

торных и комбайновых дизелей / Б. П. Загородских, В. П. Лялякин, П. А. Плотников // Москва 2006, с.-119-121.

2. Еремеев, А.Н. Анализ влияния нарушения регулировок топливной аппаратуры и газораспределительного механизма на показатели работы дизеля. Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Региональные проблемы народного хозяйства» / А.Н. Еремеев. – Ульяновск: УГСХА. 2004. с. 264-268.

3. Варнаков, В.В. Совершенствование способов оценки технического состояния

плунжерных пар топливного насоса. Материалы юбилейной конференции, посвященной 50-летию образования инженерного факультета / В.В. Варнаков, О.Н. Филимонова, А.Н. Еремеев // Пенза: РИО ПГСХА, 2002. – с. 39-42.

4. Патент РФ №2244152 «Устройство для оценки технического состояния плунжерных пар» от 21.07.2004./ В.В. Варнаков, А.Н. Еремеев, О.Н. Филимонова, В.И. Жиганов, М.Е. Дежаткин, Д.В. Варнаков, В.И. Курдюмов. Опубл. 10.01.05 Бюл.№1.

УДК 631.374

## К ВОПРОСУ О ВЕРТИКАЛЬНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

**Исаев Юрий Михайлович**, доктор технических наук, профессор

**Губейдуллин Харис Халеуллович**, доктор технических наук, профессор

**Семашкин Николай Михайлович**, кандидат технических наук, доцент

**Гришин Олег Павлович**, старший преподаватель

Технологический институт – филиал ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина»  
433510, Ульяновская область, г. Димитровград, ул. Куйбышева, 310,

Тел.: 8 (84231) 55-95-49, E-mail: [sumi@yandex.ru](mailto:sumi@yandex.ru)

**Ключевые слова:** пропускная способность, вертикальный спирально-винтовой транспортер, угол наклона винтовой линии, угловая и осевая скорости.

Рассмотрены теоретические зависимости выявления угла наклона винтовой линии спирали транспортера, при котором осевая скорость материальной частицы достигает своего максимального значения. Получены зависимости, позволяющие определить оптимальные параметры транспортера, геометрические характеристики спирали и физико-механические свойства материала для получения максимальной осевой скорости или максимальной пропускной способности транспортера.

В настоящее время в условиях появления небольших фермерских хозяйств требуется малозатратная техника, рассчитанная на небольшую пропускную способность. Большая доля сельскохозяйственных работ включает в себя процессы транспортирования зерна, в частности и вертикального его перемещения.

Одним из направлений реализации таких технологий является создание средств механизации перемещения сельхозпродукции на основе вращающихся спирально-винтовых

рабочих органов.

Рассмотрим решение задачи о пропускной способности вертикального винтового транспортера. Пусть малая материальная частица располагается на винтовой поверхности спирали, установленной в кожухе и вращающейся относительно оси с угловой скоростью  $\omega$  (рис. 1). При движении частица отбрасывается к периферии спиралью и прижимается к стенке кожуха и к витку спирали [1]. Для уточнения теоретических закономерностей перемещения сыпучих

материалов рассмотрим взаимодействие частицы со спиральным винтом и корпусом. Нормальная реакция  $N_1$ , действующая на частицу со стороны витка спирали, составляет угол  $\vartheta$ , с перпендикуляром к винтовой наклонной линии, а перпендикуляр, в свою очередь, угол  $\alpha$ , с осью  $z$  (рис. 1, 2). Сила трения направлена в сторону, обратную движению, и располагается на линии вектора скорости  $v_0$ , т.е.  $F_1 = f_1 \cdot N_1$ , где  $f_1$  – коэффициент трения частицы о спиральный винт. Как видно из рисунков 1 и 2, угол  $\vartheta$  между нормальной реакцией поверхности витка спирали и осью  $Oy$  характеризует геометрические характеристики спирального винта, цилиндрического кожуха и размер частиц сыпучего материала в транспортере, определяемый из выражения:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{(r - r_2 + d/2 - r_1)}{(r_1 + d/2)}\right), (1)$$

где  $r$  – внутренний радиус цилиндрического кожуха, м;  $r_1$  – радиус частицы, м;  $r_2$  – радиус спирального винта, м;  $d$  – диаметр проволоки, м.

