Загрузочная цапфа 5 и разгрузочная цапфа 6 снабжены пружинами 13 и 14 с квадратным сечением витков, жестко прикрепленными к их внутренней поверхности.

Комбинированный винтовой ротор 1 (рис. 2) выполнен в виде винтового наклонного усеченного конуса с винтовой боковой поверхностью треугольной формы по периметру и плоскими основаниями в виде торцевых щек эллиптической формы 15 и 16, смонтированных под острым углом  $\beta$  одна к другой и под разными острыми углами  $\psi$  и  $\varphi$  к оси вращения ротора. При этом комбинированный винтовой

ротор 1 установлен под острым углом  $\alpha$  к оси его вращения и снабжен загрузочной и разгрузочной цапфами 5 и 6 конической формы с уклоном в сторону выгрузки и жестко закрепленными по их внутренним диаметрам коническими пружинами 13 и 14 с витками квадратного сечения и уклоном в сторону выгрузки. Большие оси  $i_1-i_1$  и  $i_2-i_2$  (рис. 3) торцевых щек 15 и 16 ротора 1 повернуты относительно друг друга на острый угол  $\omega$ , при этом треугольная боковая поверхность по его периметру сгибается с образованием винтовых поверхностей. По периметру выгрузной цапфы 6 выполнены отверстия 17, позволяющие отделить в средство для отходов 4 отходы производства (заусенцы, облой, окалину) от обработанных деталей, которые выгружаются в емкость 3.

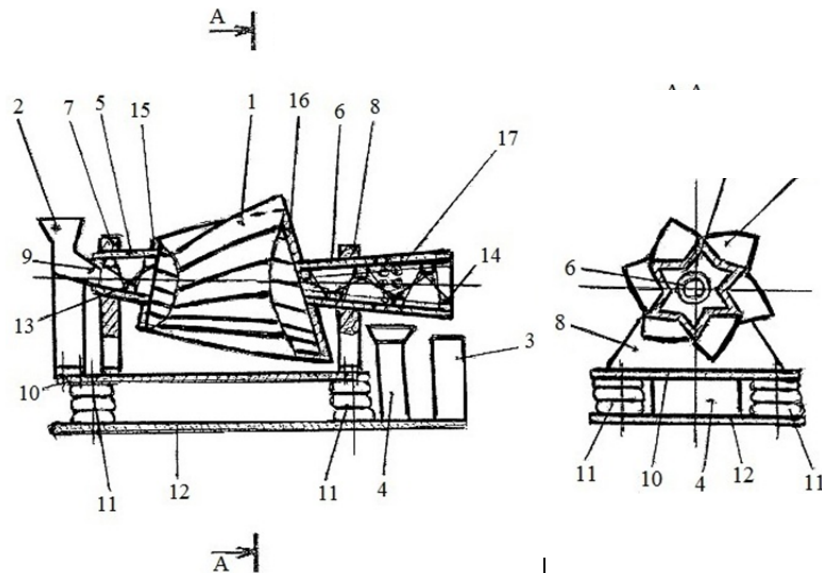


Рис. 1. Установка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки

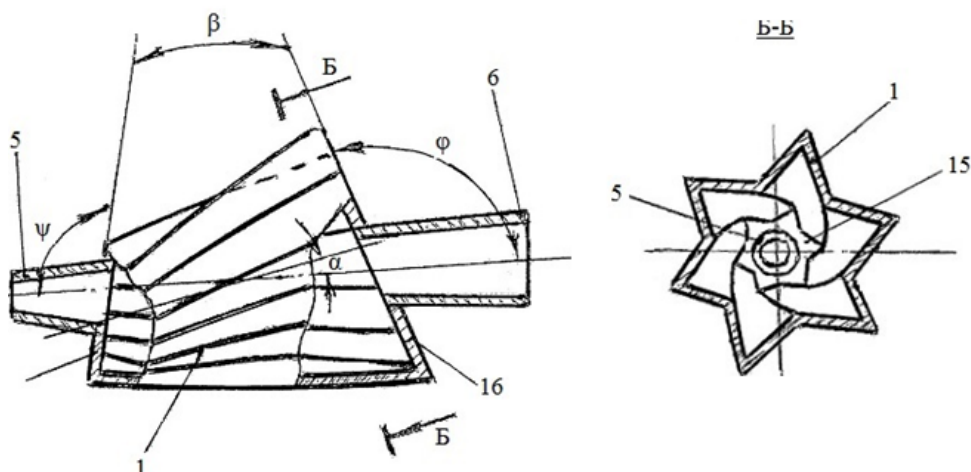


Рис. 2. Комбинированный винтовой ротор

Посредством средства для загрузки обрабатываемые детали, совместно с частицами рабочих сред (массы загрузки) непрерывным потоком подаются внутрь конической загрузочной цапфы и с помощью витков прямоугольного сечения загружаются во вращающийся барабан. При вращении комбинированного винтового ротора 1 массы загрузки совершают движение по различным эллиптическим траекториям. Созданный эксцентриситет нарушает скорость и направление движения масс загрузки, и им сообщаются низкочастотные колебания с большой амплитудой. Этому способствуют винтовая треугольная боковая поверхность комбинированного винтового ротора 1 и карманы треугольной формы по внутреннему периметру ротора, которые захватывают порции масс загрузки при его вращении, поднимают выше угла естественного откоса и бросают на противоположные стенки ротора, навстречу его вращающейся бо-

вой поверхности, увеличивая частоту и энергоёмкость взаимодействия обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред.

