

УДК 621.024

¹Г. В. Серга д-р техн. наук, профессор, зав. каф. НГиГ,²А. Н. Секисов, канд. экон. наук, доцент каф. ТОЭСиУН¹Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина²Кубанский государственный технический университет;¹Тел. 89184107955; E-mail: serga-georgy@mail.ru²Тел. 89184480082; E-mail: alnikkss@gmail.com

РОТОРНО-ВИНТОВЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ ДЛЯ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ И УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Актуальность и новизна нового направления в науке и технике, созданного в КубГАУ, подтверждается 46 патентами на изобретения Российской Федерации, требующие фундаментальных исследований, с целью сохранения приоритета России в данном научном направлении. Предложены рабочие органы (называемые нами роторно-винтовыми системами) станков для чистовой, упрочняющей обработки (далее ОЗОО), которые не только преобразуют вращательное движение двигателя в колебательное движение обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред (далее массовое нагружение) большой амплитуды без традиционных виброактиваторов, без колебаний самих рабочих органов, но и обеспечивают их транспортировку от загрузки к выгрузке.

Ключевые слова: рабочий орган, роторно-винтовые системы, винтовые роторы, винтовые тела, винтовые барабаны, винтовые сита

G. V. Serga, A. N. Sekisov

ROTARY SCREW SYSTEMS IN MACHINE BUILDING FOR FINISHING-GRINDING AND HARDENING TREATMENT

The relevance and novelty of the new direction in science and technology created in KubGAU is confirmed by 46 patents for inventions of the Russian Federation that require fundamental study, in order to preserve Russia's priority in this scientific direction. Working bodies (called rotary-screw systems by us) of machine tools for finishing, hardening processing (hereinafter OZOO) are offered, which not only convert the rotational motion of the engine into oscillatory movement of the processed parts and particles of working media (hereinafter mass loading) large amplitude without traditional vibroactivators, without oscillations of the working bodies themselves, but also ensure their transportation from loading to unloading.

Keywords: working body, rotary screw systems, screw rotors, screw bodies, screw drums, screw sieves

В машиностроении, для выполнения отделочно-зачистной и упрочняющей обработки (в дальнейшем ОЗУО), достаточно широко применяют вибрационные технологии с колебаниями масс загрузки 2-15 мм и галтовочные устройства. Следствием этого являются: значительные энергозатраты, ограниченные технологические возможности, сложность эксплуатации. Устранением этих недостатков может служить разработка и внедрение технологий и оборудования, у которого в качестве рабочих органов будут использоваться оригинальные конструкции роторно-винтовых систем (винтовых роторов, винтовых корпусов, винтовых барабанов и винтовых решет) с горизонтальным расположением оси вращения, что позволит снизить энергозатраты, улучшить технико-экономические показатели.

Существующие в настоящее время несовершенства процессов ОЗУО объясняются недостаточными исследованиями сущности и состояния научной проблемы повышения эффективности технологических процессов в оборудовании для ОЗУО на базе рабочих органов в виде винтовых роторов, винтовых корпусов,

винтовых барабанов и винтовых решет. Нами предлагаются технологии с использованием оригинальных энергосберегающих роторно-винтовых систем, обеспечивающих более быстрое протекание технологических процессов с высокими технико-экономическими показателями. Для создания прогрессивного энергосберегающего технологического процесса производства для ОЗУО, базирующегося на технологиях и машинах высшего класса (по классификации академика Л.Н. Кошкина) предлагается оборудование на базе роторно-винтовых систем [1-5].

В ходе исследований применялись методы теории подобия и размерностей, с использованием безразмерных кинематических функций.

Проведены аналитические исследования физических явлений, происходящих в зоне контакта частиц масс загрузки, при их продольном перемещении в рабочих органах. Винтовые поверхности и винтовые канавки, расположенные в рабочих органах в виде роторно-винтовых систем, способствуют перемещению и увеличению интенсивности взаимодействия частиц масс загрузки друг с другом и с винтовой поверхностью рабочего органа. Это позволяет не только создать энергосберегающие технологии и влиять на характер движения частиц масс загрузки, но и расширить технологические возможности, повысить интенсивность теплообмена, упростить эксплуатацию оборудования для ОЗУО, сократить габариты по длине, уменьшить их массу, снизить энергозатраты.

