

МЕХАНИЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 631.33.06

Поступила в редакцию 03.04.2017
Received 03.04.2017**И. С. Крук¹, Ю. В. Чигарев^{1,2}, Ф. И. Назаров¹, В. Романюк³**¹*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь*²*Западнопоморский технологический университет, Щецин, Польша*³*Институт технологических и естественных наук в Фалентах, Варшава, Польша*

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЧВУ УПЛОТНЯЮЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЬЧАТО-ПРУТКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ КАТКОВЫХ
ПРИСТАВОК**

Аннотация: Система обработки почвы, основанная на применении комбинированных агрегатов, позволяет снизить энергетические и трудовые затраты на единицу произведенной продукции и получить наибольший экономический эффект при сохранении плодородия почвы. Для обеспечения требуемого качества основной обработки почвы, усадки и поверхностной обработки пласта в пахотных агрегатах используются различные дополнительные приспособления. Наиболее универсальными при этом являются кольчато-шпоровые катки с различными формами уплотняющих элементов, которые качественно крошат, выравнивают и уплотняют поверхностный слой оборнутых пластов. На качество выполняемого технологического процесса влияют конструкция, геометрические размеры катков, кинематические и динамические параметры их работы, а также состояние обрабатываемого агрофона. В статье выполнен анализ форм уплотняющих элементов кольчато-прутковых катков, закономерностей формирования и распространения ядра уплотнения почвы под их воздействием, на основе которых получены зависимости для определения технологических параметров кольчато-прутковых катков. В результате проведенных исследований закономерностей воздействия прутков на почву, получены уравнения его движения и условие уплотнения. Результаты исследований дополняют теорию взаимодействия уплотняющих элементов кольчато-прутковых рабочих органов на почву, позволяют определить их конструкционные и технологические параметры и могут быть использованы при проектировании почвообрабатывающих катков.

Ключевые слова: теория взаимодействия уплотняющих элементов кольчато-прутковых рабочих органов на почву, кольчато-шпоровые катки

Для цитирования: Теоретические исследования взаимодействия уплотняющих элементов кольчато-прутковых дисков катковых приставок пахотных агрегатов с почвой / И. С. Крук, Ю. В. Чигарев, Ф. И. Назаров., В. Романюк // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2017. – № 4. – С. 92–102.

I. S. Kruk¹, Y. V. Chigarev^{1,2}, F. I. Nazarov¹, V. Romanyuk³¹*The Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus*²*West Pomeranian Technological University, Shchezin, Poland*³*Institute of Technological and Natural Sciences in Falenty, Warsaw, Poland*

**THEORETICAL RESEARCH OF EFFECTS OF SEALING ELEMENTS OF STAR WHEELED ROD WORKING
UNITS OF ROLLER ACCESSORIES**

Abstract: The soil treatment system based on combined units application, allows to decrease energy and labor costs per output unit and to obtain the greatest economic effect while maintaining soil fertility. Various additional accessories are used to provide the required quality of the basic soil cultivation, shrinkage and surface treatment of formation in arable units. The most universal in this case are the star wheeled rollers with various forms of sealing elements, which crumble, smooth and compact the surface of the layers that were turned over. The quality of the process is influenced by the design, geometric dimensions of the rollers, the kinematic and dynamic parameters of operation, as well as condition of the cultivated

agrophone. The purpose of the study was to substantiate the geometric parameters, the shape of the sealing elements, and the theoretical studies on their effect on soil. The article analyzes shapes of the sealing elements of star wheeled rod rollers, regularities of formation and propagation of the soil compaction kernel under their influence, on the basis of which the dependences for determining the technological parameters of star wheeled rollers have been obtained. As a result of the conducted studies of the effect of rods on the soil, the equations of its motion and compaction condition are obtained. The results of the studies supplement the theory of the interaction of reinforcing elements of star wheeled rod working organs on the soil, allow to determine their structural and technological parameters and can be used for design of soil-cultivating rollers.

Keywords: theory of interaction of reinforcing elements of star wheeled rod working units on soil, star wheeled rollers

For citation: Kruk I. S., Chigarev Y. V., Nazarov F.I., Romanyuk V. Theoretical research of effects of sealing elements of star wheeled rod working units of roller accessories. *Vesti Natsyonal'nyy akademii nauk Belarusi. Seryya agrarnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2017, no 4, pp. 92–102.

Введение. На современном этапе развития земледелия важнейшее значение имеет снижение затрат на единицу произведенной продукции при наибольшем экономическом эффекте и сохранении плодородия почвы. Достигнуть этого возможно за счет разумной системы обработки почвы, выполняемой комбинированными агрегатами, позволяющими совмещать две и более технологические операции. Комбинированные почвообрабатывающие агрегаты в зависимости от совмещаемых операций условно можно разделить на следующие группы: основная обработка почвы с дополнительной; несколько операций предпосевной обработки; предпосевная обработка и посев; обработка почвы и внесение удобрений.

Несмотря на преимущества безотвальной и нулевой обработки почв, их внедрение в практическое земледелие осуществляется медленно. Это связано с тем, что широкое применение безотвальной обработки почвы не представляется возможным в связи с сильной засоренности полей сорными растениями, борьба с которыми при данных технологических приемах должна сопровождаться широким применением в технологиях возделывания гербицидов, что негативным образом сказывается на экологии окружающей среды и повышает себестоимость продукции. Поэтому агротехника возделывания на данном этапе развития не представляется без основной обработки почвы пахотными агрегатами, которая сопровождается потерями почвенного углерода и влаги в атмосферу. Поэтому необходимо искать пути снижения отдачи углерода и влаги из почвы в атмосферу не только за счет применения почвощадящих технологий, но и совершенствования конструкций машин и орудий, предназначенных для основной и поверхностной обработки почвы. В этом случае на стадиях проектирования и расчета соответствующих агрегатов следует учитывать их воздействие на почву, которое, с одной стороны, не должно превышать допустимое, а с другой – не сильно уплотнять ее, исключая возможность ухода углерода и влаги в атмосферу [1, 2].

