

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПОЧВОЙ МНОГОКОЛЕСНЫХ ХОДОВЫХ СИСТЕМ

Г.И. Гедроить, канд. техн. наук, доцент (БГАТУ); А.Г. Гедроить, вед. инженер-программист (ИП «Дана-Нетворкс»); А.Д. Четчин, канд. техн. наук, доцент (БГАТУ)

Аннотация

Разработана математическая модель взаимодействия многоколесных ходовых систем с почвой. Каждое колесо рассматривается с учетом индивидуальных параметров. Учтено смещение следов разных колес. Модель построена на основе объемного представления поверхности контакта шины и почвы.

The mathematical model of the interaction multiple wheel running systems with soil is created. Each wheel is considered based on the individual parameters. The offset traces different wheels is taken into account. The model is based on the representation of a contact surface of the tire and the soil.

Введение

Интенсификация земледелия, повышение производительности труда, сокращение трудовых ресурсов приводят к повышению массы сельскохозяйственной техники, увеличению количества колес, идущих по одному следу. У машинно-тракторных агрегатов для внесения органических и минеральных удобрений, работающих с прицепами, транспортировщиками рулонов, по одному следу проходит 4..5 колес. В составе тракторных поездов количество колес одного борта может быть увеличено до семи. Колеса имеют разные размеры, конфигурацию профиля шин, давление воздуха в шинах. Значения колеи разных осей часто отличаются. Нормальные нагрузки на единичное колесо достигают 50 кН и более, давление воздуха в шинах может превышать 350 кПа. При решении задач оптимизации параметров ходовых систем необходимо учитывать изложенные обстоятельства.

Исследования в области взаимодействия колеса с почвой посвящены преимущественно работе единичного колеса. Большой объем исследований процесса взаимодействия с почвой многоосных ходовых систем выполнен школой В.В. Кацыгина. В частности, глубоко разработаны теоретические основы деформирования и уплотнения почв многоосными ходовыми системами [1]. Систематизированы варианты деформирования почв под ходовыми системами, предложены аналитические зависимости для расчета показателей взаимодействия при повторных нагрузках на почву. Учитываются диаметр, ширина, жесткость шин. Зависимости получены для однотипных движителей.

Цель настоящей работы – рассмотреть процесс взаимодействия пневматического колеса с почвой при качении по следу в ведомом режиме с учетом индивидуального распределения нормальных нагрузок на колеса, конфигурации профиля шины, разных размеров и жесткости шин, различия в деформации шин на почве и жестком основании, частичного перекрытия следов.

Основная часть

Обосновано, что поверхность контакта шины с почвой можно представить в виде усеченного эллиптического параболоида [2, 3]. Уравнение поверхности этого параболоида получено в виде:

$$z = h + \lambda - \frac{y^2}{\frac{b_0^2}{\Delta}} - \frac{x^2}{2R - h - \lambda},$$

где b_0, Δ – характерные размеры шины, определяющие форму части ее профиля, контактирующую с опорной поверхностью. Для большинства шин $2b_0$ – ширина беговой дорожки; Δ – стрела дуги протектора (высота беговой дорожки). Для торообразных и оболочковых шин $2b_0$ – ширина профиля шины; Δ – половина высоты профиля шины. В частных случаях могут быть приняты промежуточные значения названных параметров:

h – глубина следа;

λ – деформация шины;

z, x, y – координаты.

Проекция поверхности контакта в координатных плоскостях OYZ и OXY имеют вид, показанный на рис. 1.

