

РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНИЧЕСКО-ВИНТОВОГО ВОРОШИТЕЛЯ С МИНЕРАЛЬНЫМ УДОБРЕНИЕМ

Докт. техн. наук, доц. НУКЕШЕВ С. О.

Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина

Существующие дозаторы для минеральных удобрений не в полной мере отвечают техническим требованиям. Основной причиной некачественного дозирования является образование сводов в бункере над выпускными окнами, что связано со сложными физико-механическими свойствами удобрений (туков), резко меняющимися в зависимости от содержания влаги. При повышении влажности некоторые виды удобрений переходят в пластическое, тестообразное состояние, а другие образуют комья различной величины, скапливающиеся у выпускных окон. Помимо этого, к причинам сводообразования следует отнести недостатки конструкции дозирующего органа и конфигурации бункера, форму и размеры выпускного отверстия и т. д. [1–3]. В результате образования пустот и сводов нарушается технологический процесс дозирования, что ведет к неравномерности посевов и недобору урожая [4].

Для получения устойчивого и надежного дозирования гигроскопичных гранулированных минеральных удобрений требуются разрушение сводов над выпускными окнами, принудительная их подача к дозаторам. Несмотря на то что известно множество конструкторских и исследовательских попыток решить эту проблему, она продолжает оставаться «узким местом» в системе дозирования, требует глубокого теоретического и экспериментального изучения, создания перспективных, универсальных конструкций и поэтому является актуальной.

Цель исследования – выбор оптимальных параметров коническо-винтового ворошителя-сводообрушителя минеральных удобрений. Техническими задачами предлагаемого ворошителя-сводообрушителя являются устранение застойных зон, исключение транспортирования

материала в одну сторону, повышение равномерности дозирования трудносыпучих материалов, которое достигается за счет того, что в дозирующем устройстве вершины ворошителя имеют возможность свободного скольжения по его валу. При этом направления навиток правых и левых частей ворошителя противоположны [5].

Сущность предложенного технического решения поясняется рис. 1, где показан общий вид дозирующего устройства с коническо-винтовым ворошителем-сводообрушителем. Дозирующее устройство состоит из бункера 1 с выпускным окном 2, дозирующего аппарата 3, материалопровода 4 и вала 5, на котором установлены совмещенные основаниями пружины 6, образуя коническо-винтовой ворошитель, вершины которого свободно скользят по валу 5, а основания жестко закреплены на валу, и привода 7. Направление навитки правой части конической пружины 6 обратно направлению навитки ее левой части.

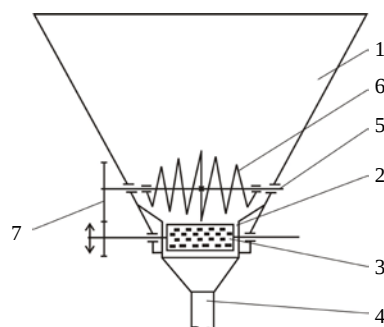


Рис. 1. Коническо-винтовой
ворошитель-сводообрушитель

Устройство работает следующим образом. Удобрение, соприкасаясь с витками спирали, оказывает на них сжимающее воздействие.

При достижении некоторого предельного напряжения спираль резко распрямляется и оказывает на удобрение ударное воздействие. При этом в среде удобрений нарушаются внутренние связи и их гранулы получают повышенную сыпучесть.

Для теоретического изучения взаимодействия коническо-винтового ворошителя-сводообрушителя с минеральным удобрением рассмотрим элементарный объем удобрения M , находящийся на витке спирали, которая вращается вокруг горизонтальной оси с угловой скоростью ω [6].

На частицу материального объема M минерального удобрения действуют следующие силы (рис. 2):

G – вес материальной частицы;

N – нормальная реакция витка спирали на материальный объем удобрения;

$F = fN$ – сила трения материального объема удобрения о материал витка спирали;

N_1 – нормальная реакция окружающей среды;

$F_1 = f_1 N_1$ – сила трения материального объема удобрения об окружающую среду;

$R_u = m\omega^2 r$ – центробежная сила инерции материального объема удобрения;

$R_k = 2m\omega\dot{\alpha}$ – Кариолисова сила.