Для улучшения процесса основной обработки почвы и снижения энергетических затрат на последующие технологические операции в конструкциях плугов широко применяются различные дополнительные устройства для поверхностной обработки почвенных пластов [3–12]. Они обеспечивают крошение, рыхление, частичное выравнивание и уплотнение верхнего слоя обороченного пласта. При этом происходит разрушение и предотвращение образования глыб, более тесное размещение почвенных агрегатов, увеличение капиллярной пористости, создается более однородное состояние обрабатываемого слоя и частичное выравнивание поверхности почвы. Уплотненная почва быстро прогревается, позволяет провести последующие технологические операции в более сжатые сроки и обеспечивает сохранение влаги и углерода в нижних слоях.

Поэтому, с агротехнической точки зрения, применение дополнительных устройств в конструкциях плугов позволяет оптимально использовать время подготовки почвы к посеву, совместить агротехнические приемы для борьбы с потерями почвенной влаги и углерода, сократить количество почвообрабатывающих операций при обработках почв легкого механического состава и снизить затраты энергии на обработку тяжелых почв. Одним из основных требований к проектированию конструкций и рабочих органов почвообрабатывающих приспособлений к пахотным агрегатам является обеспечение требуемого качества обработки различных почв вне зависимости от климатических условий [13]. Следует отметить, что теории взаимодействия сельскохозяйственных машин и орудий с почвой требуют дальнейшего развития в связи с проблемами переуплотнения (недоуплотнения) почв, усовершенствованием технологий их обработки, модернизацией конструкций рабочих органов и учета экологических процессов.

Цель данной работы – обоснование геометрических параметров кольчато-прутковых рабочих органов катковых приставок пахотных агрегатов и проведение теоретических исследований воздействия их уплотняющих элементов на почву.

Основная часть. В конструкциях плугов для обеспечения требуемого качества основной обработки почвы, усадки и дополнительной обработки пласта используются различные приспособления: волокуши, боронки, приставки [3–12]. Наиболее универсальными в применении являются кольчато-шпоровые катки с различными формами уплотняющих элементов, которые качественно крошат, выравнивают и уплотняют поверхностный слой почвы (рис. 1). На качество выполняемого технологического процесса влияют конструкция, геометрические размеры катков, кинематические и динамические параметры их работы, а также состояние обрабатываемого агрофона. В настоящее время в конструкциях рабочих органов почвообрабатывающих катков используются шпory прямоугольного, треугольного и круглого сечений, которые при внедрении в почву ведут себя по-разному.



Рис. 1. Кольчато-шпоровый (а) и кольчато-прутковый (б) рабочие органы почвообрабатывающих катков [14]

Fig. 1. Star wheeled (a) and star wheeled rod (b) working units of soil cultivation rollers [14]

При внедрении шпory прямоугольного сечения в почву (рис. 2, а) под ней образуется почвенный клин, вдоль сторон которого происходит движение частиц почвы. Примем, что угол при основании клина равен углу внутреннего трения почвы φ_1 . Найдем высоту образующегося почвенного клина h_k

$$h_k = \frac{b}{2} \operatorname{tg} \varphi_1. \quad (1)$$

(b – ширина шпory).

При внедрении шпory треугольного сечения (уголок) в почву (рис. 2, б), почвенный клин под ней не будет образоваться, если угол при основании клина φ_1 будет больше угла трения почвы о металл φ_2 . Из этого следует, что угол при вершине клина выбирается из условия

$$\beta \leq 180 - 2\varphi_2. \quad (2)$$

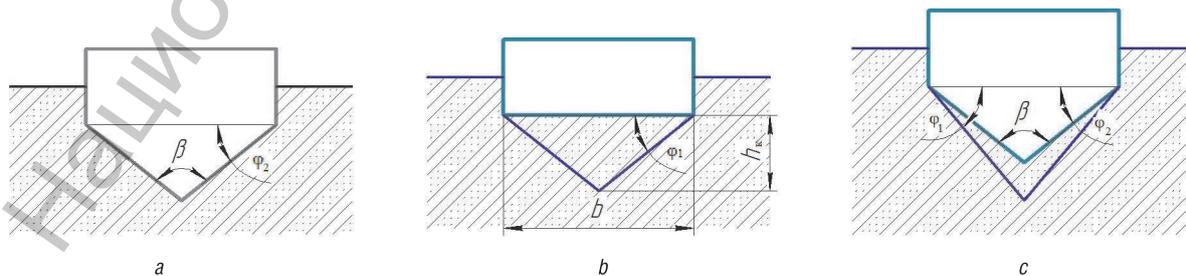


Рис. 2. Схемы внедрения в почву шпory различной формы: а – прямоугольной; б, с – треугольной

Fig. 2. Schemes for introducing various shapes skids into soil: а – rectangular; б, с – triangular

Если угол при вершине $\beta > 180 - 2\varphi_2$, то на поверхности шпоры образуется почвенный клин с углом при основании φ_1 (рис. 2, с).

После того, как клин сформировался, дальнейшее заглубление шпоры будет влиять только на глубину распространения уплотнения, а плотность почвы увеличиваться не будет. Поэтому для достижения максимального значения плотности шпору необходимо заглубить в почву на высоту клина.

