

Машиностроение и машиноведение

УДК 631.362.3

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-4-4-17

А.Н. Секисов, Е.В. Белокур, Г.В. Серга

**РАЗРАБОТКА ОСНОВ РАСЧЕТА ВИНТОВЫХ СИТ
ДЛЯ СЕПАРАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ
И ОПЫТ ИХ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО**

Рассмотрено движение сыпучих материалов в рабочей камере винтового сита. Получены зависимости для определения скорости продольного перемещения частиц сыпучих материалов в винтовых ситах и длины их рабочей камеры. Представлены результаты экспериментальных исследований параметров перемещений сыпучих сред, в зависимости от конструктивных и эксплуатационных характеристик винтовых сит, а также номограммы зависимостей скорости продольного перемещения частиц сыпучих материалов от диаметра винтового сита, для различных значений поправочных коэффициентов, веса частиц сыпучих материалов, от

коэффициентов заполнения винтового сита. Показана конструкция опытной установки для разделения частиц сыпучих материалов на фракции, выполненный в металле опытный образец, а также результаты опытов скорости перемещений сыпучих материалов в зависимости от конструктивных и эксплуатационных характеристик винтовых сит. Показана техническая характеристика опытной установки. Новизна подтверждена шестью патентами РФ на изобретения.

Ключевые слова: винтовое сито, фракции, сыпучие материалы, частицы, тетраэдральная форма.

A.N. Sekisov, E.V. Belokur, G.V. Serga

**FUNDAMENTALS DEVELOPMENT FOR COMPUTATION
OF SCREW SCREENS FOR BULK MATERIAL SEPARATION
AND EXPERIENCE OF THEIR INTRODUCTION TO PRODUCTION**

The work purpose is to increase productivity in bulk material separation by means of the development of a test sample of the installation for bulk material separation into fractions.

There is considered bulk material motion in a working chamber of the screw screen and the results of experimental investigations of bulk medium movement parameters are presented, depending on design and operation characteristics of screw screens, and also nomograms of dependences of a rate of bulk particle longitudinal movements upon a screw screen diameter, for different values of correction factors, weight of

bulk particles, an angular velocity of the screw screen and fill factors.

A design of the plant for bulk separation, test data and technical characteristics of the test plant are shown. A novelty is confirmed by six invention patents of the RF. By means of the complex method of investigations there are obtained dependences for definition of a rate of bulk particle longitudinal motion in screw screens, and also a length of working chamber of the screw screen.

Key words: helical sieve, fractions, bulk materials, particles, tetrahedral form.

Введение

Рыночные отношения и современные технологии обработки деталей строительного производства требуют постоянного повышения качества готового продукта, снижения его стоимости и поэтому изуче-

ние энергосберегающих технологий обработки, такие как сепарация сыпучих материалов в винтовых ситах, актуально и своевременно [1-7].

Исходные данные и экспериментальные условия для уточнения порядка коэффициентов

Рассматривается движение частиц сыпучих материалов в рабочей камере винтового сита тетраэдральной формы. Зависимость для определения скорости про-

дольного перемещения частиц сыпучих материалов, полученная в предыдущих работах авторов [7], может быть представлена в виде:

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

где r – средний радиус винтового сита, j – угол наклона винтовой линии винтового сита, K_2 ; K_1 ; K_0 ; μ_{20} – поправочные коэффициенты.

Исходные данные: $n = 70$ об/мин ($2,334\pi = 7,329 \text{ с}^{-1}$); $j \approx 19^\circ 30'$; $P_1 = 24,12$ – крупная частица сыпучих материалов $D_1 = 2$ см, $h = 0,7$ см, приведена к шару радиусом: $r_1 = 0,9037$ см; $P_2 = 8,97$ г – мелкая частица сыпучих материалов тоже приведена к шару радиусом $r_2 = 0,65$ см; длина ребра тетраэдра $a = 20$ см; радиус вписанного в тетраэдр шара $r = r_{\text{ср}} \approx 0,27 \cdot a$ взят за радиус вращения, т.е. средний радиус; $\frac{V_m}{V_{BC}} = \frac{1}{2} \div \frac{2}{3}$ – соотношение объемов частиц сыпучих материалов (V_m)

и объема рабочей камеры винтового сита (V_{BC}).

Экспериментальные условия: проведен опыт, где $n \approx 70$ об/мин, $V_n = 20$ об/мин, $V_n = 20 \frac{\text{см}}{\text{мин}}$ (3,3 мм/с), $t_{\text{обр}} \approx 7$ мин; $L_{BC} = 1,45$ м – длина рабочей камеры винтового сита. Вместо формулы (1) использована упрощенная зависимость (2).

Если представить:

$$K_{10} = \mu_{10} \frac{\pi}{6} \cdot \frac{\gamma}{m_1} S_1 \frac{V_m}{V_{BC}},$$

т. е., без учета влияния угловой скорости вращения ω винтового сита, можно выразить числовую характеристику $K_0 = K_{10} \cdot K_{C0}$, где K_{C0} – некоторый коэффициент. Коэффициент $K_{C(\omega)}$ можно разложить в ряд, представляя

$$K_{C(\omega)} \approx K_{C0} + \alpha_1(\omega - \omega_0) + \alpha_2(\omega - \omega_0)^2,$$

где, α_1, α_2 можно найти, используя экспериментальные данные.

Попытаемся использовать только линейные члены от ω в данном разложении, т.е. найти хотя бы коэффициент α_1 . Тогда

$K_1 = K_{10} K_{C(\omega)}$ согласно определению, т. е. имея ввиду разложение в нулевой точке, полагая $\omega_0 = 0$:

$$K_1 - K_0 = K_{10} K_{C(\omega)} - K_{10} K_{C0} \cong K_{10} [K_{C(\omega)} - K_{C0}] \approx \alpha_1 \omega$$

Используя среднее значение экспериментальной скорости перемещения (см. таблицу 1) при $n = 70$ об/мин ($\omega = 7,329 \text{ сек}^{-1}$) находим $\alpha_1 \approx 0,01$, тогда значение средней скорости при $\varphi = 0$ очевидно равно:

$$V_{n \text{ ср.}} = \frac{V_{n(\varphi=-\frac{\pi}{2})} + V_{n(\varphi=\frac{\pi}{2})}}{2},$$

где $V_{n(\varphi=-\frac{\pi}{2})} = 0$, т. е., равно половине значения экспериментальной скорости.

В этом случае мы находим:

$$K_1 - K_0 = -K_{10} \cdot 0,01\omega,$$

если считать переменной величиной ω , т.е. если пренебречь $\mu_{20} \cdot K_2 \approx 0$, имеем упрощенную зависимость:

$$V_z \approx rtgj \left\{ -\omega + \sqrt{\omega^2 - 0,02K_0 \cdot \omega(1 + \sin \varphi)} \right\}, \quad (2)$$

где $K_{10} = \mu_{10} \frac{\pi}{3} \cdot \frac{\gamma}{m_1} S_1 \frac{V_m}{V_{BC}}$.

