

УДК 629.035

DOI: 10.30987/article\_5d10851f18f085.56011612

Г.В. Серга, Д.Г. Серый, А.Ю. Марченко

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ЗОНЕ КОНТАКТА ЧАСТИЦ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ДВИЖЕНИИ В ВИНТОВЫХ БАРАБАНАХ, МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ, ИНЖЕНЕРНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ

Приведены результаты исследований физических явлений, происходящих в зоне контакта частиц сыпучих материалов при их движении в винтовых барабанах. Представлены винтовые барабаны с различным количеством винтовых линий по периметру, полученные методами инженерной и компьютерной графики в программном комплексе «Компас-3D». Получены зависимости для

определения скорости относительного скольжения, напряжений на площадке контакта, полного смещения одной частицы сыпучих материалов относительно другой за цикл контакта.

**Ключевые слова:** упругое скольжение, напряжение, смещение, сила трения, винтовые барабаны.

G.V. Serga, D.G. Sery, A.Yu. Marchenko

## INVESTIGATION OF PHYSICAL PHENOMENA OCCURRED IN CONTACT AREA OF BULK PARTICLES AT THEIR MOTION IN SCREW DRUMS BY METHODS OF SIMILARITY THEORY, ENGINEERING AND COMPUTER GRAPHICS

In Trubilin State Agricultural University of Kuban there are created machinery working devices as screw drums allowing the assurance of motion of bulk particles at their horizontal location and also promoting the intensity of particles interaction between each other and with the walls of screw drums which widens technological potentialities and decreases dimensions of equipment and its weight. In the paper there are shown various sorts of screw drums and analytical methods of the study of physical phenomena taking place in the contact area of bulk particles. The search of a screw

drum design was carried out by the methods of descriptive geometry and engineering graphics with the aid of the "Compass-3D" program complex. The apparatus of dimensionless kinematic functions (similarity invariant) and the analysis of dimensionalities allowing the investigation not one such a case but their infinite number united by the community of properties was used.

**Key words:** elastic slip, stress, displacement, friction force, screw drums.

### Введение

Исследования явлений, происходящих в зоне контакта частиц сыпучих материалов, выполнены при их движении в винтовых барабанах. Для лучшего представления сложности явлений, происходя-

щих при движении сыпучих материалов в винтовых барабанах, некоторые из них выполнены в программном комплексе «Компас-3D» (рис. 1).

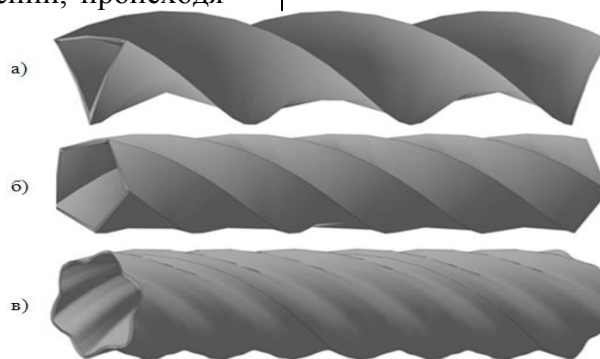


Рис. 1. Разновидности винтовых барабанов: а – с тремя винтовыми линиями по периметру; б – с пятью винтовыми линиями по периметру; в – с шестью винтовыми линиями по периметру

При анализе кинематики движения частиц сыпучих материалов рассматриваются винтовые барабаны, особенностью которых являются явно выраженные цилиндрические винтовые линии по периметру. При вращении винтовых барабанов частицы сыпучих материалов совершают сложное пространственное движение, непрерывно перемещаясь вдоль их внутренних стенок. Если задаться какой-то средней скоростью перемещения и временем выполнения технологического процесса  $t$ , то при перемещении частиц сыпучих материалов вдоль оси вращения винтовых барабанов можно оценить такой геометрический параметр барабана, как его дли-

на  $L_{в.б.}$ . Угол наклона образующей винтовой линии относительно оси вращения винтового барабана  $j = \text{Const}$  (рис. 2), а длина участка ребра плоских элементов (является секущей этой линии) равна диаметру вписанной внутри барабана сферы. Поэтому для изучения кинематики движения частиц сыпучих материалов и производительности необходимо учесть неизменные угловые параметры винтового барабана, определяющие пространственную геометрию перемещаемых частиц ( $j = \text{Const}$  задает основную направленность их перемещения и потому является основным угловым параметром).

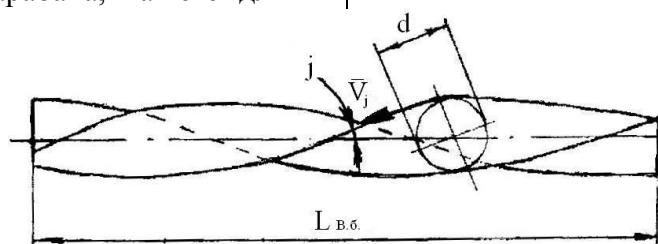


Рис. 2. Винтовой барабан с тремя винтовыми линиями по периметру (вид спереди)

Эти параметры являются сложными функциями состояния кинематических параметров перемещения частиц сыпучих материалов и времени выполнения технологического процесса. Исходя из характера технологического процесса время его выполнения должно быть оптимальным, что, безусловно, усложняет задачу определения параметров  $L_{в.б.}$  и  $d$ , а следовательно, и размеров винтового барабана, так как

должна решаться задача оптимизации его конструкции в целом.

