

У.Д.К.: 633.63.631

## КИНЕМАТИКА ЛУНКОДЕЛАТЕЛЯ ПРИ КАЧЕНИИ КОЛЕСА СО СКОЛЬЖЕНИЕМ

В. СЕРБИН

Государственный аграрный университет Молдовы

**Abstract.** The article includes theoretical assumptions regarding the kinematics of the wheeled planters of the rotary seed drills for direct seeding of the weeding crops in the case of wheel rolling with sliding.

It was proved the existence of extreme factors of sliding within the intervals providing high-quality seed placement in soil.

**Key words:** Boundary coefficient, Cycloid, Nodal point, Kinematic indicator, Rotary seed drill, Sliding, Wheel, Wheeled planter.

Колеса сельскохозяйственных машин, перемещаясь по почве, обладающей, как правило, свойствами пластического материала, оставляют за собой колею. Образование колеи сопряжено с большой нагруженностью колес. Колесо ротационно-лунковой сеялки, выполняющее технологическую функцию, несет сравнительно малую нагрузку и поэтому заметной колеи на почве не оставляет. Это дает основание вести исследование колесного лункообразователя, катящегося по пластическому грунту, без учета влияния на его кинематику глубины колеи.

Почва является средой, состоящей из отдельных, слабо связанных между собой частиц и агрегатов. Уплотняясь при качении по ней колеса, она способствует его скольжению. Величина скольжения может быть большей или меньшей в зависимости от физического состояния и свойств почвы, а также условий, определяемых параметрами и скоростью качения колеса.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОД

У скользящего колеса мгновенный центр вращения переносится в некоторую точку  $O_1$  (рис. 1), в результате чего действительное колесо радиуса  $r$  катится так, как катилось бы воображаемое другого радиуса  $r + \Delta r$ . Делая такую замену радиусов, будем считать скольжение колеса равномерным и регулярным в любой точке его контакта с линией качения, предполагая, что при взаимодействии лункоделателей с почвой эта регулярность существенно не изменяется.

Известно, что количественная характеристика скольжения колес выражается соотношением:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x + \Delta x}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta r}{r + \Delta r}, \quad (1)$$

где:  $\varepsilon$  - коэффициент скольжения.

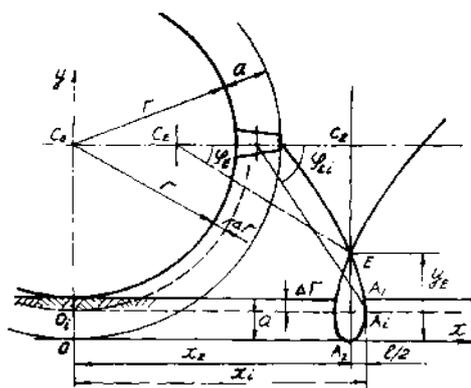


Рис 1. Траектория наконечника лункоделателя при скольжении колеса

С учетом принятых допущений параметрическое уравнение движения наконечника, выраженное через координаты его точки А, запишем так:

$$x = (r + \Delta r)\varphi_E + (r + a)\cos\varphi_E, \quad (2)$$

$$y = r + a - (r + a)\sin\varphi_E, \quad (3)$$

где:  $\varphi_E$  - угол поворота колеса, катящегося со скольжением.

С появлением регулярного скольжения колеса его угловая скорость изменится в сторону уменьшения. Поэтому принимаем к сведению такую зависимость:

$$\varphi_E = \omega_E t. \quad (4)$$

Выразим координаты циклоиды через кинематический показатель и коэффициент скольжения. Для этого воспользуемся тем, что:

$$r + a = \lambda r \Delta r = \varepsilon r (1 - \varepsilon)^{-1}.$$

Тогда, произведя подстановку в предыдущие уравнения, получим:

$$x = r \varphi_E (1 - \varepsilon)^{-1} + \lambda r \cos \varphi_E, \quad (5)$$

$$y = \lambda r (1 - \sin \varphi_E). \quad (6)$$

Циклоиды, описываемые данным уравнением, в зависимости от числового значения коэффициента скольжения по форме могут быть различными. Основной формой, естественно, остается удлиненная циклоида. Но из выражения (5) видно, что по мере увеличения коэффициента скольжения условный радиус качения колеса возрастает, приводя к вырождению характерной для удлиненной циклоиды замкнутой петли. При условии, когда в результате увеличения коэффициента скольжения становится возможным существование следующего равенства (6), эта петля циклоиды стягивается в точку. В данном случае траекторией наконечника станет уже обыкновенная циклоида.