Итак, последовательно полагая $\xi = \frac{V_m}{V_{BC}} = \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ получаем, что $V_{z(\frac{\pi}{2})}$ возрастает с ростом ξ , что вряд ли нас удовлетворяет (разброс $V_z = 3,1 \div 8,2$ мм/с). Следующий итог: используя значение эксперименталь-

ной скорости, экстраполируя при $\varphi = -\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}$ с учетом построения ряда в форме Маклорена

$$K_{1(\omega)} = K_0 + \frac{1}{1!} K'_{10} \cdot \omega + \frac{1}{2!} K''_0 \cdot \omega^2 + \dots \dots \dots \quad (3)$$

и рассматривая коэффициенты зависимости (1) с учетом формулы (3) как неизвестные (берем только K'_{10} , (K'_{10} при $\omega \approx$

$7,33 \text{ с}^{-1}$, $V_n \approx 3,3$ мм/с), получаем экспериментальную зависимость:

$$V_n \approx \text{rtqj}\{-\omega + \sqrt{[1 - 0,018(\pi + 2\varphi)]\omega^2 - 2\omega(0,7 - 0,1\omega)(1 + \sin \varphi)}\} \quad (4)$$

согласно которой $V_n \approx 4$ мм/с (24 см/мин), где V_n - средняя продольная скорость перемещения сыпучих материалов

$$V_n \approx \frac{V_{z(\varphi=-\frac{\pi}{2})} + V_{z(\varphi=\frac{\pi}{2})}}{2} \approx \frac{1}{2} V_z; \quad V_{z(-\frac{\pi}{2})} = 0.$$

Здесь одновременно получено $\mu_{20} \cdot K_2 - 0,018$ - значение, определяющее хотя бы порядок изменения остальных коэффициентов выражения (1). Если принять число соударений для каждой частицы сыпучих материалов при $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ изменении $n=20$; $5 \leq K \leq 20$, $m \leq K$, то можно подсчитать (при условии числа соударений с каждой частицей за один оборот ≥ 40) при $P \approx 0,25$, что $P_m \approx 0,615$. Тогда значение $\mu_{20} \cdot K_2 \approx -0,011$ может быть как-то «уточнено» за счет изменения коэффициента P_m при условии, что среднее

значение коэффициента скольжения при соударениях $\mu_{20} \approx 0,1$.

Таким образом: из сопоставления зависимостей (1), (2), (4) следует, что в первую очередь необходимо получить какие-то аналитические зависимости для коэффициентов $K_{C(\omega)}, K_V(\xi = \frac{V_m}{V_{BC}})$, а затем проводить дальнейшие исследования. Наверное, можно строить зависимости и частного типа с целью оценки параметров движения и проектируемых параметров при согласовании с экспериментом.

Получение характеристик поправочных коэффициентов в экспериментальных условиях

Зависимость (1) может быть представлена в общем виде:

$$L \approx (q_i \cdot \varphi), \quad (5)$$

где L - функционал:

$q_i = (\mu_0, \mu_{10}, \mu_{20}, n, k, m, \omega, \xi, a, m_1, m_2)$ - независимые между собой параметры, из которых нас пока интересует $q_1 = \omega_1$, $q_2 = \xi$.

Исходя из физического смысла процесса движения сыпучих материалов, можно считать, что выполнение данной перестановочной операции

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right), \quad (6)$$

где $\dot{L} = \frac{dL}{dt}$, вполне осуществимо. В этих условиях может возникнуть по крайней мере две задачи:

1. Использовать экспериментальные данные для зависимости (5), представляя $K_{C(\omega)}, K_V(\xi)$ - разложениями в ряды, например Тейлора или Маклорена, считая их непрерывными голоморфными функци-

ями, а затем решать системы линейных уравнений, определяя искомые коэффициенты данных рядов, а следовательно, и находить конкретный вид указанных зависимостей;

2. При неполных экспериментальных данных с целью прогнозирования интересующих нас характеристик. Привлекать соотношения (5) и (6) с учетом экстремального условия

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (7)$$

Приступим непосредственно к решению последней задачи как наименее трудоемкой с целью определения $K_{c(\omega)}$.

Применительно к зависимости (1) условие (7) означает

$$\frac{\partial V_z}{\partial \omega} = 0, \quad (8)$$

и дифференцируя правую часть зависимости (1) с учетом формулы (8), запишем:

$$rtqj \left\{ -1 + \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \right\} = 0, \quad (9)$$

где согласно выражению (6)

$$2 \cdot \phi \frac{\partial \phi}{\partial \omega} = 2\omega [1 + \mu_{20} K_2 (\pi + 2\phi)] + 2\mu_{20} \cdot K_2 \omega^2 \frac{\partial \phi}{\partial \omega} + 2K_{10} \cdot K'_{c(\omega)} (1 + \sin \phi) + 2[K_{10} \cdot K_{c(\omega)} - K_0] \cos \phi \frac{d\phi}{d\omega}, \quad (14)$$

где в первом приближении будем считать, что $\frac{\partial K_2}{\partial \omega} = 0$.

С учетом $\dot{\phi}_0 = 0$, $\phi_0 = -\frac{\pi}{2}$; $t = t_0 = 0$ зависимостей (1) и (2) находим $C_\omega = 0$, а

$$\phi = \omega [1 + \mu_{20} \cdot K_2 (\pi + 2\phi)] + \mu_{20} \cdot K_2 \cdot \omega^2 \cdot t + K_{10} \cdot K'_{c(\omega)} \times (1 + \sin \phi) + [K_{10} \cdot K_{c(\omega)} - K_0] \cos \phi \cdot t \quad (15)$$

С другой стороны, формула (14) с учетом зависимости (10) может быть представлена как дифференциальное уравнение. При этом представляем $K_{c(\omega)}$ в виде какого-то степенного ряда. Если бы это было возможно, то дифференцируя бесконечное, в принципе, число раз выражение (14), можно было определять коэффициен-

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial \omega} \right)^2 + \phi \frac{\partial^2 \phi}{\partial \omega^2} = \{ [1 + \mu_{20} K_2 (\pi + 2\phi)] + 4\mu_{20} K_2 \frac{d\phi}{d\omega} + 2K_{10} \cdot K'_{c(\omega)} \cdot \cos \phi \frac{d\phi}{d\omega} + \mu_{20} K_2 \omega^2 \frac{d^2 \phi}{d\omega^2} + K_{10} K''_{c(\omega)} (1 + \sin \phi) - [K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] \times \sin \phi \left(\frac{d\phi}{d\omega} \right)^2 + [K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] \cos \phi \frac{d^2 \phi}{d\omega^2} \} \quad (16)$$

