

УДК 621.74.07

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА УСТРОЙСТВОМ ВОРОШЕНИЯ

Исаев Ю.М., Семашкин Н.М., Каленков С.А., Злобин В.А.

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»,  
Ульяновск, e-mail: isurmi@yandex.ru

Настоящая статья посвящена изучению технологических процессов, происходящих при ворошении зерновой насыпи устройством с рабочим органом в виде спирального винта в условиях зернохранилищ, в частности теоретическим и практическим исследованиям процессов в устройстве для ворошения зерна. Приведено графическое соотношение скорости движения технического средства ворошения зерна по насыпи зерна и способности технического средства пропускать через себя количество зерновой насыпи при разных частотах вращения спирального винта, в сравнении с теоретическими исследованиями. В итоге проведенных исследований получены рациональные значения параметров устройства ворошения зерна, а также уравнения регрессии, позволяющие выявить необходимую частоту вращения спирального винта, чтобы обеспечить необходимую производительность устройства при различном шаге спирали. При этом сравнение результатов полученных экспериментально и теоретически показало, что их сходимость составляет 94%.

**Ключевые слова:** перемещение, ворошение, пропускная способность, уравнения регрессии, скорость перемещения зерна

## RESEARCH OF MOVEMENT OF GRAIN MATERIAL BY THE DEVICE OF TEDDING

Isaev Yu.M., Semashkin N.M., Kalenkov S.A., Zlobin V.A.

Ulyanovsk State Agricultural University of P.A. Stolypin, Ulyanovsk, e-mail: isurmi@yandex.ru

The present article is devoted to the study of technological processes that occur when a grain embankment is torn by a device with a working member in the form of a spiral screw in the conditions of granaries, in particular, theoretical and practical research of processes in the device for stirring grain. The graphic relationship of the speed of movement of the technical means of stirring grain to the grain embankment and the ability of the technical means to pass through the amount of grain embankment at different rotational speeds of the spiral screw are compared with theoretical studies. As a result of the studies, rational values of the parameters of the grain torsion device were obtained, as well as regression equations allowing to determine the necessary rotation frequency of the spiral screw in order to provide the required device capacity at different spiral pitch. In this comparison of the results obtained experimentally and theoretically showed that the convergence of the results is 94%.

**Keywords:** movement, tedding, capacity, regression equations, grain movement speed

В течение продолжительного хранения зерна возникает множество проблем, связанных с его перемещением, существенными финансовыми затратами, отсутствием соответствующих машин и механизмов. Важным показателем во время хранения зерна в складах являются его температурные значения, поскольку самосогревание зерна внутри самой насыпи нарушает его сохранность. Для исключения самосогревания нужно качественно сушить зерно, вентилировать и т.д. Одним из лучших методов исключения самосогревания зернового материала в складах и его повреждения становится перемешивание насыпи зерна устройством ворошения.

Разработка современного, простого и надежного в эксплуатации технического средства ворошения зерновой насыпи устройством со спирально-винтовым рабочим органом становится актуальной задачей [1, 2].

Зерно, занимающее пространство между витками спирали, оказывается в ограниченных положениях, поэтому теорети-

ческое рассмотрение перемещения зерна спиральным винтом представляется одним из комплексных решений, представляющих собой экспериментальные и теоретические задачи.

Переходя к движению сыпучего потока зерна, запишем формулу которой определим пропускную способность (кг/с) устройства [3]:

$$Q = k_n \cdot F \cdot v_{0cp} \cdot \rho, \quad (1)$$

где  $k_n$  – безразмерный параметр способности технического средства пропускать через себя количество зерновой насыпи;  $F$  – сечение спирального винта, где происходит перемещение зернового материала, м<sup>2</sup>;  $v_{0cp}$  – средняя осевая скорость материала, м/с;  $\rho$  – насыпная плотность зерна, кг/м<sup>3</sup>.

Параметром способности технического средства пропускать через себя количество зерновой насыпи – это число  $k_n \leq 1$ , которое показывает часть поперечного сечения рабочего органа (спирального винта)  $F$ , где происходит перемещение зернового материала, при средней скорости  $v_{0cp}$ .

Представим выражение (1) в развернутом виде:

$$Q = \pi \cdot v_{0cp} \cdot \rho \cdot k_n (r_2^2 - r_1^2), \quad (2)$$

где  $r_2$  – наружный радиус спирали, м;  $r_1$  – радиус по внутренней образующей спирали по, м.