$$r + \Delta r = r(1 - \varepsilon) \Rightarrow r + a = \lambda r. \quad (7)$$

Для других условий, когда скольжение колеса увеличивается так, что имеет место неравенство:

$$r(1 - \varepsilon) > \lambda r, \quad (8)$$

траекторией наконечника становится укороченная циклоида.

Из выражения (7) можно определить значение граничного коэффициента скольжения, разделяющего две формы циклоиды:

$$\varepsilon_0 = (\lambda - 1)\lambda^{-1}. \quad (9)$$

Следовательно, в зависимости от величины коэффициента скольжения колеса, траекторией наконечника лункоделателя может стать одна из трех видов циклоид:

удлиненная, если  $0 < \varepsilon < \varepsilon_0 = (\lambda - 1)\lambda^{-1}$ ,

обыкновенная, если  $\varepsilon = \varepsilon_0$ ,

и, наконец, укороченная, когда  $\varepsilon > \varepsilon_0$ .

Используя формулу (9), определим ориентировочные значения граничных коэффициентов скольжения. Принятые в этих расчетах в качестве исходных данных радиусы колес и соответствующие агротехнической глубине заделки семян вылеты лункоделателей в практическом отношении представляются наиболее предпочтительными (табл. 1).

Таблица 1

Граничные коэффициенты скольжения колес

№	г, м	а, м	$\lambda$	$\varepsilon_0$	№	г, м	а, м	$\lambda$	$\varepsilon_0$
1	0,25	0,04	1,16	0,138	5	0,30	0,08	1,27	0,212
2	0,25	0,06	1,24	0,194	6	0,35	0,04	1,11	0,099
3	0,30	0,04	1,13	0,115	7	0,35	0,06	1,17	0,145
4	0,30	0,06	1,20	0,166	9	0,35	0,08	1,23	0,187

Из данной таблицы видно, что подавляющее большинство граничных коэффициентов пре-определяют весьма высокую степень скольжения колесных лункоделателей, которую нельзя считать приемлемой для практики. Отсюда становится очевидным то, что обыкновенные и укороченные циклоиды как формы движения лункоделателей в контексте поставленных задач не имеют прикладного значения. Поэтому только движение наконечника по удлиненной циклоиде заслуживает детального рассмотрения.

Определим скоростные характеристики движения наконечника на участке траектории, проходящей через почву. Взяв производную уравнения (5) по времени, найдем скорость наконечника по направлению движения колеса:

$$\dot{x} = r \omega_E (1 - \varepsilon)^{-1} - \lambda r \omega_E \sin \varphi_E. \quad (10)$$

Скорость в точке  $A_1$ , лежащей на поверхности почвы, связана с условием:

$$y_1 = a = r\lambda(1 - \text{Sin}\varphi_E). \quad (11)$$

Отсюда следует:

$$\text{Sin}\varphi_E = \lambda^{-1}. \quad (12)$$

Тогда:

$$\dot{x}_1 = r\omega_E(1 - \varepsilon)^{-1} - \lambda r\omega_E \lambda^{-1}.$$

$$\dot{x}_1 = r\omega_E \varepsilon(1 - \varepsilon)^{-1}.$$

Но так как:

$$V = \omega_E(r + \Delta r) = r\omega_E(1 - \varepsilon)^{-1}, \quad (13),$$

то искомая скорость будет:

$$\dot{x}_1 = \varepsilon V. \quad (14)$$

Определим в той же точке скорость движения наконечника по вертикали:

$$\dot{y}_1 = -\lambda r\omega_E \text{Cos}\varphi_E = -\lambda r\omega_E \sqrt{1 - \lambda^{-2}},$$

$$\dot{y}_1 = -r\omega_E \sqrt{\lambda^2 - 1}.$$

В конечном итоге с учетом выражения (13) получим формулу искомой скорости:

$$\dot{y}_1 = -V(1 - \varepsilon)\sqrt{\lambda^2 - 1}. \quad (15)$$

Скорость наконечника по горизонтали в самой нижней точке траектории находим при условии,