С учетом зависимостей (11) и (12), $\frac{\partial^2 \phi}{\partial \omega^2} = 0$ зависимость (16) примет частный вид:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \omega} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \omega} \right), \quad (10)$$

Подставляя последнее соотношение в формуле (9) и интегрируя, находим экстремальное (частное) значение производной

$$\frac{\partial \phi}{\partial \omega} = t + C_\omega \quad (11)$$

где значение постоянной $C_\omega = \frac{\partial \phi}{\partial \omega} / t = t_0$ может быть найдено из начальных условий:

$$t = t_0 = 0 \text{ или } \phi = \phi_0 = -\frac{\pi}{2}$$

С другой стороны, из формулы (9) следует

$$\frac{\partial \phi}{\partial \omega} = 1 \quad (12)$$

Выделим коэффициент $K_{c(\omega)}$ т.е., представим $(K_1 - K_0)$ в виде:

$$K_1 - K_0 = K_{10} K_{c(\omega)} - K_0 \quad (13)$$

Беря ϕ^2 из выражения с учетом зависимости (13) и дифференцируя по ω , получим:

поэтому формула (14) может быть представлена в частном виде:

ты этого ряда, решая систему. Естественно, если строить зависимость $K_{c(\omega)}$ в виде квадратного трехчлена, то для определения коэффициентов при ω и ω^2 необходимо из формулы (14) получить другое соотношение

$$1 = \left\{ [1 + \mu_{20} K_2 (\pi + 2\varphi)] + 4\mu_{20} K_2 \omega t + \mu_{20} K_2 \omega^2 \frac{\partial t}{\partial \omega} + K_{10} K_{c(\omega)}'' (1 + \sin \varphi) + 2K_{10} K_{c(\omega)}' \cos \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} - [K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] \sin \varphi \cdot t^2 + [K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] \cos \varphi \frac{\partial t}{\partial \omega} \right\}, \quad (17)$$

где $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \omega^2} = \frac{\partial t}{\partial \omega}$ согласно выражению (11).
Выражения (15) и (17) следует рассматривать как систему, где появились новые не-

известные $t, \frac{\partial t}{\partial \omega}$, которые необходимо выразить через переменную φ . Для этих целей выражение (15) представим в виде:

$$\omega t = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} \left\{ [1 + \mu_{20} K_2 (\pi + 2\varphi)] \omega^2 + 2[K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] \times (1 + \sin \varphi) \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot d\varphi, \quad (18)$$

где, разлагая подынтегральное выражение в ряд с точностью до линейных слагаемых,

согласно сказанному выше и интегрируя, получим:

$$\omega t \approx \left\{ \varphi - \frac{1}{2} [\mu_{20} K_2 (\pi \varphi + \varphi^2) + \frac{2}{\omega^2} [K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] (\varphi - \cos \varphi)] \right\} + C_t, \quad (19)$$

где $C_t = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \left\{ \mu_{20} K_2 \frac{\pi^2}{4} - \frac{2}{\omega^2} [K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] \frac{\pi}{2} \right\}$.

Для определения производной $\frac{\partial t}{\partial \omega}$, в принципе, необходимо левую и правую части выражения (18) продифференциро-

вать по ω , рассматривая правую часть, как интеграл с переменным верхним пределом [8]:

$$t + \omega \frac{\partial t}{\partial \omega} = \frac{\partial t}{\partial \omega} \cdot$$

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} \left\{ [1 + \mu_{20} K_2 (\pi + 2\varphi)] \omega^2 + 2[K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] (1 + \sin \varphi) \right\}^{-\frac{1}{2}} d\varphi =$$

$$= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} \frac{\partial}{\partial \omega} \left\{ [1 + \mu_{20} K_2 (\pi + 2\varphi)] \omega^2 + 2[K_{10} K_{c(\omega)} - \right.$$

$$\left. - K_0] (1 + \sin \varphi) \right\}^{-\frac{1}{2}} \partial \varphi + \left\{ [1 + \mu_{20} K_2 (\pi + 2\varphi)] \omega^2 + 2[K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] (1 + \sin \varphi) \right\}^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial \varphi}{\partial \omega}, \quad (20)$$

где нижняя граница $\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$ фиксирована.

В данном случае поступим проще: дифференцируя левую и правую части выражения (20), имеем:

$$t + \omega \frac{\partial t}{\partial \omega} \approx \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} - \frac{1}{2} \left\{ \mu_{20} K_2 (\pi + 2\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} - \frac{4}{\omega^3} [K_{10} K_{c(\omega)}' - K_0] (\varphi - \cos \varphi) + \frac{2}{\omega^2} K_{10} K_{c(\omega)}'' (\varphi - \cos \varphi) + \frac{2}{\omega^2} [K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] \times (1 + \sin \varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} + \frac{\partial C_t}{\partial \omega} \right\},$$

где $\frac{\partial C_t}{\partial \omega} = -\frac{2}{\omega^3} [K_{10} K_{c(\omega)} - K_0] \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\omega^2} K_{10} K_{c(\omega)}' \frac{\pi}{2}$,

т. е. окончательно:

$$\frac{\partial t}{\partial \omega} \approx -\frac{1}{2\omega} \left\{ \mu_{20} K_2 (\pi + 2\varphi) t - \right.$$

$$-\frac{4}{\omega^3} [K_{10}K_{c(\omega)} - K_0](\varphi - \cos \varphi) + \frac{2}{\omega^2} K_{10}K'_{c(\omega)}(\varphi - \cos \varphi) + \frac{2 \cdot t}{\omega^2} K_{10}K'_{c(\omega)}\pi \}. \quad (21)$$

Нетрудно видеть, что при подстановке выражения (20) в формулу (17) образуются члены более высокого порядка по сравнению с линейными членами, а поэтому в первом приближении этими слагаемыми можно пренебречь, т. е. их не учитывать. Однако, не смотря на это, зависимости (15), (17) и (19) остаются достаточно сложными при их совместном рассмотрении и аналитическое представление искомых величин явно затруднено. Поэтому переменную φ будем рассматривать как некоторый фиксированный параметр, в зависимости от значений которого могут как-то определяться перечисленные выше искомые характеристики при определенных экстремальных значениях ω . Так, например, считая значение ω фиксированным и зная его, можно определить коэффициенты при ω , ω^2 , если $K_{c(\omega)}$ представлено квадратным трехчленом. А можно считать выражение (18) приближенным для достаточно узкого интервала значений ω , рассматривая характеристики

$K'_{c(\omega)}$, $K''_{c(\omega)}$, как неизвестные функции в выражениях (15) и (17), считая их линейными дифференциальными уравнениями относительно этих характеристик.

