

## ОБОСНОВАНИЕ ТЯГОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПЛУГА ДЛЯ ЯРУСНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

**Гниломёдов Владимир Григорьевич**, канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВПО «Самарская государственная сельскохозяйственная академия».

446436, Самарская область, г. Кинель, ул. Ново-Садовая, д. 75.

Тел.: 8(846 63) 4-63-46.

**Сазонов Дмитрий Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВПО «Самарская государственная сельскохозяйственная академия».

446441, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Спортивная, 10.

Тел.: 8(84663) 46-3-46.

**Ерзамаев Максим Павлович**, ст. преподаватель кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВПО «Самарская государственная сельскохозяйственная академия».

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Элитная, д. 1.

Тел.: 8(846 63) 4-64-10.

**Ключевые слова:** комбинированная, ярусная, обработка, почва, плужный, корпус, рыхлитель, почвообрабатывающий, агрегат, тяговое, сопротивление.

*Дано теоретическое обоснование тягового сопротивления комбинированного плуга для ярусной обработки почвы.*

Наиболее перспективным способом введения в севооборот необрабатываемых земель и повышения плодородия почвы является ярусная обработка. Одним из показателей высокого эффекта работы при этом является качественное рыхление каждого из слоев почвы. Однако реализация существующих технологических приемов ярусной обработки почвы требует высоких энергетических затрат, что сдерживает их внедрение в производство.

*Цель исследования* – теоретическое обоснование тягового сопротивления комбинированного плуга для ярусной обработки почвы, *задача исследования* – изучить влияние конструктивных и технологических параметров почвообрабатывающих рабочих органов, свойств обрабатываемой почвы и скорости движения агрегата на тяговое сопротивление комбинированного плуга.

Тяговое сопротивление разработанного комбинированного плуга для ярусной обработки почвы с рыхлением подпахотного горизонта является основным показателем, определяющим энергетические затраты технологического процесса.

Согласно исследованиям [1, 2, 6, 7, 9, 10] по определению тягового сопротивления почвообрабатывающих рабочих органов, технологический процесс комбинированного плуга при взаимодействии с обрабатываемым слоем почвы будет представлять работу лемешно-отвального корпуса верхнего яруса и рыхлящего безлемешно-отвального корпуса нижнего яруса (рис. 1).

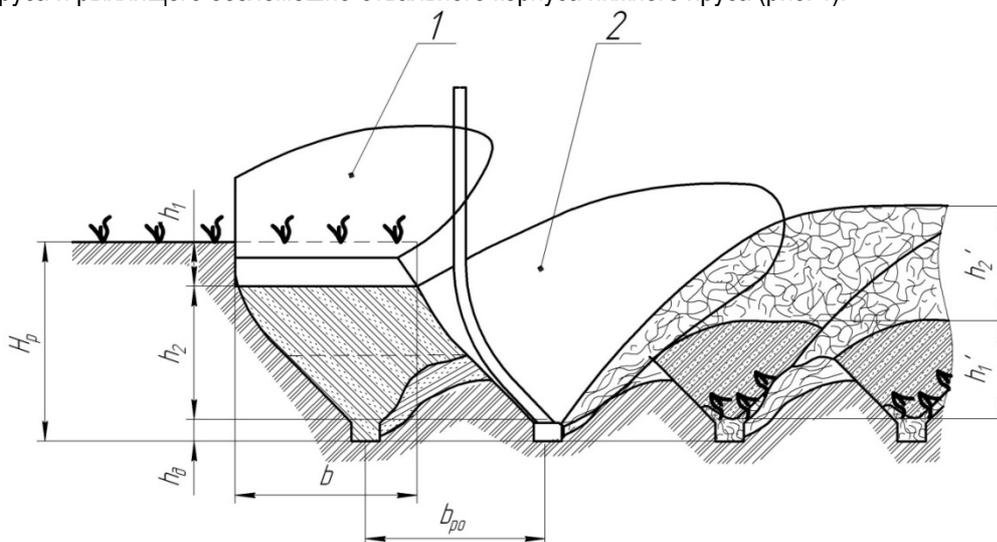


Рис. 1. Схема рабочей секции комбинированного плуга:

1 – лемешно-отвальный корпус верхнего яруса; 2 – рыхлительный безлемешно-отвальный корпус нижнего яруса

Лемешно-отвальный корпус верхнего яруса работает по известной классической схеме отвального плужного корпуса – подрезание пласта почвы верхнего слоя с глубиной  $h_1$ , отделение его от почвенного монолита, рыхление и оборот. При предлагаемом технологическом процессе этот пласт укладывается в середину обрабатываемого горизонта в борозду на предварительно разрыхленный в предыдущем проходе подпахотный горизонт.