В начальный момент материальный объем удобрения находился в положении M_0 . Через время t в переносном движении он занимает положение M_1 . Однако, совершая относительное движение вдоль витка спирали, в абсолютном движении материальный объем удобрения занимает положение M .

Для теоретического изучения поставленного вопроса надо знать следующие углы:

ωt – угол, определяющий положение материального объема удобрения за время t ;

α – угол подъема винтовой линии ворошителя;

ξ – угол между образующей конуса ворошителя и его осью вращения.

Координатные оси проходят:

x – вдоль витка винтовой спирали, что аналогично движению по касательной к окружности, образованной поперечным сечением конической поверхности;

y – по бинормали, проходящей через центр окружности поперечного сечения конической поверхности, образованной винтовой спиралью;

z – по главной нормали, перпендикулярной к винтовой линии.

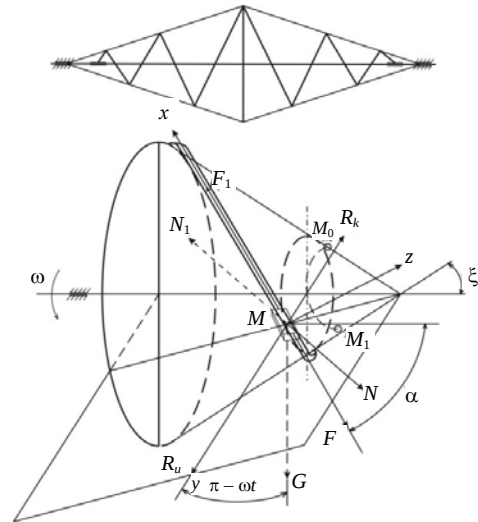


Рис. 2. Схема сил, действующих на частицу минерального удобрения

Составим уравнения равновесия сил по координатным осям, действующих на элементарный объем удобрения:

$$mx'' = F - F_1 - N \sin \xi \cos \alpha + N_1 \sin \xi \cos \alpha - G \sin(\pi - \omega t) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right);$$

$$my'' = R_u - R_k + N \cos \xi - N_1 \cos \xi + G \cos(\pi - \omega t);$$

$$mz'' = N \sin \xi \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - N_1 \sin \xi \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - G \sin(\pi - \omega t) \cos \alpha.$$

Преобразовав, получим:

$$mx'' = F - F_1 - N \sin \xi \cos \alpha + N_1 \sin \xi \cos \alpha - G \sin \omega t \sin \alpha;$$

$$my'' = R_u - R_k + N \cos \xi - N_1 \cos \xi - G \cos \omega t; \quad (1)$$

$$mz'' = N \sin \xi \sin \alpha - N_1 \sin \xi \sin \alpha - G \sin \omega t \cos \alpha.$$

Сгруппируем в (1) члены с N и N_1 :

$$mx'' = (N_1 - N) \sin \xi \cos \alpha - G \sin \omega t \sin \alpha - F + F_1;$$

$$my'' = (N - N_1) \cos \xi - G \cos \omega t + R_u - R_k; \quad (2)$$

$$mz'' = (N - N_1) \sin \xi \sin \alpha - G \sin \omega t \cos \alpha.$$

Определим из (2) $(N - N_1)$

$$N - N_1 = G \frac{\sin \omega t \cos \alpha}{\sin \xi \sin \alpha} = G \frac{\sin \omega t}{\sin \xi \operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

Приравняем левые стороны уравнения (3)

$$\frac{1}{\cos \xi} [G \cos \omega t + R_k - R_u] = G \frac{\sin \omega t}{\sin \xi \operatorname{tg} \alpha}; \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{g \sin \omega t}{\operatorname{tg} \alpha [g \cos \omega t + 2 \omega \dot{x} - \omega^2 r]}.$$

Выражение (4) определяет зависимость угла между образующей конуса винтовой спирали и его осью от конструктивных и технологических параметров.

