

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПЛАСТА ПОЧВЫ ПО РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИСКОВОГО ПРЕДПЛУЖНИКА

И.С. Крук,

проректор по научной работе – директор НИИМЭСХ БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Ф.И. Назаров,

доцент каф. технологий и механизации животноводства БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

И.С. Назаров,

зам. начальника КБ РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

Н.Г. Бакач,

*заместитель генерального директора по научной работе
РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук, доцент*

Ю.В. Чигарев,

профессор каф. теоретической механики и теории механизмов и машин, докт. физ.-мат. наук, профессор

В статье рассмотрено движение пласта почвы по рабочей поверхности дискового предплужника. Получены теоретические зависимости для определения кинематических параметров движения пласта с учетом конструктивных параметров дискового предплужника, технологических параметров его установки, а также физико-механические свойства почвы.

Ключевые слова: диск, предплужник, движение, скорость, пласт, частица, почва, угол крена, угол атаки, радиус кривизны, сила.

The article deals with the movement of the soil layer on the working surface of the disk skim colter. Theoretical dependences for determining the kinematic parameters of the layer movement adapted to the design parameters of the disk skim colter and the setup technological parameters, as well as physical and mechanical properties of the soil are obtained.

Key words: disc, skim colter, movement, speed, layer, particle, soil, lean angle, approach angle, radius of curvature, force.

Введение

Вспашка с оборотом пласта, несмотря на высокие энергетические затраты, продолжает оставаться преобладающим приемом основной обработки почвы в республике. Качественная и своевременная основная обработка позволяет не только сохранить накопленную почвой влагу, заложить основу будущего урожая, но и снизить затраты на проведение последующих почвообрабатывающих операций, система которых определяется типом и структурой почвы. При вспашке происходит оборачивание верхних и нижних слоев почвы, которые перемещаются в вертикальном направлении, а почвенный пласт крошится, разрыхляется и перемешивается. При этом в пахотный слой заделываются пожнивные остатки растений, дернина, органические и минеральные удобрения, мелиоранты. Однако не на всех агрофонах можно достигнуть одинаковых результатов. На почвах дернистых, связанных и сильно засоренных сорняками, пласт плохо разрыхляется, а верхний травянистый слой пласта в неполном объеме укладывается вниз на дно борозды, в результате чего на стыках

проходов пахотного агрегата зачастую в большом количестве видны незаделанные сорняки, которые после пахоты продолжают расти, усложняя проведение последующих почвообрабатывающих и посевных операций. Для обеспечения равномерной и полной заделки растительных остатков в почву и исключения отрицательного воздействия растительных остатков на последующую поверхностную обработку и посев, вспашку производят плугами с установленными дополнительными приспособлениями (предплужниками, приставками и др.) [1-9]. Предплужники устанавливаются перед основным корпусом плуга. В процессе работы он подрезает 2/3 ширины основного пласта на глубину 0,08-0,12 м и укладывает его на дно борозды, образованной предыдущим проходом корпуса плуга. В результате основной пласт, будучи освобожденным от большей части дернины, интенсивнее крошится и полнее заделывает растительные остатки, обеспечивая выровненность поверхности поля.

В настоящее время используются предплужники различных конструкций, однако широкое применение получили лемешные и дисковые. Дисковые рабочие

органы меньше подвержены забиванию сорняками, соломой и другими волокнистыми материалами, чем поступательно движущиеся рабочие органы [11]. Кроме того, при их использовании на сухих спекающихся почвах не происходит образование таких крупных глыб, какие возникают при работе лемешных рабочих органов. Однако дисковые рабочие органы хуже, чем лемешные, выполняют оборот пласта. По залипанию и тяговому усилию лемешные и дисковые рабочие органы являются равноценными.

При неправильной настройке дисковых предплужников пласт может сгруживаться или его часть может не укладываться на дно борозды, что приводит к снижению качества выполнения технологического процесса и увеличению его энергоемкости.

Целью данной работы является теоретическое обоснование влияния конструктивных параметров дискового предплужника и технологических параметров его установки на дальность отбрасывания частиц почвы.