Тогда, интегрируя выражения (15) и (17) при фиксированных значениях φ , можно установить характер изменения $K_{c(\omega)}$, сопоставляя те или иные его выражения.

Заметим, что при $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ выражения (15) и (17) вырождаются, т. е. становятся неопределенными, и нахождение в этом частном случае затруднено. Фиксируем наиболее характерные значения:

$$\varphi = 0, \quad \frac{\pi}{2}.$$

При этом из уравнения (19) соответственно приближенно имеем:

$$t \cong \frac{\pi}{2 \cdot \omega}; \quad \frac{\pi}{\omega}$$

В первом случае уравнение (15) примет вид:

$$K'_c + \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \frac{1}{\omega} K_c = \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \frac{K_0}{K_{10}} \cdot \frac{1}{\omega} - \mu_{20} K_2 \pi \frac{\omega}{K_{10}}, \quad (22)$$

а во втором

$$K'_c - \frac{1}{\omega} K_c = -\frac{1}{K_{10}} \left(\mu_{20} K_2 \pi \omega + \frac{K_0}{\omega} \right) \quad (23)$$

Каждое из двух линейных уравнений уже легко может быть проинтегрировано с целью определения $K_{c(\omega)}$. Очевидно, что

дополнительно необходимо при $t = \frac{\pi}{2\omega}, \frac{\pi}{\omega}$ для зависимостей (22) и (23) привлечь выражение (17). Если представить

$$(K_1 - K_0) \approx K_{10} \left(K_{c_0} + K'_{c_0} \omega + \frac{1}{2} K''_{c_0} \omega^2 \right) - K_0, \quad (24)$$

то из формул (15) и (17) можно получить системы:

$$\begin{cases} \mu_{20} K_2 \pi \omega + K_{10} (K'_{c_0} + K''_{c_0} \omega) + \left[\left(\frac{\pi}{2} - 1\right) K_{10} \cdot \left(K'_{c_0} + \frac{1}{2} \cdot K''_{c_0} \omega \right) \right] = 0 \\ 3\mu_{20} K_2 \pi + K_{10} K''_{c_0} + \frac{\pi}{\omega} K_{10} (K'_{c_0} + K''_{c_0} \omega) = 0, \end{cases} \quad (25)$$

при $\varphi = 0, t = \frac{\pi}{2\omega}$

$$\begin{cases} \mu_{20} K_2 \cdot 2\pi \omega + 2K_{10} (K'_{c_0} + K''_{c_0} \omega) - 2K_{10} \left(K'_{c_0} + \frac{1}{2} K''_{c_0} \omega \right) = 0 \\ 6\mu_{20} K_2 \pi + 2K_{10} K''_{c_0} - \left[\left(\frac{\pi}{\omega}\right)^2 K_{10} \left(K'_{c_0} \omega + \frac{1}{2} K''_{c_0} \omega^2 \right) \right] = 0, \end{cases} \quad (26)$$

при $\varphi = \frac{\pi}{2}, t = \frac{\pi}{\omega}$.

Решая каждую из этих систем при варьировании параметров K_{10} , ω , можно подобрать для этих двух случаев соответ-

ственно выражения для K'_{c_0} , K''_{c_0} и согласно формулы (24) определить $K_1 - K_0$.

Наконец, считая $\omega \neq 0$, умножая вторые уравнения систем (25) и (26) соответственно на ω и ω^2 , используя метод неопределенных коэффициентов, можно также найти K'_{C_0} , K''_{C_0} , выявив заодно соотношения между выбором $(K_{10} \cdot K_C - K_0)$ и величинами $\mu_{20} \cdot K_2$.

$$(K_1 - K_0) = [(K_{10}K_{C^*} - K_0) + \frac{2\pi}{2+\pi} \mu_{20} K_2 \omega^2] \left(\frac{\omega}{\omega_*}\right)^{\frac{\pi}{2}-1} - \frac{2\pi}{2+\pi} \mu_{20} K_2 \omega^2, \quad (27)$$

где индекс (*) относится к выбору начальных условий для обозначенных параметров из условия, что ω_* принадлежит достаточно узкому интервалу значений ω (о чем говорилось выше), а поэтому для его определения необходимо использовать выражение (17) при $\varphi = 0$, $t \approx \frac{\pi}{2\omega}$, т. е. вставляя в уравнение (17) при этих условиях выра-

$$(K_1 - K_0) = [(K_{10}K_{C^*} - K_0) \mu_{20} K_2 \pi \omega^2] \frac{\omega}{\omega_*} - \mu_{20} K_2 \pi \omega^2 \quad (28)$$

Сравнивая с выражением (27), мы видим некоторую идентичность формирования правых частей, несмотря на то, что в первом случае $\varphi = 0$, а во втором $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

Таким образом, каждый из рассмотренных трех случаев может содержать своеобразную информацию при построении зависимостей $K_{C(\omega)}$.

Интегрируя зависимость (22), находим:

жение (27) и рассматривая $\omega_* = \text{const}$. В связи с тем обстоятельством, что нас более интересуют параметры при $\varphi = \frac{\pi}{2}$, мы такую операцию по выбору ω_* подробно проведем при рассмотрении уравнения (23), интегрируя которое имеем:

Итак, для определения ω_* в уравнении (28) из выражения (17) при $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $t = \frac{\pi}{\omega}$ запишем дополнительное соотношение:

$$6\mu_{20} K_2 \pi + 2K_{10} K_C''(\omega) - \left(\frac{\pi}{\omega}\right)^2 [K_{10} K_C(\omega) - K_0] = 0, \quad (29)$$

Дифференцируя уравнение (28) дважды по ω , находим (при условии $\omega_* = \text{const}$):

$$K_{10} K_C'' = -2\mu_{20} K_2 \pi. \quad (30)$$

Подставляя уравнение (28) и выражение (30) в формулу (29), приходим к выражению

$$\omega_* - \frac{2+\pi^2}{\pi^2} \omega \cdot \omega_* + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{K_{10} \cdot K_{C^*} - K_0}{\mu_{20} \cdot K_2} = 0, \quad (31)$$

где при этом $\mu_{20} \cdot K_2 \neq 0$, из условия (31) находим ω_* .

При этом имеем в виду, что ω_* должно удовлетворять достаточно узкому интервалу значений ω , а поэтому, решая квадратное уравнение (31), необходимо выбрать корень (один из корней) согласно

данному условию. При интересующих нас значениях ω , например $\omega = 7,33\text{с}^{-1}$; и $\omega = 12,56\text{с}^{-1}$ с учетом достаточно узкого разброса относительно каждого из данных значений, которым принадлежит ω_* , решая (31), необходимо выбрать корень

$$\omega_* = \frac{1}{2} \left(\frac{2+\pi^2}{\pi^2}\right) \omega + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{2+\pi^2}{\pi^2}\right)^2 \omega^2 - \frac{1}{\pi} \cdot \frac{K_{10} \cdot K_{C^*} - K_0}{\mu_{20} \cdot K_2}}, \quad (32)$$

где, предполагается $\frac{K_{10} \cdot K_{C^*} - K_0}{\mu_{20} \cdot K_2} > 0$. Нетрудно видеть, что знак " - " (минус) при рассмотрении другого корня не подходит, так как ω_* будет лежать вне интервала интересующих значений ω . Наоборот, если

значения ω брать достаточно малыми, то уже нужно брать знак " - " (минус).

