

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИСБАЛАНСНОГО ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО КАТКА НА ПОЧВУ

Шаронов Иван Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Курдюмов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Исаев Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и физика»

Курушин Виктор Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1; тел.: 8 (8422) 55-95-95

E-mail: ugsha@yandex.ru

Ключевые слова: прикатывание, почвообрабатывающий каток, дисбаланс, угловая скорость, угловое ускорение, сила воздействия

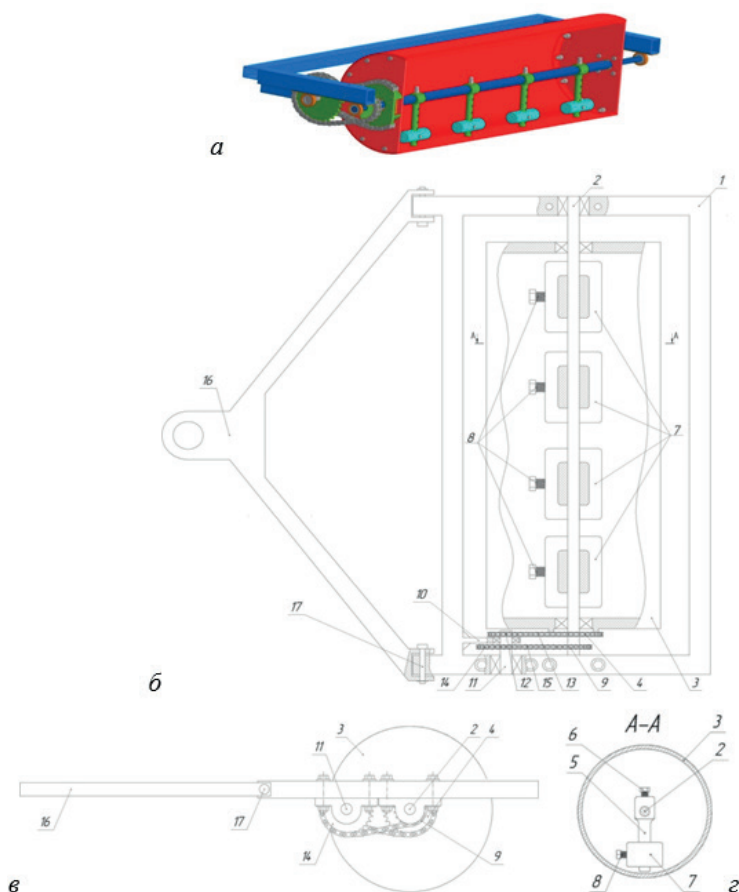
Интенсификация процесса уплотнения и структурирования почвы при посеве возможна на основе разработки нового дисбалансного почвообрабатывающего катка (ДПК), оснащенного дисбалансами, вращающимися вокруг оси полого цилиндра. Вращение дисбалансов приводит к изменению кинематических параметров катка и характера его воздействия на почву. Приняв разработанное орудие как материальную систему с несколькими степенями свободы, применили уравнение Лагранжа второго рода для определения кинематических параметров рассматриваемой системы, на основе которого получили систему дифференциальных уравнений второго порядка движения ДПК относительно обобщенных координат. Выведенные зависимости позволили установить особенности кинематики ДПК при различных массах полого цилиндра и дисбалансов. Установлено, что воздействие ДПК на почву формирует в обрабатываемой почвенной среде комбинированные деформации сжатия, сдвига и растяжения, обеспечивая лучшее выполнение агротребований к прикатыванию. Выявлено, что сила воздействия на обрабатываемую почвенную среду ДПК с вращающимися дисбалансами имеет периодический характер изменения, достигая максимума в 1488 Н при массе дисбалансов 3 кг, их удалении от оси полого цилиндра на 0,25 м, скорости поступательного движения ДПК 3 м/с и частоте вращения дисбалансов, в 2 раза превышающей частоту вращения полого цилиндра. Наличие этой силы интенсифицирует процесс разрушения почвенных комков и создания структурированного и оптимально уплотненного слоя почвы в зоне расположения семян. Изменяя массу дисбалансов ДПК, частоту их вращения, взаимное расположение и положение относительно полого цилиндра, можно добиться точного соблюдения агротребований к прикатыванию различных типов почв.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-2259.2020.8