За счет дебаланса масс комбинированного ротора 1 и размещенных внутри него обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред, а также средства для загрузки и платформы, упруго установленных на станине, создаются высокочастотные колебания с малой амплитудой. Совместное воздействие на массы загрузки высокочастотных колебаний с малой амплитудой и низкочастотных колебаний с большой амплитудой, а также нарушения скорости и направления движения масс загрузки, в том числе под воздействием криволинейности винтовых канавок треугольной формы в продольном направлении по внутреннему периметру комбинированного винтового ротора 1, повышают производительность и расширяют технологические возможности.

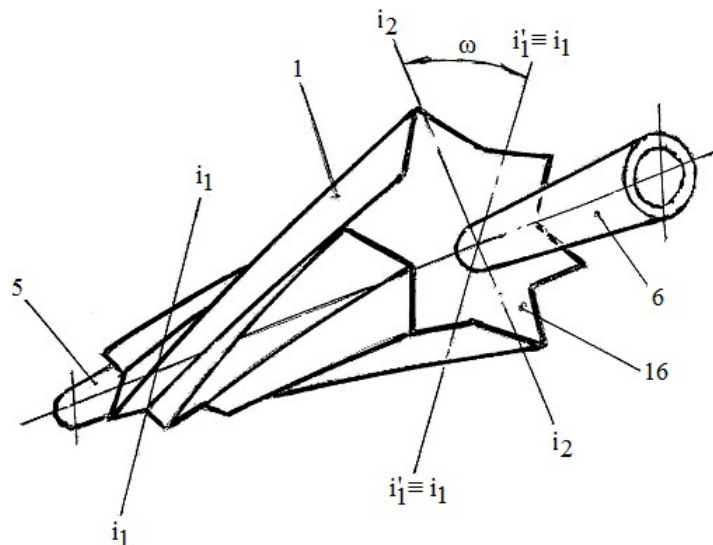


Рис. 3. Наглядное изображение комбинированного винтового ротора

Массы загрузки движутся в вертикальной плоскости по эллиптическим траекториям, а в горизонтальной плоскости - возвратно-поступательно. На эти движения воздействуют не только колебания, возбуждаемые асимметричным положением комбинированного винтового ротора 1, но и колебания в трех взаимно перпендикулярных направлениях, а также колебания, создаваемые чередующимися высту-

пами и впадинами треугольной боковой поверхности ротора.

Поток движущихся деталей и частиц рабочих сред нестационарен. В результате воздействия разнонаклоненных торцевых стенок 15 и 16, а также геометрического уклона комбинированного винтового ротора 1 массы загрузки двигаются по сложным траекториям и перемещаются в осевом направлении.



зависимости (6), где ( $W_x = \dot{x}$ ); ( $W_y = \dot{y}$ ); ( $W_\varphi$ ) - в направлении  $\bar{\varphi}$ ; ( $W_r$ ) - в направлении центра [14; 15];  $\bar{W}_{xy} = \bar{W}_\varphi + W_r$ .

При  $\rho = r = const$ ,  $W_r = -r \cdot \dot{\varphi}^2$ ,  $W_\varphi = r \cdot \ddot{\varphi}$  зависимость (2) имеет

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -r \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi; & \dot{y} &= r \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi; \\ \ddot{x} &= -r(\ddot{\varphi} \cdot \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 \cdot \cos \varphi); & \ddot{y} &= r(\ddot{\varphi} \cdot \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi). \end{aligned}$$

После подстановки получим:

$$\begin{aligned} W_{xy} &= \sqrt{\{-r \cdot (\ddot{\varphi} \cdot \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 \cdot \cos \varphi)\}^2 + \{r \cdot (\ddot{\varphi} \cdot \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi)\}^2} = \\ &= \sqrt{(r \cdot \ddot{\varphi})^2 + (-r \cdot \dot{\varphi}^2)^2}. \end{aligned}$$

Для оценки скорости продольного перемещения будем пользоваться зависимостью (6). При этом первое уравнение системы уравнений (1) рассматриваем в условиях динамического равновесия ( $r = const$ ). При интегрировании второго уравнения системы (1) (в зависимости от моделирования сил  $F_\varphi$  в направлении  $\bar{\varphi}$ ) получаем  $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ .

Пусть  $P = P_1 \cdot N_1 + P_2 \cdot N_2$  – вес засыпаемой массы, где  $P = m \cdot g$ ,  $P_1 = m_1 \cdot g$ ,  $P_2 = m_2 \cdot g$ ,  $N_1$  и  $N_2$  – соответственно количества засыпаемых (моделируемых) материальных точек. Пусть (с целью упрощения)  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$  – удельный вес их материала. Тогда вес  $P$  можно представить в виде

$$P = K_3 \cdot \gamma \cdot V_m, \quad (7)$$

где  $K_3$  – коэффициент плотности засыпки массы  $m$  в объем  $V_m$ .