Основная часть

Рабочим органом дискового предплужника, общий вид которого представлен на рисунке 1, является вогнутый сферический диск [11, 12]. Данная конструкция позволяет при работе изменять глубину пахотного слоя, углы крена и атаки, которые влияют на кинематические параметры движения пласта по поверхности диска и определяют дальность отбрасывания частиц почвы. Кроме того, на дальность отбрасывания частиц почвы влияет скорость движения агрегата, тип и параметры рабочей поверхности диска, а также тип и состояние почвы.

Вопросам проектирования, испытаний и эксплуатации почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин с дисковыми рабочими органами, исследованиям закономерностей движения почвенных пластов и частиц по рабочим поверхностям почвообрабатывающих дисковых орудий посвящены научные труды Горячкина В.П., Синеокова Г.Н., Летошнева М.Н., Клочкова А.В., Нормирзаева А.Р. и других ученых.

Для изучения закономерностей движения почвенного пласта по рабочей поверхности дискового предплужника обычно принимаются следующие допущения:

- скорость агрегата со временем не изменяется;
- окружная скорость диска постоянна (диск вращается без проскальзывания и остановок).

Почвенный пласт подрезается кромкой диска и движется по его рабочей поверхности (рис. 2). Данное движение рассматривается как относительное (система отсчета связана с рабочей поверхностью, ось $\tau-\tau$ – касательная к окружности, $n-n$ – нормаль). При подрезании слоя почвы величина относительной скорости $v_{дво}$ равна

$$v_{дво} = v_{агр} \sin \alpha,$$

где $v_{агр}$ – скорости агрегата, м/с;
 α – угол атаки, град [10-12].

Слой почвы начинает двигаться по рабочей поверхности диска со скоростью $v_{дво} \cos \gamma$ (γ – угол крена диска, град [10-12]).

Рассмотрим движение почвенного пласта массой m_n по поверхности диска (дуга AB длиной l). В верхней точке B диска (рис. 2) на пласт действуют: сила тяжести G , силы инерции $F_{и1}$ и $F_{и2}$, сила реакции поверхности диска N_d , сила трения $F_{тр}$ и сила, затрачиваемая на перемещение пласта $F_{дв} = m_n a_{дв}$ ($a_{дв}$ – ускорение движения пласта, м/с²).

Сила тяжести, действующая на пласт, равна

$$G = m_n g, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Данную силу разложим на две составляющие:

– направленную по оси $\tau-\tau$ $G' = m_n g \sin \psi$;

– направленную по нормали $n-n$ $G'' = m_n g \cos \psi$,

где ψ – угол наклона касательной, проведенной к поверхности диска в точке B к горизонту, град.)

Из рисунка 2 видно, что угол наклона касательной будет равен

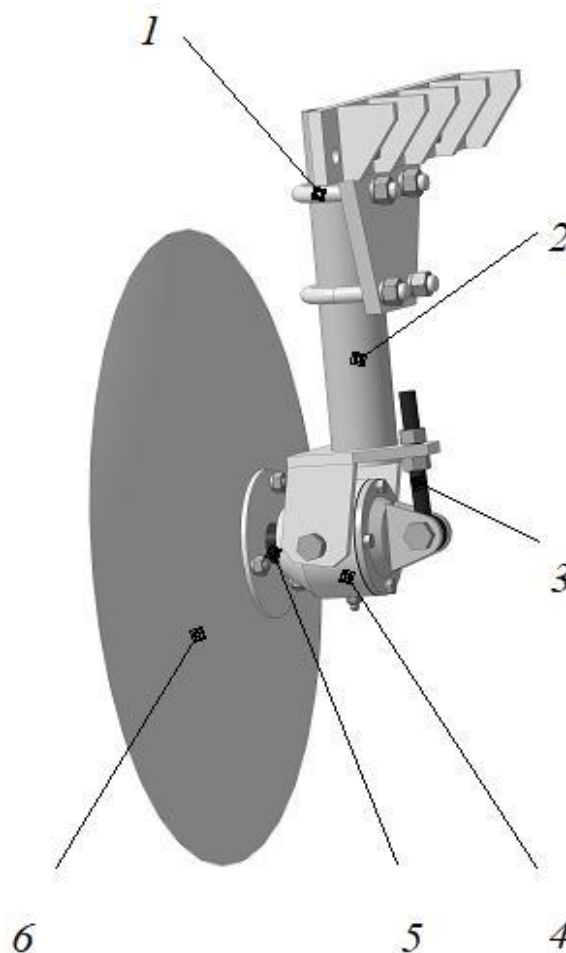


Рисунок 1. Дисковый предплужник с изменяемыми углами атаки и крена: 1 – скоба; 2 – стойка; 3 – натяжник; 4 – подшипниковый узел; 5 – ось; 6 – сферический диск