Введение

В процессе технологического воздействия на почву при выращивании агрокультур перво-степенной остается задача создания оптимально сформированного посевного верхнего слоя почвы для обеспечения необходимых условий роста и развития каждого растения, что особенно важно на начальном этапе вегетации непосредственно с момента заделки семян в почву [1]. В период прорастания семян требуется создать мелко структурированный и оптимально уплотненный почвенный слой, который обеспечит минимальные потери энергии семени при прорастании и максимальный контакт семян с влагообеспеченными агрегатами посевного

слоя почвы. При этом максимальный размер почвенных агрегатов ограничивается размером 50 мм, а агротехнически ценная структура почвы должна быть представлена фракцией 0,25...10 мм. Плотность почвы для зерновых культур должна варьироваться в диапазоне 1100...1200 кг/м³. Это позволяет на начальном этапе вегетационного периода получить интенсивно и равномерно развивающиеся растения и в результате максимально возможную урожайность возделываемых культур в конкретных почвенно-климатических условиях. Однако на заключительных этапах подготовки почвы к посеву и непосредственно при посеве рабочие органы применяемых агроорудий не в полной мере обеспечивают оптимально сформированный и



а – 3D-модель ДПК в разрезе; б – вид сверху с местным сечением полого цилиндра; в – вид сбоку; г – разрез по сечению А - А; 1 – рама; 2 – ось; 3 – полый цилиндр; 4 – ведущая звездочка; 5 – стержень; 6, 8 – болты; 7 – утяжелители; 9 – ведомая звездочка; 10 – кронштейн; 11 – вал; 12, 14 – промежуточные звездочки; 13, 15 – цепи; 16 – сцепное устройство; 17 – палец

Рис. 1 - Дисбалансный почвообрабатывающий каток

уплотненный мелкокомковатый посевной слой, необходимый для прорастания семян и питания всходов культурных растений [2].

Катки и прикатывающие рабочие органы почвообрабатывающих и посевных машин, применяемые в процессе подготовки почвы для высева семян растений, характеризуются различиями в принципе воздействия на почву, что объясняется их функциональным назначением в растениеводческих технологиях и определяет разнообразие их конструктивного исполнения [3, 4].

Качество сформированного посевного слоя задают параметры орудий и режимы операций подготовки почвы к посеву в зависимости от выбранной технологии возделывания культурных растений, а также принципы воздействия на обрабатываемый слой рабочих органов применяемых агроорудий [5]. Различные конструктивные схемы почвообрабатывающих машин и орудий обуславливают особенности создания в почвенном пласте деформаций, вызывающих изменение размеров, формы и положения почвенных частиц [6]. При этом основополагающим фактором при разработке новых орудий является обеспечение комбинированно-

го воздействия рабочих органов на почвенную среду с генерацией деформаций сдвига, изгиба, сжатия и растяжения для обеспечения требуемого качества и интенсификации процесса почвообработки, а также соблюдение принципов энергоэффективности [7].

Приведенные выше доводы позволяют сформулировать цель исследования - повышение качества уплотнения и структурирования слоя почвы в зоне расположения семян на основе разработки новой конструкции дисбалансного почвообрабатывающего катка (ДПК), совмещающего разнохарактерные динамические воздействия на обрабатываемую почвенную среду.

Материалы и методы исследований

Объектами теоретического исследования являются кинематический и динамический режимы работы ДПК новой конструкции, оснащенного дисбалансами, установленными шарнирно с помощью радиальных стержней на оси катка и вращающихся вокруг нее при перекачивании катка по поверхности поля.

Предлагаемый ДПК (рис. 1) содержит установленный на раме 1, снабженный осью 2 полый цилиндр 3. Внутри полого цилиндра на его оси 2 установлены дисбалансы, выполненные в

виде шарнирно установленных на оси 2 стержней 5 и утяжелителей 7. Дисбалансы вращаются вокруг оси 2 посредством передачи им крутящего момента через повышающий цепной редуктор от перекатывающегося по поверхности почвы пустотелого цилиндра 3. При этом частота вращения установленных на оси 2 дисбалансов больше частоты вращения полого цилиндра 3.