Определим из первого уравнения (3) значение N

$$N = \frac{1}{\cos \xi} [G \cos \omega t + R_k - R_u] + N_1. \quad (5)$$

Из второго уравнения (3) определим

$$N_1 - N = -G \frac{\sin \omega t}{\sin \xi \operatorname{tg} \alpha}. \quad (6)$$

Подставим (5) и (6) в первое уравнение системы (2)

$$m \ddot{x} = -G \frac{\sin \omega t}{\sin \xi \operatorname{tg} \alpha} \sin \xi \cos \alpha - G \sin \omega t \sin \alpha - \frac{f}{\cos \xi} [G \cos \omega t + R_k - R_u] + f_1 N_1. \quad (7)$$

Подставляя значения известных величин, преобразуем (7)

$$m \ddot{x} = -mg \sin \omega t \left(\frac{\cos \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} + \sin \alpha \right) - \frac{fmg}{\cos \xi} \cos \omega t - \frac{f}{\cos \xi} 2m \omega \dot{x} + \frac{f}{\cos \xi} m \omega^2 r + f_1 \rho; \quad (8)$$

$$\ddot{x} + \frac{2f\omega}{\cos \xi} \dot{x} = -\frac{g}{\sin \alpha} \sin \omega t - \frac{fg}{\cos \xi} \cos \omega t + \frac{1}{\cos \xi} f \omega^2 r + f_1, \quad (9)$$

где $\rho = N_1 = \frac{m}{V}$ – плотность минеральных удобрений; V – объем минерального удобрения, который обхватывает ворошитель; для единичного объема $V = 1$.

Принимаем обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{2f\omega}{\cos \xi} &= b; \\ \frac{g}{\sin \alpha} &= n; \\ \frac{fg}{\cos \xi} &= m; \\ \frac{f\omega^2 r}{\cos \xi} + f_1 &= l. \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом (10) уравнение (9) принимает вид

$$x'' + bx' = n - m \cos \omega t - l \sin \omega t. \quad (11)$$

Получено неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами.

Общее решение уравнения (11) определяют по формуле

$$x = x_0 + \bar{x}, \quad (12)$$

где x_0 – решение однородной части уравнения; $\bar{x}$ – частное решение неоднородного уравнения.

Решение однородной части. Характеристическое уравнение для однородной части исходного уравнения имеет вид

$$k^2 + bk = 0, \quad (13)$$

его корни равны

$$k_1 = 0 \text{ и } k_2 = -b.$$

При этом решение (13) имеет вид

$$x_0 = C_1 + C_2 e^{-bt}. \quad (14)$$

Правая сторона неоднородного уравнения (11) имеет свободный член n . Поэтому его частное решение ищут в виде суммы двух функций f_1 и f_2 :

$$\begin{aligned} f_1 &= A \cos \omega t + B \sin \omega t; \\ f_2 &= Ct. \end{aligned}$$

В этом случае частное решение уравнения (11) должно иметь вид

$$\bar{x} = A \cos \omega t + B \sin \omega t + Ct. \quad (15)$$

Определим первые и вторые производные уравнения (15):

$$\begin{aligned} \bar{x}' &= -A \omega \sin \omega t + B \omega \cos \omega t + C; \\ \bar{x}'' &= -A \omega^2 \cos \omega t - B \omega^2 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (16)$$

Найденные значения производных из (16) подставим в исходное уравнение (11)

$$-A\omega^2 \cos \omega t - B\omega^2 \sin \omega t + (-Ab\omega \sin \omega t) - \\ - Bb\omega \cos \omega t + Cb = n - m \cos \omega t - l \sin \omega t.$$

Сгруппируем в левой части члены с одинаковыми тригонометрическими функциями

$$(-A\omega^2 + Bb\omega) \cos \omega t + (-B\omega^2 - Ab\omega) \sin \omega t + \\ + Cb = n - m \cos \omega t - l \sin \omega t. \quad (17)$$