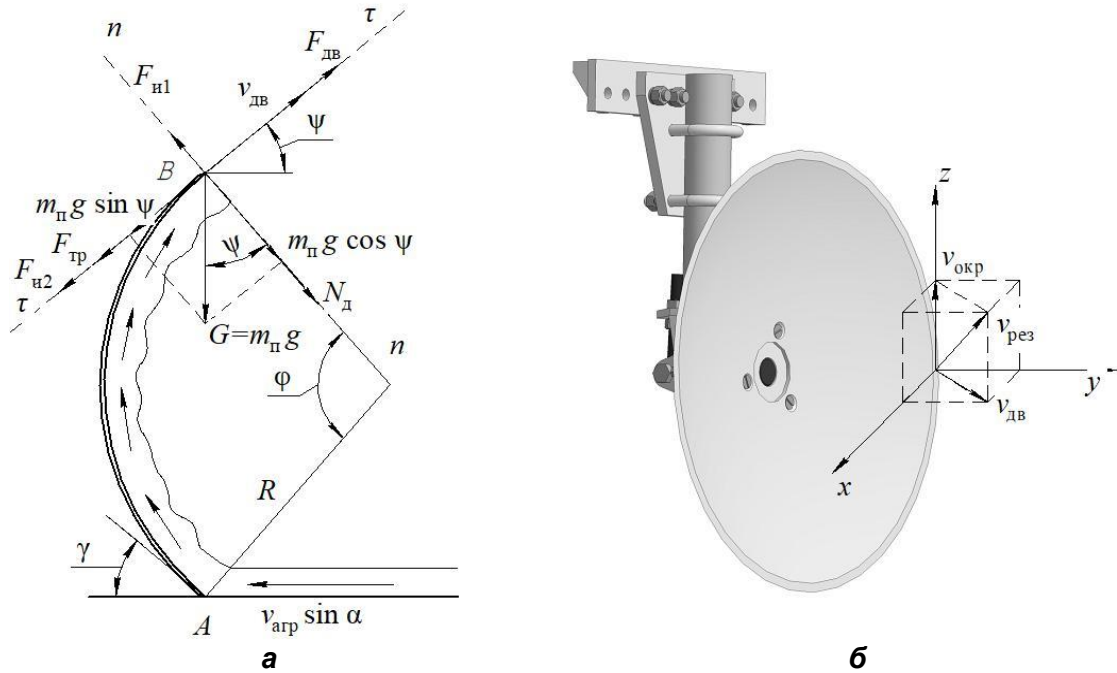


Рисунок 2. Расчетная схема движения почвы по рабочей поверхности дискового предплужника: а – силы, действующие на частицу почвы; б – определение результирующей скорости движения частицы почвы

$$\psi = 180 - \varphi - \gamma, \quad (2)$$

где φ – центральный угол, опирающийся на дугу AB , град.

Сила инерции пласта почвы по нормали $n-n$

$$F_{н1} = \frac{m_n v_{дв}^2 \sin^2 \psi}{R}, \quad (3)$$

где $v_{дв}$ – скорость движения пласта, м/с;
 R – радиус кривизны диска, м.

Сила инерции пласта почвы по касательной $\tau-\tau$

$$F_{н2} = \frac{m_n v_{окр}^2}{R},$$

где $v_{окр}$ – окружная скорость движения пласта, м/с.

Окружная скорость движения пласта зависит от положения частицы почвы на диске и изменяется в пределах от 0 до $2v_{агр}$.

Сила трения $F_{тр}$, направленная по касательной к поверхности отвала, определяется по формуле

$$F_{тр} = f_{тр} N_d, \quad (4)$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения почвы о поверхность диска [12-14].