В плоскости OYZ проекция ограничена отрезками прямых и парабол. Проекция в плоскости OXY состоит из двух областей: D_1 – проекция плоской зоны поверхности контакта в виде эллипса, D_2 – проекция криволинейной зоны поверхности контакта. При небольшом погружении шин в почву ($h + \lambda \leq \Delta$) область D_2 является эллиптическим полукольцом $ALBCA_1C_1B_1L_1$ (первый вариант). При $h + \lambda > \Delta$, т.е. когда в почву погружаются протектор и частично боковины шины, область D_2 является усеченным эллиптическим полукольцом $ALKCA_1C_1K_1L_1$ (второй вариант). При зна-

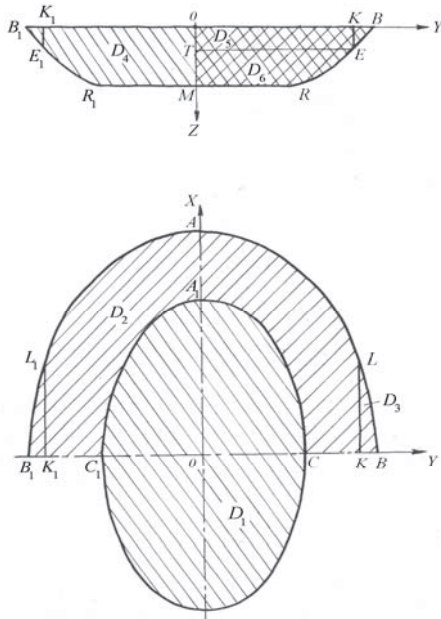


Рисунок 1. Проекция поверхности контакта шины с почвой на плоскости OYZ и OXY

чительных деформациях шины ($\lambda > \Delta$) область D_1 рассматривается как усеченный эллипс [2].

Схема взаимодействия колес с почвой при качении по следу приведена на рис. 2. На колесо радиуса R действуют нормальная нагрузка G , толкающая сила P . После прохода колеса остаются максимальная остаточная h_{m1} и средняя остаточная h_{s1} глубина следа. Индексом 1 обозначены параметры, относящиеся к предшествующему колесу.

Приняты следующие допущения:

- форма поверхности контакта каждого колеса описывается в соответствии с изложенными выше предпосылками;
- с целью соблюдения единого методологического подхода, сложная форма следа предшествующего

колеса, полученного исходя из принятой поверхности контакта, усредняется по глубине;

- распределение нормальных давлений в контакте подчиняется закону гиперболического тангенса;
- упругие деформации почвы не влияют на процесс качения исследуемого колеса. Они восстанавливаются к моменту прохода следующего колеса.

Последнее допущение базируется на следующих предпосылках. Время упругого восстановления почв в основном не превышает 0,25 с [1, 4, 5]. Следовательно, при основных рабочих скоростях машинно-тракторных агрегатов 1,5...3,0 м/с указанное восстановление будет происходить на участке 0,4...0,75 м. Это меньше расстояния между колесами.

С учетом вышеизложенного, для колеса, движущегося по следу, нормальные к поверхности контакта реакции почвы q определяются по формуле:

$$q = \sigma_0 th \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + z),$$

где σ_0 – несущая способность почвы;

K – коэффициент объемного смятия почвы.

Значение средней остаточной h_s и средней полной h_c глубины следа связаны выражением:

$$h_s = h_c (1 - K_y),$$

где K_y – коэффициент упругости почвы, представляющий отношение упругой деформации почвы к полной.

Для первого варианта уравнение равновесия сил в вертикальной плоскости имеет вид:

$$G = \iint_{F_1} q dF + \iint_{F_2} q \cos \gamma_z dF,$$

где F_1, F_2 – соответственно площади поверхности контакта плоской и криволинейной части контакта;

γ_z – угол, составляемый нормальными к поверхности контакта с осью Z ;

dF – элемент площади поверхности контакта.

Первый интеграл в уравнении определяет нагрузку, которую несет плоская часть поверхности контакта, второй – нагрузку, воспринимаемую вертикальными составляющими нормальных реакций по криволинейной поверхности контакта.