Так как потребность в новых рабочих органах станков для ОЗУО достаточно велика, то их внедрение в машиностроении позволит решить одну из проблем технического оснащения предприятий машиностроительного комплекса. Это обеспечит развитие принципиально новой концепции производства станков для ОЗУО в России.

В настоящее время в технической литературе отсутствуют методы расчета основных параметров роторно-винтовых систем - рабочих органов оборудования станков для ОЗУО, отсутствуют методики назначения рациональных параметров осуществления технологических процессов, отсутствуют методы выбора конструкции в зависимости от вида и размеров частиц масс загрузки, технологических задач и требований производительности, основы расчета конструктивных параметров и технология их изготовления, что сдерживает развитие принципиально новой концепции производства станков для ОЗУО в России. Аналогов таких технологий и оборудования в мире нет. Это новое направление в науке и технике, принципиально новые рабочие органы станков для ОЗУО. Это принципиально новые энергосберегающие технологии и оборудование.

Научная новизна заключается в разработке теории и исследовании механизма придания потокам частиц масс загрузки движения в роторно-винтовых системах и создание основ расчета конструктивных параметров рабочих органов станков для ОЗУО, их внедрение на предприятиях машиностроительного комплекса, что позволяет решить одну из проблем - фундаментальных основ разработки его технического оснащения.

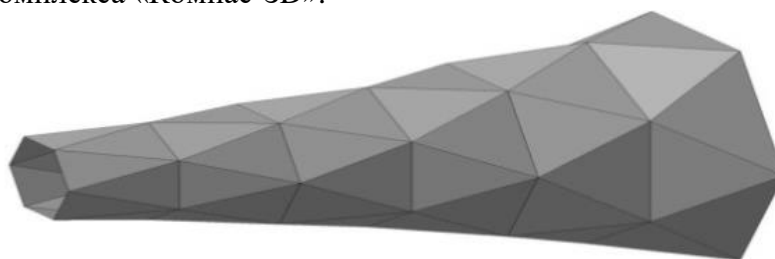
Актуальность и новизна исследования подтверждена 46 патентами на изобретения, патентообладатель - ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», некоторые из них представлены в работах [1-5].

Чтобы внедрить созданные станки для ОЗУО, проведены аналитические исследования явлений, происходящих в зоне контакта частиц масс загрузки, с

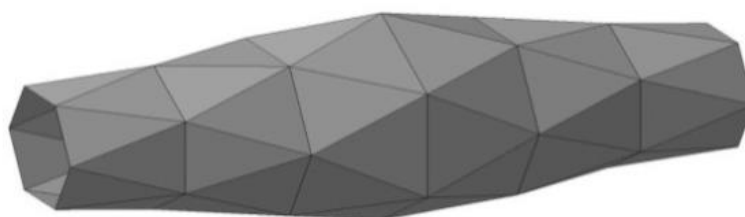
помощью методов теории подобия и размерности с использованием аппарата безразмерных кинематических функций, которые позволяют сопоставить соответствующие изучаемые величины. Решение этой задачи позволяет создать основы расчета конструктивных параметров и технологию изготовления рабочих органов в виде роторно-винтовых систем для ОЗУО. Возможность движения частиц масс загрузки в предлагаемых рабочих органах оборудования реализуется за счет оформления их винтовыми поверхностями и винтовыми линиями по наружному периметру и винтовыми канавками по внутреннему периметру [6- 12].

Для определения конструктивных параметров и определения скорости продольного перемещения масс загрузки и требуемой длины рабочего органа в форме винтового барабана, винтового ротора, винтового корпуса и винтового решета в результате исследования процесса движения потоков частиц масс загрузки, анализа математических моделей и исследования конструктивных особенностей методами теории подобия и размерности с использованием аппарата безразмерных кинематических функций, разработана математическая модель движения частиц масс загрузки в винтовом барабане, винтовом роторе, винтовом корпусе и винтовом решете. В модели учтены условия взаимодействия частиц масс загрузки между собой и со стенками винтового барабана, винтового ротора, винтового корпуса и винтового решета (в дальнейшем рабочих органов роторно-винтовых систем); воздействие скорости вращения рабочих органов роторно-винтовой системы; масса обрабатываемых деталей и масса частиц рабочей среды; коэффициента заполнения рабочего органа роторно-винтовой систем обрабатываемыми деталями; основные конструктивные параметры винтового барабана, винтового ротора, винтового корпуса и винтового решета; геометрия поперечного сечения, шаг и направление винтовых линий, определяющих расположение винтовых поверхностей по периметру рабочих органов роторно-винтовой системы.