Рассмотрим достаточно интересный частный случай: если со стороны отрицательных значений $(K_{10} K_{C^*} - K_0) \rightarrow 0$, т. е.

$K_{C^*} \rightarrow \frac{K_0}{K_{10}}$, то согласно (32) $\omega_* \rightarrow \frac{2+\pi^2}{\pi^2} \omega$, а согласно условию (28) $(K_1 - K_0) \rightarrow \mu_{20} \cdot K_2 \pi (2\omega - \omega^2) > 0$ для интересующих значений ω . При этом, анализируя выражение (1) при $\varphi = \frac{\pi}{2}$, видим, что $V_{z(\frac{\pi}{2})}$ имеет тенденцию к снижению с ростом ω (разумеется, в определенных пределах), т.е. $V_{z(\frac{\pi}{2})}^+ \rightarrow 0$ при этом при определенном соотношении коэффициентов $K_0, K_1, \mu_{20} \cdot K_2$ (по крайней мере, может быть такое).

Если же брать знак " - " для одного из корней уравнения (32), то в этих условиях $\omega_* \rightarrow 0$, т.е. в условиях малых значений ω , при $K_{C^*} \rightarrow \frac{K_0}{K_{10}}$ имеем $(K_1 - K_0) \rightarrow \frac{2}{\pi} \mu_{20} K_2 \omega^2 < 0$, где $\bar{V}_{z(\pi/2)} \rightarrow 0$ только лишь при условии $\mu_{20} K_2 \rightarrow 0$.

Говоря вообще, как следует из выражения (32), что для действительных значений ω_* параметр

$$(K_{10}K_{C^*} - K_0) \geq \frac{\pi}{4} \left(\frac{2+\pi^2}{\pi^2} \right) \omega^2 \cdot \mu_{20} K_2 \quad (33)$$

ограничен с учетом $\mu_{20} \cdot K_2 < 0$, и это ограничение всегда (в данных экстремаль-

ных условиях) следует иметь в виду при его варьировании.

Оценка скорости продольного перемещения частиц строительных материалов и длины винтового сита

С учетом зависимостей (1), (38), (32) имеем частную формулу при $\varphi = \frac{\pi}{2}$ для расчета скорости

$$V_{z(\frac{\pi}{2})} = r \cdot \text{tg } j \left\{ -\omega + \sqrt{(1 + 2\mu_{20}K_2 \cdot \pi)\omega^2 + 4 \left[\frac{K_{10}K_{C^*} - K_0}{\omega_*} \omega - \mu_{20}K_2\pi \cdot \omega(\omega_* - \omega) \right]} \right\}, \quad (34)$$

где ω_* определяется согласно условию (32), а значения параметра $(K_{10}K_{C^*} - K_0)$ могут быть выбраны согласно условия (33). Так, например, при $\omega = 7,33\text{с}^{-1}$ $(K_{10}K_{C^*} - K_0) \geq -0,67$, а при $\omega = 12,56\text{с}^{-1}$, $(K_{10}K_{C^*} - K_0) \geq -1,97$.

Если произвести подсчеты по формуле (34), то значения скоростей будут невелики:

$$V_{z(\frac{\pi}{2})} \approx -\frac{0,76\text{мм}}{\text{с}} - \text{ для первого случая,}$$

$$V_{z(\frac{\pi}{2})} \approx -1,72\text{мм/с} - \text{ для второго случая}$$

с учетом значений левой границы согласно (33). Начнем сдвигать левую границу вправо и пусть, например, $(K_{10}K_{C^*} - K_0) \rightarrow -0$, то значения соответственно возрастут:

$$V_{z(\frac{\pi}{2})} \approx -6,88\text{ мм/с}, \quad V_{z(\frac{\pi}{2})} \approx -9,55\text{ мм/с} -$$

для второго случая. Заметим, что для первого случая значение продольной скорости перемещения частиц сыпучих материалов

$$V_z \approx \frac{1}{2} \left[V_{n(\frac{\pi}{2})} \right] \approx 3,44\text{ (мм/с)} \text{ хорошо сов-}$$

падает с опытным значением $V_n = 20\text{ см/мин. (3,34 мм/с)}$. Из этого следует, что если пользоваться зависимостью (34) для сопоставления опытных и расчетных значений, то, наверное, лучше брать условие

$$K_{10}K_{C^*} - K_0 \approx 0.$$

Выше был проведен анализ $V_{z(\frac{\pi}{2})}$ согласно формуле (34). В этих же условиях оценим параметр - длину рабочей камеры $L_{p.к}$ винтового сита в зависимости от выбора характеристики $V_{z(\frac{\pi}{2})}$ или с учетом зависимостей (28), (29) и (33). Начнем с общего преобразования зависимости (1).

$$V_z = \frac{dz}{dt} \approx \text{rtg } j \{-\omega + \phi\}, \quad (35)$$

или в интегральной форме величина Z продольного перемещения частиц сыпучих материалов при $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ (за $\frac{1}{2}$ оборота винтового сита).

$$Z = r \operatorname{tg} j \cdot \int (-\omega dt + d\varphi) + C \tag{36}$$

Обозначим $\mu_{20} \cdot K_2 = \alpha$; $K_1 - K_0 = \beta$,
получим выражение для определения ско-

рости продольного перемещения частиц
сыпучих материалов в винтовом сите:

$$V_{Z(\frac{\pi}{2})} = r \operatorname{tg} j \{ -\omega + \sqrt{(1 + 2\pi\alpha)\omega^2 + 4\beta} \} \tag{37}$$

Тогда формула расчетного продольного перемещения за один оборот:

$$Z \approx r \operatorname{tg} j (\pi^2 + 4) \mu_{20} K_2 < 0 \tag{38}$$

Перемещение происходит в направ-
лении, противоположном оси Z неподвиж-
ной системы координат XVZ . Зная время
обработки частиц сыпучих материалов,

можно экспериментально определить об-
щее количество оборотов N и длину рабо-
чее камеры винтового сита $L_{p,k}$:

$$L_{p,k} \approx r \operatorname{tg} j (\pi^2 + 4) \mu_{20} K_2 N, \tag{39}$$

Графики и опытные данные приведены в таблице и на рис. 1-5.