Для создания методики расчета и проектирования винтовых барабанов необходимо изучить явления, происходящие в зоне контакта частиц сыпучих материалов. Эту актуальную и своевременную задачу целесообразно решать с использованием методов теории подобия и размерностей.

### Материалы и методы

Вначале проведем оценку скорости упругого скольжения в зоне контакта частиц сыпучих материалов.

При движении частиц сыпучих материалов и их соприкосновении под влиянием силы  $R_n$  образуется площадка контакта

$2b \times 1$  (рис. 3). Полусом в относительном движении 1-й и 2-й частиц является некоторая точка касания центроидных кругов, положение которой определяется следующими условиями:

$$\omega_1 \mathbf{r}_{1u} = \omega_2 \mathbf{r}_{2u} \quad ;(1)$$

$$\mathbf{r}_{1u} + \mathbf{r}_{2u} = \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 - W = A \quad ;(2)$$

$$r_{2u} = \mathbf{r}_{1u} \frac{\omega_1}{\omega_2 \theta} = \mathbf{r}_{1u} \frac{\omega_1}{\theta \cdot \omega_2} \text{ и } \mathbf{r}_{1u} = \frac{A}{1 + i_{21}}, \text{ где } i_{21} = \frac{r_2}{r_1} \quad ;(3)$$

$$r_2 = A - \mathbf{r}_{1u} = A \cdot \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{i_{21}}{\theta}} \right) = \frac{A}{1 + \frac{i_{21}}{\theta}} \quad ;(4)$$

Здесь  $\theta = \frac{\omega_2 \phi}{\omega_1}$  – коэффициент скольжения;  $i_{21} = \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$  – передаточное отно-

шение;  $\omega_2 \phi$  – угловая скорость 2-й частицы сыпучих материалов.

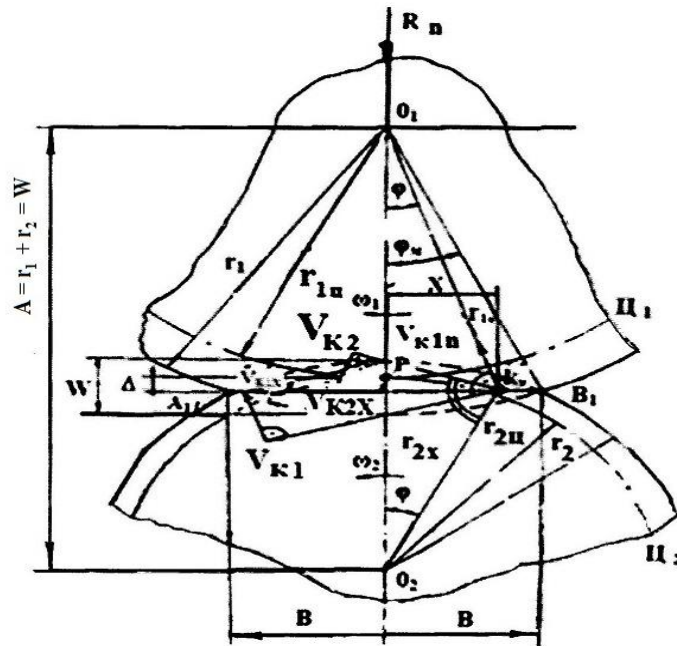


Рис. 3. Схема контакта частиц сыпучих материалов

Рассмотрим кинематику точек  $K_1$  и  $K_2$ , принадлежащих поверхностям 1-й и 2-й частиц сыпучих материалов соответственно (т.  $K_x$  на расстоянии  $X$  до т.  $P$  на линии площадки контакта  $A_1B_1$ ).

Переносная скорость точки  $K_1$  имеет вид  $V_{K1} = \omega_1 \cdot r_{1x}$ , а ее относительная скорость  $V_{K1n} = V_{K1} \cdot \text{tg} \phi$ .