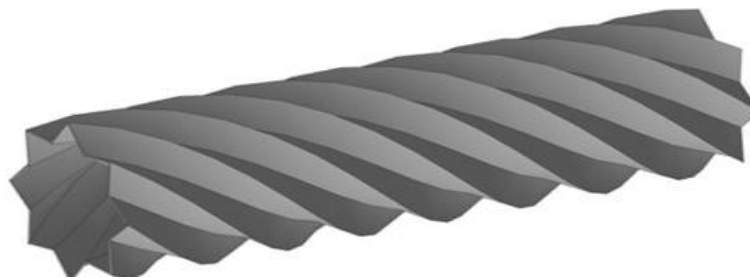
Для наглядности, на рис. 1 представлены некоторые разновидности рабочих органов роторно-винтовых систем станков для ОЗУО, выполненные с помощью программного комплекса «Компас-3D».



а) Конический с треугольным периметром



б) Выпуклый с треугольным периметром



в) Цилиндрический с треугольным периметром

Рисунок 1. Примеры наглядного изображения рабочих органов роторно-винтовых систем станков для ОЗУ

Для определения технологических параметров процессов ОЗУО с помощью аппарата безразмерных кинематических функций проведен анализ физических явлений при контакте обрабатываемых деталей с частицами рабочих сред. Разработана и предложена технология изготовления винтовых барабанов, винтовых роторов, винтовых корпусов и винтовых решет для единичного, серийного и массового производства, а также классификация рабочих органов станков для ОЗУО.

На скорость продольного перемещения масс загрузки в рабочих органах роторно-винтовых систем могут существенное влияние оказывать явления «увлекаемости массы загрузки» стенками вращающегося рабочего органа роторно-винтовой системы.

Установившийся процесс реального движения частиц среды и деталей можно считать в некотором смысле «взвешенным», сопровождающимся контактными явлениями, где давление в нижней части вращающегося рабочего органа роторно-винтовой системы будет выше по сравнению с «верхними слоями». При этом, можно считать, что вся засыпаемая m – масса в рабочий орган как-то равномерно при его вращении распределена по его $V_{p.k.}$ – объему.

Пусть $P = P_1 \cdot N_1 + P_2 \cdot N_2$ – вес данной 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 m_1 , и m_2 засыпаемых моделируемых материальных точек (шаров), где пусть с целью упрощения $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ – удельный вес их материала. Тогда P вес можно представить, с другой стороны, в виде:

$$P = K_3 \cdot \gamma \cdot V_m, \quad (1)$$

где K_3 – коэффициент плотности засыпки m – массы в объем V_m :

$K_3 = \frac{\pi}{6}$ – вытекает из условия соотношения объемов, занимаемых каждым из шаров к соответствующим объемам кубов, в которые они вписаны;

$V_{ш}$ – объем шара равен $V_{ш} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{ш}^3$;

V_k – объем куба равен $V_k = (2 \cdot r_{ш})^3$:

$$K_3 = \frac{V_{ш}}{V_k} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{ш}^3}{(2 \cdot r_{ш})^3} = \frac{\pi}{6}.$$

Если отнести P к $V_{p.k.}$ – объему рабочего органа, то получим так называемый

условный удельный вес взвешенных P_1, P_2 – частиц $\gamma_{усл.}$:

$$\gamma_{усл.} = \frac{P}{V_{p.k.}} = \frac{\pi}{6} \cdot \gamma \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}} \quad (2)$$

где очень важно то обстоятельство, что фигурирует соотношение $\frac{V_{ш}}{V_{p.k.}}$ – объемов, необходимое для моделирования функциональных зависимостей. С учетом того, что наибольшая высота «статического» воображаемого условного давления $\approx 2r$, то с учетом этого

$$P_{усл.} = 2 \cdot \gamma_{усл.} \cdot r, \quad (3)$$

где $P_{усл.}$ – моделируемое давление в точке захвата.