Эти конструктивные особенности разработанного ДПК приводят к возникновению колебаний, которые за счет увеличения силы воздействия катка на почву генерируют в обрабатываемой почвенной среде комбинированные деформации сжатия, сдвига, растяжения, возникающие в зоне контакта полого цилиндра с почвой. Это при меньших по сравнению с прототипом габаритах и материалоемкости конструкции повышает степень крошения комков. Также обеспечивается качественно уплотненный посевной слой почвы и обеспечивается хороший контакт семян с влагосодержащими агрегатами почвы, что необходимо для создания требуемых свойств посевного слоя почвы, оптимального развития растений на стадии прорастания семян и формирования равномерных всходов.

Рассматривая разработанный ДПК как материальную систему с несколькими степенями свободы, в соответствии с общепринятыми математическими закономерностями, для решения задач кинематики и динамики применим уравнения Лагранжа второго рода [8]. Эта методика позволяет составить систему дифференциальных уравнений второго порядка движения совокупности материальных тел относительно обобщенных координат. Уравнения Лагранжа характеризуют движение принятой механической системы, обладающей идеальными связями [9]. В качестве координат системы приняты параметры, не имеющие взаимосвязи. Эти параметры позволяют определить положение тел системы через выражение их декартовых координат [10, 11].

Запишем дифференциальное уравнение Лагранжа второго рода с учетом количества степеней свободы, определяющих число независимых координат, в общем виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы тел, Дж; Q_j – сила в обобщенном виде, соответствующая обобщенной координате, Н; q_j ; \dot{q}_j – первая

производная обобщенной координаты – обобщенная скорость механической системы; ($j = 1, 2, \dots, z$), м/с.

Результаты исследований

Применительно к разработанному ДПК рассмотрим механическую систему (рис. 2), состоящую из полого цилиндра, обладающего массой m_1 , и дисбаланса массой m_2 . Полый цилиндр перекатывается по горизонтальной плоскости, а дисбаланс установлен на стержне O_1B длиной l с возможностью вращения относительно точки O_1 и оси полого цилиндра, перпендикулярной плоскости xOy .

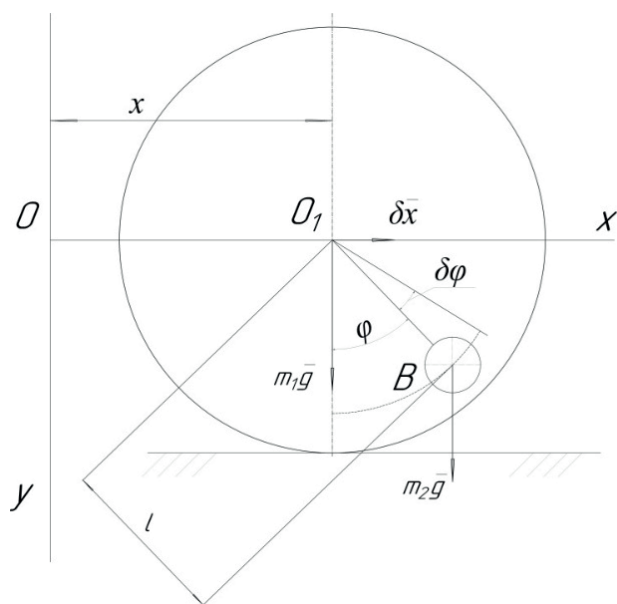


Рис. 2 – Механическая система, состоящая из перекатывающегося полого цилиндра и вращающихся дисбалансов

С учетом имеющихся двух степеней свободы системы положение ее точек в каждый момент времени t определим по заданной координате x , описывающей положение перемещающегося полого цилиндра, и углу φ , который характеризует вращение дисбаланса относительно точки O_1 (оси полого цилиндра).

Зададим параметры x и φ в качестве обобщенных координат, после чего система уравнений Лагранжа примет вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_x; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_\varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где \dot{x} – первая производная координаты x – поступательная скорость движения полого цилиндра, м/с; $\dot{\varphi}$ – первая производная координаты

наты, характеризующей угловое перемещение дисбаланса, c^{-1} .