При одновременном воздействии на почву двух прямоугольных шпор (рис. 3) глубина пере-сечения создаваемых ими зон уплотнений определяется по формуле

$$h_1 = \frac{b}{2} \operatorname{tg} \varphi_1 + \left(\frac{l}{2} - \frac{b}{2} \right) \operatorname{ctg} \varphi_1,$$

где l – расстояние между шпорами,
или

$$l = \frac{2h_1 - b \operatorname{tg} \varphi_1 + b \operatorname{ctg} \varphi_1}{\operatorname{ctg} \varphi_1}. \quad (3)$$

Задаваясь параметром h_1 , можно определить расстояние между шпорами.

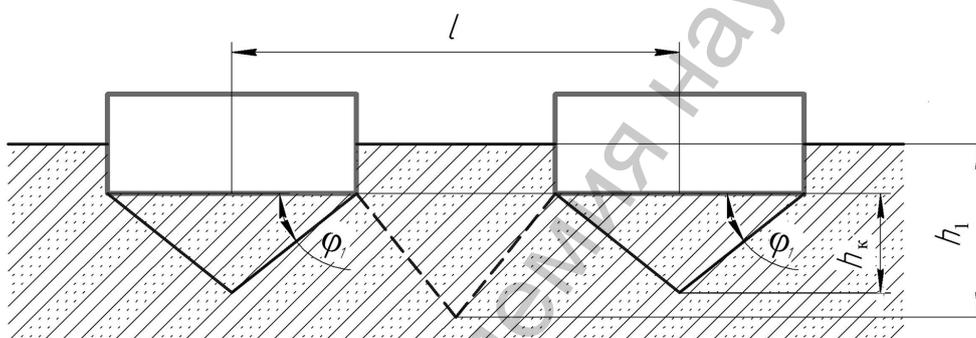


Рис. 3. Схема одновременного воздействия двух прямоугольных шпор на почву

Fig. 3. Scheme of simultaneous effect of two rectangular skids on soil

Ширина шпоры b для кольчато-шпоровых катков определяется из прочностных и технологических условий. Углы трения зависят от физико-механических свойств и состояния почвы [15–19].

Расстояние между шпорами треугольного сечения для случая, когда $\beta > 180 - 2\varphi_2$, определяется по формуле (3). Для случая, когда $\beta \leq 180 - 2\varphi_2$, расстояние между шпорами определяется по формуле

$$l = 2h_1 \operatorname{ctg} \left(\frac{\beta}{2} \right) - b \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) + b. \quad (4)$$

При внедрении шпоры круглого сечения (прутка) в почву (рис. 4) клин будет формироваться на дуге, ограниченной центральным углом, равным $2\varphi_2$. Высота клина определяется по формуле

$$h_k = r \sin \varphi_2 \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{b}{2} \operatorname{tg} \varphi_1, \quad (5)$$

где $b = 2r \sin \varphi_2$.

Максимальная плотность почвы в зоне уплотнения прутка достигается при его заглублении на глубину, равную радиусу. Дальнейшее его заглубление ведет лишь к увеличению глубины распространения уплотнения. Тогда

$$h_1 = r \cos \varphi_2 + \left(\frac{l}{2} - r \sin \varphi_2 \right) \operatorname{ctg} \varphi_1,$$

или

$$l = \frac{2(h_1 - r \cos \varphi_2 + r \sin \varphi_2 \operatorname{ctg} \varphi_1)}{\operatorname{ctg} \varphi_1}. \quad (6)$$

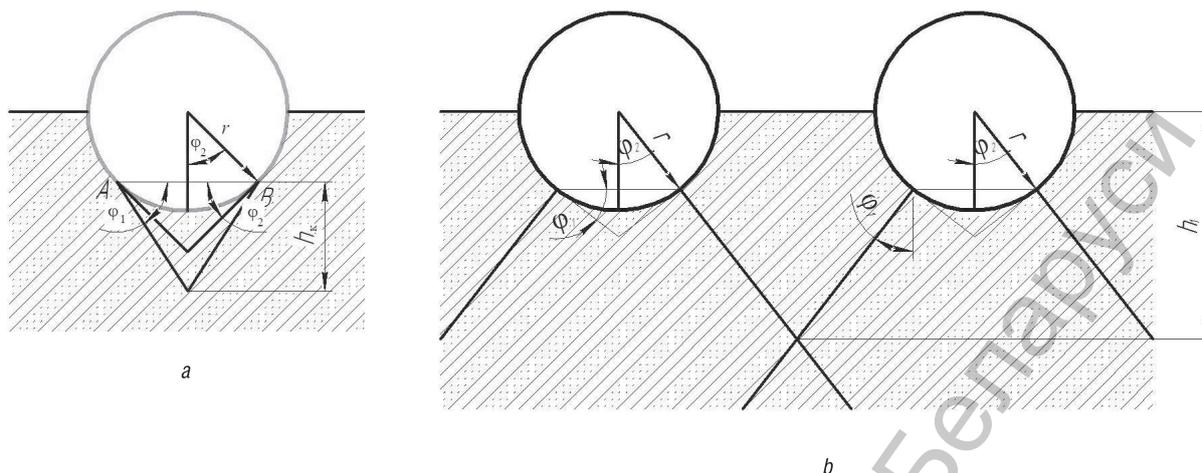


Рис. 4. Схема внедрения шпор круглого сечения в почву: *a* – формирование клина; *b* – пересечение двух зон уплотнения

Fig. 4. Scheme of introduction of round skids into soil: *a* – wedge formation; *b* – intersection of two compaction areas