Для дальнейших расчетов технологического процесса рассмотрим проекцию элементарной площадки спирали на плоскость, перпендикулярной к оси спирального винта  $dF = r dr d\theta$ , где  $r$  – расстояние от центра вращения спирали до элементарной площадки, м (рис. 1).

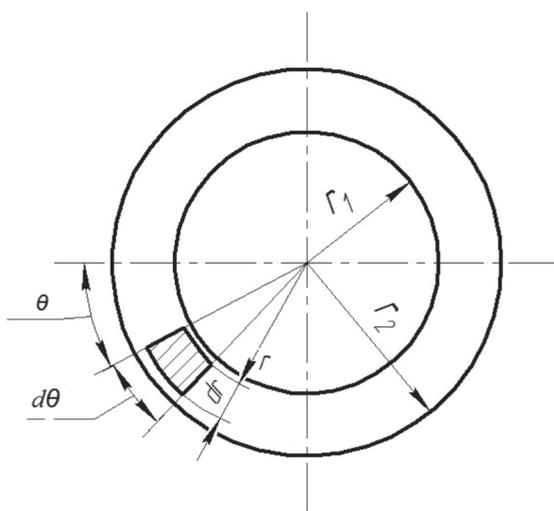


Рис. 1. К определению средней скорости зерна

Для площадки  $dF$  будем считать, что  $v_0$  и  $v_s$  будут постоянными, тогда получим значения средней осевой скорости зерно-

вого материала на элементарной площадке  $dr$  [4–6] (рис. 1):

$$v_{0cp} = \frac{\iint_F v_0 dF}{\iint_F dF} = \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_1}^{r_2} v_0 r dr}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_1}^{r_2} r dr}, \quad (3)$$

где  $v_0$  – осевая скорость каждого единичного зерна, находящегося на площадке  $dr$ , м/с.

Средняя окружная скорость единичного зерна по площади сечения спирали

$$v_{scp} = \frac{\iint_F v_s dF}{\iint_F dF} = \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_1}^{r_2} v_s r dr}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_1}^{r_2} r dr}, \quad (4)$$

где  $v_s$  – переносная скорость каждого единичного зерна, находящегося на площадке  $dr$ , м/с.

Заменим в формулах (3) и (4) тригонометрические функции зависимостями, которые можно записать, рассмотрев развертку винтовой линии (рис. 2).

Винтовая линия образуется при вращении точки М с постоянной угловой скоростью с одновременным движением точки в направлении оси вращения также с постоянной скоростью (рис. 2). Из подобия треугольников  $\triangle ABC$  и  $\triangle AMK$  имеем

$$\frac{MK}{AK} = \frac{BC}{AC},$$

или

$$\frac{z}{r\varphi} = \frac{s}{2\pi r}, \Rightarrow z = \varphi \frac{s}{2\pi r}.$$

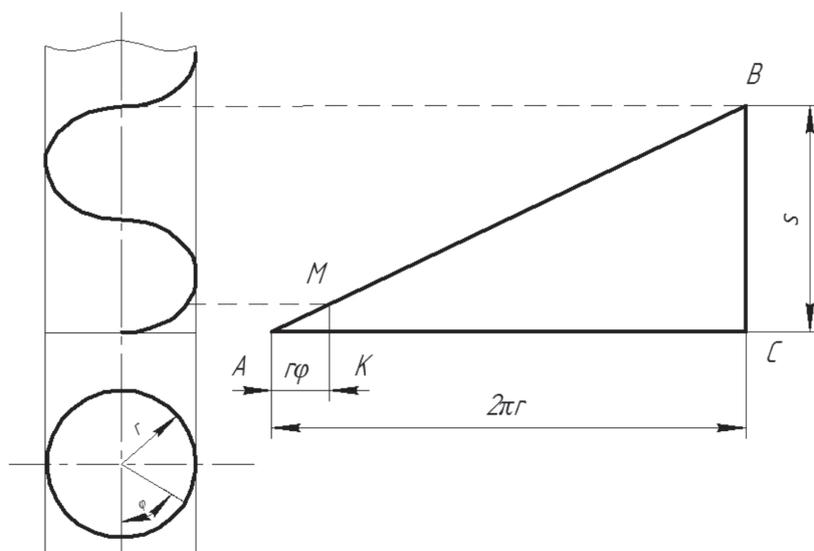


Рис. 2. Схема винтовой линии

Поскольку  $s = 2\pi r \cdot \operatorname{tg}\alpha$ , то  $z = r\varphi \cdot \operatorname{tg}\alpha$ .  
Обозначив  $r \cdot \operatorname{tg}\alpha = s / (2\pi) = c$ , получим  $z = a\varphi$ , имеем

$$\sin \alpha = \frac{s}{\sqrt{s^2 + 4\pi^2 r^2}}, \quad \cos \alpha = \frac{2\pi r}{\sqrt{s^2 + 4\pi^2 r^2}},$$

где  $s$  – шаг винта, м.