$K_3 = \frac{\pi}{6}$  – вытекает из отношения объема, занимаемого каждым из шаров, к соответствующему объему куба, в который он вписан; объем шара равен  $V_u = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_u^3$ ; объем куба равен  $V_k = (2 \cdot r_u)^3$ :

$$K_3 = \frac{V_u}{V_k} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_u^3}{(2 \cdot r_u)^3} = \frac{\pi}{6}.$$

Если отнести  $P$  к  $V_{p.k.}$  (объему рабочей камеры), то получим так называемый условный удельный вес взвешенных частиц:

вид

$$W_{xy} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \sqrt{W_\varphi^2 + W_r^2}.$$

При этом  $x = r \cdot \cos \varphi$ ,  $y = r \cdot \sin \varphi$ .

Продифференцировав по переменной  $t$ , получим:

$$\gamma_{усл.} = \frac{P}{V_{p.k.}} = \frac{\pi}{6} \cdot \gamma \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}. \quad (8)$$

Очень важно то обстоятельство, что фигурирует соотношение объемов  $\frac{V_u}{V_{p.k.}}$ , необходимое для моделирования функциональных зависимостей.

Условное давление:

$$P_{усл.} = 2 \cdot \gamma_{усл.} \cdot r, \quad (9)$$

Необходимо ввести некоторый эмпирический коэффициент согласования  $K_c = K_{(\omega)}$ , согласующий реальное давление с моделируемым. Тогда, подставляя (8) в (9), получим:

$$P_{усл.} = \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot r \cdot K_c \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}. \quad (10)$$

Теперь можно представить явление увлекаемости материальной точки  $m_1$  стенками комбинированного винтового ротора силой условного ее выталкивания вверх, отнесенной к площади ее поперечного сечения ( $m_1$  - шар,  $S_1 = \pi \cdot r_1^2$  - площадь поперечного сечения). Если еще учесть, что увлекаемая масса будет проскальзывать относительно стенок комбинированного винтового ротора, то эту силу  $P_1$  можно представить так:

$$\hat{P}_1 = \mu \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot r \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}, \quad (11)$$

где  $\mu$  – коэффициент проскальзывания шаров относительно стенок реальной рабочей камеры.

Выражение (11) представляет (как мы убедимся ниже) схематическое моделирование массовых сил, где вводимые коэффициенты должны быть сложными функциями определенной природы. Заметим,

что в (11) вместо  $\frac{V_m}{V_{p.к.}}$  правильнее было бы считать:

$$K_v = K_v \left( \frac{V_m}{V_{p.к.}} \right),$$

где индекс у коэффициента  $K_v$  указывает на природу его образования.

Рассмотрим, как формируется модель скольжения между  $m_1$  и  $m_2$ . Например, при  $U_\tau \geq 0$  [17]

$$R = \mp \mu \cdot N, \tag{12}$$

где  $N$  и  $R$  – нормальная и тангенциальная составляющие силы трения.

Тогда с учетом вероятности возникновения контактов между телами силу трения можно определить согласно зависимости

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (1 - K^2) \cdot (V_1 - V_2)^2,$$

где  $(V_1 - V_2)^2 \approx \dot{\varphi}^2 \cdot r \cdot \Delta r$ , если после каждого контакта  $m_1$  и  $m_2$  удерживаются на траектории движения.

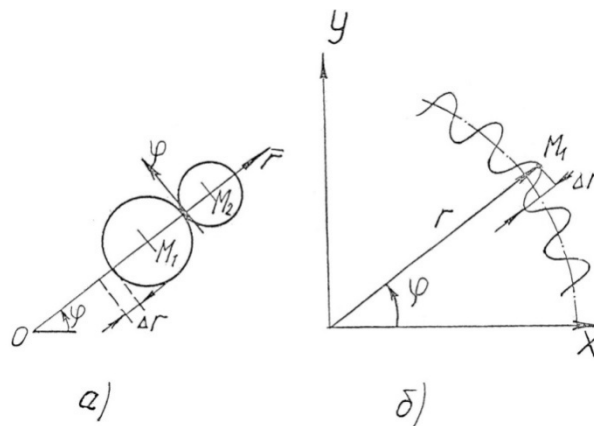


Рис. 5. Схема контактирования частиц масс загрузки в радиальном направлении

После введения некоторого эмпирического коэффициента

$$K_v = \frac{1}{2} \cdot (1 - K^2); \Delta W = N \cdot \Delta r.$$

силу нормального давления  $N$  между контактирующими поверхностями  $S_{m1}$  и  $S_{m2}$  можно определить с помощью зависимости

$$N = - \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot K_v \cdot r \cdot \dot{\varphi}^2. \tag{14}$$

Покажем возможность моделирования коэффициента трения скольжения  $\mu$  в выражении (13). Известна общая форма

$$F_{m.p.1,2} = -\mu \cdot P_m \cdot N, \tag{13}$$

где  $F_{r1,2}$  – сила взаимодействия между массами  $m_1, m_2$  вдоль направления  $\vec{r}$ ;  $N$  – сила нормального давления между контактирующими поверхностями  $S_{m1}$  и  $S_{m2}$ ;  $P_m$  – вероятностный коэффициент числа контактов, уточняемый экспериментальным путем.