После вычисления интегралов получены выражения для расчета глу-

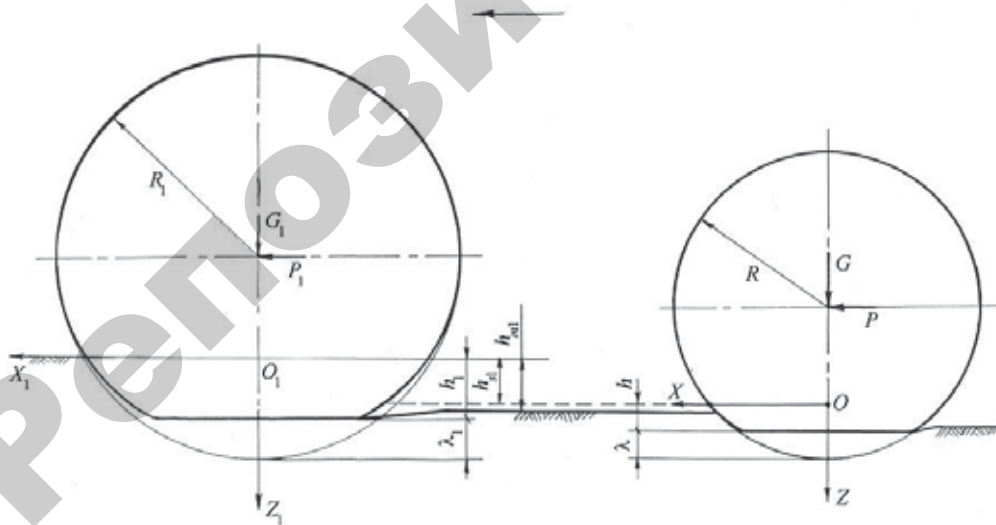


Рисунок 2. Расчетная схема при движении колес по следу

бины следа колеса, движущегося по следу:

$$h = \frac{\sigma_0}{K} \operatorname{arth} \frac{G_{nl}}{\pi b_0 \sigma_0 \lambda} \sqrt{\frac{\Delta}{2R - \lambda}} - h_{s1}; \quad (1)$$

$$G = \frac{\pi b_0 \sigma_0^2}{2K} \cdot \sqrt{\frac{2R - h - \lambda}{\Delta}} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} + G_{nl}, \quad (2)$$

где G_{nl} – часть нагрузки, воспринимаемая в плоской части контакта.

Полагаем, что нагрузка, воспринимаемая плоской частью контакта шины с почвой, равняется нагрузке, воспринимаемой шиной на жестком основании при одинаковом значении деформации шины λ . Значение G_{nl} является функцией нормальной нагрузки на колесо, давления воздуха в шине, размеров шины, жесткости каркаса шины, формы профиля шины. Определяется по экспериментальным характеристикам деформации шин на жестком основании, либо аналитически [6].

В формулах (1), (2) неизвестны параметры G_{nl} , h , λ . Поэтому задаем значение λ , определяем G_{nl} и вычисляем h по формуле (1). Подставляем полученные значения в формулу (2) и сравниваем результат с известной нормальной нагрузкой на колесо G . Путем последовательных пересчетов можно добиться с заданной точностью равенства левой и правой частей уравнения (2). В результате будут известны значения глубины следа h и деформации шины λ на почве.

Значение средней полной глубины следа в рассматриваемом случае определяется по формуле:

$$h_c = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{(h + \lambda)^3 + \sqrt{\lambda^3}}}{\sqrt{h + \lambda}}$$

Силу сопротивления качения колеса представим в виде двух составляющих P_{fn} и P_{fu} , учитывающих соответственно потери на деформацию почвы и шины:

$$P_f = P_{fn} + P_{fu}.$$

Составляющую силы сопротивления качению P_{fn} , обусловленную затратами на деформацию почвы, исходя из принятой расчетной схемы, найдем путем суммирования проекций нормальных реакций почвы на ось X :

$$P_{fn} = \iint_{F_3} q \cos \gamma_x dF = \iint_{D_1} q dx dy = \iint_{D_1} \sigma_0 th \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + z) dx dy,$$

где γ_x – угол, составляемый нормальными к поверхности контакта и осью X ;

D_4 – проекция криволинейной зоны контакта шины с почвой на плоскость OYZ . Определяется контуром $BERR_1 E_1 B_1$ (рис. 1).