Тогда абсолютная скорость точки  $K_1$  равна:  $V_{K1x} = \frac{V_{K1}}{\cos \phi}$ . (5)

Величина радиуса

$$r_{1x} = r_1 \cdot \frac{\cos \phi_m}{\cos \phi},$$
 (6)

где

$$\sin \phi_m = \frac{B}{r_1} \text{ и } \cos \phi_m = \sqrt{1 - \left(\frac{B}{r_1}\right)^2}.$$

Используя формулы (5) и (6), найдем величину абсолютной скорости точки  $V_{K1x}$ :

$$V_{K1x} = \omega_1 r_1 \frac{\cos \phi_m}{\cos^2 \phi} = \omega_1 r_1 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{B}{r_1}\right)^2}}{1 - \left(\frac{X}{r_1}\right)^2} \approx \frac{1 - 0,5 \left(\frac{B}{r_1}\right)^2}{1 - \left(\frac{X}{r_1}\right)^2} \cdot \omega r_1.$$
 (7)

Так как  $\cos \phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \phi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{r_1 \cdot \cos \phi_m}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{r_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{B}{r_1}\right)^2}}\right)^2}}$ , то, применяя методы вычис-

лений с числами, мало отличающимися от единицы,  $\alpha \rightarrow 0$ , введем упрощения:

$$\sqrt{1 \pm \alpha} = 1 \pm 0,5\alpha; \frac{1}{1 \pm \alpha} = 1 \mp \alpha; (1 \pm \alpha)^2 = 1 \pm 2\alpha.$$

Будем считать

$$\cos \phi = 1 - 0,5 \left(\frac{X}{r_1}\right)^2 \cdot \left[1 + 0,5 \left(\frac{B}{r_1}\right)^2\right] \approx 1 - 0,5 \left(\frac{X}{r_1}\right)^2;$$

$$\cos^2 \varphi \approx 1 - \left(\frac{X}{r_1}\right)^2.$$

По аналогии определим абсолютную скорость точки  $K_2$ :

$$V_{K2X} = \omega_2 r_2 \cdot \frac{1 - 0,5\left(\frac{B}{r_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{X}{r_2}\right)^2}. \tag{8}$$

Скорость упругого скольжения связана с относительными скоростями деформаций:

$$\begin{aligned} V_{КСХ} &= V_{K1X} - V_{K2X} = \omega_1 r_1 \cdot \frac{1 - 0,5\left(\frac{B}{r_1}\right)^2}{1 - \left(\frac{X}{r_1}\right)^2} - \omega_2 \phi \cdot r_2 \cdot \frac{1 - 0,5\left(\frac{B}{r_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{X}{r_2}\right)^2} = \\ &= \omega_1 \cdot r_1 \cdot \left[ \frac{1 - 0,5\left(\frac{B}{r_1}\right)^2}{1 - \left(\frac{X}{r_1}\right)^2} - \frac{\omega_2 \phi \cdot r_2}{\omega_1 \cdot r_1} \cdot \frac{1 - 0,5\left(\frac{B}{r_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{X}{r_2}\right)^2} \right]. \end{aligned}$$

С учетом (4)

$$V_{КСХ} = \omega_1 \cdot r_1 \cdot \left[ \frac{1 - 0,5\left(\frac{B}{r_1}\right)^2}{1 - \left(\frac{X}{r_1}\right)^2} - \theta \cdot \frac{1 - 0,5\left(\frac{B}{r_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{X}{r_2}\right)^2} \right], \tag{9}$$

или

$$V_{КСХ} = \omega_1 r_1 \cdot \left[ \delta - 0,5 \left(\frac{B}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{X}{r_1}\right)^2 + 0,5 \cdot \theta \cdot \left(\frac{B}{r_2}\right)^2 - \theta \cdot \left(\frac{X}{r_2}\right)^2 \right], \tag{10}$$

где  $\delta = 1 - \theta$  – коэффициент относительного скольжения,

$$\delta = 1 - \theta = 1 - \frac{\omega_{2\phi}}{\omega_2} = \frac{\omega_2 - \omega_{2\phi}}{\omega_2} = \frac{V_2 - V_{2\phi}}{V_2} = \frac{V_{отн}}{V_2}.$$

Анализируя формулу (9), запишем:

$$\frac{V_{КСХ}}{\omega_1 \cdot r_1} = \frac{1 - 0,5\left(\frac{B}{r_1}\right)^2}{1 - \chi^2\left(\frac{B}{r_1}\right)^2} - \theta \cdot \frac{1 - 0,5\left(\frac{B}{r_2}\right)^2}{1 - \chi\left(\frac{B}{r_2}\right)^2} = P_1 - \theta \cdot P_2,$$

где  $\chi = \frac{X}{B} \cdot P_1$  – первый член в виде дроби,  $P_2$  – второй. При  $\chi < 0,5$   $P_1 < 1$  и  $P_2 < 1$ , при  $\chi > 0,5$   $P_1 > 1$  и  $P_2 > 1$ .

Преобразуем формулу (10) к виду

$$\begin{aligned} V_{КСХи} &= \frac{V_{КСХ}}{\omega_1 \cdot r_1} = \delta - (0,5 - \chi^2) \cdot \left[ \left(\frac{B}{r_1}\right)^2 + \theta \left(\frac{B}{r_2}\right)^2 \right] = \\ &= \delta - (0,5 - \chi^2) \cdot q = \delta - u \cdot q. \tag{11} \end{aligned}$$

Придав конкретные значения величинам  $\left(\frac{B}{r_1}\right)$ ,  $\left(\frac{B}{r_2}\right)$ ,  $\theta$ ,  $\delta = 1 - \theta$ ,  $\chi$ , т.е.  $\delta, q, \chi$ , найдем значения  $V_{КСХи}$ , обеспечивающие построение номограмм  $V_{КСХи}(\delta, q, \chi)$ .