Запишем проекции сил, действующих на пласт в точке B , на нормаль $n-n$ и касательную $\tau-\tau$ к поверхности отвала, получим уравнения равновесия в следующем виде:

$$F_{н1} - m_n g \cos \psi - N_d = 0, \quad (5)$$

$$F_{дв} - F_{тр} - m_n g \sin \psi - F_{н2} = 0. \quad (6)$$

Из равенства (5) с учетом формулы (3) при условии, что $N_d = 0$, можно определить критическую для рассматриваемого поперечного сечения скорость движения агрегата, при которой пласт почвы будет двигаться вдоль рабочей поверхности диска без сгруживания (условие отбрасывания пласта дисковым предплужником без сгруживания):

$$\frac{\sqrt{Rg \cos \psi}}{\sin \psi \sin \alpha} < v_{агр}. \quad (7)$$

Дальность отбрасывания частиц почвы зависит от величины и направления результирующей скорости $v_{рез}$ движения пласта по рабочей поверхности диска, состоящей из относительной скорости $v_{дв}$ движения пласта и окружной скорости $v_{окр}$, углов крена и атаки диска. Кроме того, пласт почвы двигается вместе с агрегатом и имеет переносную скорость $v_{агр}$. Эта скорость определяет отброс частиц по направлению движения.

Для определения относительной скорости движения пласта из уравнения (5) выразим силу N_d и подставим в формулу (6). Учитывая равенства (3) и (4), получим:

$$m_n a_{дв} = f_{тр} \frac{m_n v_{дв}^2 \sin^2 \psi}{R} - f_{тр} m_n g \cos \psi + m_n g \sin \psi + \frac{m_n v_{окр}^2}{R}. \quad (8)$$

После деления выражения (8) на m_n и последующих преобразований получим:

$$\frac{v_{дв} dv_{дв}}{dx} = f_{тр} \frac{v_{дв}^2 \sin^2 \psi}{R} - f_{тр} g \cos \psi + g \sin \psi + \frac{v_{окр}^2}{R}, \quad (9)$$

$$\int \frac{v_{дв} dv_{дв}}{f_{тр} \frac{v_{дв}^2 \sin^2 \psi}{R} - f_{тр} g \cos \psi + g \sin \psi + \frac{v_{окр}^2}{R}} = \int dx, \\ \frac{R}{2f_{тр} \sin^2 \psi} \times \\ \times \int \frac{d \left(f_{тр} \frac{v_{дв}^2 \sin^2 \psi}{R} - f_{тр} g \cos \psi + g \sin \psi + \frac{v_{окр}^2}{R} \right)}{f_{тр} \frac{v_{дв}^2 \sin^2 \psi}{R} - f_{тр} g \cos \psi + g \sin \psi + \frac{v_{окр}^2}{R}} = \\ = \int dx, \quad (10)$$

Проинтегрировав данное уравнение, получим:

$$\frac{R}{2f_{тр} \sin^2 \psi} \ln \left| f_{тр} \frac{v_{дв}^2 \sin^2 \psi}{R} - f_{тр} g \cos \psi + g \sin \psi + \frac{v_{окр}^2}{R} \right| = x + C_1. \quad (11)$$

При начальных условиях $x_0 = 0$ и $v_{дв0} = v_{арп} \sin \alpha$, постоянная интегрирования C_1 будет равна

$$C_1 = \frac{R}{2f_{тр} \sin^2 \psi} \ln \left| f_{тр} \frac{v_{дв0}^2 \sin^2 \psi}{R} - f_{тр} g \cos \psi + g \sin \psi + \frac{v_{окр}^2}{R} \right|. \quad (12)$$

Тогда формула (11) с учетом равенства (12) примет следующий вид:

$$\frac{R}{2f_{тр} \sin^2 \psi} \ln \left| f_{тр} \frac{v_{дв}^2 \sin^2 \psi}{R} - f_{тр} g \cos \psi + g \sin \psi + \frac{v_{окр}^2}{R} \right| = x + \frac{R}{2f_{тр} \sin^2 \psi} \times \\ \times \ln \left| f_{тр} \frac{v_{дв0}^2 \sin^2 \psi}{R} - f_{тр} g \cos \psi + g \sin \psi + \frac{v_{окр}^2}{R} \right|,$$