За момент соприкосновения двух масс совершается работа  $F_{r1,2} \cdot \Delta r$ ;  $\Delta r \ll r = r_{cp}$  – перемещение достаточно мало, т.е. массы  $m_1, m_2$  (согласно принятой модели) после нескольких контактирований сохраняют движение по окружности радиуса  $r = r_{cp}$ .

При этом работа обуславливает потерю кинетической энергии [16], равную

$$\mu = a + b \cdot \sigma_K + c \cdot \sigma_K^2, \tag{15}$$

где

$$\sigma_K = \sqrt{\frac{|N| \cdot E_{np.}}{\hat{B}_2} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}; N - \text{сила взаимодействия}; \hat{B}_2 = \psi \cdot r_2 = const, r - \text{радиус } m_2.$$

В нашем случае коэффициент пропорциональности  $\psi = 0,9$ . С учетом этого выражение (15) предстанет в виде [14; 16; 18]

$$\mu_1 = \mu_{10} + b_2 \cdot \dot{\varphi} + c_2 \cdot \dot{\varphi}^2, \tag{16}$$

где коэффициенты  $b_2, c_2$  достаточно малы.

В математической модели кон-

тактных сил трения, сил увлечения массы загрузки стенками комбинированного винтового ротора (эти силы выше мы назвали массовыми) особая роль отводится эмпирическим коэффициентам, которые должны быть установлены из реального соотношения сил (массовых сил), действующих на каждую из обрабатываемых деталей. К этому следует добавить, что условие  $\rho = r = const$  является достаточно сильным загроулением. Вообще говоря, соотношение коэффициентов  $K_B, K_C, P_m, \omega, \frac{V_m}{V_{p.k.}}, r$  при правильном их подборе должно определять соответствие моделируемого процесса условного движения реальному; процесс можно регулировать путем поочередного варьирования одних из них и фиксирования других. Например, если  $K_B, K_C$  достаточно малы, то это означает пренебрежение массовыми силами. При интегрировании второго уравнения системы (1) мы находимся в условиях

$$\frac{\dot{\varphi}^2}{2} \cong C - \frac{g}{r} \cdot \sin \varphi, \quad (17)$$

где выбор постоянной  $C = C(\omega, \varphi_0)$  может оказаться неудовлетворительным с точки зрения соответствия реальному значению  $\dot{\varphi}$ . Мало того, если при одинаковом захвате массы, т.е. при  $\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$ , непрерывно уменьшать угловую скорость вращения комбинированного винтового ротора  $\omega$ , то моделируемое условное движение не будет обеспечено с энергетической точки зрения, так как материальная точка  $m_1$  так и не достигнет верхнего положения рабочей камеры, т.е. условие  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  не будет обеспечено.

В данном случае это будет уже при

$$m_1 \cdot r \cdot \ddot{\varphi} = -(P_1 - \tilde{P}_1) \cdot \cos \varphi + F_{\text{тр}1,2}, \quad (18)$$

где

$$P_1 = m_1 \cdot g.$$

Это уравнение можно переписать с учетом (13), (14), (16), (24) в виде

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi} &= -[K_0 - K_1] \cdot \cos \varphi + K_2 \cdot (M_{20} + b_2 \cdot \dot{\varphi} + C_2 \cdot \varphi^2) \cdot \varphi^2. \\ m_1 \cdot r \cdot \ddot{\varphi} &= -(P_1 - \tilde{P}_1) \cdot \cos \varphi + F_{\text{тр}1,2}; \end{aligned}$$

$\omega = 4 \frac{\pi}{c}$ , т.е. при снижении количества оборотов. Если при этом добиваться «выполнения энергетики», увеличивая  $\varphi_0$  (начальное значение), то при  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ ,  $\dot{\varphi} > \omega$  уже будет выполняться (17).

Таким образом, массовые силы необходимо не только учитывать, но и функционально представлять, выделяя, например, фиксированные  $\omega, \frac{V_m}{V_{p.k.}}$  и варьируя с функциональными зависимостями  $r, K_B, K_C$ . Этот процесс достаточно сложен и опирается на ряд экспериментальных характеристик.

Найдем величину проекции  $F_\varphi$  (рис. 6). Согласно принятой модели, выталкивающая сила  $\tilde{P}$  направлена вверх параллельно оси Y и, суммируясь с силой тяжести, дает величину проекции на Y, равную разности сил  $(\tilde{P}_1 - P_1)$ .