Следует обратить внимание на множитель  $(0,5 - \chi^2)$ . Так как  $0 < \chi < 1,0$ , то величина  $0,5 - \chi^2 = f(\chi)$  выразится частными значениями (табл. 1).

Таблица 1

Частные значения $0,5 - \chi^2 = f(\chi)$											
$\chi$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$f(\chi) = 0,5 - \chi^2$	0,5	0,49	0,46	0,4	0,34	0,25	0,14	0,01	-0,14	-0,34	-0,5

Величину  $q = \left(\frac{B}{r_1}\right)^2 + \theta \left(\frac{B}{r_2}\right)^2$  с вполне пренебрежимым округлением можно считать приближенно равной

$$q = \left(\frac{B}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{B}{r_2}\right)^2 = \left(\frac{B}{r_1}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{i_{21}^2}\right). \tag{12}$$

На рис. 4, 5 изображены номограммы, рассчитанные по формуле (11).

Номограмма  $V_{кcxu}(\chi, \delta)$  при  $q = 0,0160$  ( $B = 0,24$  мм,  $r_1 = 6,0$  мм,  $r_2 = 2,0$  мм) скоростей упругого скольжения  $V_{кcxu}$ , связанная с относительными скоростями деформаций, в инвариантном виде, по половине площадки контакта  $A_1B_1$  частиц сыпучих материалов (вторая полови-

на имеет симметричную эпюру), представлена на рис. 4.

Нижняя кривая соответствует значению  $\delta = 0,0$ , когда  $V_{кcxu} < 0$  до  $\chi = 0,705$ ,  $V_{кcxu} > 0$  при  $\chi > 0,705$ .

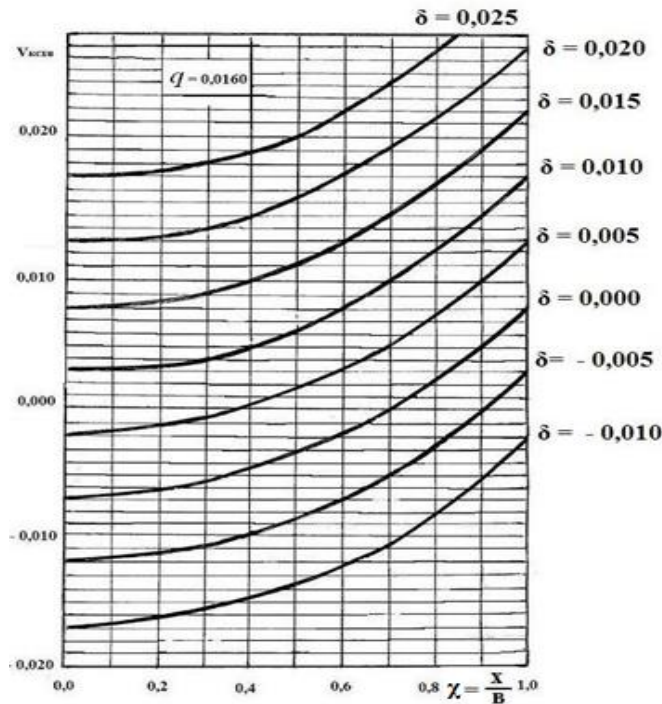


Рис. 4. Номограмма  $V_{кcxu} = \frac{V_{кcx}}{\omega_1 \cdot r_1} = f(\delta, \chi)$  при  $q = 0,0160$

Заметим, что при  $\delta > 0,070$  и  $q = 0,0160$  относительное упругое скольжение остается положительным на протяжении всего цикла контакта, а при  $\delta < 0,0070$  существует зона отрицательных смещений поверхности 1-й частицы относительно 2-й частицы сыпучих материалов. Совершенно очевидно, что фрикционное вращение 2-й частицы возможно лишь в том случае, когда силы трения в зонах положительных  $V_{кcxu}$  больше, чем силы трения в зонах отрицательных  $V_{кcxu}$ .

На рис. 5 изображена рассчитанная по формуле (11) номограмма скоростей

упругого скольжения  $V_{кcxu}$  при  $q = 0,0040$ , связанная с относительными скоростями деформаций, в инвариантном виде на половине площадки контакта  $A_1B_1$  частиц сыпучих материалов.

Для определения условий равновесного установившегося процесса контактирования частиц сыпучих материалов проанализируем силовые параметры их контактирующих поверхностей.

Контактные напряжения при соприкосновении частиц сыпучих материалов выражаются величиной

$$q_0 = 0,798 \sqrt{\frac{P \frac{D_1 + D_2}{D_1 \cdot D_2}}{\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}}}, \tag{13}$$

где  $P = \frac{R_n}{B}$  – нагрузка на единицу длины линии контакта вдоль образующей;  $D_1 + D_2$  – диаметры 1-й и 2-й частиц сыпучих ма-

териалов;  $\mu_1$  и  $E_1$ ,  $\mu_2$  и  $E_2$  – коэффициенты Пуассона и модули продольной упругости для материалов частиц.