Для определения обобщенных сил примем один параметр постоянным ($\varphi = \text{const}$), а второму параметру x дадим приращение δx . При этом силы тяжести полого цилиндра и дисбаланса (реакции этих сил на рисунке 1 отсутствуют, поскольку на систему наложены идеальные связи) «приложены перпендикулярно перемещению системы, направление которого которое совпадает с приращением δx » [12]. При этом элементарная работа сил δA_x и обобщенная сила Q_x , соответствующая обобщенной координате x , равны нулю.

Сообщим исследуемой системе перемещение $\delta\varphi$ при постоянной координате x , то есть $\delta x = 0$. В этом случае элементарная работа активных сил

$$\delta A_\varphi = \delta\varphi M = -\delta\varphi m_2 g l \sin \varphi, \quad (3)$$

где M – момент силы тяжести дисбаланса относительно оси полого цилиндра, Н·м; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; l – расстояние от оси полого цилиндра до центра тяжести дисбаланса, м.

Тогда

$$Q_\varphi = -m_2 g l \sin \varphi. \quad (4)$$

Кинетическая энергия T системы равна сумме кинетических энергий полого цилиндра T_1 и дисбаланса T_2 соответственно. Записав выражения для определения кинетических энергий полого цилиндра и дисбаланса с учетом координат x_B и y_B точки B [13] и выполнив соответствующие преобразования, определим кинетическую энергию системы:

$$T = T_1 + T_2 = 0,5(2m_1 + m_2)\dot{x}^2 + 0,5m_2(l^2\dot{\varphi}^2 + 2\dot{x}l\dot{\varphi} \cos \varphi). \quad (5)$$

Определив производные от T по обобщенным координатам x и φ , а также по обобщенным скоростям, получим уравнение Лагранжа для рассматриваемой системы:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} [(2m_1 + m_2)\dot{x}^2 + m_2 l \dot{\varphi} \cos \varphi] = 0; \\ \frac{d}{dt} (l\dot{\varphi} + \dot{x} \cos \varphi) + \dot{x} \dot{\varphi} \sin \varphi = -g \sin \varphi. \end{cases} \quad (6)$$

Система дифференциальных уравнений (6) описывает движение ДПК, состоящее из полого цилиндра с дисбалансами [14].

В результате преобразований системы уравнений (6) получим дифференциальное уравнение движения ДПК с вращающимися

дисбалансами:

$$(2m_1 + m_2 \sin^2 \varphi)l\ddot{\varphi} + m_2 l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \cos \varphi + (2m_1 + m_2)g \sin \varphi = 0. \quad (7)$$

Обсуждение

На рисунке 3 изображены результаты решения дифференциального уравнения (7) движения ДПК со следующими характеристиками: $m_1 = 80$ кг – масса полого цилиндра; $m_2 = 3$ кг – масса дисбалансов; $l = 0,25$ м – длина стержня; $u = 3$ м/с – скорость перемещения ДПК. Наружный диаметр полого цилиндра равен 0,53 м, а частота вращения дисбалансов в 2 раза превышает частоту вращения полого цилиндра.

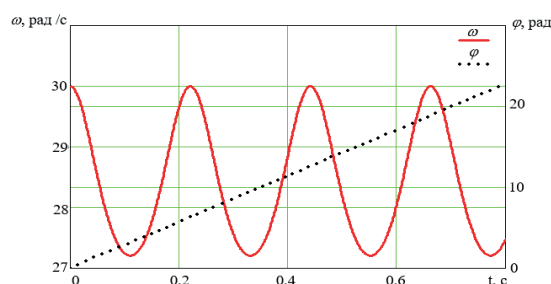


Рис. 3 – Зависимости угловой скорости ω и углового перемещения φ дисбалансов относительно оси полого цилиндра от времени t

Из рисунка следует, что при линейном возрастании углового перемещения дисбалансов j во времени t их угловая скорость циклически изменяется, достигая в точках максимума при заданных выше параметрах ДПК 30 рад/с.