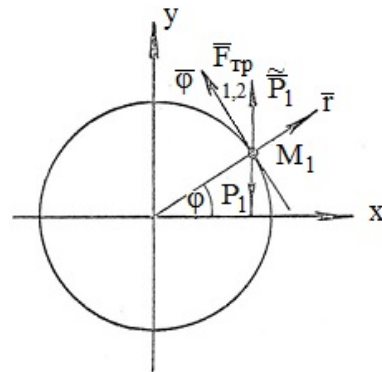


Рис. 6. Схема действия сил на частицу масс загрузки

Очевидно, что

$$(\tilde{P}_1 - P_1) \cdot \cos \varphi = -(P_1 - \tilde{P}_1) \cdot \cos \varphi,$$

а если учесть величину силы трения, то

$$F_\varphi = -(P_1 - \tilde{P}_1) \cdot \cos \varphi + F_{\text{тр}1,2}.$$

С учетом  $\rho = r = const$  второе уравнение системы (1) принимает вид

$$\begin{aligned} m_1 \cdot r \cdot \ddot{\varphi} &= -\left(m_1 \cdot g - \mu_1 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot 2 \cdot K_c \cdot S_1 \cdot V_m V_{p.k.} \cdot \cos \varphi - \mu_2 \cdot P_m \cdot N\right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_1 \cdot r \cdot \ddot{\varphi} &= -\left(m_1 \cdot g - \mu \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot 2 \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}\right) \cdot \cos \varphi + \mu_2 \cdot P_m \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot K_b \cdot r \cdot \dot{\varphi}^2; \\ m_1 \cdot r \cdot \ddot{\varphi} &= -\left(m_1 \cdot g - \mu_1 g \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot 2 \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}\right) \cdot \cos \varphi + (\mu_{20} + b_2 \cdot \dot{\varphi} + C_2 \cdot \varphi^2) \cdot \end{aligned}$$



$$\ddot{\varphi} = - \left( \frac{g}{2} - \frac{M_1 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}}{m_1} \right) \cdot \cos \varphi + (\mu + b_2 \cdot \dot{\varphi} + C_2 \cdot \dot{\varphi}^2) \cdot P_m \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot K_b \cdot \dot{\varphi}^2.$$

Обозначим:

$$K_0 = \frac{g}{2}; \quad K_1 = \frac{M_1 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}}{m_1}; \quad K_2 = P_m \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot K_b.$$

В формуле (19) желательно представить разность  $(K_1 - K_0)$  в виде

$$(K_1 - K_0) = -(1 - \hat{\mu}_1) \cdot \frac{g}{r}, \tag{20}$$

где

$$\begin{aligned} K_0 \left( \frac{K_1}{K_0} - 1 \right) &= -K_0 - \left( 1 - \frac{K_1}{K_0} \right) \\ &= -\frac{g}{r} \cdot \left( 1 - \frac{K_1}{K_0} \right) = \\ &= -\frac{g}{r} \cdot \left( 1 - \frac{\mu_1 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}} \cdot r}{m_1 \cdot g} \right) = \\ &= -(1 - \hat{\mu}_1) \cdot \frac{g}{r}. \end{aligned}$$

Здесь  $\hat{\mu}_1 = \frac{K_1}{K_0}$ .

Исходя из того, что  $K_0 = \frac{1}{2} \cdot g$  – реальный коэффициент от силы тяжести,

$$\hat{\mu}_1 \approx \mu_0 - \frac{\pi}{3} \cdot \mu_{10} \cdot S_1 \cdot \frac{r}{P_1} \cdot j \cdot K_c \cdot K_v$$

или

$$\hat{\mu}_1 \approx \mu_0 - \frac{\pi}{3} \cdot \mu_{10} \cdot S_1 \cdot \frac{r}{P_1} \cdot j \cdot K_c(\omega) \cdot K_v \left( \frac{V_m}{V_{p.k.}} \right), \tag{21}$$

где  $\mu_0$  – некоторый статический коэффициент трения покоя;  $\mu_{10}$  – коэффициент трения скольжения (из выражения (11) не трудно видеть, что при увеличении периметра комбинированного винтового ротора  $r_2 = \infty, \sigma_K \approx 0$ ; в этом случае  $\mu_{10} \approx const$ , т.е.  $0,07 \leq \mu_{10} \leq 0,15$ );  $S_1 = \pi \cdot r_1$ ;  $P_1$  – вес шара радиуса  $r$ ;  $j$  – его удельный вес.

Параметры  $\mu_0, K_c, K_v$  предназначены приблизить условный (моделируемый) процесс к реальному. Последние два коэффициента следует рассмотреть особо.

$$K_2 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot P_m \cdot K_b.$$

Заметим, что если вероятностный коэффициент  $P_m = P_m(\varphi)$  будет осреднен, то слагаемое правой части (19) от контактных сил окажется зависимым только от  $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ , которая, в свою очередь, входит и в выражение (6).