Приравняем коэффициенты перед одинаковыми тригонометрическими функциями и свободными членами правой и левой частей в (17)

$$\begin{cases} -A\omega^2 + Bb\omega = -m; \\ -B\omega^2 - Ab\omega = -l; \\ Cb = n; \end{cases} \begin{cases} A = \frac{m + Bb\omega}{\omega^2}; \\ B = \frac{l - Ab\omega}{\omega^2}; \\ C = \frac{n}{b}. \end{cases} \quad (18)$$

Из первого уравнения второй системы (18) определим A

$$A = \frac{m\omega + bl}{\omega(\omega^2 + b^2)}. \quad (19)$$

Из второго уравнения второй системы (18) находим

$$B = \frac{l\omega - bm}{\omega(\omega^2 + b^2)}. \quad (20)$$

Подставив найденные значения коэффициентов (19) и (20) в (15), получим частное решение исходного уравнения

$$\bar{x} = \frac{1}{\omega(\omega^2 + b^2)} \times \\ \times [(m\omega + bl) \cos \omega t + (l\omega - bm) \sin \omega t] + \frac{n}{b} t. \quad (21)$$

Общее решение исходного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка (11) получится, если в (12) подставить однородное и частное решения (14) и (21):

$$x = C_1 + C_2 e^{-bt} + \frac{1}{\omega(\omega^2 + b^2)} \times \\ \times [(m\omega + bl) \cos \omega t + (l\omega - bm) \sin \omega t] + \frac{n}{b} t. \quad (22)$$

По определению известно, что в начальный момент при $t = 0$ относительное движение по витку и относительная скорость также равны нулю, т. е. $x = 0$; $\dot{x} = 0$.

Определим первую производную общего решения уравнения (22) и приравняем ее нулю

$$\dot{x} = C_2 b e^{-bt} + \frac{(m\omega + bl)\omega}{\omega(\omega^2 + b^2)} (-\sin \omega t) + \\ + \frac{(l\omega - bm)\omega}{\omega(\omega^2 + b^2)} \cos \omega t + \frac{n}{b} = 0; \\ C_2 b e^{-bt} = \frac{l\omega - bm}{\omega^2 + b^2} \cos \omega t - \\ - \frac{m\omega + bl}{\omega^2 + b^2} \sin \omega t + \frac{n}{b} = 0. \quad (23)$$

При $t = 0$ из (23) получим

$$C_2 = \frac{1}{b} \left(\frac{n}{b} + \frac{l\omega - bm}{\omega^2 + b^2} \right). \quad (24)$$

Используя (24), уравнение (22) приравняем к нулю

$$x = \frac{m\omega + bl}{\omega(\omega^2 + b^2)} \cos \omega t + \frac{l\omega - bm}{\omega(\omega^2 + b^2)} \sin \omega t + \\ + \frac{n}{b} t + C_1 + \frac{e^{-bt}}{b} \left(\frac{n}{b} + \frac{l\omega - bm}{\omega^2 + b^2} \right) = 0. \quad (25)$$

При $t = 0$ из (25) получим

$$C_1 = \frac{1}{b} \left(\frac{n}{b} + \frac{l\omega - bm}{\omega^2 + b^2} \right) - \frac{m\omega + bl}{\omega(\omega^2 + b^2)}. \quad (26)$$

Подставив значения свободных членов C_1 и C_2 из (24) и (26) в общее решение (22), получим

$$x = \frac{1}{b} \left(\frac{n}{b} + \frac{l\omega - bm}{\omega^2 + b^2} \right) (e^{-bt} - 1) + \frac{1}{\omega(\omega^2 + b^2)} \times \\ \times [(m\omega + bl)(\cos \omega t - 1) + (l\omega - bm) \sin \omega t] + \frac{n}{b} t. \quad (27)$$

Получили полное решение дифференциального уравнения, характеризующего взаимодействие коническо-винтового ворошителя-сводообрушителя с минеральным удобрением.