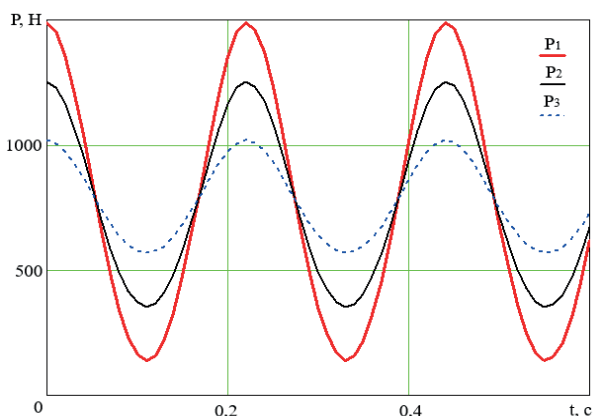
Из системы дифференциальных уравнений (6) движения полого цилиндра с вращающимися дисбалансами можно определить силу его воздействия на почву в зависимости от времени:

$$P(t) = m_1 g + [m_2 l \omega(t)^2 + m_2 g \cos \varphi(t)] \cos \varphi(t), \quad (8)$$

где $\omega(t) = \dot{\varphi}(t)$ – угловая скорость вращения дисбалансов, рад/с.

Графическая интерпретация теоретически выведенной зависимости (8) при различной массе дисбалансов, расположенных на оси полого цилиндра, изображена на рисунке 4.

Анализ рисунка 4 показал, что максимальная сила действия ДПК на почву P_1 достигается при массе вращающихся дисбалансов 3 кг, и она составляет 1488 Н, что на 79,3 % превышает силу тяжести ДПК. Среднее значение периодически меняющейся силы равно 823,5 Н, что почти сопоставимо с силой тяжести ДПК. При мень-



P_1 – при массе дисбалансов 3 кг; P_2 – при массе дисбалансов 2 кг; P_3 – при массе дисбалансов 1 кг

Рис. 4 – Зависимость силы воздействия ДПК на почву P от времени t при различной массе дисбалансов m_2

ших массах дисбалансов - 2 кг и 1 кг получаем максимальные значения силы соответственно $P_2 = 1264$ Н и $P_3 = 1021$ Н. Это соответственно на 54,1 % и 26 % больше силы тяжести ДПК.

Для обеспечения точного соблюдения агротехнических требований к прикатыванию почв различных типов в регулировках ДПК предусмотрены возможности изменения массы дисбалансов, частоты их вращения, взаимного расположения и положения относительно полого цилиндра.

Заключение

Выведенные зависимости позволяют установить особенности кинематики ДПК при различных массах полого цилиндра и дисбалансов.

Выявлено, что сила воздействия на обрабатываемую почвенную среду ДПК с вращающимися дисбалансами имеет периодический характер изменения, достигая максимума в 1488 Н при массе дисбалансов 3 кг, их удалении от оси полого цилиндра на 0,25 м, скорости поступательного движения ДПК 3 м/с и частоте вращения дисбалансов, в 2 раза превышающей частоту вращения полого цилиндра. Наличие этой силы интенсифицирует процесс разрушения почвенных комков и создания структурированного и оптимально уплотненного слоя почвы в зоне расположения семян.

Изменяя массу дисбалансов ДПК, частоту их вращения, взаимное расположение и положение относительно полого цилиндра, можно добиться точного соблюдения агротехнических требований к прикатыванию различных типов почв.