Рыхлящий безлемешно-отвальный корпус нижнего яруса с глубиной  $H_p$  работает следующим образом [8]:

- долотом производится одновременное разрыхление нижнего слоя почвы и подпахотного горизонта без подрезания, без образования «плужной подошвы»;
- в предварительно разрыхленном почвенном горизонте отвалом отделяется нижний слой почвы от подпахотного горизонта, а затем транспортируется, оборачивается и укладывается поверх ранее уложенного верхнего слоя почвы.

Поэтому тяговое сопротивление секции рабочих органов комбинированного плуга определяется суммой сопротивлений

$$P_c = P_{в\text{я}} + P_{н\text{я}}, \quad (1)$$

где  $P_c$  – тяговое сопротивление одной секции рабочих органов комбинированного плуга, Н;  $P_{в\text{я}}$  – тяговое сопротивление корпуса верхнего яруса, Н;  $P_{н\text{я}}$  – тяговое сопротивление корпуса нижнего яруса, Н.

Тяговое сопротивление корпуса верхнего яруса можно определить по рациональной формуле академика В. П. Горячкина [4].

Тяговое сопротивление корпуса нижнего яруса определяется суммой сопротивлений долота, рыхлительной и отвальной поверхностей:

$$P_{н\text{я}} = P_d + P_p + P_o, \quad (2)$$

где  $P_d$  – тяговое сопротивление долота, Н;  $P_p$  – тяговое сопротивление рыхлительной поверхности отвала, Н;  $P_o$  – тяговое сопротивление отвальной поверхности корпуса нижнего яруса, Н.

В соответствии с работами [1, 2, 7, 10, 11] тяговое сопротивление долота можно определить как сопротивление трехгранного косо поставленного клина, имеющего вытянутую рабочую поверхность и режущую кромку, расположенных под углом  $\alpha_d$  (рис. 2) к горизонту с режущей кромкой под углом  $\gamma_d$  по направлению движения. Так как долото работает на достаточно большой глубине, то можно предположить, что при этом осуществляется как сжатие почвы, так и ее сдвиг с последующим периодическим отрывом определенных объемов почвы. Рабочая поверхность долота расположена к горизонту по направлению движения под углом  $\alpha_d$  – угол крошения почвы долотом, а во фронтальной плоскости под углом  $\beta_d$  – угол постановки рабочей поверхности долота в поперечно-вертикальной плоскости. При этом режущая кромка долота длиной  $l_{рк}$  расположена горизонтально, образуя с линией движения угол  $\gamma_d$  – угол резания почвы, и вырезает пласт почвы шириной  $b_d$  и высотой  $h_d$ .

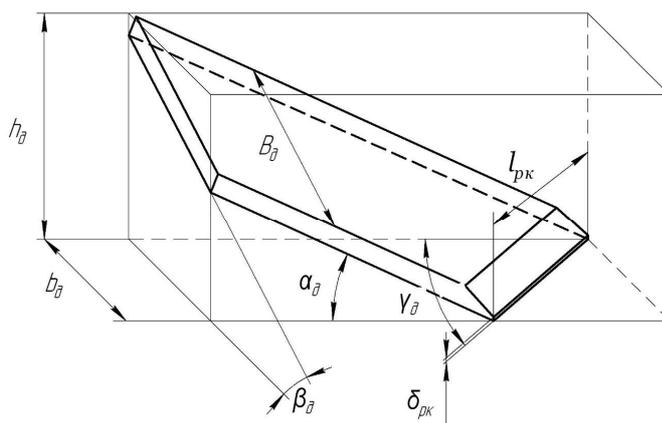


Рис. 2. Конструкционные параметры долота

Тяговое сопротивление долота в данном случае определится суммой сопротивлений: на вдавливании режущей кромки долота в почву и сдвиг вырезанного почвенного объема.