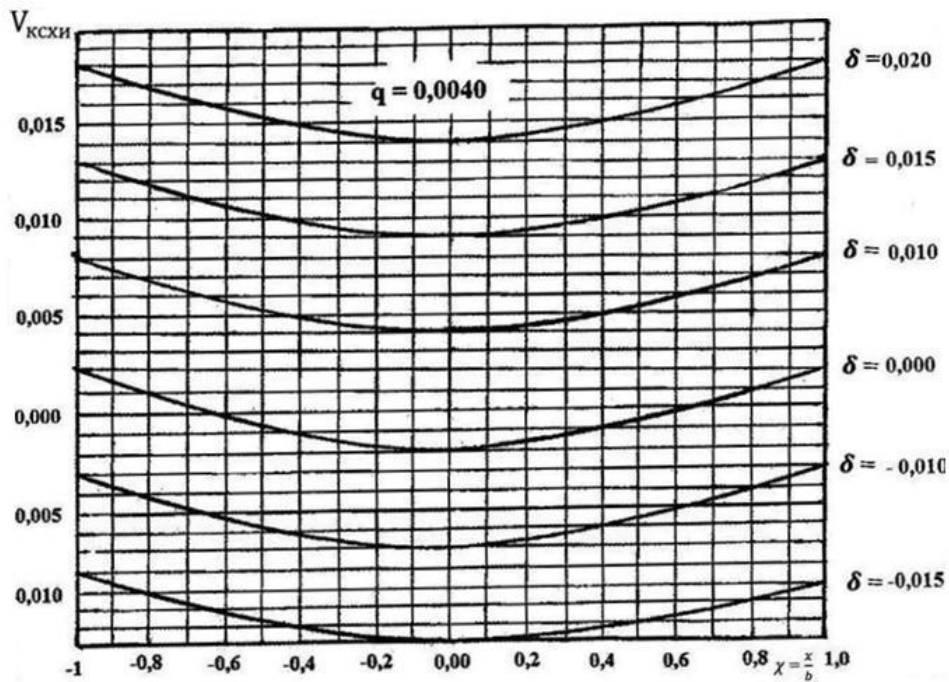


Рис. 5. Номограмма  $V_{kcxi} = \frac{V_{kcx}}{\omega_1 \cdot r_1} = f_{vc}(\delta, \chi)$  при  $q=0,0040$

Ширина полосы контакта

$$C = 2B = 1,6 \sqrt{P \cdot \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2} \left[ \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right]} \tag{14}$$

Закон распределения напряжений на площадке по ходу относительного движения частиц сыпучих материалов – эллиптический:

$$\frac{\sigma_x^2}{\sigma_{xm}^2} + \left(\frac{X}{B}\right)^2 = 1, \tag{15}$$

откуда следует

$$\sigma_x = \sigma_{xm} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{X}{B}\right)^2}, \tag{16}$$

Выражая  $X = \chi \cdot B$  и подставляя это значение в рассматриваемое выражение, найдем:

$$\sigma_x = \sigma_{xm} \cdot \sqrt{1 - \chi^2} = \sigma_{xm} \cdot \sigma_{xu} \tag{17}$$

Частные значения  $\sigma_{xu} = \frac{\sigma_x}{\sigma_m}$  в зависимости от  $\chi = \frac{X}{B}$  даны в табл. 2, а кривая распределения напряжений по половине площадки  $A_1B_1$  представлена на рис. 6. Если откладывать  $\sigma_{xu} = 1$  (в точке  $\chi = 0$ ) в масштабе  $\chi$ , то кривая эллипса превращается в дугу окружности радиуса 1.

Таблица 2

Частные значения  $\sigma_{xu} = \frac{\sigma_x}{\sigma_m}$

$\chi$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$f_{x1}$	0,0000	0,1048	0,1985	0,2961	0,3894	0,4785	0,5620	0,6399	0,7050	0,7562	0,7854
$f_{x2}$	0,7854	0,6807	0,5869	0,4893	0,3960	0,3069	0,2234	0,1455	0,0804	0,0292	0,00
$f_{x1} - f_{x2}$	-0,7854	-0,5859	-0,3884	-0,1932	-0,0066	+0,1716	+0,3386	+0,4944	+0,6246	+0,6246	+0,7854

Тогда нагрузка на площадку контакта с  $B = 1$  мм может быть представлена в виде

$$P = 2 \int_0^1 \sigma_{xm} \cdot B \cdot \sqrt{1 - \chi^2} \cdot d\chi = 2\sigma_{xm} \cdot B \left( \frac{\chi}{2} \sqrt{1 - \chi^2} + 0,5 \arcsin \chi \right) \tag{18}$$

или

$$P = 2 \cdot \sigma_{xm} \cdot B \cdot \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2} \cdot \sigma_{xm} \cdot B. \quad (19)$$