Библиографический список

1. Руденко, Н. Е. Новые технологии и средства механизации в растениеводстве : монография / Н. Е. Руденко, Е. В. Кулаев, В. Н. Руденко. – Ставрополь : издательство Ставропольского ГАУ, 2018. – 380 с. – ISBN 978-5-9596-1429-4.
2. Оценка результативности технологических процессов / Н. Е. Руденко, Е. В. Кулаев, В. Н. Руденко, И. А. Носов // Тракторы и сельхозмашины. - 2019. - № 3. - С. 91-94.
3. Руденко, Н. Е. Как эффективно воздействовать на почву при поверхностной обработке / Н. Е. Руденко // Тракторы и сельхозмашины. - 2017. - № 6. - С. 3-8.
4. Эффективные технологические приёмы в земледелии, обеспечивающие оптимальное влагонакопление в почве и влагопотребление / В. А. Милюткин, В. В. Орлов, Г. В. Кнурова, В. С. Стеновский // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2015. - № 56(6). - С. 69-72.
5. Theoretical substantiation of ridger-seeder roll draught / A. K. Subaeva, A. A. Zamaidinov, V. I. Kurdyumov, Y. S. Zykin // Journal of Fundamental and Applied Sciences. – 2017. - 9(15). - P. 1945-1955.
6. Quality control indicators of soil ridges at sowing cultivated crops / A. K. Subaeva, A. A. Zamaidinov, V. I. Kurdyumov, Y. S. Zykin // International journal of Pharmacy & Technology. – 2016. – Vol. 8, № 3. - P. 14965 -14972.
7. Козырев, Б. М. Почвообрабатывающие машины с коноидальными ротационными рабочими органами / Б. М. Козырев. – Казань : издательство Казанского университета, 2001. – 328 с. – ISBN 5-7464-0747-X.
8. Артемов, И. И. Применение уравнений Лагранжа второго рода для решения задач динамики : методические указания / И. И. Артемов, В. Н. Плешаков, А. А. Елисеева. – Краснодар : КубГАУ, 2013. – 30 с.
9. Математическое описание мульчирования прутковым катком / Н. К. Мазитов, Р. Л. Сахапов, С. М. Архипов, Н. Х. Галаятудинов // Техника в сельском хозяйстве. – 2005. – № 4. – С. 24-26.
10. Локтионов, А. В. Расчет уравнения движения малых колебаний эллиптического маятника с заданной начальной угловой скоростью его движения / А. В. Локтионов, С. А. Сеньков // Теоретическая и прикладная механика: Международный научно-технический журнал. - 2011. - № 26. - С. 138-143.
11. Роль различных типов колебаний в почвообработке / Г. Г. Булгариев, Г. В. Пикмул-

лин, Р. Г. Юнусов, В. П. Данилов // Актуальные вопросы совершенствования технологий и технического обеспечения сельскохозяйственного производства : материалы Международной научной конференции института механизации и технического сервиса. - Казань, 2012. - С.46-49.

12. Булгариев, Г. Г. К обоснованию и определению колебательного процесса спирально-пластинчатого рабочего органа / Г. Г. Булгариев, Г. В. Пикмуллин, Р. Г. Юнусов // Вестник Казан-

ского ГАУ. - 2014. - № 2(32). - С. 63-67.

13. Сахапов, Р. Л. Теоретические основы колебательных рабочих органов культиваторов / Р. Л. Сахапов. – Казань : КФЭИ, 2001. - 193 с.

14. Modeling the technological process of tillage / S. G. Mudarisov, I. I. Gabitov, Y. P. Lobachevsky, N. K. Mazitov, R. S. Rakhimov, R. R. Khamaletdinov, I. R. Rakhimov, I. M. Farkhutdinov, A. M. Mukhametdinov, R. T. Gareev // Soil & Tillage Research. – 2019. - T. 190. – P. 70-77.

TO THE ISSUE OF SPECIFICATION OF THE IMPACT FORCE OF UNBALANCED TILLAGE ROLLER ON THE SOIL

Sharonov I.A., Kurdyumov V.I., Isaev Yu.M., Kurushin V.V.

FSBEI HE Ulyanovsk SAU

432017, Ulyanovsk, Novyi Venets blvd, 1; tel. : 8 (8422) 55-95-95

E-mail: ugsha@yandex.ru

Keywords: soil compaction, tillage roller, disbalance, angular velocity, angular acceleration, impact force

Intensification of the process of soil compaction and structuring during sowing is possible on the basis of development of a new unbalanced tillage roller (UTR) equipped with disbalances rotating around the axis of a hollow cylinder. The rotation of disbalances leads to a change of the roller kinematic parameters and the nature of its impact on the soil. Having accepted the developed device as a material system with several degrees of freedom, we applied the Lagrange equation of the second kind to determine the kinematic parameters of the system, on the basis of which we obtained a system of second-order differential equations of the motion of the UTR in relation to generalized coordinates. The derived dependences made it possible to establish the kinematics peculiarities of the UTR at various masses of the hollow cylinder and disbalances. It was found that the impact of the UTR forms combined deformations of compression, shear and extension in the tilled soil environment, providing better fulfillment of agricultural requirements for rolling. It was revealed that the impact force of the UTR with rotating disbalances on the tilled soil environment has a periodic character of change, reaching a maximum of 1488 N with a mass of disbalances of 3 kg, their distance from the axis of the hollow cylinder by 0.25 m, the speed of the forward movement of the UTR of 3 m/s and disbalance rotation frequency 2 times higher than the hollow cylinder rotation frequency. The presence of this force intensifies the destruction process of soil clods and creates a structured and appropriately compacted soil layer in the area of seed placement. By changing the mass of UTR disbalances, their rotation frequency, relative position and position in relation to the hollow cylinder, it is possible to achieve exact compliance with agricultural requirements for rolling of various types of soils.