Основываясь на теоретических исследованиях А. Н. Зеленина по определению сил резания клинообразного рабочего органа [5], тяговое сопротивление долота рыхлителя, учитывая его геометрию, определится следующей зависимостью:

$$P_{\partial} = \tau_{max} \cdot h_{\partial} \cdot B_{\partial} \cdot \frac{\cos \beta_{\partial} \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\alpha_{\partial} + 2\varphi')}{\cos \varphi' \cdot \cos^2\left(\frac{\alpha_{\partial} + \varphi + \varphi'}{2}\right)} + \sigma_{сж} \cdot \delta_{рк} \cdot l_{рк} \cdot \sin \gamma_{\partial}, \quad (3)$$

где  $\tau_{max}$  – максимальная величина касательных напряжений при сдвиге почвы в предельно напряженном состоянии, Па;  $h_{\partial}$  – высота пласта почвы вырезаемого долотом, м;  $B_{\partial}$  – ширина рабочей поверхности долота, м;  $\beta_{\partial}$  – угол постановки рабочей поверхности долота в поперечно-вертикальной плоскости, град.;  $\varphi$  – угол трения почвы о металл, град.;  $\varphi'$  – угол внутреннего трения почвы, град.;  $\alpha_{\partial}$  – угол крошения почвы долотом, град.;  $\sigma_{сж}$  – напряжение сжатия почвы режущей кромкой долота, Па;  $l_{рк}$  – длина режущей кромки, м;  $\delta_{рк}$  – толщина режущей кромки, м;  $\gamma_{\partial}$  – угол резания почвы долотом, град.

Работу рыхления после долота продолжает рыхлительная поверхность корпуса нижнего яруса, выполненная в виде косопоставленного клина треугольной формы (рис. 3).

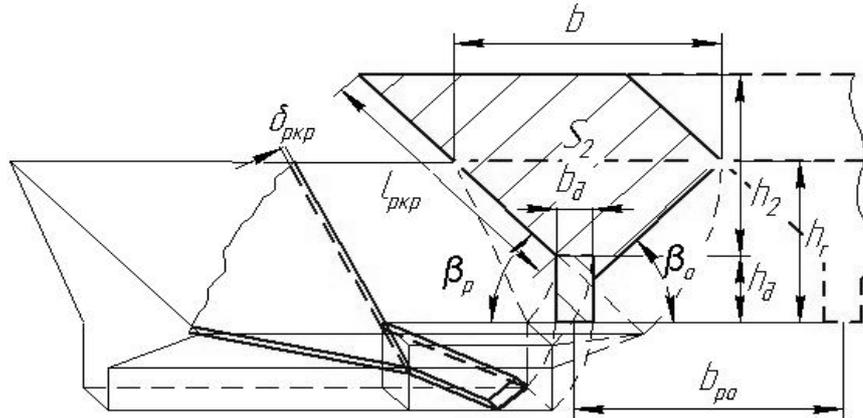


Рис. 3. Рыхлительная часть корпуса нижнего яруса

Тяговое сопротивление рыхлительной поверхности корпуса нижнего яруса можно определить по аналогии с зависимостью тягового сопротивления долота рыхлителя:

$$P_p = \tau_{max} \cdot S_2 \cdot \frac{\cos \varphi \cdot \sin(\alpha_p + 2\varphi')}{\cos \varphi' \cdot \cos^2\left(\frac{\alpha_p + \varphi + \varphi'}{2}\right)} + \sigma_{сж} \cdot S_{ркp}, \quad (4)$$

где  $\alpha_p$  – угол крошения почвы рыхлительной поверхностью, град.;  $S_{ркp} = \delta_{ркp} \cdot l_{ркp} \cdot \sin \gamma_p$  – площадь смятия почвы режущей кромкой рыхлительной поверхности корпуса нижнего яруса, м<sup>2</sup>;  $\delta_{ркp}$  – толщина режущей кромки рыхлительной поверхности корпуса, м;  $l_{ркp}$  – длина рабочей части режущей кромки рыхлительной поверхности корпуса, м;  $\gamma_p$  – угол резания почвы рыхлительной поверхностью (угол между режущей кромкой и фронтальной плоскостью), град.

Площадь  $S_2$  поперечного сечения пласта, обрабатываемого рыхлительной поверхностью корпуса нижнего яруса, определенная в зависимости от технологических параметров обработки почвы и от конструктивных параметров рыхлительной поверхности корпуса нижнего яруса:

$$S_2 = \left( l_{ркp} \cdot \sin \gamma_p \cdot \sin \beta_p - \frac{\beta_{po}}{2} \cdot \text{tg} \beta_o + h_{\partial} \right) \cdot b_{po} + \frac{b_{po} + b_{\partial}}{2} \cdot \left( \frac{b_{po}}{2} \cdot \text{tg} \beta_o - h_{\partial} \right), \quad (5)$$

где  $\beta_p$  – угол сдвига почвы рыхлительной поверхностью, град.;  $\beta_{po}$  – интервал расстановки рабочих органов на плуге, м;  $b_{\partial}$  – ширина пласта почвы вырезаемого долотом, м.