Здесь так же, как и выше, необходимо внести некоторый эмпирический коэффициент $K_c = K_{(\omega)}$ согласования, согласующий реальное давление с моделируемым, и тогда подставляя (2) в (3), получим:

$$P_{усл.} = \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot r \cdot K_c \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}} \quad (4)$$

Теперь можно представить явление «увлекаемости», например, m_1 – материальной точки стенками рабочего органа силой «условного ее выталкивания вверх», отнесенной к площади ее поперечного сечения (m_1 – шар, где $S_1 = \pi \cdot r_1^2$ – площадь поперечного, сечения). Если еще учесть тот фактор, что «увлекаемая масса» будет «проскальзывать» относительно стенок рабочего органа, то эту силу P_1 можно представить так:

$$P_1 = \mu \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot r \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}} \quad (5)$$

где μ_1 – коэффициент проскальзывания шаров по стенкам рабочего органа.

Итак, выражение (5) представляют (как мы убедимся ниже) одно из схематических моделирований массовых сил, где вводимые K_c, K_g – коэффициенты на самом деле должны быть сложными функциями определенной природы. Заметим, что в соотношении (5) вместо $\frac{V_m}{V_{p.k.}}$ (как правильнее было бы считать):

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

где v – индекс у K_v – коэффициента указывает на природу его образования.

Моделируем μ_2 – коэффициента трения скольжения:

Известна общая форма

$$\mu = a + b \cdot \sigma_K + c \cdot \sigma_K^2, \quad (6)$$

где:

$$\sigma_K = \sqrt{\frac{|N| \cdot E_{np.}}{\widehat{B}_2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}$$

N – сила взаимодействия, $\widehat{B}_2 = \psi \cdot r_2 = const$, r – радиус m_2 . В нашем случае сила взаимодействия представлена $\psi = 0,9$ – коэффициент пропорциональности, а поэтому с учетом этого (6) запишем в виде:

$$\mu_2 = \mu_{20} + b_2 \cdot \dot{\varphi} + C_2 \cdot \dot{\varphi}^2, \quad (7)$$

где b_2, C_2 – коэффициенты достаточно малы.

Итак, нам удалось построить математические модели контактных сил трения, сил увлечения массы стенками рабочего органа (эти силы выше мы назвали массовыми), в которых особая роль отводится K_b, K_c – эмпирическим коэффициентам, которые должны быть установлены из реального соотношения сил (массовых сил), действующих на каждую из обрабатываемых деталей. К этому следует добавить, что условие $\rho = r = r_{cp} = const$ является достаточно сильным закруглением, так как $\rho = \rho(a)$ – довольно сложная геометрическая характеристика. Говоря вообще, соотношение $K_b, K_c, P_m, \omega, \frac{V_m}{V_{p.k.}}, r(a)$ должно при правильном их подборе определять соответствие моделируемого процесса условного движения реальному, и процесс можно регулировать путем поочередного варьирования одних из них и фиксирования других. Так, например, если K_b, K_c – достаточно малы, то это означает пренебрежение массовыми силами, и при интегрировании второго уравнения системы дифференциальных уравнений [13].

$$\begin{cases} m \cdot (\ddot{r} - r \cdot \dot{\varphi}^2) = F_r \\ m \cdot (r \cdot \ddot{\varphi} + 2 \cdot \dot{r} \cdot \dot{\varphi}) = F_\varphi \end{cases}, \quad (8)$$

мы находимся в условиях:

$$\frac{\dot{\varphi}^2}{2} \cong C - \frac{g}{r} \cdot \sin \varphi, \quad (9)$$

где выбор $C=C(\omega, \varphi_0)$ – постоянной может оказаться неудовлетворительным с точки зрения соответствия реальному значению $\dot{\varphi}$. Мало того, при одинаковом захвате массы, т. е. при $\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$, если непрерывно уменьшать ω – угловую скорость вращения рабочего органа, то моделируемое условное движение не будет обеспечено с энергетической точки зрения.

m_1 – материальная точка так и не достигнет верхнего положения рабочего органа, т. е. условие $\varphi = \frac{\pi}{2}$ не будет обеспечено.