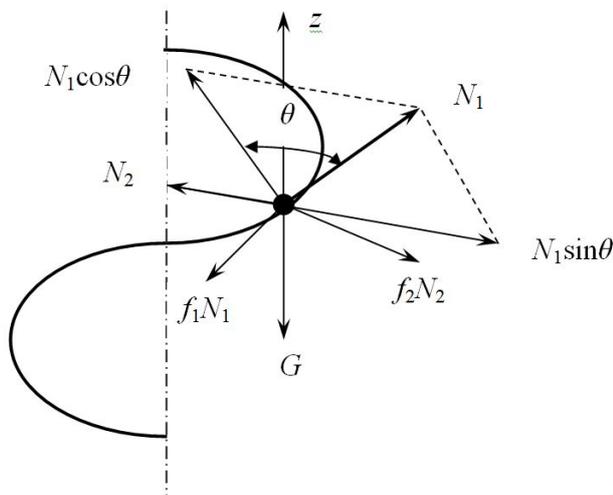


Рис. 1 – Силы, приложенные к частице в вертикальном транспортере

Нормальная реакция  $N_2$ , действующая на частицу со стороны внутренней поверхности кожуха, лежит на радиусе кожуха, а сила трения  $F_2 = f_2 \cdot N_2$  имеет направление, обратное вектору абсолютной скорости, и составляет с осью  $\varphi$  угол  $\beta$ , где  $f_2$  – коэффициент трения частицы о внутреннюю поверхность кожуха [2].

При подъеме материальная частица участвует в движениях: а) относительно – вдоль витка спирали; б) переносом – вместе с витком спирали; в) абсолютном, по некоторой винтовой траектории, которую она описывает на поверхности кожуха. Соответствующие угловые скорости будут:  $\omega'$ ;  $\omega$  и  $\omega - \omega'$ .

Выделим узкую полоску винтовой поверхности и развернем ее на плоскость, в связи с чем получаем возможность рассматривать движение в плоскости (рисунок 2), где  $v_0$  – вектор скорости относительного движения (вдоль витка спирали);  $v_n$  – вектор скорости переносного движения, вместе с витком спирали (в пространстве он располагается в плоскости, перпендикулярной к оси спирали, после развертки он по-прежнему перпендикулярен к оси спирали);  $v$  – вектор скорости результирующего, абсолютного движения. Сила трения  $f_2 N_2$  действует в сторону, обратную движению, поэтому вектор ее направлен по линии вектора абсолютной скорости в противоположную сторону. На производительность транспортера как подъемного устройства влияет величина осевой скорости  $v_1$ , т.е.  $v_1 = v \sin \beta = v_0 \sin \alpha$ , где  $\alpha$  – угол подъема винтовой линии спирали, град.

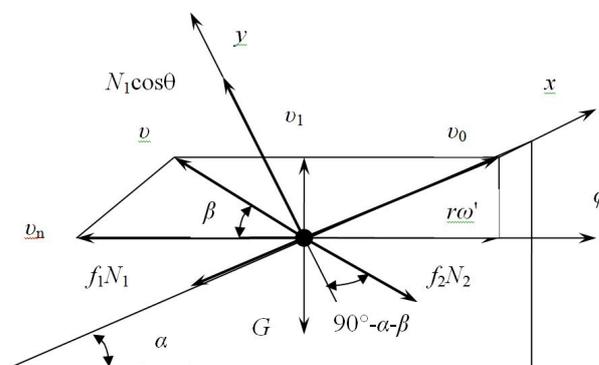


Рис. 2 – Развертка наклонной плоскости в вертикальном транспортере

Если спроектировать в пространстве вектор скорости  $v_0$  на плоскость, перпендикулярную к оси спирали, то получится вектор  $(r\omega')$  и вектор  $v_1$ , которые после развертки располагаются определенным образом, как показано на рисунке 2, поэтому можно записать еще, что  $v_1 = r\omega' \cdot \operatorname{tg} \alpha$ .