Технологический процесс работы корпуса нижнего яруса завершает его отвальная поверхность, которая оборачивает и перемещает нижний пласт почвы.

Тяговое сопротивление отвальной поверхности корпуса нижнего яруса можно определить по величине затраченной работы на выполнение транспортирования определенного объема почвы с последующим отбрасыванием в борозду.

Отвальная поверхность корпуса нижнего яруса совершает работу по перемещению пласта почвы  $S_2$  на расстояние  $Z_{12}$  (рис. 4). При выполнении работы происходит изменение потенциальной энергии пласта за счет изменения высоты его расположения на  $Z_{12}$  и за счет сил трения – перемещение по направлению движения на  $X_{12}$ .

Для транспортировки пласта почвы на необходимое расстояние требуется сообщить пласту импульс

$$p = m_{пл} \cdot v_{пл}, \quad (6)$$

где  $m_{пл}$  – масса вырезаемого пласта почвы, кг;  $v_{пл}$  – абсолютная скорость движения пласта, м/с.

Массу вырезаемого пласта почвы можно представить зависимостью

$$m_{пл} = \rho \cdot S_2 \cdot v_{арп} \cdot t_{арп}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность вырезаемого пласта почвы, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{арп}$  – рабочая скорость движения пахотного агрегата, м/с;  $t_{арп}$  – рассматриваемый интервал времени движения пахотного агрегата, с.

Абсолютная скорость движения пласта  $v_{пл}$  должна обеспечить перемещение центра массы почвы из положения 1 в положение 2 (рис. 4), координаты которого можно представить как  $X_{12}, Y_{12}, Z_{12}$ .

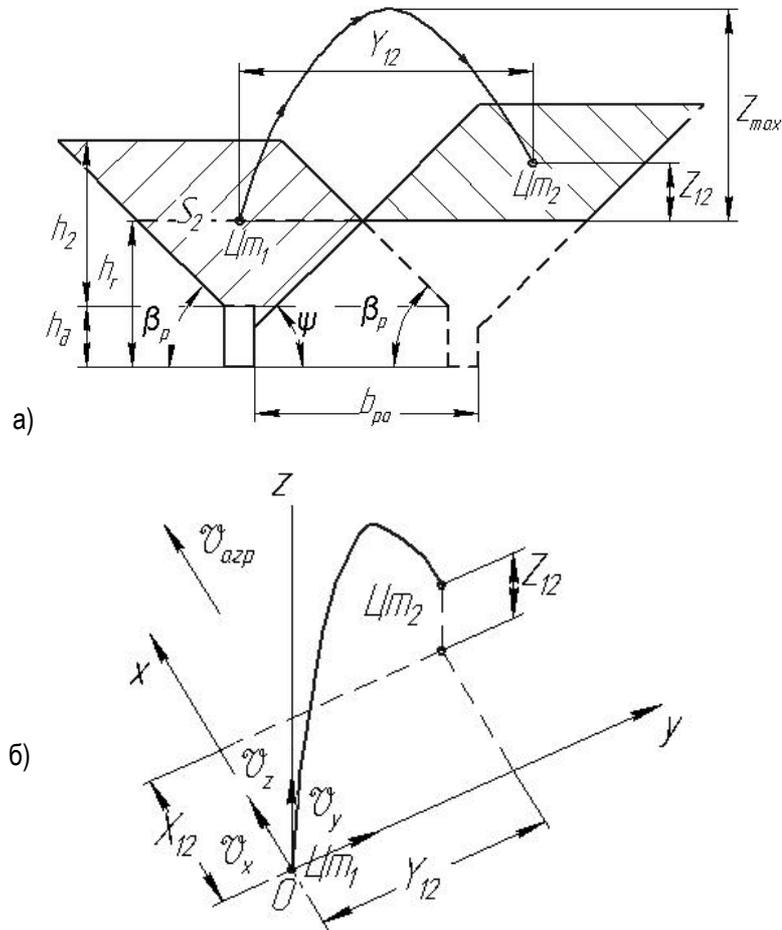


Рис. 4. Схема к определению работы по перемещению нижнего слоя почвы:

а – геометрические параметры вырезаемого пласта; б – траектория движения центра тяжести вырезаемого пласта