В данном случае это уже будет при $\omega = 4 \frac{\pi}{C}$, например, при снижении количества оборотов до $n=120$ об/мин. Если при этом «добиваться выполнения энергетики», увеличивая φ_0 – начальное значение, то при $\varphi = -\frac{\pi}{2}$, $\dot{\varphi} > \omega$ уже будет согласно (9).

Таким образом, массовые силы необходимо не только просто учитывать, но и функционально представить, выделяя, например, фиксированные $\omega, \frac{V_m}{V_{p.k.}}$ и варьируя $r(a), K_b, K_c$ – функциональными зависимостями. Этот процесс достаточно сложен и опирается на ряд экспериментальных характеристик.

Найдем величину F_φ – проекции. Согласно принятой модели «выталкивающая сила» увлечения \tilde{P}_1 массы будет направлена вверх параллельно оси Y и, суммируясь силой тяжести, дает величину проекции на Y – направления $(\tilde{P}_1 - P_1)$ т. е. равную разности этих сил (рисунок 1). Очевидно, что на направление $\bar{\varphi}$ мы имеем

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

если учесть величину силы трения, то:

$$F_{\varphi} = -(P_1 - \tilde{P}_1) \cdot \cos \varphi + F_{mp1,2},$$

с учетом $\rho = r = \text{const}$ второе уравнение системы (8) принимает вид:

$$m_1 \cdot r \cdot \ddot{\varphi} = -(P_1 - \tilde{P}_1) \cdot \cos \varphi + F_{mp1,2} \quad (10)$$

где

$$P_1 = m_1 \cdot g.$$

Это уравнение еще можно переписать в виде (с учетом (4), (5) – зависимостей):

$$\ddot{\varphi} = -[K_0 - K_1] \cdot \cos \varphi + K_2 \cdot (\mu_{20} + b_2 \cdot \dot{\varphi} + C_2 \cdot \varphi^2) \cdot \varphi^2 \quad (11)$$

которая получена:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot r \cdot \ddot{\varphi} &= -(P_1 - \tilde{P}_1) \cdot \cos \varphi + F_{mp1,2}; \\ m_1 \cdot r \cdot \ddot{\varphi} &= -\left(m_1 \cdot g - \mu_1 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot 2 \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}\right) \cdot \cos \varphi - \mu_2 \cdot P_m \cdot N; \\ m_1 \cdot r \cdot \ddot{\varphi} &= -\left(m_1 \cdot g - \mu \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot 2 \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}\right) \cdot \cos \varphi + \mu_2 \cdot P_m \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot K_b \cdot r \cdot \dot{\varphi}^2; \\ m_1 \cdot r \cdot \ddot{\varphi} &= -\left(m_1 \cdot g - \mu_1 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot 2 \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}\right) \cdot \cos \varphi + (\mu_{20} + b_2 \cdot \dot{\varphi} + C_2 \cdot \dot{\varphi}^2) \cdot P_m \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot K_b \cdot r \cdot \dot{\varphi}^2; \\ \ddot{\varphi} &= -\left(\frac{g}{2} - \frac{M_1 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}}{m_1}\right) \cdot \cos \varphi + (\mu + b_2 \cdot \dot{\varphi} + C_2 \cdot \dot{\varphi}^2) \cdot P_m \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot K_b \cdot \dot{\varphi}^2; \end{aligned}$$

обозначим:

$$\begin{aligned} K_0 &= \frac{g}{2}; \quad K_1 = \frac{\mu_1 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot j \cdot K_c \cdot S_1 \cdot \frac{V_m}{V_{p.k.}}}{m_1}; \\ K_2 &= P_m \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot K_b. \end{aligned}$$