Для упрощения математических преобразований выразим значения  $\sin\alpha$  и  $\cos\alpha$  через  $a$ :

$$\sin \alpha = \frac{c}{\sqrt{c^2 + r^2}}, \quad \cos \alpha = \frac{r}{\sqrt{c^2 + r^2}}.$$

Тогда соответственно осевая и переносная скорости

$$v_0 = \frac{\omega c r \operatorname{tg}\beta}{c + \operatorname{tg}\beta \cdot r}, \quad (5)$$

$$v_s = \frac{\omega c r}{c + \operatorname{tg}\beta \cdot r}, \quad (6)$$

где  $\omega$  – частота вращения спирали,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $\beta$  – угол между векторами скоростей  $v_0$  и  $v_s$ , град.

Обозначив  $q = \operatorname{tg}\beta$  и подставив значения  $v_0$  и  $v_s$  в выражения (5) и (6), получим

$$v_{0cp} = \frac{\omega c}{2q^2(r_2^2 - r_1^2)} \left[ q^2(r_2^2 - r_1^2) - 2qc(r_2 - r_1) + c^2 \ln \frac{c + qr_2}{c + qr_1} \right]. \quad (7)$$

Средняя окружная скорость зерна:

$$v_{scp} = \frac{\omega c}{2q^3(r_2^2 - r_1^2)} \left[ q^2(r_2^2 - r_1^2) - 2qc(r_2 - r_1) + c^2 \ln \frac{c + qr_2}{c + qr_1} \right]. \quad (8)$$

Формулы (7) и (8) выведены с учетом того, что пространство между витками полностью заполнено зерновым материалом.

Для спиральных винтов, применяющихся для перемешивания зернового материала в насыпи, с длиной шага спирали 50...100 мм при коэффициенте  $t = s / (2r_2) = 0,7...1,3$ , формуле (7) можно придать более простой вид, а выражение  $\ln \frac{c + qr_2}{c + qr_1}$  запишется в следующем виде [7–9]:

$$\ln \frac{c + qr_2}{c + qr_1} \approx \frac{q(r_2 - r_1)}{c + qr_1}.$$

Тогда выражения (7) и (8) примут вид:

$$v_{0cp} = \frac{\omega c}{2q^2(r_2^2 - r_1^2)} \left[ q^2(r_2^2 - r_1^2) - 2qc(r_2 - r_1) + c^2 \frac{q(r_2 - r_1)}{c + qr_1} \right];$$

$$v_{0cp} = \frac{\omega c}{2} \left[ 1 - \frac{2cr_1}{(c + qr_1)(r_2 + r_1)} \right]; \quad (9)$$

$$v_{scp} = \frac{\omega c}{2q} \left[ 1 - \frac{2cr_1}{(c + qr_1)(r_2 + r_1)} \right]. \quad (10)$$

Подставив  $v_{0cp}$  в (2), имеем

$$Q = \frac{\pi \omega c r k_n}{2} \left[ (r_2^2 - r_1^2) - \frac{2cr_1(r_2 - r_1)}{(c + qr_1)} \right]. \quad (11)$$

Пропускная способность исследуемого технического средства представляет собой сложную функцию значения шага спирали [10, 11]. При известных геометрических и кинематических параметрах спирального

винта, насыпной плотности зерновой насыпи, тогда, подставив значения этих данных в выражение (11), можно определить пропускную способность устройства ворошения зерновой насыпи.

В исследуемом устройстве устанавливали спиральный винт со следующими параметрами: наружный радиус спирали  $r_2 = 35$  мм; шаг спирального винта  $s = 0,07$  м и диаметром проволоки  $d = 0,008$  м, полная высота спирали  $H = 2$  м. Техническое средство исследовали в бурте пшеницы, насыпная плотность которой  $\rho = 780$   $\text{кг/м}^3$ . По итогам исследований построены соотношения скорости движения  $v$  технического средства для ворошения по зерновой насыпи при вычислении способности техниче-

ского средства пропускать через себя количество зерновой насыпи  $Q$  при разных частотах вращения  $\omega$  спирального винта, в сравнении с теоретическими исследованиями (рис. 2).