Представление (20) выбрано не случайно: нужно иметь в виду, что реальная продольная скорость перемещения обрабатываемых деталей мала по сравнению с угловыми скоростями вращения комбинированного винтового ротора, поэтому  $\hat{\mu}_1 = 1$ , т.е.  $1 - \hat{\mu}_1$ , – должна быть величина достаточно малого порядка, тем более с учетом множителя  $\frac{1}{2} \cdot g$ . С другой стороны, коэффициент увлечения массы  $\hat{\mu}_1$  можно рассматривать как некоторый условный коэффициент трения, зависящий от геометрии стенок, угловой скорости вращения комбинированного винтового ротора, соотношения объемов  $\frac{V_m}{V_{p.k.}}$  материала, сыпучести в спокойном состоянии, размеров частиц – материальных точек, размеров поперечного сечения комбинированного винтового ротора, обработки поверхности и других физико-химических свойств, т.е. достаточно сложной природы. Поэтому с учетом вида (11) есть смысл представить  $\hat{\mu}_1$  в следующей функциональной форме:

Заметим, что в определенной мере от коэффициентов  $K_c(\omega), K_v \left( \frac{V_m}{V_{p.k.}} \right)$  зависит коэффициент  $K_b$  в выражении (19). Этот коэффициент также зависит от геометрии профиля поперечного сечения барабана: порядок коэффициента  $K_2$ , очевидно, должен соответствовать порядку разности  $K_1 - K_0$  (выше, может быть, еще допускается, а ниже нет, так как нарушается общее требование к порядку скорости продольного перемещения).



Так как предполагаемые порядки слагаемых правой части уравнения (19) достаточно малы (и с учетом закругления

$\rho = r = const$ ), при интегрировании (19) положим  $b_2, C_2 \approx 0$ . Запишем:

$$\ddot{\varphi} \approx (K_1 - K_0) \cdot \cos \varphi + K_2 \cdot \mu_{20} \cdot \dot{\varphi}^2. \quad (22)$$

Однако, несмотря на простоту вида, (21) может быть проинтегрировано методом последовательных приближений. В данном случае достаточно остановиться на

первом приближении для  $\dot{\varphi} \approx \dot{\varphi}^{(1)}$ , полагая  $\dot{\varphi}^{(0)} = \dot{\varphi}_0 = \omega$  в качестве начального (нулевого) приближения. Имеем:

$$\ddot{\varphi} \approx \dot{\varphi}^{(1)} \approx (K_1 - K_0) \cdot \cos \varphi + K_2 \cdot \mu_{20} \cdot \omega^2. \quad (23)$$

После вычисления формулы (22)

$$\ddot{\varphi} \approx \dot{\varphi}^{(1)} = \frac{d\varphi^{(1)}}{dt},$$

а после сокращения на  $dt$  и интегрирования запишем:

$$\frac{\dot{\varphi}^2}{2} \approx \frac{[\varphi^{(1)}]}{2} = C^{(1)} + (K_1 - K_0) \cdot \sin \varphi + K_2 \cdot \mu_{20} \cdot \omega^2 \cdot \varphi,$$

где  $C^{(1)}$  определяется из начальных условий  $\dot{\varphi}_0 = \omega, \varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$ .

Окончательно получим приближен-

ную зависимость для последующего анализа:

$$\dot{\varphi} \approx \sqrt{[1 + \mu_{20} \cdot K_2 \cdot (\pi + 2\varphi)] \cdot \omega^2 + 2(K_1 - K_0) \cdot (1 + \sin \varphi)}. \quad (24)$$

Аналогично имеем ( $V_z = 0$ ):

$$V_z \approx r \cdot tgj \cdot \left\{ -\omega + \sqrt{[1 + \mu_{20} \cdot K_2 \cdot (\pi + 2\varphi)] \cdot \omega^2 + 2(K_1 - K_0) \cdot (1 + \sin \varphi)} \right\}, \quad (25)$$

Нетрудно видеть, что для дальнейшего исследования зависимостей (24), (25), их интегрирования при заданном диапазоне изменения  $\pi \leq \omega \leq 4\pi$  (интересующем нас диапазоне)

подкоренное выражение удобно разлагать в ряд относительно  $\omega^2$  (возможно, достаточно ограничиться только линейными числами).

## Заключение

Технико-экономические преимущества от внедрения нового оборудования обеспечиваются за счет того, что рабочий орган выполнен в виде комбинированного винтового ротора, установленного под острым углом  $\alpha$  к оси его вращения и снабженного по внутреннему периметру винтовыми карманами треугольной формы, а по наружному периметру выполненного с чередующимися винтовыми выступами треугольной формы.