или

$$v_{дв}^2 = e^{\frac{2f_{тр} \sin^2 \psi}{R} x} \left(v_{дв0}^2 - \frac{Rg \cos \psi}{\sin^2 \psi} + \frac{Rg}{f_{тр} \sin \psi} + \frac{v_{окр}^2}{f_{тр} \sin^2 \psi} \right) + \frac{Rg \cos \psi}{f_{тр} \sin^2 \psi} - \frac{Rg}{f_{тр} \sin \psi} - \frac{v_{окр}^2}{f_{тр} \sin^2 \psi}.$$

Скорость частиц почвы в момент отрыва от кромки диска определим при условии $x = l$:

$$v_{дв} = \left(e^{\frac{2f_{тр} \sin^2 \psi}{R} l} \left[v_{дв0}^2 - \frac{Rg \cos \psi}{\sin^2 \psi} + \frac{Rg}{f_{тр} \sin \psi} + \frac{v_{окр}^2}{f_{тр} \sin^2 \psi} \right] + \frac{Rg \cos \psi}{f_{тр} \sin^2 \psi} - \frac{Rg}{f_{тр} \sin \psi} - \frac{v_{окр}^2}{f_{тр} \sin^2 \psi} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Подставив в формулу (13) равенства (2) и проведя ряд преобразований, получим:

$$v_{дв} = \left(e^{\frac{2f_{тр} \sin^2 (\varphi + \gamma)}{R} l} \left[v_{арп}^2 \sin^2 \alpha + \frac{Rg \cos (\varphi + \gamma)}{\sin^2 (\varphi + \gamma)} + \frac{Rg}{f_{тр} \sin (\varphi + \gamma)} + \frac{v_{окр}^2}{f_{тр} \sin^2 (\varphi + \gamma)} \right] - \frac{Rg \cos (\varphi + \gamma)}{f_{тр} \sin^2 (\varphi + \gamma)} - \frac{Rg}{f_{тр} \sin (\varphi + \gamma)} - \frac{v_{окр}^2}{f_{тр} \sin^2 (\varphi + \gamma)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

На основании полученной формулы можно определить скорость частицы почвы в момент отрыва от поверхности диска в зависимости от углов атаки и крена, геометрических параметров диска, скорости агрегата с учетом физико-механических свойств почвы.

Результирующую скорость в момент отрыва от поверхности диска можно определить по формуле

$$v_{рез} = \sqrt{v_{окр}^2 + v_{дв}^2}. \quad (15)$$

Учитывая зависимость ([8], с. 56), определим дальность отбрасывания частицы

$$x_{п} = \frac{v_{рез}}{2g} (v_{рез} \sin^2 (\varphi + \gamma) - \cos (\varphi + \gamma)) \times \\ \times \sqrt{v_{рез}^2 \sin^2 (\varphi + \gamma) + 2gh}, \quad (16)$$

где h – расстояние от поверхности почвы до верхней кромки диска, м.

На рисунке 3 представлен график зависимости дальности отбрасывания частиц почвы дисковым предплужником от углов крена и атаки при неизменной силе трения и без учета взаимодействия частиц пласта (диаметр диска $d_d = 0,45$ м, радиус кривизны диска $R = 0,65$ м).

Из анализа полученного графика следует, что с увеличением углов крена γ и атаки α дальность отбрасывания частиц почвы увеличивается, причем большее влияние оказывает величина угла крена диска.