С помощью (10) уравнение (27) можно представить в расширенном виде

$$\begin{aligned}
 x = & \frac{q \cos \xi}{2 f \omega \sin \alpha} \left[\frac{\cos \xi}{2 f \omega} \left(l \frac{2 f \omega t}{\cos \xi} - 1 \right) + t \right] + \\
 & + \frac{\cos \xi (f \omega^2 r + f_1 \cos \xi - 2 f^2 \omega q)}{\omega^2 (\cos^2 \xi + 4 f^2)} \times \\
 & \times \left[\frac{\cos \xi}{2 f} \left(l \frac{2 f \omega t}{\cos \xi} - 1 \right) + \sin \omega t \right] + \\
 & + \frac{\cos \omega t - 1}{\omega^2 (\cos^2 \xi + 4 f^2)} f [2 f \omega^2 r + q \cos \xi (1 + 2 f_1)].
 \end{aligned} \quad (28)$$

В уравнениях (23) и (28) установлены взаимозависимости пути перемещения во времени элементарного объема минерального удобрения по витку винтовой спирали ворошителя и ее относительной скорости от важнейших конструктивных и технологических параметров, таких как угол образующей конуса к его оси, угол подъема винтовой линии, радиус винтовой поверхности, коэффициенты внешнего и внутреннего трения и угловая скорость. Варьируя каждый из указанных параметров, можно выбрать их оптимальные сочетания в зависимости от принятого критерия эффективности ворошения [6, 7].

На рис. 3 представлены графические зависимости пути перемещения элементарного объема минеральных удобрений от угла подъема винтовой линии, угла расположения образующей конуса по отношению к его оси. Из них видно, что наибольшее влияние на величину пути перемещения элементарного объема удобрения по витку ворошителя оказывает угол подъема винтовой линии. Так, при угле образующей конуса $\xi = 30^\circ$ угол подъема винтовой линии α увеличивается вдвое (от 15° до 30°), что приводит к снижению пути перемещения удобрения по витку ворошителя в 2,3 раза – с 3,35 до 1,43 мм за время 0,5 с (рис. 3). Причем такая зависимость сохраняется при всех значениях угла расположения образующей конуса, угловой скорости ворошителя и радиуса места расположения удобрения на конической поверхности.

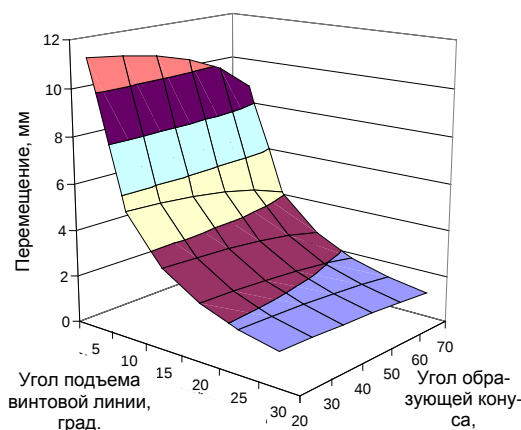


Рис. 3. Зависимость пути перемещения гранулы удобрения от угла подъема винтовой линии и угла образующей конуса

Например, при угловой скорости $1,00 \text{ с}^{-1}$ перемещение удобрения по витку ворошителя снижается с 3,41 до 1,47 мм при тех же значениях α . Такую же зависимость можно увидеть и при радиусе расположения удобрения на конической поверхности, например при $r = 0,03 \text{ м}$. Рассмотренную зависимость можно объяснить тем, что при увеличении угла подъема винтовой линии уменьшается переносное движение минеральных удобрений вместе с витком, что приводит к снижению относительного перемещения.

Следующим по значимости параметром, влияющим на перемещение удобрения, является угловая скорость ворошителя. При радиусе расположения удобрения на конической поверхности $r = 0,03 \text{ м}$ угловая скорость увеличивается вдвое (от $2,00$ до $4,00 \text{ с}^{-1}$), что приводит к снижению пути перемещения удобрения в 1,3 раза – с 4,46 до 3,46 мм. Это снижение особо интенсивно происходит при малых углах подъема винтовой линии α .

Снижение относительного перемещения при увеличении угловой скорости ворошителя объясняется тем, что в этом случае происходит большее проскальзывание частиц удобрения по отношению к виткам ворошителя. При этом снижается переносное перемещение, что в конечном итоге уменьшает и относительное перемещение. Наименьшее влияние на величину пути перемещения частиц удобрения оказывает расположение их на поверхности ворошителя. Следовательно, можно заключить, что закономерности перемещения частиц удобрения во всех точках ворошителя едины.