После решения интеграла получена формула:

$$P_{fn} = \beta K b_0 \sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}},$$

где β – расчетный коэффициент, определяемый по формуле:

$$\beta = E^2 - h_{s1}^2 - \frac{1}{3} \frac{E^3 - h_{s1}^3}{h + \lambda} + \frac{1}{2} \frac{h_{s1} (E^2 - h_{s1}^2)}{h + \lambda} - \frac{1}{6} \frac{K^2}{\sigma_0^2} (E^4 - h_{s1}^4) + \frac{1}{15} \frac{K^2 E^5 - h_{s1}^5}{\sigma_0^2 h + \lambda} - \frac{1}{12} \frac{K^2 h_{s1} (E^4 - h_{s1}^4)}{\sigma_0^2 h + \lambda},$$

где $E = h + h_{s1}$.

Во втором варианте расчета при $\lambda \leq \Delta$ уравнение равновесия сил, действующих на колесо в вертикальной плоскости, имеет вид

$$G = \iint_{F_1} q dF + \iint_{F_2} q \cos \gamma_x dF - \iint_{F_3} q \cos \gamma_x dF,$$

где F_3 – часть площади криволинейной зоны контакта, отсекаемой плоскостью, параллельной плоскости OYX на расстоянии b_0 от нее.

Составляющую силы сопротивления качению найдем при решении интеграла

$$P_{fn} = 2 \iint_{D_5} q dy dz + 2 \iint_{D_6} q dy dz,$$

где D_5 , D_6 – области, определяемые соответственно контурами $OKET$ и $TERM$ (рис. 1).

После соответствующих подстановок и интегрирования получены формулы (3), (4):

$$G = \frac{\pi b_0 \sigma_0^2}{2K} \sqrt{\frac{2R - h - \lambda}{\Delta}} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} + G_{nl} - b_0 \sigma_0 \left(\sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}} - 1 \right) \sqrt{(2R - h - \lambda)(h + \lambda - \Delta)} \cdot th \frac{K}{\sigma_0} \left(\frac{5}{9} (h + \lambda - \Delta) + h_{s1} \right). \quad (3)$$

$$P_{fn} = 2 \frac{b_0 \sigma_0^2}{K} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h + \lambda - \Delta)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} + \omega K b_0 \sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}}, \quad (4)$$

где ω – расчетный коэффициент, определяемый по формуле:

$$\omega = E^2 - C^2 - \frac{1}{3} \frac{E^3 - C^3}{h + \lambda} + \frac{1}{2} \frac{h_{s1}(E^2 - C^2)}{h + \lambda} - \frac{1}{6} \frac{K^2}{\sigma_0^2} (E^4 - C^4) + \frac{1}{15} \frac{K^2}{\sigma_0^2} \frac{E^5 - C^5}{h + \lambda} - \frac{1}{12} \frac{K^2}{\sigma_0^2} \frac{h_{s1}(E^4 - C^4)}{h + \lambda},$$

где $C = h_{s1} + h + \lambda - \Delta$.

При $\lambda > \Delta$ в рассматриваемом варианте расчетные формулы получены в виде:

$$h = \frac{\sigma_0}{K} \operatorname{arth} \frac{G_{nl}}{2b_0\sigma_0\sqrt{(2R-\lambda)\Delta} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{\Delta}} - 1 + \frac{\lambda}{\Delta} \arcsin \sqrt{\frac{\Delta}{\lambda}} \right)} - h_{s1} \quad (5)$$

$$G = \frac{\alpha b_0 \sigma_0^2}{K} \sqrt{\frac{2R - h - \lambda}{\Delta}} \cdot \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} + G_{nl}, \quad (6)$$

где α – расчетный коэффициент, определяемый по формуле

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\operatorname{arctg} \frac{b_0}{\sqrt{(2R-h-\lambda)(h+\lambda-\Delta)}} + \operatorname{arth} \frac{b_0}{\sqrt{(2R-h-\lambda)(\lambda-\Delta)}} \right)$$

$$P_{fn} = \frac{2b_0\sigma_0^2}{K} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}}. \quad (7)$$