Тогда уравнение регрессии для скорости перемещения технического средства ворошения зерновой насыпи имеет вид

$$v(\omega) = 0,85 \cdot 10^{-3} \omega - 0,303. \quad (12)$$

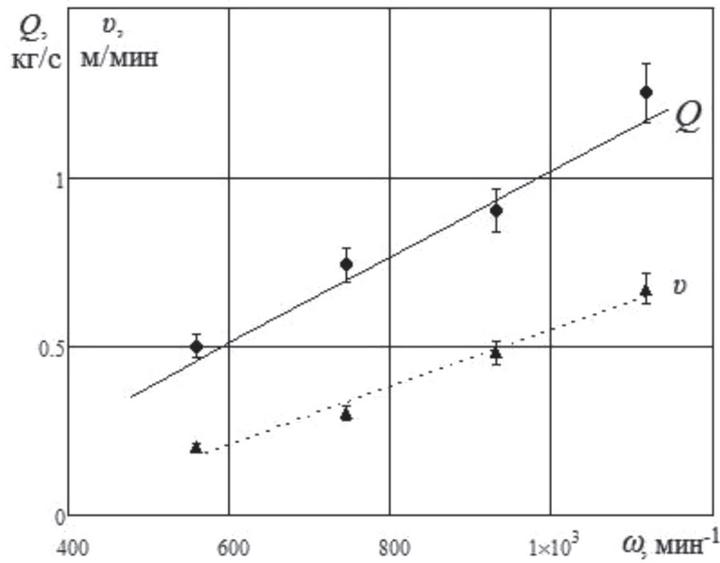


Рис. 3. Скорость движения  $v$  технического средства ворошения зерновой насыпи и пропускная способность  $Q$  устройства в зависимости от различной частоты вращения  $\omega$  спирального винта

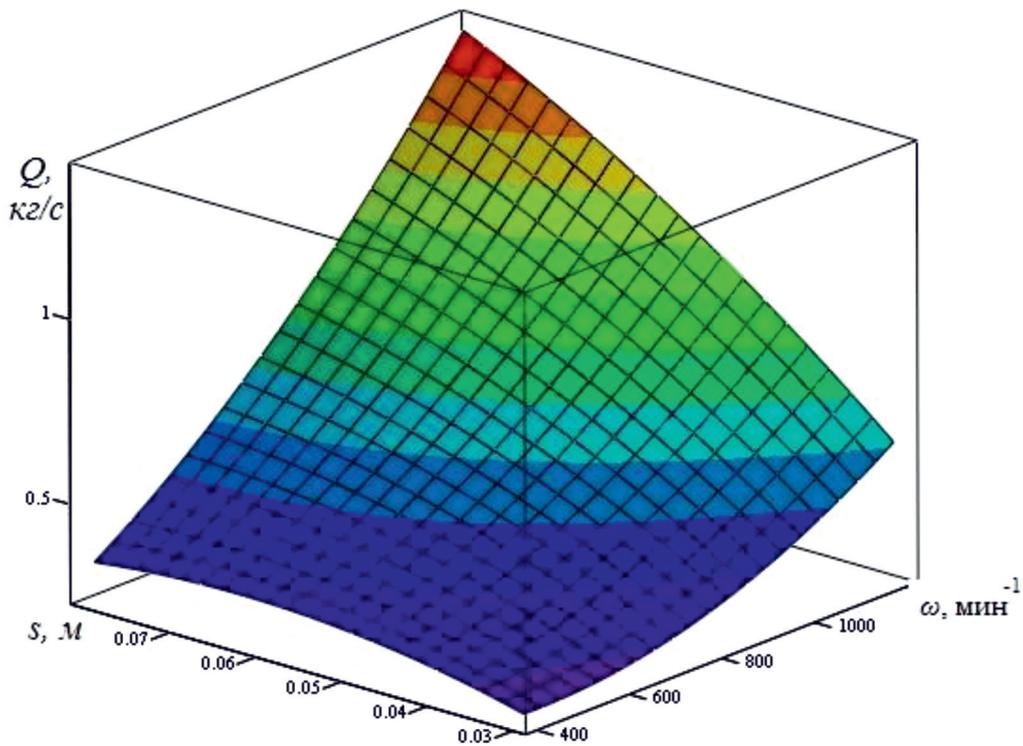


Рис. 4. Соотношение значений способности технического средства пропускать через себя количество зерновой насыпи  $Q$  при различном винтовом шаге спирали  $s$  и частоты вращения  $\omega$

Рис. 3 изображает зависимость пропускной способности  $Q$  (сплошная линия) и скорость перемещения  $v$  устройства (точки) ворошения зерновой насыпи при различных частотах вращения  $\omega$ .