В формуле (11) желательно представить разность $(K_1 - K_0)$ в виде:

$$(K_1 - K_0) = -(1 - \hat{\mu}_1) \cdot \frac{g}{r}, \quad (12)$$

где

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

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

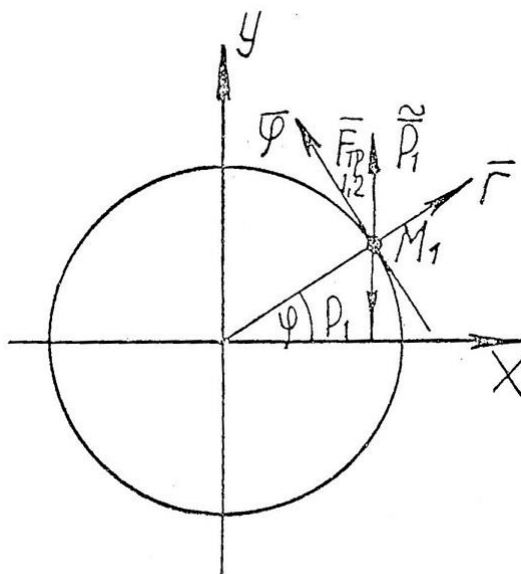


Рисунок 2. Схема сил действующих на точку M_1

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

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

Заметим, что если $P_m = P_m(\varphi)$ – вероятный коэффициент будет как-то усреднен, то слагаемое правой части (11) от контактных сил окажется зависимым только от $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$, которая в свою очередь входит и в выражение:

$$V_z = (r \cdot \operatorname{tg} j \cdot \dot{\varphi} + C) < 0 \tag{13}$$

Представление (12) выбрано в таком виде не случайно: нужно иметь в виду, что реальная продольная скорость перемещения обрабатываемых деталей составляет порядок единиц (мм/с), т. е. достаточно мала по сравнению с угловыми скоростями ω – вращений рабочего органа, а поэтому должно быть $\hat{\mu}_1 = 1$, т. е. $1 - \hat{\mu}_1$, должно иметь величину достаточно малого порядка и тем более с учетом $\frac{1}{2} \cdot g$ – множителя. С другой стороны, коэффициент «увлечения массы» $\hat{\mu}_1$ – можно рассматривать как некоторый «условный коэффициент трения», зависящий от геометрии стенок, угловой скорости вращения рабочего органа, соотношения объемов $\frac{V_m}{V_{p.k.}}$ материала массы, сыпучести в спокойном состоянии, размеров частиц – материальных точек, размеров поперечного сечения рабочего органа, обработки поверхности и других физико-химических свойств достаточно сложной природы. Поэтому, с учетом вида (5), есть смысл представить $\hat{\mu}_1$ в следующей функциональной форме:

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

или

$$\hat{\mu}_1 \approx \mu_0 - \frac{\pi}{3} \cdot \mu_{10} \cdot S_1 \cdot \frac{r}{P_1} \cdot j \cdot K_c(\omega) \cdot K_V \left(\frac{V_m}{V_{p.k.}} \right), \quad (14)$$

где μ_0 – некоторый статический коэффициент состояния трения покоя;

μ_{10} – некоторый коэффициент трения скольжения нетрудно видеть из (5) выражения, что при увлечении стенками рабочего органа – плоскостями $r_2 = \infty, \sigma_K \approx 0$, а поскольку 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 μ_0, K_c, K_V предназначены «приблизить» условный, моделируемый, процесс к реальному. О последних двух коэффициентах следует говорить особо, чего мы коснемся ниже. 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 (11), т.е. P_m – коэффициент, где коэффициент K_b также зависит от геометрии профиля поперечного сечения рабочего органа: порядок K_2 – коэффициента, очевидно, должен соответствовать порядку разности $K_1 - K_0$ (выше, может быть, еще и допускается, а ниже нет, т.к. нарушается общее требование к порядку скорости продольного перемещения).