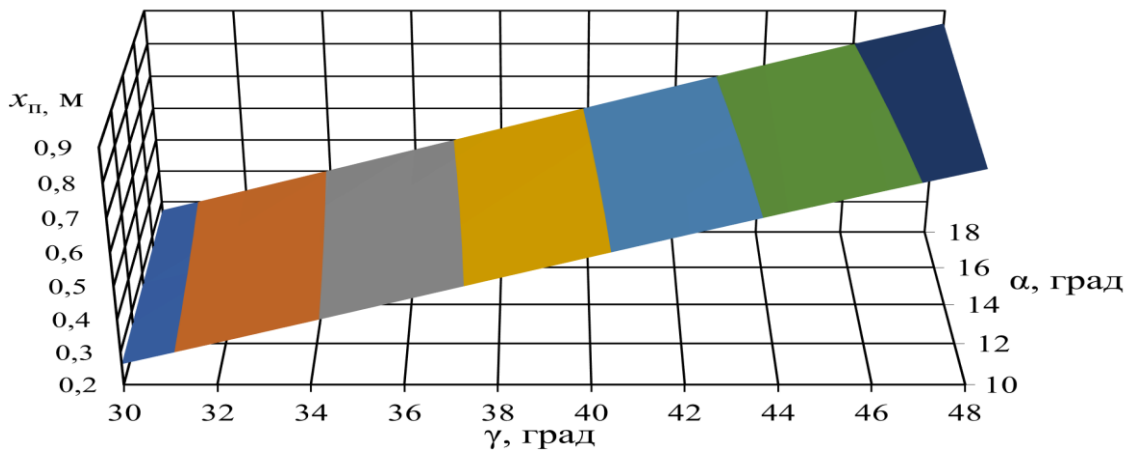


Рисунок 3. График зависимости дальности отбрасывания частиц почвы x_n дисковым предплужником от углов крена γ и атаки α

Заключение

Рассмотрен процесс движения почвенной части по рабочей поверхности дискового предплужника. При условиях отсутствия проскальзывания диска, постоянства скорости движения агрегата получены зависимости для определения кинематических параметров движения частиц почвы по поверхности сферического диска предплужника в зависимости от его конструктивных параметров и технологических параметров установки на раме плуга с учетом физико-механических свойств почвы. Отмечено, что на дальность отбрасывания почвенных частиц существенное влияние оказывают тип и состояние почвы, угол атаки, угол крена, диаметр диска и его радиус кривизны.

Данные зависимости позволяют на стадии проектирования обосновать рациональные параметры установки дисковых предплужников на раме плуга с целью обеспечения качественной вспашки различных агрофонов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых и усовершенствовании существующих конструкций плугов конструкторскими и техническими отделами предприятий сельскохозяйственного машиностроения, а также научных организаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горячкин, В.П. Собрание сочинений: в 3 т. / В.П. Горячкин; под ред. Н.Д. Лучинского. – М.: Колос, 1965. – Т. 1. – 720 с.
2. Зимарин, С.В. Анализ движения почвенной частицы по поверхности дискового корпуса плуга / С.В. Зимарин, Н.А. Сердюкова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 2-2 (13-2). – С. 128-132.
3. Искендеров, Э.Б. К исследованию энергетических показателей дискового плуга-рыхлителя / Э.Б. Искендеров // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 3 (77). – С. 98-100.

4. Нормирзаев, А.Р. Отбрасывание почвы сферическим дисковым предплужником / А.Р. Нормирзаев, Б.М. Нишонов // Вестник Науки и Творчества. – 2017. – № 1(13). – С. 86-90.

5. Летошнев, М.Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет, проектирование и испытание / М.Н. Летошнев – М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1955. – 764 с.

6. Обзор рабочих органов дисковой борона / В.Д. Липин [и др.] // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2020. – № 2 (11). – С. 104-110.

7. Обоснование конструктивных параметров дискового плуга / С.Г. Руднев, И.А. Петунина, И.В. Вульшинская, М.Д. Сарксян // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 6 (92). – С. 137-141.

8. Проектирование катковых приставок для пахотных агрегатов. Рекомендации / И.С. Крук [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2017. – 104 с.

9. Романцов, Ю.Ф. Дисковый предплужник для заделки измельченной соломы в почву / Ю.Ф. Романцов, В.А. Пшеничный // Проблемы механизации агрохимического обеспечения сельского хозяйства. – 2016. – № 10. – С. 220-222.

10. Сельскохозяйственные машины / А.В. Клочков [и др.]; под ред. Р.Я. Лифшица. – Минск: Ураджай, 1997. – 494 с.

11. Синеоков, Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г.Н. Синеоков, И.М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 331 с.

12. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин / В.И. Александров [и др.]; под ред. А.В. Красниченко. – М.: Машиностроение, 1961. – 864 с.

13. Физические основы механики почв / И.М. Панов, В.И. Ветохин. – К.: Феникс, 2008. – 266 с.

14. Чигарев, Ю.В. Математические основы механики почв: учеб. пособие / Ю.В. Чигарев, П.Н. Синкевич. – Минск: Технопринт, 2004. – 164 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 18.08.2022