Отсюда следует, что нахождение ско-

рости  $u_1$ , обуславливающей пропускную способность, связано с определением угловой скорости  $\omega'$  относительного движения. При равновесии соблюдаются условия:

$$\sum y = 0, \quad \sum x = 0$$

Проектируя силы на ось  $y$  и  $x$ , пренебрегая малостью  $f_2 \sin \theta$ , находим:

$$N_1 \cos \theta - G \cos \alpha - f_2 (\omega - \omega')^2 r \frac{G}{g} \sin(\alpha + \beta) = 0 \quad (2)$$

$$-f_1 N_1 - G \sin \alpha - f_2 (\omega - \omega')^2 r \frac{G}{g} \cos(\alpha + \beta) = 0 \quad (3)$$

где  $\omega$  – абсолютная угловая скорость,  $c^{-1}$ ;  $G$  – сила тяжести, Н;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ .

Умножим уравнение (2) на  $f_1$ , и сложим его с (3), умноженным на  $\cos \theta$ , сократим на  $G$  и переменим знаки, тогда

$$f_1 \cos \alpha + \cos \theta \sin \alpha + \frac{f_2 (\omega - \omega')^2}{g} r [f_1 \sin(\alpha + \beta) - \cos \theta \cos(\alpha + \beta)] = 0 \quad (4)$$

Выясним условие, при котором процесса подъема материала не будет. Положив в уравнении (4)  $\beta = 0^\circ$ ,  $\cos \beta = 1$ ,  $\sin \beta = 0$ , имеем:

$$f_1 \cos \alpha + \cos \theta \sin \alpha + \frac{f_2 (\omega - \omega')^2}{g} r [f_1 \sin \alpha - \cos \theta \cos \alpha] = 0 \quad (5)$$

Отсюда

$$\omega - \omega' = \sqrt{\frac{(f_1 \cos \alpha + \sin \alpha \cos \theta) \cdot g}{rf_2 (\cos \alpha \cos \theta - f_1 \sin \alpha)}} \quad (6)$$

или

$$\omega = \omega' + \sqrt{\frac{tg(\alpha + \varphi_1) \cdot g}{rf_2}} \quad (7)$$

$$\text{где } \varphi_1 = \arctg\left(\frac{f_1}{\cos \theta}\right)$$

Следовательно, для движения материала вверх вдоль оси спирали необходимо соблюсти условие

$$\omega \geq \sqrt{\frac{tg(\alpha + \varphi_1) \cdot g}{rf_2}} \quad (8)$$

Рассмотрим задачу об осевой скорости материала в вертикальном транспортере. Уравнения движения материала для вертикального транспортера имеют вид:

$$\begin{cases} N_1 (\cos \alpha \cos \theta - f_1 \sin \alpha) - ma \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - G - f_2 N_2 \cdot \frac{a \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)}{v} = 0, \\ mr \omega_0^2 + mr \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - N_2 + N_1 \sin \theta - 2mr \omega_0 \frac{d\varphi}{dt} = 0, \\ G \cos \gamma \sin \varepsilon + f_2 N_2 \frac{a \left( \frac{d\varphi}{dt} - \omega \right)}{v} - N_1 (f_1 \cos \alpha + \sin \alpha \cos \theta) - mr \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где  $m$  – масса транспортируемого материала, кг;  $a$  – ускорение,  $m/c^2$ ;  $\omega_0$  – угловая скорость спирального винта,  $c^{-1}$ ;  $\gamma$  – угол наклона транспортера, град.;  $\varepsilon$  – угол перемещения частицы материала, град.;  $t$  – время транспортирования, с.