Для определения расстояния R (радиуса окружности), на которое удалены центры прутков относительно центра диска (кольца), рассмотрим случай, когда в почву внедряется только один пруток и глубина его погружения равна его радиусу. Из рис. 5 определим расстояние между прутками

$$l^2 = R^2 + R^2 - 2R^2 \cos(180^\circ - 3(90^\circ - \alpha_1)), \quad (7)$$

или

$$l^2 = 2R^2 - 2R^2 \cos 2\alpha_1. \quad (8)$$

Зная, что $\cos 2\alpha_1 = 1 - 2\sin^2 \alpha_1$, после несложных преобразований уравнения (7), получим

$$R = \frac{l^2}{2r}. \quad (9)$$

Для шпор уравнение примет следующий вид:

$$R = \frac{l^2}{btg\varphi_1}. \quad (10)$$

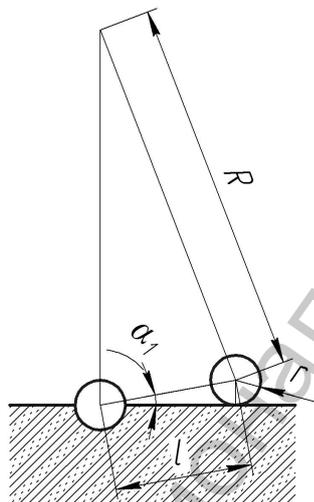


Рис. 5. Схема к определению расстояния между центром диска и центрами уплотняющих элементов кольчато-пруткового катка

Fig. 5. Scheme for determining the distance between the center of the disc and the centers of the sealing elements of the star wheeled roller

Примем, что все прутки равноудалены друг от друга и закреплены на диске на расстояние R относительно его геометрического центра. Рассмотрим процесс вхождения прутка в почву в вертикальной плоскости xOz . Примем, что в точке $B(x_0; z_0)$ пруток соприкасается с почвой, что является началом процесса вхождения его в почву. Уравнения движения точки B прутка в почве запишем в таком виде (рис. 6):

$$\begin{cases} x = x_0 + \zeta; & (0 \leq \zeta \leq CB'; \quad x_0 = AC); \\ z = z_0 + \eta; & (0 \leq \eta \leq BC; \quad z_0 = OK), \end{cases} \quad (11)$$

или

$$\begin{cases} \zeta = x - x_0 = x - r \sin \alpha; & (AC \leq x \leq AB'); \\ \eta = z - z_0 = z - r \cos \alpha; & (0 \leq z \leq OA). \end{cases} \quad (12)$$

где α – угол, определяющий положение прутка относительно оси Oz в момент вхождения в почву (рис. 6), $\alpha = \omega t$ (ω – угловая скорость диска; t – время).

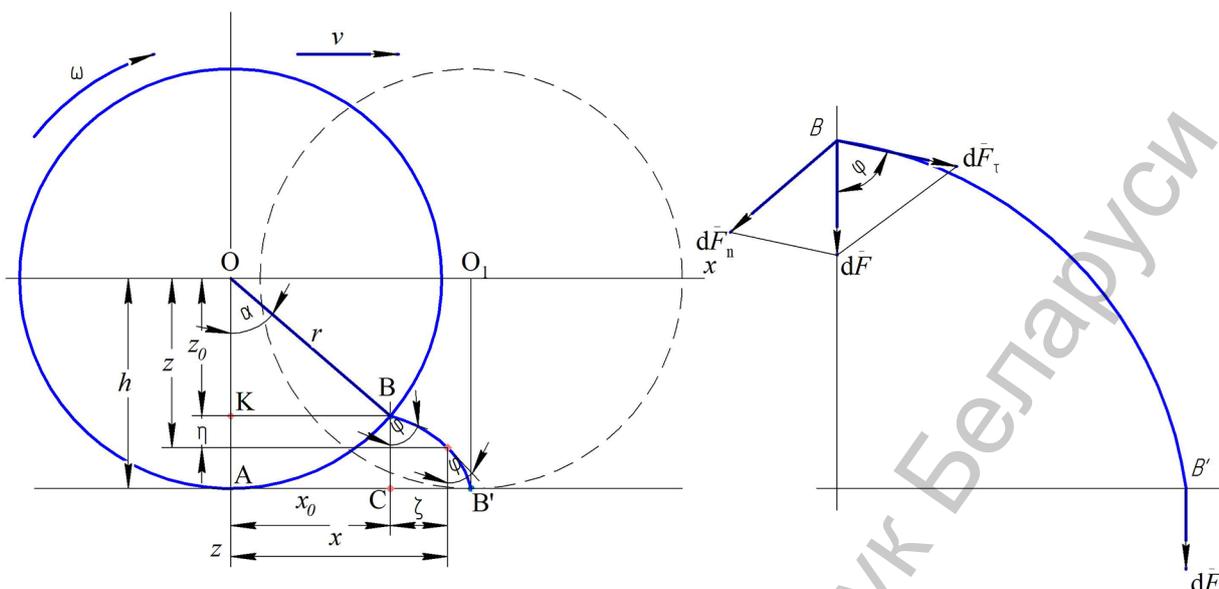


Рис. 6. Схема к определению кинематических параметров движения прутка диска и закономерностей воздействия ее на почву

Fig. 6. Scheme for determining kinematic parameters of the disk rod motion and the laws of its effect on soil

Исходя из рис. 6 для точки B' уравнения (12) можно записать в таком виде:

$$\zeta = r\alpha - r \sin \alpha = r(\alpha - \sin \alpha), \quad (13)$$

$$\eta = r - r \cos \alpha = r(1 - \cos \alpha). \quad (14)$$

Траекторией движения прутка в почве в плоскости xOz согласно уравнениям (13) и (14), будет циклоида. При движении по циклоиде пруток переупаковывает частицы почвы, изменяя пористость и плотность. Вектор скорости движения прутка вдоль траектории будет проходить по касательной к траектории циклоиды BB' . При этом угол φ между касательной и прямой BC будет меняться, т.е. он зависит от времени $\varphi = \varphi(t)$. Примем, что $\varphi = \Omega t$ ($\Omega = \frac{d\varphi}{dt}$ – угловая частота движения точки B по циклоиде):

$$v = \sqrt{\dot{\zeta}^2 + \dot{\eta}^2}, \quad (15)$$

$$\dot{\zeta} = \dot{x} - \Omega r \cos \varphi,$$

$$\dot{\eta} = \dot{z} + \Omega r \sin \varphi = \Omega r \sin \varphi.$$

При неравномерном движении диска по полю ($\omega \neq \text{const}$) ускорение прутка вдоль траектории будет определяться уравнением

$$\ddot{\eta} = \dot{z} + \Omega r \sin \varphi = \Omega r \sin \varphi, \quad (16)$$

где $\ddot{\zeta} = \ddot{x} - \dot{\Omega} r \cos \varphi + \Omega^2 r \sin \varphi$; $\ddot{\eta} = \dot{\Omega} r \sin \varphi + \Omega^2 r \cos \varphi$.