В интервале от 0 до  $\chi$

$$P_1 = 2 \int_0^\chi \sigma_{xm} \cdot B \sqrt{1 - \chi^2} d\chi = 2\sigma_{xm} \cdot B \cdot \left( \frac{\chi}{2} \cdot \sqrt{1 - \chi^2} + 0,5 \arcsin \chi \right) = 2\sigma_{xm} \cdot B \cdot f_{x1}, \quad (20)$$

в интервале от  $\chi$  до 1

$$P_2 = P - P_1 = 2\sigma_{xm} \cdot B \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\chi}{2} \sqrt{1 - \chi^2} - 0,5 \arcsin \chi \right) = 2\sigma_{xm} \cdot B \cdot f_{x2}. \quad (21)$$

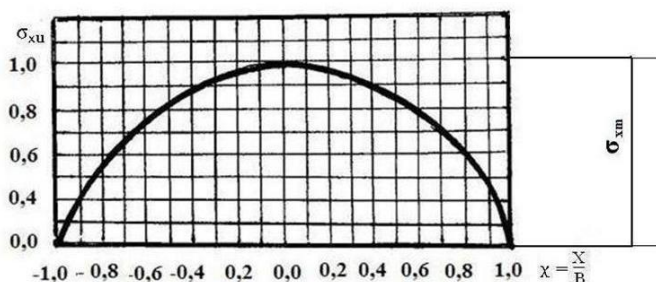


Рис. 6. Распределение напряжений на площадке контакта частиц сыпучих материалов

Придавая  $\chi$  конкретные частные значения, найдем значения  $f_{x1}$  и  $f_{x2}$ , представленные в табл. 2.

В связи с появлением упругих деформаций в перекатывающихся соприкасающихся поверхностях частиц сыпучих материалов между ними, по Рейнольдсу, неизбежно возникает упругое относитель-

$$V_{OTH} = \frac{dS_{OTH}}{dt} = \frac{dS_{OTH}d\varphi}{d\varphi dt} = \omega_1 \cdot \frac{dS_{OTH}}{d\varphi} = V_{КСХУ} \cdot \omega_1 r_1 \quad (22)$$

где  $V_{КСХУ} = \frac{V_{OTH}}{\omega_1 \cdot r_1}$  - инвариант  $V_{OTH}$ .

Отсюда определяется элементарное смещение точки поверхности одного компонента сыпучих материалов относительно другого:

$$dS_{OTH} = V_{КСХУ} \cdot r_1 \cdot d\varphi. \quad (23)$$

ное скольжение. При этом по ширине плоскости контакта возникают три характерных участка: два участка *скольжения* по краям и один участок *сцепления* в средней части контакта.

Скорость относительного скольжения в дифференциальном виде выражается величиной

Полное смещение точки одной частицы сыпучих материалов по поверхности второй частицы с момента начала рассматриваемого цикла контакта с учетом формулы (11) имеет вид

$$S_{OTH} = r_1 \int_{-\varphi_m}^\varphi V_{КСХУ} \cdot d\varphi = r_1 \int_{-\varphi_m}^\varphi [\sigma - (0,5 - \chi^2) \cdot q] \cdot d\varphi = r_1 \cdot \left[ (\sigma - 0,5 \cdot q) \cdot \varphi \int_{-\varphi_m}^\varphi + \left( \frac{r_1}{B} \right) \cdot q \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4} \right) \right], \quad (24)$$

где подставлены  $\varphi = \frac{\chi}{B} = \frac{r_1}{B} \cdot \sin \varphi$ ;  $\varphi = \arcsin \frac{B\chi}{r_1}$  и табличный интеграл  $\int_{-\varphi_m}^\varphi \sin^2 \varphi \cdot d\varphi = \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4} \right)$

Подставляя в (24) пределы интегрирования

$$\varphi = \arcsin \frac{B\chi}{r_1}; -\varphi_m = \arcsin \left( -\frac{B}{r_1} \right),$$

получим:

$$S_{OTH} = r_1 \left\{ \left[ \varphi - 0,5 \cdot q \cdot \left( \arcsin \frac{B\chi}{r_1} + \arcsin \frac{B}{r_1} \right) \right] + \left( \frac{r_1}{B} \right)^2 \cdot \frac{q}{2} \left[ \left( \arcsin \frac{B\chi}{r_1} + \arcsin \frac{B}{r_1} \right) - \frac{1}{2} \sin 2 \left( \arcsin \frac{B\chi}{r_1} \right) - \frac{1}{2} \sin 2 \left( \arcsin \frac{B}{r_1} \right) \right] \right\} \quad (25)$$

Так как

$$\sin 2 \left( \arcsin \frac{B\chi}{r_1} \right) = 2 \frac{B \cdot \chi}{r_1} \cdot \cos \left( \arcsin \frac{B\chi}{r_1} \right) = 2 \frac{B\chi}{r_1} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{B \cdot \chi}{r_1} \right)^2}$$