Из системы уравнений (9), после подстановок и преобразований получим:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{bg}{r} - \frac{f_2 u^2 (u + bc\omega)}{\sqrt{u^2 + c^2 (u + \omega)^2}} \quad (10)$$

$$\text{где } u = \frac{d\varphi}{dt} - \omega$$

$$b = \cos^2 \alpha \left( tg \alpha + \frac{f_1}{\cos \theta} \right); \quad c = tg \alpha = \frac{a}{r}$$

Решаем уравнение (10) путем разложения в ряд Тэйлора по степеням  $t$ . Если ограничиться пятью членами и учесть, что

$$\frac{du}{dt} = 0, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega_c \quad \text{получим:}$$

$$\frac{u^2 (u + bc\omega)}{\sqrt{u^2 + c^2 (u + \omega)^2}} + \frac{bg}{rf_2} = 0 \quad (11)$$

Уравнение (11) может быть заменено приближенным квадратным уравнением следующего вида:

$$u^2 + bc\omega u - \frac{bg}{rf_2} = 0 \quad (12)$$

Приведенное уравнение (12) пред-

ставляется весьма удобным для практических расчетов, поскольку корень его является верхней границей для  $u$ , а метод проб позволяет определить значение  $u$  с необходимой точностью. Большой интерес представляет вопрос о выявлении угла наклона винтовой линии транспортера, при котором осевая скорость материальной частицы достигает своего максимального значения.

Поскольку осевая скорость  $v_1 = r\omega_c \operatorname{tg} \alpha$ , с учетом значений параметров:

$$\omega_c = \omega + u,$$

$$u = -\frac{bc\omega}{2} - \sqrt{\frac{b^2c^2\omega^2}{4} + \frac{bg}{rf_2}},$$

то, после подстановки значений  $c$  и преобразований получим:

$$v_1 = r\omega \left[ \operatorname{tg} \alpha - \frac{1}{2} \sin^2 \alpha \left( \operatorname{tg} \alpha + \frac{f_1}{\cos \theta} \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \sin^4 \alpha \left( \operatorname{tg} \alpha + \frac{f_1}{\cos \theta} \right)^2 + \frac{g}{rf_2\omega^2} \sin \alpha \left( \operatorname{tg} \alpha + \frac{f_1}{\cos \theta} \right)} \right] \quad (13)$$

Вычисление первой производной и

$$\frac{dv_1}{d\alpha} = 0$$

приравнивание ее к нулю  $d\alpha$  приводит, после некоторых упрощений, к формуле, удобной для практического применения

$$\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{f_1}{\cos \theta} + \frac{2g}{rf_2\omega^2} \quad (14)$$

Данное выражение позволяет определить оптимальные параметры транспортера, геометрические характеристики спирали и физико-механические показатели материала для получения максимальной осевой скорости или максимальной пропускной способности транспортера.

Следовательно, пределы для отношения шага винтовой линии спирального винта к ее диаметру для быстроходных спирально-винтовых транспортеров при конструировании следует выбирать в пределах:

$$\frac{S}{D} = 1,3 \div 2,0 \quad (15)$$

Аналогичный результат был получен и

для горизонтального спирально-винтового транспортера, поэтому можно рекомендовать эту формулу (15) для подобных транспортеров быстроходного типа.

При проведении практических исследований вертикального транспортера на подъем зерновой массы с различными частотами вращения спирального винта были получены следующие результаты (таблице) 1.

Анализ таблицы 1 показывает, что для вертикальных транспортеров характерны более высокие частоты вращения спирального винта, по сравнению с наклонными, для достижения желаемых результатов подачи.

Характер расположения в поперечном сечении вертикального транспортера со спирально-винтовым рабочим органом пшеницы показан на рисунке 3.