Таким образом, переупаковка твердых и жидких частиц почвы под прутком происходит со скоростью и ускорением, определяемых уравнениями (15) и (16). Так как в процессе работы диска могут возникать его буксование и скольжение [16], то и прутки, жестко закрепленные на нем, при взаимодействии с почвой будут участвовать в указанных процессах. В этом случае они будут иметь удлиненные или укороченные траектории уплотнения почвы, которые определяются уравнениями (11):

$$\zeta = x - \lambda r \sin \varphi, \quad (17)$$

$$\eta = z - \lambda r \cos \varphi, \quad (18)$$

где λ – отношение радиусов воображаемого диска к реальному ($\lambda > 1$ при скольжении и $\lambda < 1$ при буксовании).

Обозначим коэффициент скольжения через k_c , а коэффициент буксования через δ . Так как $k_c = \lambda - 1$, а $\delta = \lambda + 1$, то уравнения движения прутка (17) и (18) примут следующий вид

– при скольжении

$$\begin{cases} \zeta = x - (1 + k_c)r \sin \alpha, \\ \eta = z - (1 + k_c)r \cos \alpha. \end{cases} \quad (19)$$

– при буксовании

$$\begin{cases} \zeta = x - (1 + \delta)r \sin \alpha, \\ \eta = z - (1 + \delta)r \cos \alpha. \end{cases} \quad (20)$$

Так как в нашем случае движение катка осуществляется без активного привода, а вследствие сцепления с почвой вариант буксования исключается, отметим, что скольжение диска не редкое явление при обработке почвы.

Рассмотрим динамическую схему взаимодействия прутка с почвой. Будем считать, что прутки заглубляются в почву под действием силы тяжести диска и догружающей нагрузки. Данным силам будет противодействовать реакция почвы, которая будет расти с увеличением глубины заглубления прутка.

Обозначим результирующую силу, приходящуюся на один прутки при заглублении в почву через $d\bar{F}$, которую разложим на две составляющие: $d\bar{F}_\tau$ направлена по касательной вдоль траектории (циклоиды), $d\bar{F}_n$ по внутренней нормали к траектории (рис. 6).

$$d\bar{F} = d\bar{F}_n + d\bar{F}_\tau,$$

или

$$dF = \sqrt{dF_n^2 + dF_\tau^2}.$$

Приближенно можно считать, что в точке B угол между $d\bar{F}$ и $d\bar{F}_\tau$ равен α , т.е. $\varphi = \alpha$. Тогда

$$\begin{cases} dF_\tau = dF \cos \varphi, \\ dF_n = dF \sin \varphi. \end{cases} \quad (21)$$

В процессе движения точки B по траектории углы α и φ будут меняться приближаясь к нулю в точке B' . Таким образом, влияние касательной и нормальной силы на переупаковку почвенных частиц вдоль траектории движения прутка будет разное.

Так как угол φ в точке B' будет равным нулю, то основное уплотнение почвы проходит при действии касательной силы, максимальное значение которой будет в точке B' .

Уплотняющее воздействие прутка на почву определяется как

$$dF = k_{cm} S dh,$$

где dh – элементарное значение заглубления втулки в почву; k_{cm} – коэффициент объемного смятия (удельное уплотнение), учитывающий свойства почвы (H/cm^3): рыхлая почва – 0,5–1,5; уплотненная почва среднего механического состава – 3–8; уплотненная почва тяжелого механического состава – 6–10; уплотненная сухая почва тяжелого механического состава 12–20 [20]; S – площадь контакта прутка с почвой.

Считаем, что уплотняющее воздействие на почву оказывает только нижняя часть прутка, тогда ее площадь определим по формуле

$$S = \frac{\pi b d}{2}. \quad (22)$$

Тогда величина уплотняющего воздействия равна

$$dF = k_{cm} \frac{\pi b d}{2} dh. \quad (23)$$

Отметим, что $k_{cm} dh$ играет роль элементарного напряжения в зоне контакта втулки с почвой. Для касательной силы, согласно выражениям (21) и (22), имеем

$$\int_0^{F_\tau} dF_\tau = \int_0^h k_{cm} \frac{\pi b d}{2} \cos \varphi dh,$$

т.е.

$$F_{\tau} = k_{\text{см}} \frac{\pi b h d}{2} \cos \varphi. \quad (24)$$

Аналогично для нормальной силы будем иметь

$$F_n = k_{\text{см}} \frac{\pi b h d}{2} \sin \varphi, \quad (25)$$

$$F = k_{\text{см}} \pi b h d.$$

В формулах (24) и (25) левую и правую часть разделим на площадь контакта S , получим

$$\sigma_{\tau} = k_{\text{см}} h \cos \varphi, \quad (26)$$

$$\sigma_n = k_{\text{см}} h \sin \varphi, \quad (27)$$

Связь между σ_n и σ_{τ} в зоне контакта прутка с почвой, согласно закону Кулона, будет

$$\sigma_{\tau} = c + f_{\text{вн}} \sigma_n, \quad (28)$$

где c – коэффициент сцепления; $f_{\text{вн}}$ – коэффициент внутреннего трения почвы.