и

$$\sin 2 \left( \arcsin \frac{B}{r_1} \right) = 2 \frac{B}{r_1} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{B}{r_1} \right)^2},$$

формула (25) приводится к виду

$$S_{\text{отн}} = r_1 \cdot \xi_1 = r_1 \cdot \left\{ \left[ (\varphi - 0,5q) \cdot \left( \arcsin \frac{B\chi}{r_1} + \arcsin \frac{B}{r_1} \right) \right] + \frac{r_1^2 \cdot q}{2B^2} \left[ \arcsin \frac{B\chi}{r_1} + \arcsin \frac{B}{r_1} - \frac{B\chi}{r_1} \sqrt{1 - \left( \frac{B\chi}{r_1} \right)^2} - \frac{B}{r_1} \sqrt{1 - \left( \frac{B}{r_1} \right)^2} \right] \right\} \quad (26)$$

где  $\xi_1$  – безразмерный коэффициент смещения одной частицы сыпучих материалов относительно другой за цикл контакта.

Полное смещение точки одной частицы сыпучих материалов по поверхности второй за цикл контакта определяется после подстановки в формулу (26):

$$S_{\text{отн}} = \xi_2 \cdot r_1 = 2 \left[ (\varphi - 0,5 \cdot q) \arcsin \frac{B}{r_1} + \frac{r_1^2 q}{2B^2} \left( \arcsin \frac{B}{r_1} - \frac{B}{r_1} \sqrt{1 - \left( \frac{B}{r_1} \right)^2} \right) \right] \cdot r_1, \quad (27)$$

где  $\xi_2 = \frac{S_{\text{отн}}}{r_1}$  – безразмерный коэффициент полного смещения за цикл контакта (рис. 7).

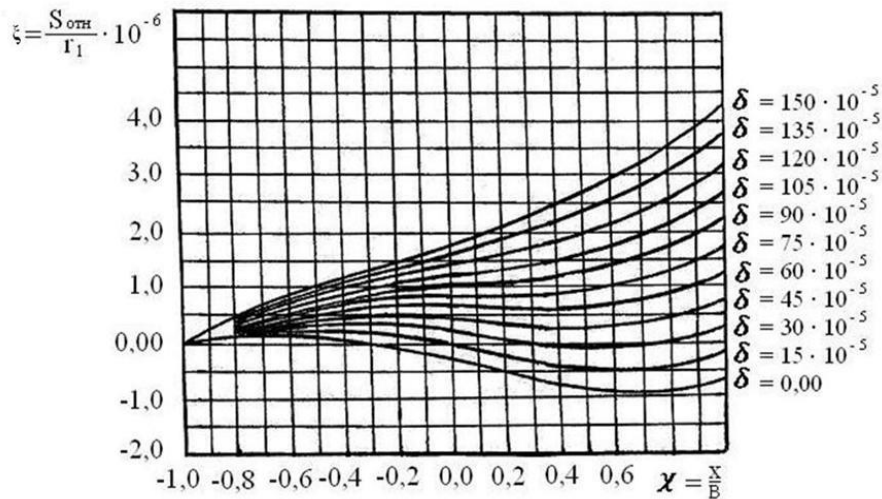


Рис. 7. Безразмерный коэффициент полного смещения частиц сыпучих материалов за цикл контакта

### Заключение

В результате проведенных исследований физических явлений, происходящих в зоне контакта частиц сыпучих материалов, с помощью аппарата безразмерных кинематических функций и анализа размерностей изучен не один какой-либо случай оценки скорости упругого скольжения контактирующих поверхностей и их силовых параметров, а бесчисленное множество различных случаев, объединенных общностью свойств.

В инвариантном виде получены зависимости для определения скорости упругого скольжения контактирующих поверхностей и их силовых параметров, а также намечены пути оптимизации размеров рабочих органов оборудования в виде винтового барабана. Показано, что для создания методики расчета и проектирования винтовых барабанов необходимо получить в инвариантном виде зависимости для определения мощности, расходуемой на трение



при упругом относительном скольжении в зоне контакта частиц сыпучих материалов, работы сил трения упругого скольжения, скорости продольного перемещения ча-