Рис. 3 – Распределение зерновой массы в кожухе при вертикальном транспортировании

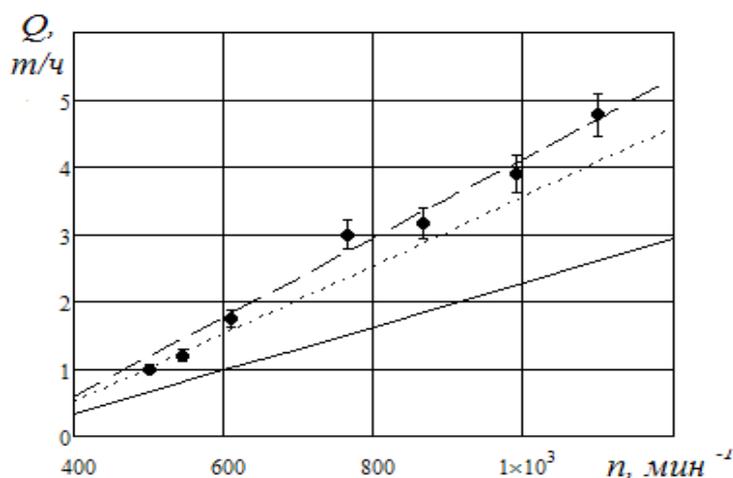
Площадь поперечного сечения пустотного кольца при подъеме пшеницы вертикально вверх при  $n = 1110 \text{ мин}^{-1}$  составляет 25...30 % общей площади сечения кожуха.

Зависимость осевой скорости материала от частоты вращения и различных диаметрах спирального винта изображена на рисунке 4.

При исследовании характеристик перемещения зернового материала выяснилось, что пропускная способность возрастает с уменьшением угла наклона транспортера к горизонтали и увеличением частоты вращения спирального винта.

**Таблица 1**  
**Результаты исследования вертикального транспортера**

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Время проведения опыта, с	Подача, т/ч	Время наполнения кожуха, с	Осевая скорость спирального винта, м/с	Осевая скорость сыпучего материала, м/с
545	9,2	1,2	7,2	0,72	0,28
610	8,1	1,4	6,5	0,81	0,31
766	6,4	3	5,2	1,02	0,38
864	10,1	3,2	4,6	1,15	0,43
990	7,3	3,9	3,3	1,32	0,6
1110	4,8	4,8	2,3	1,48	0,87



**Рис. 4 – Зависимость подачи Q зерна от частоты вращения спирального винта n при разных его диаметрах в сравнении с теоретическими данными для вертикального погрузчика**

—  $d=86$ мм;  $\cdots d=72$ мм;  $-\cdot-\cdot-$   $d=55$  мм;  $\bullet\bullet\bullet$  экспериментальная зависимость

**Библиографический список**

1. Груздев, И.Э. Теории шнековых устройств / И.Э. Груздев, Р.Г. Мирзоев, В.И. Яиков. – Л.: Изд-во. Ленингр. ун-та, 1978. – 144 с.  
 2. Исаев, Ю.М. Длинномерные спирально-винтовые транспортирующие

устройства. Монография. ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА». – Ульяновск: 2006. – 433 с.

3. Гутьяр, Е. Я. Элементарная теория вертикального винтового транспортёра // Тр МИ-МЭСХ им. В. М. Молотова. – М.: Машгиз, 1956. – Т. 2. с. 8...12.

4. Алтынбеков, Р.Е. Соотношения между параметрами вертикальных шнеков для получения наибольшей производительности / Р.Е. Алтынбеков, Н.Н. Васильев // Прогрессивные конструкции конвейерных машин для грузов. - Л.-1967.

5. Груздев, И.Э. Теории шнековых устройств. / И.Э. Груздев Р.Г., Мирзоев, В.И. Яиков // Л.: Изд-во. Ленингр. ун-та, 1978. – 144 с.

6. Исаев, Ю.М. Критические условия перемещения частиц в спирально-винтовом транспортере / Ю.М. Исаев, Н.М. Семашкин, В.А. Злобин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований – 2011. – №3, с.142...143.

7. Исаев, Ю.М. [Движение зерна в спирально-винтовом транспортере](#) / Ю.М. Исаев, Н.М. Семашкин, Н.Н. Назарова, В.А. Злобин // Приоритетные направления развития науки, технологий и техники, научная международная конференция – 2010, с. 95...96.

8. Желтов, В. П. Расчёт спиральных винтовых конвейеров // Вестник машиностроения. – 1975. – № 5, с. 18...21.