Исследуя рассмотренные зависимости, можно выбрать переменные параметры ворошителя, при которых получается оптимальное пере-

мешивание удобрения. Так, на рис. 4 совмещены зависимости перемещения частиц удобрения от угла подъема винтовой линии и угловой скорости ворошителя. Из рис. 4 видно, что одинаковое перемешивание удобрения происходит при угле подъема винтовой линии 14° и угловой скорости ворошителя $3,1 \text{ с}^{-1}$.

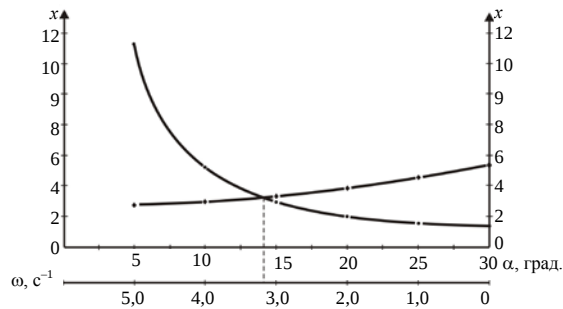


Рис. 4. Зависимость перемещения частиц удобрения от угла подъема винтовой линии и угловой скорости ворошителя

ВЫВОД

Получено полное решение дифференциального уравнения, характеризующего взаимодействие коническо-винтового ворошителя-сводообрушителя с минеральным удобрением.

В уравнениях (23) и (28) установлены взаимозависимости пути перемещения во времени элементарного объема минерального удобрения по витку винтовой спирали ворошителя и ее относительной скорости от важнейших конструктивных и технологических параметров, таких как угол образующей конуса к его оси, угол подъема винтовой линии, радиус винтовой поверхности, коэффициенты внешнего и внут-

реннего трения и угловая скорость. Варьируя каждый из указанных параметров, можно выбрать их оптимальные сочетания в зависимости от принятого критерия эффективности ворошения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов, П. В. Бункеры, затворы и питатели. Основы проектирования и расчета / П. В. Алферов. — М.: Машгиз, 1946. — С. 35.
2. Кошанов, О. М. Изыскание устройства для предотвращения образования в бункерах застойных зон и сводов труднотекучих сельскохозяйственных материалов и обоснование его параметров, режимов работы: автореф. дис. ... канд. техн. наук / О. М. Кошанов. — Рязань, 1987. — 22 с.
3. Тарасов, А. Г. Исследования вибрационного сводообрушения кормов в бункерах на птицефабриках: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Г. Тарасов. — Саратов, 1976. — 24 с.
4. Методика оценки качества внесения минеральных удобрений / П. Н. Побединский [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. — 1988. — № 4. — С. 48.
5. Высевающее устройство: пат. 19008 РК / С. О. Нукешев; опубл. 15.12.2010 // Бюл. — № 12. — 4 с.
6. Нукешев, С. О. Результаты теоретического исследования коническо-винтового ворошителя. Актуальные проблемы современности / С. О. Нукешев, Д. З. Есхожин, А. Ж. Аскарлова // Международный научный журнал. Серия «Технические науки». — 2009. — № 1 (35). — С. 63–65.
7. Рустембаев, Б. Е. Теоретические предпосылки к определению параметров пружинно-винтового ворошителя / Б. Е. Рустембаев, А. М. Абдиров, С. О. Нукешев // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. — 1999. — № 4. — С. 127–130.

Поступила 12.12.2011

УДК 631.3.072

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРАКТОРА С СЕЛЬХОЗОРУДИЕМ С УЧЕТОМ ИХ МАЛЫХ ВЗАИМНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Кандидаты техн. наук ВАЩУЛА А. В.¹⁾, ЗАХАРОВ А. В.¹⁾,
асп. ЗАХАРОВА И. О.¹⁾, инж. КАЛУГИНА О. Н.²⁾

¹⁾Белорусский аграрный технический университет,

²⁾ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»