стиц сыпучих материалов, а следовательно, и размеров винтового барабана, решая таким образом задачу оптимизации его конструкции в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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*. – 2018. – № 327. – 042062.
2. 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.
3. 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.
4. Серга, Г.В. Оборудование на базе винтовых роторов в машиностроении / Г.В. Серга, Э.А. Хвостик // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2018. – № 3 (64). – С. 4-9.
5. Серга, Г.В. Оборудование для мойки сыпучих материалов и абразивных сред с амплитудой движения свыше 500 мм / Г.В. Серга, Э.А. Хвостик, Н.Н. Кузнецова, И.И. Табачук // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2018. – № 2 (63). – С. 38-43.
6. Серга, Г.В. Исследование возможности применения низкочастотных колебаний с большой амплитудой для сепарации сыпучих сред / Г.В. Серга, Э.А. Хвостик, М.Э. Делок // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. – Донецк, 2018. – № 1 (60). – С. 62-67.
7. Серга, Г.В. Роторно-винтовые системы для приготовления цементного клинкера / Г.В. Серга, К.А. Белокур, Э.А. Хвостик // *Вестник МГСУ*. – 2018. – Т. 13. – Вып. 11. – С. 1367-1385.
8. Пат. 2385664 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Устройство для приготовления концентрированных кормов / А.Ю. Марченко, Г.В. Серга, В.В. Цыбулевский, М.Г. Серга; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный университет. – № 2008127560/13; заявл. 07.07.08; опубл. 10.04.10, Бюл. № 10.
9. Пат. 2493019 Российская Федерация, МПК В60F 3/00, В63H 1/12, В62D 57/036, В63G 8/00. Транспортное средство / Г.В. Серга, М.Г. Серга; Кубанский государственный аграрный университет. – № 2014107119/11; заявл. 25.02.14; опубл. 10.04.15, Бюл. № 10. – 3 с.
10. Пат. 2550103 Российская Федерация, МПК МПК В60F 3/00, В63H 1/12, В62D 57/036, В63G 8/00. Средство транспортное / Г.В. Серга, М.Г. Серга; Кубанский государственный аграрный университет. – № 2014107118/11; заявл. 25.02.14; опубл. 10.05.15, Бюл. № 13. – 3 с.
1. 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*. – 2018. – № 327. – 042062.
2. 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.
3. 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.
4. Serga, G.V. Equipment based on screw rotors in mechanical engineering / G.V. Serga, E.A. Khvostik // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2018. – No.3 (64). – pp. 4-9.
5. Serga, G.V. Equipment for bulk and abrasive environment washing with motion amplitude above 500mm / G.V. Serga, E.A. Khvostik, N.N. Kuznetsova, I.I. Tabachuk // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2018. – No.2 (63). – pp. 38-43.
6. Serga, G.V. Analysis of application potentialities of low-frequency oscillations with high amplitude for bulk separation / G.V. Serga, E.A. Khvostik, M.E. Delock // *Efficient Technologies and Mechanical Engineering Systems*. – Donetsk, 2018. – No.1 (60). – pp. 62-67.
7. Serga, G.V. Rotor-screw systems for cement clinker preparation / G.V. Serga, K.A. Belokur, E.A. Khvostik // *Bulletin of MSCU*. – 2018. – Vol.13. – Issue 11. – pp. 1367-1385.
8. Pat. 2385664 the Russian Federation, IPC A23N 17/00. *Device for Concentrated Fodder Preparation* / A.Yu. Marchenko, G.V. Serga, V.V. Tsybulevsky, M.G. Serga; applicant and patent holder: Kuban State University. – No. 2008127560/13; claimed: 07.07.08; published: 10.04.10, Bull. No.10.
9. Pat. 2493019 the Russian Federation, IPC B60F 3/00, B63H 1/12, B62D 57/036, B63G 8/00. *Transport Vehicle* / G.V. Serga, M.G. Serga; Kuban State Agricultural University. – No.

2014107119/11; claimed: 25.02.14; published:  
10.04.15, Bull. No.10. – pp. 3.  
10.Pat. 2550103 the Russian Federation, IPC B60F  
3/00, B63H 1/12, B62D 57/036, B63G

8/00.Transport Vehicle / G.V. Serga, M.G. Serga;  
Kuban State Agricultural University. – No.  
2014107118/11; claimed: 25.02.14; published:  
10.05.15, Bull. No.13. – pp. 3.

*Статья поступила в редакцию 10.04.19*  
*Рецензент: д.т.н., профессор Кубанского государственного*  
*аграрного университета*  
*Дегтярев Г.В.*  
*Статья принята к публикации 27. 05. 19.*

#### Сведения об авторах:

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

**Серый Дмитрий Гаврилович**, к.т.н., доцент кафедры строительных материалов и конструкций

Кубанского государственного аграрного университета им. И.Т. Трубилина, e-mail: [seriy.d@kubsau.ru](mailto:seriy.d@kubsau.ru).

**Марченко Алексей Юрьевич**, к.т.н., доцент кафедры начертательной геометрии и графики Кубанского государственного аграрного университета им. И.Т. Трубилина, e-mail: [ipmarchenko@rambler.ru](mailto:ipmarchenko@rambler.ru).

**Serga George Vasilievich**, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. “Descriptive Geometry and Graphics”, Trubilin State Agricultural University of Kuban, e-mail: [serga-georgy@mail.ru](mailto:serga-georgy@mail.ru).

**Sery Dmitry Gavrilovich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Building Materials and Construc-

tions”, Trubilin State Agricultural University of Kuban, e-mail: [seriy.d@kubsau.ru](mailto:seriy.d@kubsau.ru).

**Marchenko Alexey Yurievich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Descriptive Geometry and Graphics”, Trubilin State Agricultural University of Kuban, e-mail: [ipmarchenko@rambler.ru](mailto:ipmarchenko@rambler.ru).