Пренебрегая сопротивлением воздуха, движение пласта почвы после схода с отвальной поверхности корпуса нижнего яруса можно представить параметрическим уравнением

$$\begin{cases} X_{12} = v_{пл}^x \cdot t_{пл}; \\ Y_{12} = v_{пл}^y \cdot t_{пл}; \\ Z_{12} = v_{пл}^z \cdot t_{пл} - \frac{g \cdot t_{пл}^2}{2}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $v_{пл}^x, v_{пл}^y, v_{пл}^z$  – проекции вектора абсолютной скорости движения пласта  $v_{пл}$  по осям  $Ox, Oy, Oz$  в прямоугольной пространственной системе координат, м/с;  $t_{пл}$  – время свободного движения пласта после схода с отвальной поверхности корпуса нижнего яруса, с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Выразив из данного параметрического уравнения составляющие скорости, получим следующую систему уравнений

$$\begin{cases} v_{пл}^x = \frac{X_{12}}{t_{пл}}; \\ v_{пл}^y = \frac{Y_{12}}{t_{пл}}; \\ v_{пл}^z = \frac{Z_{12}}{t_{пл}} + \frac{g \cdot t_{пл}}{2}. \end{cases} \quad (9)$$

Учитывая параметрическое уравнение (9), скорость пласта почвы можно представить зависимостью

$$v_{пл} = \sqrt{\left(\frac{X_{12}}{t_{пл}}\right)^2 + \left(\frac{Y_{12}}{t_{пл}}\right)^2 + \left(\frac{Z_{12}}{t_{пл}} + \frac{g \cdot t_{пл}}{2}\right)^2} \quad (10)$$

или

$$v_{пл} = \frac{1}{t_{пл}} \sqrt{X_{12}^2 + Y_{12}^2 + Z_{12}^2 + Z_{12} \cdot g \cdot t^2 + \frac{g^2 \cdot t^4}{4}}. \quad (11)$$

При условии  $t_{арп} = t_{пл}$ , для транспортировки вырезаемого пласта почвы, необходимая величина импульса определится из уравнения

$$p = \rho \cdot S_2 \cdot v_{арп} \cdot \sqrt{X_{12}^2 + Y_{12}^2 + Z_{12}^2 + Z_{12} \cdot g \cdot t_{пл}^2 + \frac{g^2 \cdot t_{пл}^4}{4}}. \quad (12)$$

Учитывая то, что импульс сообщается пласту в течение времени  $t_{имп}$ , пока пласт движется по отвальной поверхности, то величина тягового сопротивления отвальной поверхности будет равна:

$$P_{отв} = \rho \cdot S_2 \cdot v_{арп} \cdot \sqrt{X_{12}^2 + Y_{12}^2 + Z_{12}^2 + Z_{12} \cdot g \cdot t_{пл}^2 + \frac{g^2 \cdot t_{пл}^4}{4}} / t_{имп}. \quad (13)$$

Учитывая выражения (3), (4) и (13) тяговое сопротивление корпуса нижнего яруса (2) примет вид:

$$P_{ня} = \tau_{max} \left[ h_{\partial} \cdot B_{\partial} \cdot \frac{\cos \beta_{\partial} \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\alpha_{\partial} + 2\varphi')}{\cos \varphi' \cdot \cos^2\left(\frac{\alpha_{\partial} + \varphi + \varphi'}{2}\right)} + S_2 \cdot \frac{\cos \varphi \cdot \sin(\alpha_p + 2\varphi')}{\cos \varphi' \cdot \cos^2\left(\frac{\alpha_p + \varphi + \varphi'}{2}\right)} \right] + \sigma_{сж}(\delta_{рк} \cdot l_{рк} \cdot \sin \gamma_{\partial} + S_{ркп}) + \rho \cdot S_2 \cdot v_{арп} \cdot \sqrt{X_{12}^2 + Y_{12}^2 + Z_{12}^2 + Z_{12} \cdot g \cdot t_{пл}^2 + \frac{g^2 \cdot t_{пл}^4}{4}} / t_{имп}. \quad (14)$$