Уравнение касательной к траектории движения прутка в почве в плоскости xOz запишем в таком виде

$$x - x_0 = \frac{dz}{dx} (z - z_0),$$

или

$$\zeta = \frac{d(z_0 + \eta)}{d(x_0 + \zeta)} \eta = \frac{d\eta}{d\zeta} \eta. \quad (29)$$

Так как

$$\frac{d\eta}{d\zeta} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (30)$$

следовательно,

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\zeta}{\eta}. \quad (31)$$

Уравнение (28), с учетом формул (26) и (27), перепишем так:

$$k_{\text{см}} h \cos \varphi = c + f_{\text{вн}} k_{\text{см}} h \sin \varphi.$$

Откуда получим

$$h = \frac{c}{k_{\text{см}} (\cos \varphi - f_{\text{вн}} \sin \varphi)}. \quad (32)$$

Формула (32) показывает, что чем больше коэффициент объемного смятия, тем меньше будет глубина заглупления прутка в почву. Дадим оценку коэффициенту внутреннего трения почвы.

Так как $h \geq 0$, то из формулы (32) следует, что должно выполняться строгое неравенство

$$\cos \varphi - f_{\text{вн}} \sin \varphi > 0,$$

или

$$\cos \varphi > f_{\text{вн}} \sin \varphi.$$

Следовательно,

$$\operatorname{ctg} \varphi > f_{\text{вн}}.$$

Значение $f_{\text{вн}}$ определяется формулой

$$f_{\text{вн}} = \operatorname{tg} \varphi_1.$$

Тогда

$$\operatorname{ctg} \varphi > \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi_1},$$

или

$$\frac{\eta}{\zeta} > \operatorname{tg} \varphi_1; \frac{\eta}{\zeta} > f_{\text{вн}}.$$

С учетом формулы (19) имеем

$$\frac{z - (1 + k_c)r \cos \varphi}{x - (1 + k_c)r \sin \varphi} > f_{\text{вн}}. \quad (33)$$

Данное неравенство является условием уплотнения почвы прутком кольчато-пруткового диска.

Заключение. Система обработки почвы, основанная на применении комбинированных агрегатов, позволяет снизить энергетические и трудовые затраты на единицу произведенной продукции и получить наибольший экономический эффект при сохранении плодородия почвы. Для обеспечения требуемого качества основной обработки почвы, усадки и поверхностной обработки пласта в пахотных агрегатах используются различные дополнительные приспособления. Наиболее универсальными при этом являются кольчато-шпоровые катки с различными формами уплотняющих элементов, которые качественно крошат, выравнивают и уплотняют поверхностный слой обернутых пластов. На качество выполняемого технологического процесса влияют конструкция, геометрические размеры катков, кинематические и динамические параметры их работы, а также состояние обрабатываемого агрофона.

В статье выполнен анализ форм уплотняющих элементов кольчато-прутковых катков, закономерностей формирования и распространения ядра уплотнения почвы под их воздействием. В результате получены зависимости для определения конструктивных параметров кольчато-прутковых катков. Представлены теоретические исследования изменения кинематических параметров движения уплотняющих элементов кольчато-прутковых рабочих органов. Установлено, что уплотняющие элементы при движении в почве описывают циклоиду, уравнения которой получены с учетом скольжения диска. Для принятой круглой формы уплотняющих элементов проведены теоретические исследования их воздействия на почву и получена зависимость, устанавливающая условие погружения прутков. Полученные результаты дополняют теорию взаимодействия упрочняющих элементов кольчато-прутковых рабочих органов на почву, позволяют определить конструкционные и технологические их параметры и могут быть использованы при проектировании почвообрабатывающих катков.

Список использованных источников

1. Development trends in soil cultivation and fertilization engineering in the aspect of organic farming standards / ed. E. Kaminski. – Falenty : Widaw. ITP, 2011. – 160 p.
2. Kaminski, J.R. Ciągnikowe agregaty maszynowe w nowoczesnym rolnictwie / J.R. Kaminski, I.S. Kruk, A. Szeptycki. – Falenty : Widaw. ITP, 2015. – 133 p. – (Inżynieria w Rolnictwie. Monografie ; nr 18).
3. Клочков, А.В. Сельскохозяйственные машины / А.В. Клочков, Н.В. Чайчиц, В.П. Буяшов. – Минск : Ураджай, 1997. – 491 с.
4. Kіrunki rozwoju techniki w transporcie rolniczym, uprawie gleby, siewie, nawożeniu i ochronie roślin / red. nauk. W. Golka. – Falenty : Widaw. ITP, 2016. – 138 p. – (Inżynieria w Rolnictwie. Monografie ; nr 23).
5. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Г.Е. Листопад [и др.] ; ред. Г.Е. Листопад. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1986. – 688 с.
6. Сысолин, П.В. Почвообрабатывающие и посевные машины: история, машиностроение, конструирование / П.В. Сысолин, Л.В. Погорельый. – Киев : Феникс, 2005. – 264 с. – (Сельскохозяйственная техника XX века).
7. Назаров, Ф.И. Повышение эффективности использования катковых приставок в комбинированных пахотных агрегатах / Ф.И. Назаров // Молодежь в науке – 2014 : прил. к журн. «Вес. Нац. акад. наук Беларуси» : в 5 ч. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых НАН Беларуси ; ред.: В.Г. Гусаков [и др.]. – Минск, 2015. – Ч. 5. – С. 125–128.
8. Крук, И.С. Обеспечение требуемого качества подготовки почвы под посев культур при использовании дополнительных почвообрабатывающих устройств в пахотных агрегатах / И.С. Крук, Ф.И. Назаров // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–30 нояб. 2013 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т [и др.] ; ред.: И.Н. Шило [и др.]. – Минск, 2013. – С. 279–282.
9. Дополнительные орудия для повышения эффективности основной обработки почвы оборотными плугами / И.С. Крук [и др.] // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сб. науч. ст. междунар.

науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня 2016 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т [и др.] ; ред.: Н. Н. Романюк [и др.]. – Минск, 2016. – С. 122–128.

10. Крук, И. С. Повышение эффективности использования дополнительных устройств для поверхностной обработки почвенного пласта в пахотных агрегатах / И. С. Крук, Ю. В. Чигарев, Ф. И. Назаров // Proceedings of 8th International research and development conference of Central and Eastern European institutes of agricultural engineering (CEE AgEng), Poznan, Puszczkowo, 25–28 June 2013. – Poznan, 2013. – P. 13–17.

11. К обоснованию геометрических параметров кольчато-шпоровых катков / И. С. Крук [и др.] // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня 2016 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т [и др.] ; ред.: Н. Н. Романюк [и др.]. – Минск, 2016. – С. 118–122.

12. Крук, И. С. Повышение эффективности использования катковых приставок в комбинированных пахотных агрегатах / И. С. Крук, Ю. В. Чигарев, Ф. И. Назаров // Trendy w inzynierii rolniczej – energia odnawialna : XVI Miedzynar. konf. nauk. z cyklu «Problemy inzynierii rolniczej», Miedzyzdroje, Poland, 4–6 czerw. 2014. – Miedzyzdroje, 2014. – S. 50–53.

13. Голубев, В. В. Обоснование параметров и режимов работы почвообрабатывающего катка для предпосевной обработки почвы под мелкосеменные культуры : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / В. В. Голубев. – Тверь, 2004. – 178 л.

14. Экспериментальные исследования уплотняющего воздействия на почву рабочего органа катковой приставки / И. С. Крук [и др.] // Агропанорама. – 2015. – №4. – С. 2–5.

15. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.

16. Кулен, А. Современная земледельческая механика / А. Кулен, Х. Куиперс ; пер. с англ. А. Э. Габриэляна ; ред. Ю. А. Смирнов. – М. : Агропромиздат, 1986. – 349 с.

17. Кушнарев, А. С. Механико-технологические основы обработки почвы / А. С. Кушнарев, В. И. Кочев. – Киев : Урожай, 1989. – 140 с.

18. Воронин, А. Д. Основы физики почв / А. Д. Воронин. – М. : Изд-во МГУ, 1986. – 244 с.

19. Бондарев, А. Г. Физические свойства почв как теоретическая основа их уплотнения сельскохозяйственной техникой / А. Г. Бондарев // Влияние сельскохозяйственной техники на почву : науч. тр. / ВАСХНИИ, Почв. ин-т им. В. В. Докучаева ; отв. ред. А. Г. Бондарев. – М., 1981. – С. 3–9.

20. Чигарев, Ю. В. Математические основы механики почв / Ю. В. Чигарев, П. Н. Синкевич. – Минск : Технопринт, 2004. – 163 с.

References

1. Kaminski E. (ed.) *Development trends in soil cultivation and fertilization engineering in the aspect of organic farming standards*. Falenty, Wydawnictwo ITP, 2011. 160 p.

2. Kaminski J. R., Kruk I. S., Szeptycki A. *Ciągnikowe agregaty maszynowe w nowoczesnym rolnictwie. Ser. Inżynieria w Rolnictwie. Monografie; nr 18* [Agricultural tractor units in modern agriculture. Ser. Engineering in Agriculture. Monographs; no. 18]. Falenty, Wydawnictwo ITP, 2015. 133 p. (In Poland).

3. Klochkov A. V., Chaychits N. V., Buyashov V. P. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny* [Agricultural machines]. Minsk, Uradzhay Publ., 1997. 491 p. (In Russian).

4. Golka W. (ed.) *Kirunki rozwoju techniki w transporcie rolniczym, uprawie gleby, siewie, nawożeniu i ochronie roślin. Ser. Inżynieria w Rolnictwie. Monografie; nr 23* [Development trends in agricultural transport, soil cultivation, sowing, fertilization and plant protection. Ser. Engineering in Agriculture. Monographs; no. 23]. Falenty, Wydawnictwo ITP, 2016. 138 p. (In Poland).

5. Listopad G. E., Demidov G. K., Zonov B. D., Novokhatskiy V. S., Sapunkov A. P., Selivanov V. A. *Sel'skokhozyaystvennyye i meliorativnyye mashiny. 2-e izd.* [Agricultural and land reclamation machines. 2nd ed.]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 688 p. (In Russian).

6. Sysolin P. V., Pogorelyy L. V. *Pochvoobrabatyvayushchie i posevnyye mashiny: istoriya, mashinostroenie, konstruirovaniye* [Tillage and sowing machines: history, mechanical engineering, design]. Kiev, Feniks Publ., 2005. 264 p. (In Russian).

7. Nazarov F. I. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya katkovykh pristavok v kombinirovannykh pakhotnykh agregatakh* [Increase of the efficiency of roller attachment use in combined plowing units]. *Molodezh' v nauke – 2014: prilozhenie k zhurnalnu "Vesti Natsyonal'nay akademii navuk Belarusi* [Youth in Science – 2014: supplement to the journal "Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Agrarian series"]. Minsk, 2015, pt. 5, pp. 125–128. (In Russian).

8. Kruk I. S., Nazarov F. I. *Obespechenie trebuyemogo kachestva podgotovki pochvy pod posev kul'tur pri ispol'zovanii dopolnitel'nykh pochvoobrabatyvayushchikh ustroystv v pakhotnykh agregatakh* [Provision of the required quality of soil preparation for crop sowing using additional tillage devices in plowing units]. *Nauchno-tekhnicheskij progress v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve : materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Minsk, 28–30 noyabrya 2013 g.* [Scientific and technical progress in agricultural production: materials of the International Scientific and Practical conference, Minsk, November 28–30, 2013]. Minsk, 2013, pp. 279–282. (In Russian).