когда  $\varphi_E = \frac{\pi}{2}$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= r\omega_E(1 - \varepsilon)^{-1} - \lambda r\omega_E = r\omega_E((1 - \varepsilon)^{-1} - \lambda), \\ \dot{x}_2 &= -V(\lambda(1 - \varepsilon) - 1). \end{aligned} \quad (16)$$

Кстати, из этого уравнения видно, что если:

$$\varepsilon = (\lambda - 1)\lambda^{-1} \Rightarrow \varepsilon_0,$$

то скорость наконечника по горизонтали становится равной нулю и удлиненная цик-лоида вырождается в обыкновенную.

По мере увеличения коэффициента скольжения от нуля до его граничного значения петля циклоиды сужается, а ее узловая точка опускается вниз. Вместе с этим уменьшается и зона деформации почвы, зависящая, как известно, от ширины петли. Наибольшая ширина циклоидной петли располагается в том горизонте почвы, где скорость наконечника по горизонтали равняется нулю. Пусть это будет взятая на нисходящей траектории точка  $A_p$ , располагающаяся в слое почвы на глубине  $Dg$  (рис.1). Тогда согласно уравнению (6) запишем:

$$y_i = a - \Delta r = \lambda r(1 - \text{Sin}\varphi_{Ei}). \quad (17)$$

Отсюда находим:

$$\text{Sin}\varphi_{Ei} = (\lambda(1 - \varepsilon))^{-1}; \quad \varphi_{Ei} = \text{arcSin}(\lambda - \varepsilon\lambda)^{-1}, \quad (18)$$

Выразим ширину петли через горизонтальное перемещение наконечника:

$$\frac{l}{2} = x_i - x_2. \quad (19)$$

Причем, как известно,

$$x_i = r\varphi_{Ei}(1 - \varepsilon) + \lambda r \text{Cos}\varphi_{Ei},$$

$$\text{Cos}\varphi_{Ei} = \sqrt{1 - (\lambda - \varepsilon\lambda)^{-2}}.$$

Вследствие этого получим:

$$x_i = r(1 - \varepsilon)^{-1} \left( \text{arcSin}(\lambda - \varepsilon\lambda)^{-1} + \sqrt{\lambda^2(1 - \varepsilon^2) - 1} \right).$$

При повороте лункоделателя на угол  $\pi \leq 2$  найдем, что:

$$x_2 = \pi r(2(1-\varepsilon))^{-1}.$$

Подставляя выражения для  $x_1$  и  $x_2$  в (5.48), находим:

$$l = 2r(1-\varepsilon)^{-1} \left( \arcsin(\lambda - \varepsilon\lambda)^{-1} + \sqrt{\lambda^2(1-\varepsilon)^2 - 1} - \frac{\pi}{2} \right). \quad (20)$$

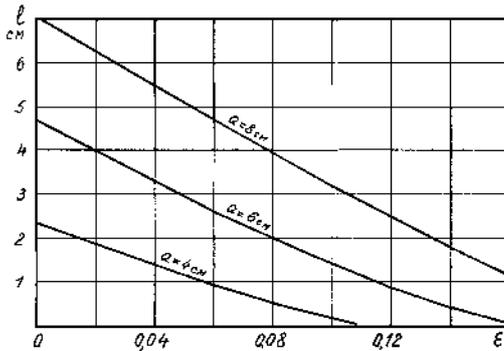


Рис 2. Влияние длины лункоделателя и коэффициента скольжения на параметры траектории наконечника

Представление о влиянии скольжения колеса на длину деформации почвы лункообразователями дают графические аналоги полученного уравнения (рис. 2). Построенные для колеса радиусом 0,3 м и заделки семян на глубину 0,04, 0,06, 0,08 м. графики показывают уменьшение зоны деформации почвы при увеличении коэффициента скольжения.