Так как предполагаемые порядки слагаемых правой части (11) – уравнения достаточно малы (и с учетом закругления $\rho = r = const$) при интегрировании (11) положим $b_2, C_2 \approx 0$, т. е. запишем:

$$\ddot{\varphi} \approx (K_1 - K_0) \cdot \cos \varphi + K_2 \cdot \mu_{20} \cdot \dot{\varphi}^2. \quad (15)$$

Однако, несмотря на «простоту вида», (14) может быть проинтегрировано методом последовательных приближений, где 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:

$$\ddot{\varphi} \approx \dot{\varphi}^{(1)} \approx (K_1 - K_0) \cdot \cos \varphi + K_2 \cdot \mu_{20} \cdot \omega^2. \quad (16)$$

Умножая левую и правую части (16) соответственно:

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

сокращая на dt в знаменателе и интегрируя, запишем:

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

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

Окончательно для последующего анализа получим приближенную зависимость:

$$\dot{\varphi} \approx \sqrt{[1 + \mu_{20} \cdot K_2 \cdot (\pi + 2\varphi)] \cdot \omega^2 + 2(K_1 - K_0) \cdot (1 + \sin \varphi)}. \quad (17)$$

Вставляя (17) в (13) и аналогично определяя условия, имеем ($V_z = 0$):

$$V_z \approx r \cdot \operatorname{tg} j \cdot \left\{ -\omega + \sqrt{[1 + \mu_{20} \cdot K_2 \cdot (\pi + 2\varphi)] \cdot \omega^2 + 2(K_1 - K_0) \cdot (1 + \sin \varphi)} \right\}, \quad (18)$$

Винтовыми направляющими 9, частицы рабочих сред 4 и отходы обработки 7 движутся в обратном направлении внутри барабана 5. Отходы обработки 7 посредством отверстий 10, перемещаются в полость кожуха 11 и затем в камеру 12. Диаметр отверстий 10 меньше частиц рабочих сред. Затем рабочая среда с помощью винтовых направляющих 9, попадает в средство перегрузки 13, с помощью которого передается внутрь рабочего органа 1, где встречаясь с подлежащими обработки деталями, поступающими внутрь рабочего органа, обрабатывают их. Подача интенсифицирующих и моющих растворов осуществляется через патрубки кожуха 11.

На рис. 5 представлена фотография станка непрерывного действия для ОЗУО, а на рисунок 6-фотография наружного барабана с смонтированным внутри винтовым ротором, средством для перегрузки, а по наружному периметру- кожухом.

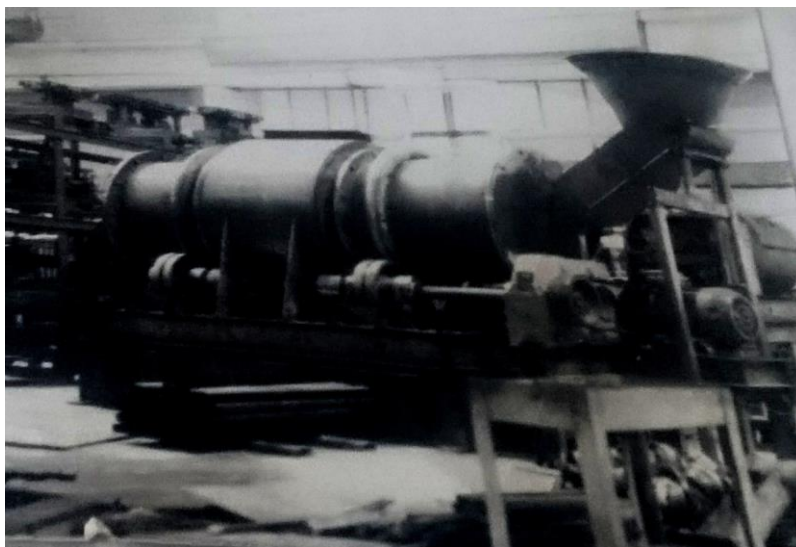


Рисунок 5. Станок непрерывного действия для ОЗУО на базе роторно-винтовой системы



Рисунок 6. Наружный барабан со стороны выходного люка станка непрерывного действия для ОЗУО на базе роторно-винтовой системы

Опыты показали, что станок может в час обработать непрерывным потоком 28 тонн деталей, при этом минимальный размер деталей 30 мм -максимальный 300мм, при чем масса станка достигает 10 т, а габаритные размеры в метрах 9х3.2х3. При работе станка используют интенсифицирующие растворы с нагревом до 60⁰.