Предложенная конструкция позволяет повысить производительность,

расширить технологические возможности обработки за счет одновременного воздействия на массы загрузки высокочастотных колебаний с малой амплитудой и низкочастотных колебаний с большой амплитудой, а также нарушения скорости и направления движения масс загрузки при их встрече с карманами треугольной формы, расположенными по винтовым линиям по внутреннему периметру комбинированного винтового ротора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2672974 Российская Федерация, МПК В24В 31/023. Устройство для отделочно-

упрочняющей обработки / В.А. Лебедев, Г.В. Серга, И.В. Давыдова, С.Ю. Штынь; Донской

- государственный технический университет. – № 2017144229; заявл. 18.12.17; опубл. 21.11.18, Бюл. № 33.
2. Пат. 2519398 Российская Федерация, МПК B24B 31/02. Станок для химико-отделочно-упрочняющей обработки деталей / Г.В. Серга, В.В. Иванов, В.А. Лебедев; Кубанский государственный аграрный университет. – № 2013106597/02; заявл. 14.12.13; опубл. 10.06.14, Бюл. № 16.
  3. Пат. 2528291 Российская Федерация, МПК B24B 31/02. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / Г.В. Серга, В.А. Лебедев, В.В. Иванов; Кубанский государственный аграрный университет. – № 2013106599/02; заявл. 14.02.13; опубл. 10.09.14, Бюл. № 25.
  4. Пат. 2572685 Российская Федерация, МПК B24B 31/02. Устройство для отделочно-зачистной обработки / А.Ю. Марченко, А.Н. Иванов, В.А. Лебедев, В.В. Иванов, Г.В. Серга; Кубанский государственный аграрный университет. – № 2014129160/02; заявл. 15.07.14; опубл. 20.01.16, Бюл. № 2.
  5. Пат. 2613517 Российская Федерация, МПК B01F 13/08. Аппарат вихревого слоя непрерывного действия / Г.В. Серга, А.А. Кочубей, В.А. Лебедев; Кубанский государственный аграрный университет. – № 2016110382/02; заявл. 21.03.16; опубл. 16.03.17, Бюл. № 8.
  6. Пат. 2614009 Российская Федерация, МПК B01F 13/08. Аппарат вихревого слоя / Г.В. Серга, А.А. Кочубей, В.А. Лебедев; Кубанский государственный аграрный университет. – № 2015153707; заявл. 14.12.15; опубл. 22.03.17, Бюл. № 9.
  7. Пат. 2614013 Российская Федерация, МПК B01F 13/08. Аппарат слоя вихревого / Г.В. Серга, А.А. Кочубей, В.А. Лебедев; Кубанский государственный аграрный университет. – № 2016110238; заявл. 21.03.16; опубл. 22.03.17, Бюл. № 9.
  8. Пат. 2618568 Российская Федерация, МПК B01F 13/08. Аппарат трубный вихревого слоя / Г.В. Серга, А.А. Кочубей, В.А. Лебедев; Кубанский государственный аграрный университет. – № 2016108190; заявл. 09.03.16; опубл. 04.05.17, Бюл. № 13.
  9. Серга, Г.В. Внедрение идеологии Л.Н. Кошкина в виброупрочняющей технологии на примере винтовых роторов / Г.В. Серга, В.А. Лебедев // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьева. – Рыбинск, 2017. – № 2 (41). – С. 126-132.
  10. Lebedev, V.A. Increase of efficiency of finishing-cleaning and hardening processing of details based on rotor-screw technological systems / V.A. Lebedev, G.V. Serga, A.V. Khandozhko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. - № 327. - 042062.
  11. Lebedev, V.A. Method for calculating the power of a rotor-screw machines / V.A. Lebedev, G.V. Serga, I.V. Davydova, T.V. Atoyán, I.G. Koshlyakova, A.V. Gordienko // MATEC Web Conf. - 226 (2018) 01007.
  12. Lebedev, V.A. Main trends in intensification of rotor-screw processing of parts / V.A. Lebedev, G.V. Serga, I.V. Davydova, T.V. Atoyán, I.G. Koshlyakova, A.V. Gordienko // MATEC Web Conf. - 226 (2018) 01008.
  13. Яворский, Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1965. - С. 38.
  14. Смирнов, В.И. Курс высшей математики / В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1961. - Т. 3. - Ч. 2. - С. 641-643.
  15. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 135 с.
  16. Энциклопедический справочник. Машиностроение. Инженерные расчеты в машиностроении. - М.: ГНТИМЛ, 1947. – Т. 1. – Кн. 2. – 456 с.
  17. Федорченко, А.М. Теоретическая физика / А.М. Федорченко. – Киев: Вышш. шк., 1983. - 231 с.
  18. Серга, Г.В. Параметрические исследования кинетики износа кулачков: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г.В. Серга. - Львов, 1971.
1. Pat. 2672974 the RF, IPC B24B 31/023. *Device for Finishing-Strengthening* / V.A. Lebedev, G.V. Serga, I.V. Davydova, S.Yu. Shtyn; Don State Technical University. – No. 2017144229; claimed: 18.12.17; published: 21.11.18, Bull. No.33.
  2. Pat. 2519398 the RF, IPC B24B 31/02. *Machine for Parts Chemical-Finishing-Strengthening* / G.V. Serga, V.V. Ivanov, V.A. Lebedev; Kuban State Agricultural University. – No.2013106597/02; claimed: 14.12.13; published: 10.06.14, Bull. No.16.
  3. Pat. 2528291 the RF, IPC B24B 31/02. *Device for Finishing-Strengthening* / G.V. Serga, V.A. Lebedev, V.V. Ivanov; Kuban State Agricultural University. – No. 2013106599/02; claimed: 14.02.13; published: 10.09.14, Bull. No.25.
  4. Pat. 2572685 the RF, IPC B24B 31/02. *Device for Finishing-Cleaning* / A.Yu. Marchenko, A.N. Ivanov, V.A. Lebedev, V.V. Ivanov, G.V. Serga; Kuban State Agricultural University. – No. 2014129160/02; claimed: 15.07.14; published: 20.01.16, Bull. No.2.
  5. Pat. 2613517 the RF, IPC B01F 13/08. *Device of Continuous Vortex Layer* / G.V. Serga, A.A. Kochubey, V.A. Lebedev; Kuban State Agricultural