Таким образом, значение составляющей силы сопротивления качению P_{fn} во втором варианте расчета при $\lambda \leq \Delta$ определяется по формуле (4), а при $\lambda > \Delta$ – по формуле (7). Необходимые для расчетов значения глубины следа и деформации шины находим соответственно при решении уравнений (1), (3) и (5), (6). Значения средней полной глубины следа определим соответственно по формулам:

$$h_c = h + \lambda - \frac{2}{3} \lambda \sqrt{\frac{\lambda}{\Delta}} - \frac{\Delta}{3};$$

$$h_c = h.$$

Составляющую силы сопротивления качению P_{fu} во всех вариантах определяем при допущении, что значение этой составляющей при качении по почве равняется силе сопротивления качению на жестком основании при равной деформации шины λ [3].

$$P_{fu} = K_{uu} B_k \lambda,$$

где B_k – ширина плоской зоны контакта;

K_{uu} – давление шины на дорогу при нулевом значении давления воздуха в шине.

Рассмотрим вариант, когда след колеса частично не совпадает со следом предшествующего. В этом случае необходимо учесть деформацию дополнительного объема почвы, сечение которого в поперечной плоскости колеса, проходящей через ось вращения, определяется контуром $ABCD$ (рис. 3). Размеры сечения $ABCD$ равны b и h_{s1} .

Расчет параметров взаимодействия части колеса шириной b произведем как для жесткого колеса. Качественно это соответствует конструкции шины и подтверждается сведениями об увеличении жесткости в элементарных сечениях шины при удалении от середины к краю беговой дорожки [7].

Используем формулы, предложенные В.В. Гусковым [4]:

$$h = \sqrt[3]{\frac{G^2}{KBD}}; \quad (8)$$

$$P_{fn} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{G^4}{KBD}}; \quad (9)$$

где B, D – соответственно ширина и диаметр колеса.

Применительно к нашему варианту, в указанных формулах $B = b$, а D принимаем как средний диаметр части колеса на ширине b . Так как в любом сечении i диаметр колеса равен

$$D_i = D - 2r + 2r \cos \psi,$$

то средний диаметр на ширине b определится из выражения:

$$D_b = \frac{\int_{\psi_1}^{\psi_2} (D - 2r + 2r \cos \psi) d\psi}{\psi_2 - \psi_1} = (D - 2r) + \frac{2r(\sin \psi_2 - \sin \psi_1)}{\psi_2 - \psi_1}$$

$$\text{где } \psi_1 = \arcsin \frac{b_0 - b}{r}; \quad \psi_2 = \arcsin \frac{b_0}{r}.$$

Значения радиуса кривизны r в поперечной плоскости определяется по формуле:

$$r = \frac{b_0^2 + \Delta^2}{2\Delta}.$$

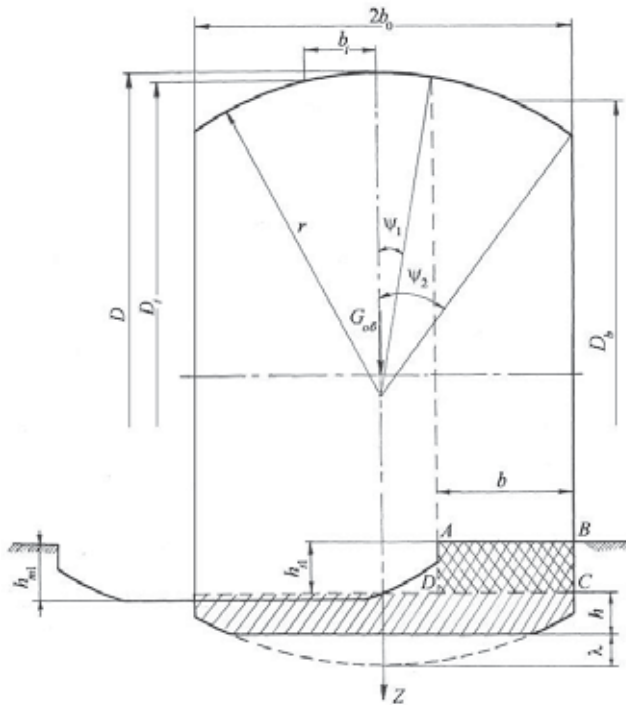


Рисунок 3. Схема качения колеса при частичном перекрытии следов

Проверяем по формуле (8) превышает ли деформация почвы частью колеса шириной b остаточную глубину следа h_{s1} при общей нормальной нагрузке $G_{об}$. При положительном результате, на основании формул (8), (9) находим часть нагрузки G_b , воспринимаемую почвой при деформации ее в сечении ABCD и соответствующую составляющую силы сопротивления качению $P_{f nb}$:

$$G_b = \sqrt{K^2 b^2 D_b^2 h_{s1}^3} ;$$

$$P_{f nb} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{G_b^4}{K b D_b^2}}$$

Расчет параметров взаимодействия для шины, погруженной в почву на глубину, большую, чем h_{s1} , производим по рассмотренной выше методике для колес равной ширины. Нормальная нагрузка для этой части шины определяется из выражения:

$$G = G_{об} - G_b .$$

Сила сопротивления качению колеса, движущегося по следу со смещением, определяется путем суммирования P_{fn} , $P_{f nb}$ и P_{fu} .

При определении параметров взаимодействия с почвой многоколесных ходовых систем, каждое колесо рассматривается отдельно с учетом параметров предшествующего следа. Это позволяет учесть параметры каждой из шин, произвольное распределение нагрузок по колесам. Общая глубина следа и сила

сопротивления качению системы колес определяются суммированием составляющих отдельных колес. Коэффициент сопротивления качению системы колес (машины) можно вычислить по формуле:

$$f = \frac{\sum_{j=1}^N f_j G_j}{\sum_{j=1}^N G_j} ,$$

где f_j – коэффициент сопротивления качению j -го колеса;

G_j – нормальная нагрузка на j -е колесо;

N – количество колес.

Влияние смещения системы двух колес со следа, предшествующего на силу сопротивления качению, показано на рис.4. Расчет выполнен для случая качения колеса с шиной типа 22/70-20 по слежавшейся пахоте при нормальной нагрузке на колесо 30 кН.

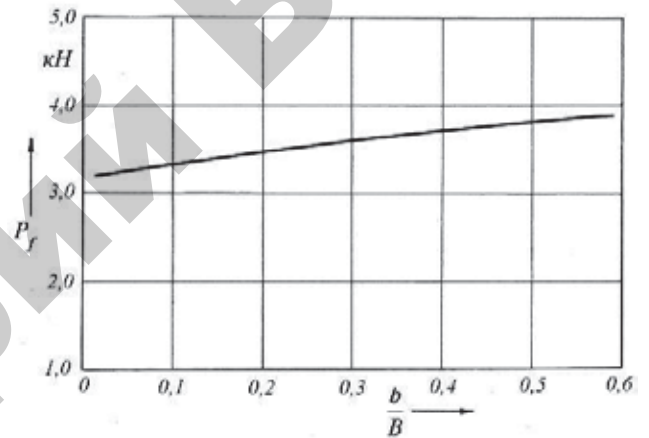


Рисунок 4. Зависимость силы сопротивления качению от смещения колес со следа

Видно, что указанное смещение приводит к росту силы сопротивления качению. Например, при смещении колес на половину ширины шины ($b/B=0,5$) сила сопротивления качению возрастает почти на 20%. Одновременно в 1,5 раза возрастает общая ширина следа.

Следует отметить, что ширина движущегося колеса может полностью перекрывать предшествующий след и деформировать дополнительный объем почвы. Это часто наблюдается у тракторов, а также агрегируемых ими машин. Последнее происходит при установке на машины широких шин для снижения давления на почву без изменения компоновки ходовой части. Эффективность такого приема требует дополнительных исследований.