Bibliography:

1. Rudenko, N. E. *New technologies and means of mechanization in crop production: monograph* / N. E. Rudenko, E. V. Kulaev, V. N. Rudenko. - Stavropol: publishing house of Stavropol SAU, 2018. - 380 p. - ISBN 978-5-9596-1429-4.
2. *Efficiency evaluation of technological processes* / N. E. Rudenko, E. V. Kulaev, V. N. Rudenko, I. A. Nosov // *Tractors and agricultural machines*. - 2019. - № 3. - P. 91-94.
3. Rudenko, N. E. *How to influence the soil effectively during surface tillage* / N. E. Rudenko // *Tractors and agricultural machines*. - 2017. - № 6. - P. 3-8.
4. *Effective technological methods in agriculture, ensuring suitable moisture accumulation in the soil and moisture consumption* / V. A. Milyutkin, V. V. Orlov, G. V. Knurova, V. S. Stenovskiy // *Vestnik of Orenburg State Agrarian University*. - 2015. - № 56 (6). - P. 69-72.
5. *Theoretical substantiation of ridger-seeder roll draft* / A. K. Subaeva, A. A. Zamaidinov, V. I. Kurdyumov, Y. S. Zykin // *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. - 2017. - 9 (15). - P. 1945-1955.
6. *Quality control indicators of soil ridges at sowing cultivated crops* / A. K. Subaeva, A. A. Zamaidinov, V. I. Kurdyumov, Y. S. Zykin // *International journal of Pharmacy & Technology*. - 2016. - Vol. 8, № 3. - P. 14965-14972.
7. *Kozyrev, B.M. Tillage machines with conoidal rotation working bodies* / B.M. Kozyrev. - Kazan: publishing house of Kazan University, 2001. - 328 p. - ISBN 5-7464-0747-X.
8. *Artemov, I.I. Application of Lagrange equations of the second kind for solving dynamics problems: methodical instructions* / I.I. Artemov, V.N. Pleshakov, A.A. Eliseeva. - Krasnodar: KubSAU, 2013. - 30 p.
9. *Mathematical description of mulching with a rod-type roller* / N.K. Mazitov, R.L. Sakhapov, S.M. Arkhipov, N. Kh. Galyautdinov // *Machinery in agriculture*. - 2005. - № 4. - P. 24-26.
10. *Loktionov, A. V. Equation calculation of the motion of small oscillations of an elliptical pendulum with a given initial angular velocity of its motion* / A. V. Loktionov, S. A. Senkov // *Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical magazine*. - 2011. - № 26. - P. 138-143.
11. *The role of different types of oscillations in soil tillage* / G. G. Bulgariev, G. V. Pikmullin, R. G. Yunusov, V. P. Danilov // *Current issues of improvement of technologies and technical support of agricultural production: materials of the International Scientific Conference of the Institute of Mechanization and technical service*. - Kazan, 2012. - P. 46-49.
12. *Bulgariev, G.G. To substantiation and definition of the oscillatory process of a spiral-plate working body* / G.G. Bulgariev, G.V. Pikmullin, R.G. Yunusov // *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. - 2014. - № 2 (32). - P. 63-67.
13. *Sakhapov, R.L. Theoretical foundations of oscillatory working bodies of cultivators* / R.L. Sakhapov. - Kazan: KFEI, 2001. - 193 p.
14. *Modeling the technological process of tillage* / S. G. Mudarisov, I. I. Gabitov, Y. P. Lobachevsky, N. K. Mazitov, R. S. Rakhimov, R. R. Khamaletdinov, I. R. Rakhimov, I. M. Farkhutdinov, A. M. Mukhametdinov, R. T. Gareev // *Soil & Tillage Research*. - 2019. - V. 190. - P. 70-77.