Таблица 1

Данные эксперимента

Скорость вращения об/мин	Угол наклона оси винтового сита (угл. мин)	Количество оборотов	Время продольного перемещения (мин)	Средняя скорость V_n продольного перемещения (мм/с)
0	—	400	14,0	1,73
45	—	300	7,3	3,29
60	—	400	6,0	4,02
90	—	300	3,3	7,21
90	-6	210	2,4	10,19
90	+3	850	9,5	2,54

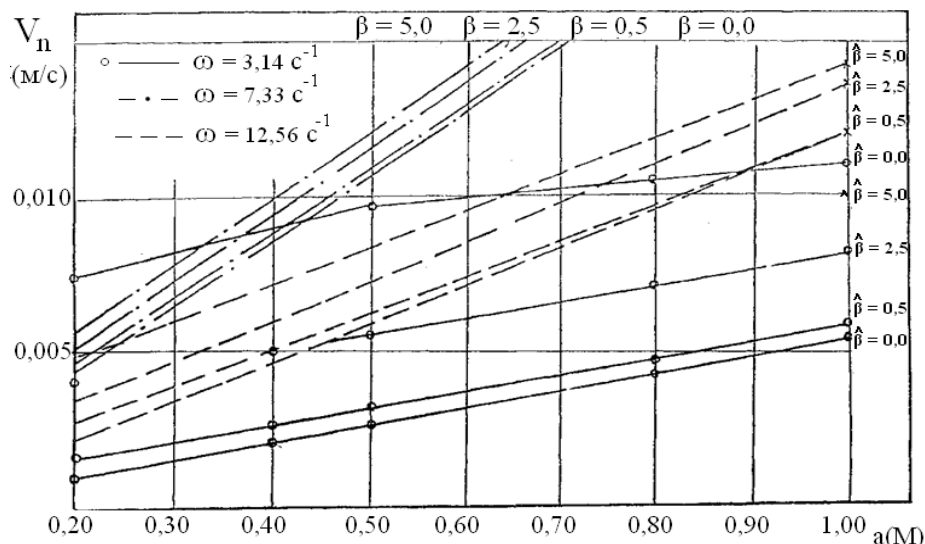


Рис. 1. Зависимость скорости продольного перемещения частицы сыпучих материалов от диаметра винтового сита – длины составляющей ломанной винтовой линии винтового сита, например, ребра тетраэдра

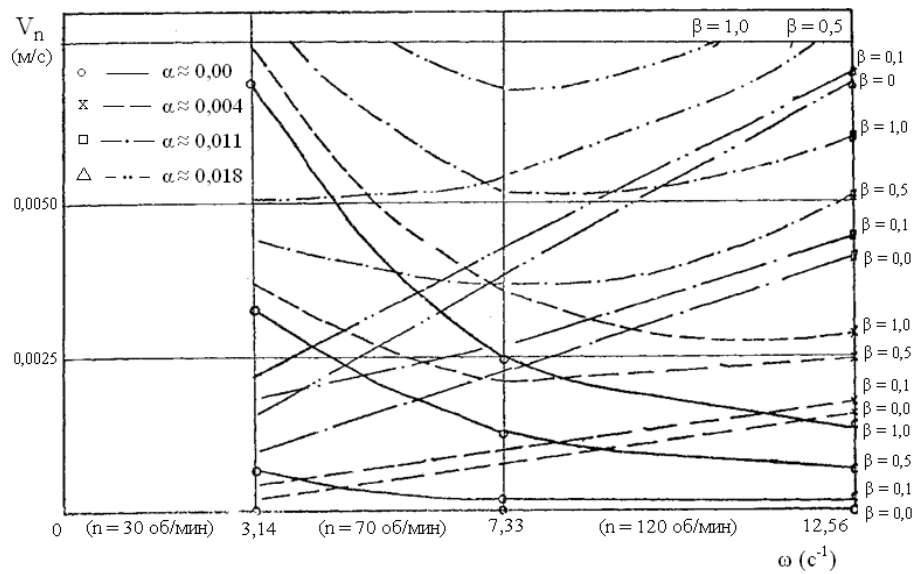


Рис. 2. Зависимость скорости продольного перемещения частиц для различных значений коэффициентов α , β при различной частоте вращения винтового сита

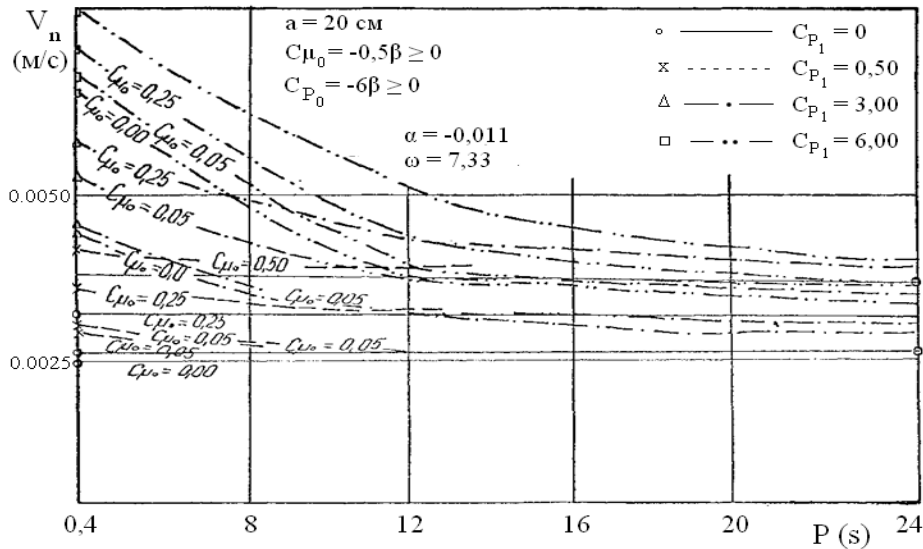


Рис. 3. Зависимость скорости продольного перемещения частиц от их веса

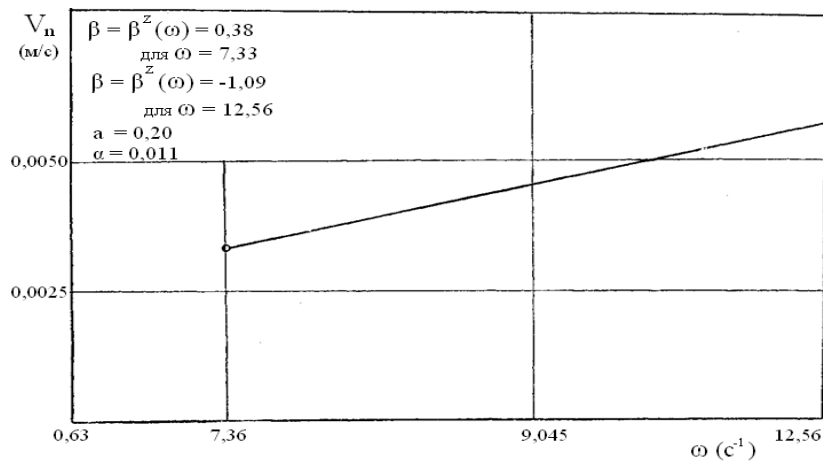


Рис. 4. График изменения скорости продольного перемещения с учетом частного $\beta = \beta^*(\omega)$ вида из условия $\frac{dV_n}{d\omega} \approx 0$