Также был проанализирован экспериментальный анализ по влиянию шага спирального винта с учётом её диаметра на производительность технического средства ворошения зерна от различной частоты вращения рабочего органа (рис. 4).

По результатам исследований по изучению зависимости шага  $s$  рабочего органа (спирали) на производительность устройства и частоты вращения  $\omega$  также получено выражение (13) в текущих значениях факторов:

$$Q = 0,312 - 1,02 \cdot 10^{-3} \omega - 5,8 \cdot 10^{-7} \omega^2 + 4,67s + 0,018s\omega. \quad (13)$$

Уравнение регрессии (13) в кодированной форме:

$$y = 0,606 + 0,235x_1 + 0,041x_1^2 + 0,218x_2 + 0,104x_1x_2, \quad (14)$$

где  $y$  – пропускная способность технического средства, кг/с;  $x_1$  – частота вращения рабочего органа;  $x_2$  – винтовой шаг спирали.

Выражения (13) и (14) дают возможность выбрать необходимую частоту вращения спирального винта для получения необходимой производительности технического средства при различном шаге спирали.

При линейном шаге спирали  $s = 0,070$  м оптимальная скорость движения устройства для ворошения  $v = 0,68$  м/мин составляет при частоте вращения спирали  $\omega = 930$  мин<sup>-1</sup>. Тогда пропускная способность устройства  $Q = 1,1$  кг/с. Сравнение полученных экспериментальных и теоретических данных показало, что сходимость результатов составляет 94%. Следовательно, данные экспериментальных исследований доказывают

справедливость предложенных теоретических зависимостей.

### Список литературы

1. Кошкина А.О. Разработка устройства для ворошения зерновой насыпи и обоснование его параметров: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Кошкина Анастасия Олеговна; [Место защиты: ФГБОУ ВО Башкирский государственный аграрный университет]. – Уфа, 2017. – 155 с.
2. Губейдуллин Х.Х., Семашкин Н.М., Шигапов И.И. Теория перемещения частицы винтовым элементом по плоскости // Аграрная наука. – 2015. – № 1. – С. 29–32.
3. Исаев Ю.М., Губейдуллин Х.Х., Семашкин Н.М., Шигапов И.И. Начальные скорости движения частицы материала при перемещении спиральным винтом // Аграрная наука. – 2014. – № 10. – С. 28–30.
4. Васильев В.Ф. Водометные движители. – М.: МАДИ (ГТУ), 2006. – 45 с.
5. Ibragimov I.D. Optimization of research and methodology work at university in terms of the process approach / I.D. Ibragimov, R.R. Iskhakova, M.A. Galeeva, M.M. Kalashnikova, Yu.V. Ryseva, I.I. Galimzyanova, I.A. Sharonov // Journal of Sustainable Development. – 2015. – Т. 8. – № 3. – С. 234–241.
6. Курдюмов В.И. Исследование эксцентрикового почвообрабатывающего катка / В.И. Курдюмов, Ю.М. Исаев, И.А. Шаронов, В.Е. Прошкин, А.С. Егоров // Наука в центральной России. – 2016. – № 1 (19). – С. 37–45.
7. Долгов В.И. К вопросу об определении пропускной способности устройства для сушки зерна / В.И. Долгов, С.А. Сутягин, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин, В.И. Курдюмов // В сборнике: Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения материалы VIII международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 86–89.
8. Журавлев В.А., Павлушин А.А. Оценка эффективности контактной сушки зерна // В сборнике: Аграрный потенциал в системе продовольственного обеспечения: теория и практика: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Ульяновск: УГСХА, 2016. – С. 134–138.
9. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Обеззараживание зерна в установке комбинированного типа // В сборнике: Аграрная наука как основа продовольственной безопасности региона: материалы 66-й международной научно-практической конференции. – Ульяновск: УГСХА, 2015. – С. 181–183.
10. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Повышение качества сушки зерна в установке контактного типа // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. – № 3 (13). – С. 79–81.
11. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Карпенко Г.В., Сутягин С.А. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография. – Ульяновск: УГСХА имени П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.