Кроме того, скольжение колеса в небольших пределах, не превышающих 10-12%, в технологическом отношении представляется вполне полезным явлением, так как в некотором смысле способствует улучшению режима лункообразования. Действительно, сужение петли траектории за счет скольжения означает почти вертикальное перемещение наконечника в почве, что способствует более концентрированному уплотнению почвы в подсеменном слое.

Скольжение колеса изменяет и другие показатели лункообразования. В частности, с увеличением коэффициента скольжения увеличивается время уплотняющего действия лункоделателя. Об этом свидетельствует следующее уравнение:

$$\Delta t_E = r(\pi - 2\arcsin\lambda^{-1})(2V(1-\varepsilon))^{-1}. \quad (21)$$

Найдем ординату узловой точки петли циклоиды:

$$y_E = \lambda r \left( 1 - \sin \left( \frac{1 - \sqrt{1 + 2\lambda^2(1-\varepsilon)^2} - \lambda\pi(1-\varepsilon)}{\lambda(1-\varepsilon)} \right) \right). \quad (22)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из анализа этого уравнения, повышение скольжения колеса вызывает опускание узловой точки траектории вниз. Наибольший интерес представляет условие качения колеса, при котором точка замыкания петли размещения на линии поверхности поля, отмечая место входа и выхода наконечника из почвы. Определим коэффициент скольжения, удовлетворяющий этому условию. Для этого, пользуясь уравнением циклоиды, запишем горизонтальную координату точки для ниспадающей ветви:

$$x_i = ry_{Ei}(1-\varepsilon)^{-1} + \lambda r \cos\varphi_{Ei}. \quad (23)$$

Выражение той же координаты для восходящей ветви:

$$x_1 = r(\pi - \varphi_{Ei})(1-\varepsilon)^{-1} + \lambda r \cos(\pi - \varphi_{Ei}). \quad (24)$$

Приравнивая эти выражения между собой, получим:

$$\begin{aligned} r\varphi_{Ei}(1-\varepsilon)^{-1} + \lambda r \cos\varphi_{Ei} &= r(\pi - \varphi_{Ei})(1-\varepsilon)^{-1} + \lambda r \cos(\pi - \varphi_{Ei}), \\ 2\varphi_{Ei} + 2\lambda \cos\varphi_{Ei}(1-\varepsilon) &= \pi. \end{aligned}$$

Решая это выражение относительно коэффициента скольжения, находим:

$$\varepsilon = 1 - (\pi - 2\varphi_{Ei})(2\lambda \cos\varphi_{Ei})^{-1}. \quad (25)$$

Так как для точки траектории, одновременно принадлежащей и поверхности почвы, согласно выражению (12) имеют место зависимости

$$\varphi_{Ei} = \arcsin \lambda^{-1}; \quad \cos \varphi_{Ei} = \sqrt{1 - \lambda^{-2}},$$

то при подстановке их в уравнение (5.54) в конечном итоге получим:

$$\varepsilon_a = 1 - \left( \pi - 2 \arcsin \lambda^{-1} \right) \left( 2 \sqrt{\lambda^2 - 1} \right)^{-1}. \quad (26)$$

Коэффициент скольжения, выражаемый данной формулой, также является граничным, разделяющим траектории на две различные группы: первая - циклоиды с узловыми точками, располагающимися над поверхностью почвы, вторая - циклоиды с замыкающейся петлей внутри почвы. Движение наконечника по циклоидам первой группы характерно для условия, когда

$$0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_a. \quad (27)$$

Что касается циклоид второй группы, то они могут проявляться лишь в сравнительно узком интервале коэффициентов скольжения, предопределяемом глубиной заделки семян (28), а именно:

$$\varepsilon_0 > \varepsilon > \varepsilon_a. \quad (28)$$

Рассматриваемые граничные коэффициенты функционально зависят от кинематического показателя, определяемого радиусом колеса и длиной лункоделателя. При малых кинематических показателях как это хорошо видно на графиках (3,4), циклоиды с внутренними узловыми точками (заштрихованная зона) появляются уже при 8-процентном (0,08) скольжении колеса. В пределах кинематических показателей, выражаемых числами 1,16-1,24, аналогичный тип циклоид формируется при скольжении 10-18% ( $\varepsilon = 0,10-0,18$ ).