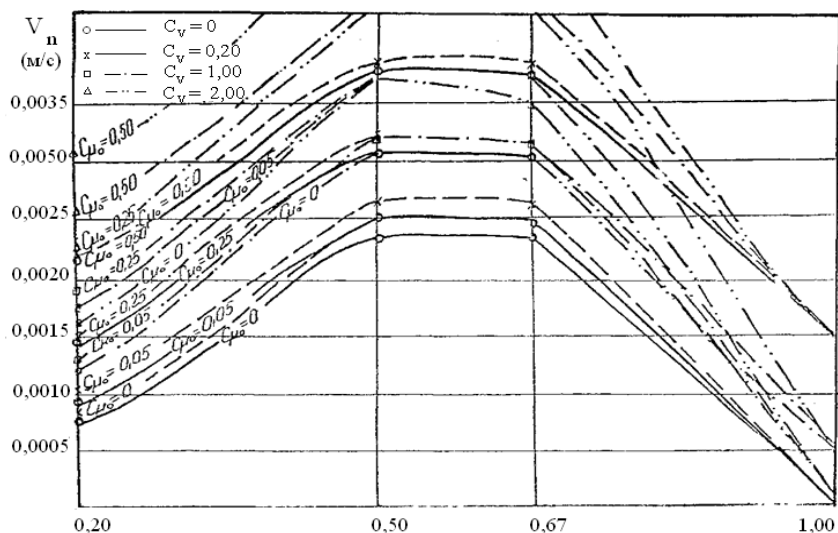


Рис. 5. Зависимость скорости продольного перемещения частиц от коэффициента заполнения

На рис. 6 показана конструкция установки для сепарации сыпучих материалов на базе винтового сита тетраэдральной формы. Она состоит из: 1 – загрузочное устройство 1, 2 – торцевая щека, 3 – разгрузочное устройство, 4-винтовое сито, 5 – опорное кольцо, 6-два опорных ролика, 7 – рама, 8 – щека, 9 – диск, 10 – стержни,

11 – вал, 12 – привод, 13 – рама, 14 – обечайка, 15 – конус, 16 – винтовая навивка, 17- каркас, 18 – сита, 19 – приемный бункер мелких фракций, 20 – приемный бункер крупных фракций, 21 – приемных фракций более крупных фракций.

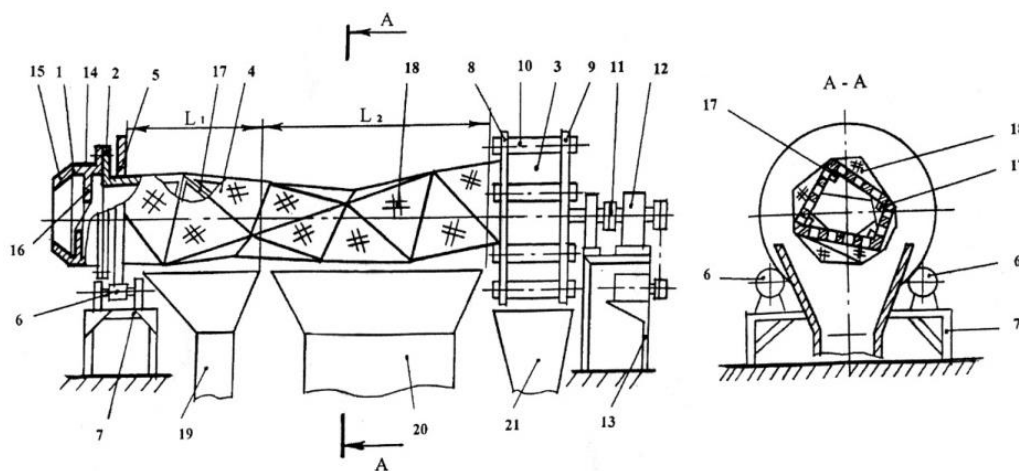


Рис. 6. Конструкция установки для сепарации сыпучих материалов на базе винтового сита тетраэдральной формы

На рис. 7, 8 опытный образец установки для сепарации сыпучих материалов на базе винтового сита тетраэдральной формы, которая состоит из 1 – загрузочное устройство 1, 2 – торцевая щека, 3 – разгрузочное устройство, 4 – винтовое сито, 5 – опорное кольцо, 6 – два опорных ролика, 7 – рама, 8 – щека, 9 – диск, 10 –

стержни, 11 – вал, 12 – привод, 13 – рама, 14 – обечайка, 15 – конус, 16 – винтовая навивка, 17 – каркас, 18-сита, 19-приемный бункер мелких фракций, 20 – приемный бункер крупных фракций, 21 – приемных фракций более крупных фракций.

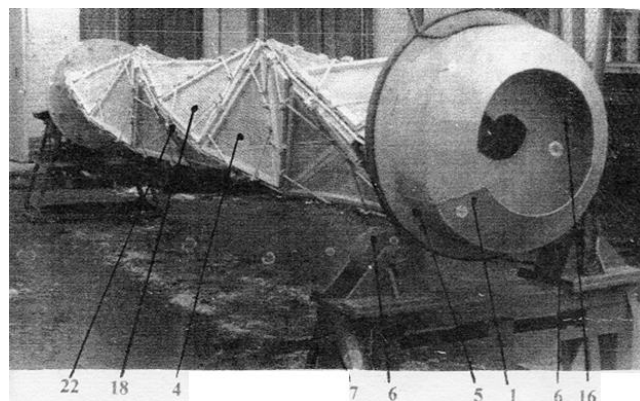


Рис. 7. Опытный образец установки для сепарации сыпучих материалов на базе винтового сита тетраэдральной формы, вид со стороны загрузки

Технические характеристики установки

Габаритные размеры, мм.....9000×1700×600
Масса, кг....2300
Установленная мощность, кВт.....7,5
Производительность, кг/час.....3000



Рис. 8. Опытный образец установки для сепарации сыпучих материалов на базе винтового сита тетраэдральной формы, вид со стороны выгрузки

Установка со всех сторон закрыта кожухом для уменьшения запыленности

помещений и предотвращений травм обслуживающего персонала.