- University. – No. 2016110382/02; claimed: 21.03.16; published: 16.03.17, Bull. No.8.
6. Pat. 2614009 the RF, IPC B01F 13/08. *Device of Vortex Layer* / G.V. Serga, A.A. Kochubey, V.A. Lebedev; Kuban State Agricultural University. – No. 2015153707; claimed: 14.12.15; published: 22.03.17, Bull. No.9.
  7. Pat. 2614013 the RF, IPC B01F 13/08. *Device of Vortex Layer* / G.V. Serga, A.A. Kochubey, V.A. Lebedev; Kuban State Agricultural University. – No. 2016110238; claimed: 21.03.16; published: 22.03.17, Bull. No.9.
  8. Pat. 2618568 the RF, IPC B01F 13/08. *Pipe Device of Vortex Layer* / G.V. Serga, A.A. Kochubey, V.A. Lebedev; Kuban State Agricultural University. – No. 2016108190; claimed: 09.03.16; published: 04.05.17, Bull. No.13.
  9. Serga, G.V. Koshkin's ideology introduction in vibro-strengthening technology by example of screw rotors / G.V. Serga, V.A. Lebedev // *Bulletin of Soloviyov RSTU*. – Rybinsk, 2017. – No.2 (41). – pp. 126-132.
  10. Lebedev, V.A. Increase of efficiency of finishing-cleaning and hardening processing of details based on rotor-screw technological systems / V.A. Lebedev, G.V. Serga, A.V. Khandozhko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. - № 327. - 042062.
  11. Lebedev, V.A. Method for calculating the power of a rotor-screw machines / V.A. Lebedev, G.V. Serga, I.V. Davydova, T.V. Atoyan, I.G. Koshlyakova, A.V. Gordienko // MATEC Web Conf. - 226 (2018) 01007.
  12. Lebedev, V.A. Main trends in intensification of rotor-screw processing of parts / V.A. Lebedev, G.V. Serga, I.V. Davydova, T.V. Atoyan, I.G. Koshlyakova, A.V. Gordienko // MATEC Web Conf. - 226 (2018) 01008.
  13. Yavorsky, B.M. *Physics Reference Book* / B.M. Yavorsky, A.A. Detlaf. – M.: Science, 1965. – pp. 38.
  14. Smirnov, V.I. *Higher Mathematics Course* / V.I. Smirnov. – M.: Science, 1961. – Vol.3. – Part 2. – pp. 641-643.
  15. Wentzel, E.S. *Probability Theory* / E.S. Wentzel. – M.: Science, 1964. – pp. 135.
  16. *Encyclopaedic Dictionary. Mechanical Engineering. Engineering Calculations in Mechanical Engineering*. – M.: GNTIML, 1947. – Vol.1. – B.2. – pp. 456.
  17. Fedorchenko, A.M. *Theoretical Physics* / A.M. Fedorchenko. – Kiev: Higher School, 1983. – pp. 231.
  18. Serga, G.V. Parametric investigations of cam wear kinetics: *Author's Abstract of Thesis for Can. Sc. Tech.* / G.V. Serga. – Lvov, 1971.

Ссылка для цитирования:

Лебедев, В.А. Повышение эффективности и увеличение технологических возможностей отделочно-упрочняющей обработки / В.А. Лебедев, Г.В. Серга // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 8. – С.22 - 32.

Статья поступила в редакцию 11.06.19

Рецензент: д.т.н., профессор Кубанского государственного аграрного университета

Кузнецов Е.В.

Статья принята к публикации 2. 07. 19.

#### Сведения об авторах:

**Лебедев Валерий Александрович**, к.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, e-mail: [va.lebedev@yandex.ru](mailto:va.lebedev@yandex.ru).

**Lebedev Valery Alexandrovich**, Can. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Don State Technical University, e-mail: [va.lebedev@yandex.ru](mailto:va.lebedev@yandex.ru).

**Серга Георгий Васильевич**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой НГиГ Кубанского государственного аграрного университета им. И.Т. Трубилина, e-mail: [serga-georgiy@mail.ru](mailto:serga-georgiy@mail.ru).

**Serga Georgy Vasilievich**, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. "NG&G", Trubilin State Agricultural University of Kuban, e-mail: [serga-georgiy@mail.ru](mailto:serga-georgiy@mail.ru).