Выводы

Предложены рабочие органы станков для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки непрерывным потоком в виде роторно-винтовых систем. Представлены наглядные изображения рабочих органов и один из созданных станков. Роторно-винтовые системы могут быть использованы в машиностроении для металлообработки не только для ОЗУО [1-5], но и для нанесения покрытий на поверхность деталей [2], а также в машиностроении для строительной индустрии [14], для других отраслей промышленности [15] и для сельского хозяйства [16].

ЛИТЕРАТУРА:

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; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет». – № 2017144229; заявл. 18.12.2017; опубл. 21.11.2018, Бюл. № 33.

2. Пат. 2519398 Российская Федерация, МПК В24В 31/02. Станок для химико-отделочно-упрочняющей обработки деталей / Г. В. Серга, В. В. Иванов, В. А. Лебедев, В.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет». – № 2013106597/02; заявл. 14.12.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

3. Пат. 2528291 Российская Федерация, МПК В24В 31/02. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / Г. В. Серга, В. А. Лебедев, В. В. Иванов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет». – № 2013106599/02; заявл. 14.02.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.

4. Пат. 2572685 Российская Федерация, МПК В24В 31/02. Устройство для отделочно-зачистной обработки / А. Ю. Марченко, А. Н. Иванов, В. А. Лебедев, В. В. Иванов, Г. В. Серга; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет». – № 2014129160/02; заявл. 15.07.2014; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.

5. Пат. 2430825 Российская Федерация, МПК В24В 31/06. Устройство для отделочно-зачистной обработки / К. А. Белокур, Г. В. Серга; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет».- № 2009144621/02; заявл. 01.12.2009; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 16.

6. 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 Conference Series: Materials Science and Engineering. Conf. Se-

ries: Materials Science and Engineering. – 2018, №327, 042062 doi:10.1088/1757-899X/327/4/042062.

7. 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, Irina G., Koshlyakova and A.V. Gordienko // MATEC Web Conf., 226 (2018) 01007 DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822601007>

8. 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, Irina G., Koshlyakova and A.V. Gordienko // MATEC Web Conf., 226 (2018) 01008 DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822601008>.

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. Серга, Г. В. Повышение производительности технологических систем отделочно-зачистной и упрочняющей обработки на основе винтовых роторов / Г. В. Серга, К. А. Белокур, В. А. Лебедев, Д. Я. Яковлев // Научный журнал «Упрочняющие технологии и покрытия». – Москва, 2016. – № 4. – С. 23-25.

11. Серга, Г. В. Технологические особенности изготовления винтовых роторов для отделочно-упрочняющей обработки деталей / Г. В. Серга, К. А. Белокур, В. А. Лебедев, // Научно-технический и производственный журнал «Сборка в машиностроении, приборостроении». – Москва, 2016. – С. 8-11.

12. Серга, Г. В. Комплексные технологии отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей машин / Г. В. Серга, К. А. Белокур, Э. А. Хвостик // Машиностроение и техносфера XXI: сб. трудов междунар. Научно-техн. конф., Т. 1 / Донецк: ДНТУ, 2018. – С. 126-131.

13. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 831 с.

14. Aleksandr Sekisov. Rotary-screw systems for rotary kilns / Aleksandr Sekisov, Georgy Serga // E3S Web of Conferences, Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE-2018), France, 2019, Vol. 91, 02034.

15. Marchenko, A. Y. Creating A Methodology For Calculating The Drive Of The Working Parts Of The Equipment Based On The Original Screw Sieves, Screw Housings And Screw Drums / A. Y. Marchenko, G. V. Serga // Research journal of pharmaceutical biological and chemical sciences. Volume: 10. Issue: 1. P: 1689-1696. Publ: JAN-FEB 2019. [https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10\(1\)/\[219\].pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10(1)/[219].pdf).

16. Пат. 2535946 Российская Федерация, МПК В24В А01D41/00. Зерноуборочный комбайн прямоточный / Г. В. Серга, В. Д. Таратуга; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет». – № 2013136483/13; заявл. 01.08.2013; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35.

Поступила в редколлегию 13.05.2019 г.