Заключение

Представлены зависимости для определения скорости продольного перемещения сыпучих материалов в винтовом сите и длины его рабочей камеры а также номограммы зависимостей скорости продольного перемещения частиц сыпучих материалов от диаметра винтового сита, для

различных значений поправочных коэффициентов, веса частиц сыпучих материалов, от коэффициентов заполнения винтового сита, от угловой скорости винтового сита Рассмотрено движение сыпучих материалов в рабочей камере винтового сита. Показаны результаты экспериментальных

исследований параметров перемещений сыпучих сред, в зависимости от конструктивных и эксплуатационных характеристик винтовых сит. Показана конструкция опытной установки для разделения частиц сыпучих материалов на фракции, выполненный в металле опытный образец, а также результаты опытов скорости переме-

щений сыпучих материалов в зависимости от конструктивных и эксплуатационных характеристик винтовых сит. Показана техническая характеристика опытной установки для сепарации сыпучих материалов на базе винтового сита тетраэдральной формы, виды со стороны загрузки и выгрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат.1808417, А.С. СССР № 309750 и № 271981, МПК В07В 1/22. Устройство для очистки семян : № 4864388; заявл. 07.09.1990; опубл. 15.04.1993 / Г. В. Серга, Г. С. Григорьянц, В. Н. Мирошниченко ; заявитель Армавирский государственный педагогический институт; Армавирский масложиркомбинат.
2. Пат. № 2513066, Российская Федерация, В07В1/22. Грохот прямоточный: №2012148640/3; заявл.15.11.2012; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11 / В.Д. Таратута, Г. В. Серга ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.
3. Пат. № 2121890, Российская Федерация, МПК В07В 1/22. Машина для сепарации сыпучих сред : № 97113113/03; заявл. 16.07.1997; опубл. 20.11.1998, Бюл.№ 25 / Л.Н. Луговая, И.И. Табачук, Э.В. Кравченко, Г.В. Серга ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.
4. Пат. № 2188720, Российская Федерация, МПК В07В 1/22. Барабанный грохот: №

- 2000118994/03; заявл. 17.07.2000; опубл. 10.08.2002, Бюл. № 25/ А.В. Ляу, А. Н. Иванов, Н. Н. Лукин, Г. В. Серга ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.
5. Пат. № 2494601, Российская Федерация, МПК А01D41/00. Комбайн зерноуборочный прямоточный : № 2012121216/13; заявл. 23.05.2011; опубл. 10.10.13. Бюл. «28 / / Г. В. Серга, В. Д. Таратута ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.
6. Пат. 2007226 Российская Федерация, МПК В07В 1/22. Семяочистительная машина : № 4926616/03; заявл. 11.03.1991; опубл. 15.02.1994 / Г. В. Серга, К. В. Филин.
7. Серга, Г.В. Разработка классификации винтовых сит/ Г. В. Серга, А. Н. Секисов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – №11. – С. 27-37.
8. Смирнов, В.И. Курс высшей математики / В. Н. Смирнов. – Москва : Наука, 1961. – Т. 2.4. – С. 361-367.

1. Pat. 1808417, A.C. of the USSR No. 309750 and No. 271981, IPC B07B 1/22. Device for Seed Cleaning: No. 4864388; claimed: 07.09.1990; published: 15.04.1993 / G.V. Serga, G.S. Grigoriyants, V.N. Miroschnichenko; applicant: Armavir State Teacher Training Institute; Armavir Oil-Fat Complex.
2. Pat. No. 2513066, the Russian Federation, B07B1/22. Uniflow Screen: No. 2012148640/3; claimed: 15.11.2012; published: 20.04.2014, Bull. No.11 / V.D. Taratuta, G.V. Serga; applicant: Kuban State Agricultural University.
3. Pat. No.2121890, the Russian Federation, IPC B07B 1/22. Machine for Bulk Medium Separation: No.97113113/03; claimed: 16.07.1997; published: 20.11.1998, Bull. No.25 / L.N. Lugovaya, I.I. Tabachuk, E.I. Kravchenko, G.V. Serga; applicant: Kuban State Agricultural University.
4. Pat. No. 2188720, the Russian Federation, IPC B07B 1/22. Drum Screen: No. 2000118994;

- claimed: 17.07.2000; published: 10.08.2002, Bull. No. 25/ A.V. Lyau, A.N. Ivanov, N.N. Lukin, G.V. Serga; applicant: Kuban State Agricultural University.
5. Pat. No. 2494601, the Russian Federation, IPC A01D41/00. Uniflow Grain Harvester: No. 2012121216/13; claimed: 23.05.2011; published: 10.10.13. Bull. No.28 / G.V. Serga, V.D. Taratuta; applicant: Kuban State Agricultural University.
6. Pat. No. 2007226 the Russian Federation, IPC B07B 1/22. Seed Dresser: No. 4926616/03; claimed: 11.03.1991; published: 15.02.1994 / G.V. Serga, K.V. Filin.
7. Serga, G.V. Development of screw screen classification/ G.V. Serga, A.N. Sekisov // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2019. – No.11. – pp. 27-37.
8. Smirnov, V.I. Higher Mathematics Course / V.N. Smirnov. – Moscow : Science, 1961. – Vol. 2.4. – pp. 361-367.

Ссылка цитирования:

Секисов, А.Н. Разработка основ расчета винтовых сит для сепарации сыпучих материалов и опыт их внедрения в производство / А.Н. Секисов, Е.В. Белокур, Г.В. Серга // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. - № 4. – С. 4 - 17. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-4-4-17.

Статья поступила в редакцию 10.10.20.

Рецензент: д.т.н., профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета,

Мокрицкий Б.Я.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 25.03.21.

Сведения об авторах:

Секисов Александр Николаевич, к.э.н., доцент кафедры «Технология, организация, экономика, строительство и управление недвижимостью» Кубанского государственного технологического университета, e-mail: alnikkss@gmail.com.

Белокур Евгения Васильевна, ст. преподаватель кафедры «Высшая математика» Кубанского госу-

дарственного аграрного университета им. И. Т. Трубилина, e-mail: evgeniakoa@mail.ru.

Серга Георгий Васильевич, д. т. н., профессор, зав. кафедрой «Начертательная геометрия и графика» Кубанского государственного аграрного университета им. И. Т. Трубилина, e-mail: serga-georgy@mail.ru.

Sekisov Alexander Nikolaevich, Can. Sc. Econ., Assistant Prof. of the Dep. "Technology, Organization, Economy, Construction and Property Management", Kuban State Technological University, e-mail: alnikkss@gmail.com.

Belokur Yevgeny Vasilievna, Senior lecturer of the Dep. "Higher Mathematics", Trubilin State Agricultural University of Kuban, e-mail: evgeniakoa@mail.ru.

Serga Georgy Vasilievich, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. "Descriptive Geometry and Drawing", Trubilin State Agricultural University of Kuban, e-mail: serga-georgy@mail.ru.