9. Kruk I. S., Gordeenko O. V., Nazarov F. I., Geruk S. N., Amelichev V. V. *Dopolnitel'nye orudiya dlya povysheniya effektivnosti osnovnoy obrabotki pochvy oborotnymi plugami* [Additional tools for increasing the efficiency of basic tillage with reversible plows]. *Tekhnicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve: sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Minsk, 8–9 iyunya 2016 g.* [Technical support of innovative technologies in agriculture: a collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, June 8–9, 2016]. Minsk, 2016, pp. 122–128. (In Russian).

10. Kruk I. S., Chigarev Yu.V., Nazarov F. I. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya dopolnitel'nykh ustroystv dlya pov-erkhnostnoy obrabotki pochvennogo plasta v pakhotnykh agregatakh* [Increase of the efficiency of using additional devices

for surface treatment of soil in plowing units]. Proceedings of 8th International research and development conference of Central and Eastern European institutes of agricultural engineering (CEE AgEng) (Poznan, Puszczykowo, 25–28 June 2013). Poznan, 2013, pp. 13–17.

11. Kruk I. S., Nazarov F. I., Chigarev Yu.V., Gordeenko O. V., Geruk S. N. *K obosnovaniyu geometricheskikh parametrov kol'chato-shporovykh katkov* [To the substantiation of the geometric parameters of ring-spiral rollers]. *Tekhnicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve: sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Minsk, 8–9 iyunya 2016 g.* [Technical support of innovative technologies in agriculture: a collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, June 8–9, 2016]. Minsk, 2016, pp. 118–122. (In Russian).

12. Kruk I. S., Chigarev Yu.V., Nazarov F. I. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya katkovykh pristavok v kombinirovannykh pakhotnykh agregatakh* [Increase in the efficiency of roller attachment use in combined plowing units]. *Trendy w inzynierii rolniczej – energia odnawialna: XVI Międzynarodowa konferencja naukowa z cyklu «Problemy inzynierii rolniczej», Miedzyzdroje, Poland, 4–6 czerwca 2014* [Trends in agricultural engineering – renewable energy: 16th International scientific conference on the “Problems of Agricultural Engineering”, Miedzyzdroje, Poland, 4–6 June 2014]. Miedzyzdroje, 2014, pp. 50–53. (In Poland).

13. Golubev V. V. *Obosnovanie parametrov i rezhimov raboty pochvoobrabatyvayushchego katka dlya predposevnoy obrabotki pochvy pod melkosemennye kul'tury. Diss. kand. tekhn. nauk* [Substantiation of the parameters and operating modes of a soil-cultivating compactor for secondary tillage for small-seed crops. Ph.D. thesis in engineering science]. Tver, 2004. 178 p. (In Russian).

14. Kruk I. S., Chigarev Yu.V., Nazarov F. I., Kosovskiy P. V. *Eksperimental'nye issledovaniya uplotnyayushchego vozdeystviya na pochvu rabocheho organa katkovoy pristavki* [Experimental studies of compacting effect of a roller set operating element on soil]. *Agropanorama* [Agropanorama], 2015, no. 4, pp. 2–5. (In Russian).

15. Sineokov G. N., Panov I. M. *Teoriya i raschet pochvoobrabatyvayushchikh mashin* [Theory and calculation of soil-cultivating machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 328 p. (In Russian).

16. Koolen A. J., Kuipers H. *Agricultural soil mechanics*. Berlin, Springer-Verlag, 1983. 244 p. (Russ. ed.: Kulen A., Kuipers Kh. *Sovremennaya zemledel'cheskaya mekhanika*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 349 p.)

17. Kushnarev A. S., Kochev V. I. *Mekhaniko-tekhnologicheskie osnovy obrabotki pochvy* [Mechanic and technological bases of soil cultivation]. Kiev, Urozhay Publ., 1989. 140 p. (In Russian).

18. Voronin A. D. *Osnovy fiziki pochv* [Bases of soil physics]. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 1986. 244 p. (In Russian).

19. Bondarev A. G. *Fizicheskie svoystva pochv kak teoreticheskaya osnova ikh uplotneniya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki* [Physical properties of soils as a theoretical basis for their compaction with agricultural machinery]. *Vliyaniye sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na pochvu: nauchnye trudy* [Influence of agricultural machinery on soil: scientific works]. Moscow, 1981, pp. 3–9. (In Russian).

20. Chigarev Yu.V., Sinkevich P. N. *Matematicheskie osnovy mekhaniki pochv* [Mathematical foundations of soil mechanics]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 163 p. (In Russian).

Информация об авторах

Крук Игорь Степанович – кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: krug_igar@mail.ru

Чигарев Юрий Власович – доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь); Западнопоморский технологический университет (Щетин, Польша).

Назаров Федор Игоревич – Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь).

Романюк Вацлав – хаб. доктор технических наук, профессор, Институт технологических и естественных наук в Фалентах, отдел в Варшаве (ул. Раковецкая, 14, Варшава, Польша).

Information about authors

Kruk Igor S. – Ph.D. (Engineering). Assistant Professor. The Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., Minsk 220023, Belarus). E-mail: krug_igar@mail.ru

Chigarev Yuriy V. – D.Sc. (Pisico-Mathematical), Professor. The Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., Minsk 220023, Belarus); West Pomeranian Technological University (Shchezin, Poland).

Nazarov Fedor I. – The Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., Minsk 220023, Belarus).

Romanyuk Vaclav – D.hab. (Engineering), Professor. Institute of Technological and Natural Sciences in Falenty (Warsaw, Poland).