Тяговое сопротивление секции рабочих органов (1) учитывая выражение (14) определится следующим образом

$$P_c = G_{вя} \cdot f_{вя} + k_{вя} h_1 b + \varepsilon h_1 b v_{арп} + \tau_{max} \left[ h_{\partial} \cdot B_{\partial} \cdot \frac{\cos \beta_{\partial} \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\alpha_{\partial} + 2\varphi')}{\cos \varphi' \cdot \cos^2\left(\frac{\alpha_{\partial} + \varphi + \varphi'}{2}\right)} + S_2 \cdot \frac{\cos \varphi \cdot \sin(\alpha_p + 2\varphi')}{\cos \varphi' \cdot \cos^2\left(\frac{\alpha_p + \varphi + \varphi'}{2}\right)} \right] + \rho \cdot S_2 \cdot v_{арп} \cdot \sqrt{X_{12}^2 + Y_{12}^2 + Z_{12}^2 + Z_{12} \cdot g \cdot t_{пл}^2 + \frac{g^2 \cdot t_{пл}^4}{4}} / t_{имп}. \quad (15)$$

Общее тяговое сопротивление плуга  $P_{кп}$  будет равно

$$P_{кп} = n_c \cdot P_c, \quad (16)$$

где  $n_c$  – количество секций комбинированного плуга, шт.

Представленные теоретические выражения (3), (4), (13), (14) и (15) для определения составляющих тягового сопротивления рабочих органов, выполняющих предлагаемый новый технологический процесс ярусной обработки почвы, позволяют учитывать влияние конструкционных и технологических параметров почвообрабатывающих рабочих органов, свойств обрабатываемой почвы и скорости движения агрегата, но для аналитического вычисления тягового сопротивления необходимы экспериментальные данные физических (плотность, твердость) и механических свойств почвы (величины нормальных и касательных предельных напряжений, углы скола почвы, коэффициенты внутреннего и внешнего трения).

Подставив исходные значения [3] в выражения (14), (15) и (16), получили следующие значения тягового сопротивления обработки почвы корпусами нижнего яруса и комбинированным плугом (табл. 1).

Таблица 1

Тяговое сопротивление обработки почвы плугом и корпусами нижнего яруса при  $h_1=0,06$  м

Глубина рыхления, м	Тяговое сопротивление корпусов нижнего яруса, Н	Общее тяговое сопротивление плуга, Н
0,25	19500	25000
0,3	23000	28500
0,35	27250	32750
0,4	31550	37050
0,45	36500	42000

Результаты проведённых исследований могут использоваться при совершенствовании технологий ярусных обработок почвы, а также при разработке и совершенствовании конструкций комбинированных почвообрабатывающих агрегатов на стадии проектирования.

#### Библиографический список

1. Бойкова, Е. В. Результаты производственных испытаний плуга с новыми рабочими органами // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2008. – №1. – С. 27-28.
2. Бурченко, П. Н. Механико-технологические основы почвообрабатывающих машин нового поколения : монография. – М. : ГНУ ВИМ, 2002. – 212 с.
3. Ерзамаев, М. П. Повышение эффективности вспашки разработкой и применением способа ярусной обработки почвы и комбинированного плуга : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Ерзамаев Максим Павлович. – Пенза, 2012. – 169 с.
4. Жук, А. Ф. Интерпретация рациональной формулы В. П. Горячкина // Техника в сельском хозяйстве. – 2007. – №6. – С. 44-46.
5. Зеленин, А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами : монография – М. : Машиностроение, 2004. – 375 с. : ил.
6. Коршиков, А. А. О глубоком рыхлении почвы / А. А. Коршиков, А. А. Михайлин // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2003. – №4. – С. 28-30.
7. Лобачевский, Я. П. Современное состояние и тенденции развития почвообрабатывающих машин : монография / Я. П. Лобачевский, Л. М. Колчина. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 116 с.
8. Пат. 2456787 Российская Федерация. Способ ярусной обработки почвы: заявка на изобретение / Афонин А. Е., Гниломёдов В. Г., Ерзамаев М. П. [и др.]. – №2010150772/13 ; заявл. 10.12.12 ; опубл. 27.07.12, Бюл. №21. – 5 с.
9. Пархоменко, Г. Г. Машины для глубокой обработки почвы в засушливых условиях юга России / Г. Г. Пархоменко, В. Г. Рыков, В. И. Таранин // Техника и оборудование для села. – 2005. – № 9. – С. 15-16.
10. Ревякин, Е. Л. Чизелевание почвы: состояние, перспективы и проблемы / Е. Л. Ревякин, Т. П. Нино // Техника и оборудование для села. – 2005. – №11. – С. 18-21.
11. Тырнов, Ю. А. ПРУН – «мастер на все руки» / Ю. А. Тырнов, А. Н. Зазуля, В. Г. Гниломёдов [и др.] // Сельский механизатор. – 2007. – №9. – С. 14-15.