При больших кинематических показателях и малых коэффициентах скольжения основной формой траектории наконечника становится циклоида с наружными узловыми точками.

К практически значимым кинематическим характеристикам принадлежит также скорость движения лункообразователя в почвенном слое. В зависимости от величины этой скорости уплотняемая лункоделателем почва может проявлять в той или иной мере как пластические, так и упругие свойства. С увеличением скорости заглубления лункоделателя упругость деформируемой им почвы возрастает. Проявляющаяся в момент образования лунок упругость почвы должна приводить к некоторому снижению плотности почвы в подсеменном ложе, что не способствует образованию под ним капиллярности. Поэтому желательно, чтобы скорость движения лункоделателя в почве была относительно небольшой.

Уплотнение почвы связано преимущественно с вертикальной составляющей перемещения лункоделателя. Его наибольшая скорость по вертикали согласно выражению (17) относится к точкам траектории, расположенным в верхних горизонтах надсеменного слоя почвы. Причем передаточная функция от скорости движения колеса к скорости уплотнения лункоделателем почвы зависит исключительно от кинематического фактора, так как влияние на эту скорость

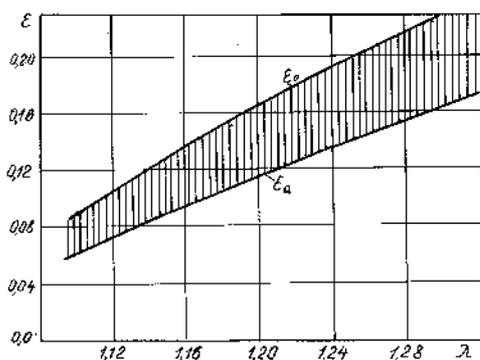


Рис 3. Графики граничных коэффициентов скольжения колеса

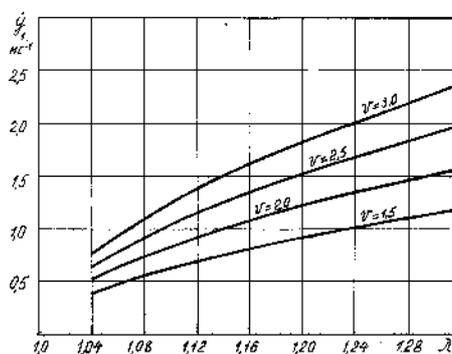


Рис 4. Скорости наконечника лункоделателя по вертикали при входе его в почву

скольжения колеса несущественно. С увеличением кинематического показателя скорость уплотнения почвы растет. Однако она всегда значительно меньше скорости движения колеса. Так, например, для условий, определяемых кинематическим показателем  $l = 1,12$  и коэффициентом скольжения  $e = 0,08$ , максимальная скорость уплотнения почвы становится в 2,5 раза и при показателе  $l = 1,2$  в 1,63 раза меньше скорости колеса. По мере заглубления лункоделателя в почву его скорость последовательно снижается до нуля.

Малые скорости уплотнения почвы в ложе семян и пониженная скорость движения лункоделателя в почве способствуют качественной заделке семян. В отличие от ротационно-лункового посева работа на повышенных скоростях сошниковых сеялок сопровождается интенсивным выбросом почвы из непрерывно образующихся бороздок, что является сдерживающим фактором повышения эффективности работы традиционных посевных машин.

### **ВЫВОДЫ**

1. Равномерное скольжение колеса не ведет к изменению формы циклоиды, однако по мере увеличения коэффициента скольжения замкнутая часть циклоиды сужается, а ее узловая точка опускается вниз.
2. Существуют границы предельных коэффициентов скольжения, в интервале которых узловые точки циклоид попадают исключительно внутрь надсеменного слоя почвы.
4. Установлено, что с увеличением кинематического показателя скорость уплотнения почвы растет. Однако она всегда значительно меньше скорости движения колеса.
5. Малые скорости уплотнения почвы в ложе семян и пониженная скорость движения лункоделателя в почве способствуют качественной заделке семян.

Data prezentării articolului – **07.06.2010**