Заключение

Разработанная математическая модель взаимодействия многоколесных ходовых систем с почвой позволяет определять силу сопротивления качению и глубину следа системы колес с учетом разных размеров шин и нормальных нагрузок на отдельные колеса, configura-

ции профиля шин, деформации шин, изменяющейся в зависимости от нагрузки и свойств опорного основания. Модель построена на основе объемного представления поверхности контакта шины с почвой. Расчет базируется на данных о параметрах почвы, шин и о нагрузочных характеристиках шин на жестком основании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орда, А.Н. Сопротивление почв/ А.Н. Орда. – Мн.: БГАТУ, 2002. – 94 с.
2. Горин, Г.С. Исследование колееобразования при качении ведомого колеса / Г.С. Горин, Г.И. Гедроить, И.Е. Юреть // Воздействие ходовых систем сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов на почву: сб. науч. трудов. – Горки, 1991. – С. 11-18.

3. Гедроить, Г.И. Сопротивление качению ведомых пневматических колес / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2010, № 1. – С. 26-30.
4. Гуськов, В.В. Теория трактора/ В.В. Гуськов. – Мн.: Машиностроение, 1977. – 384 с.
5. Зариньш, Я.А. Уменьшение уплотнения почв путем рыхления колеи трактора при культивации и посеве: автореф. дис. ... канд. техн. наук/ Я.А. Зариньш. – Елгава, 1985. – 18 с.
6. Гедроить, Г.И. Опорные свойства шин для сельскохозяйственной техники / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2009, № 4. – С. 23-27.
7. Транспортные средства на высокоэластичных движителях / Н.В. Бочаров [и др.]; под общ. ред. Н.В. Бочарова. – М.: Машиностроение, 1974. – 208 с.

УДК 631.8; 631.171

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 15.02.2012

ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ПНЕВМОПРОВОДЕ

С.О. Нукешев, докт. техн. наук, профессор, академик АСХН Респ. Казахстан (Агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Казахстан)

Аннотация

В работе рассмотрены пути повышения эффективности центрального распределения сыпучих материалов путем применения нового технического решения. Получены зависимости, позволяющие определить параметры центрального распределителя в зависимости от скорости частицы и воздуха.

Efficiency improving ways of mineral fertilizers of central distribution by new technical solution are considered in this work. Dependences allowing determine the parameters of the central distribution depending on the speed of particles and air are obtained.

Введение

Решение вопроса равномерного разделения сыпучего материала на части требует стабилизации закона распределения частиц в поперечном сечении материалопровода. Для этого после участка поворота устанавливается дополнительный конструктивный элемент – завихритель, выполненный в виде винтовой спирали, навитой на стержень. Завихритель занимает все поперечное сечение материалопровода [1].

Основная часть

Предложенное техническое решение содержит материалопровод 1, корпус распределителя 2 Г-образной формы, многозаходный винт 3, выполненный в виде спиральных витков. Поступивший на винтовую спираль поток закручивается и вследствие вращательного движения под действием центробежных сил инерции прижимается к внутренней стенке материалопровода, распределяется по ней ровным слоем, обретая при этом в поперечном сечении В-В форму полого цилиндра, (рис. 1). Устройство работает следующим образом. Транспортируемый по трубопроводу 1 потоком воздуха материал, попав на уча-

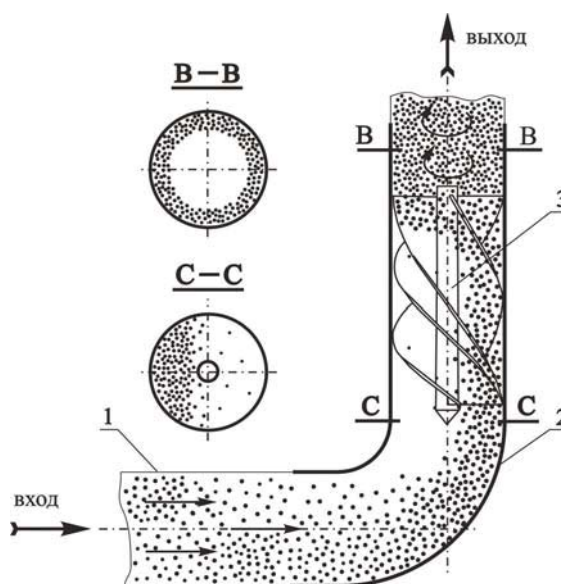


Рисунок 1. Устройство для распределения сыпучего материала