

УДК 631.53.04

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
САМОХОДНОЙ МАЛОГАБАРИТНОЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ФРЕЗЫ
С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ АКТИВНЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ**

**Купряшкин В. Ф., Шляпников М. Г., Чаткин М. Н., Глотов С. В.,
Купряшкин В. В., Четверов Н. А.**

Реферат. При выполнении технологического процесса обработки почвы, самоходная фреза перемещается за счет силы сцепления ведущих колес с почвой. Мощность двигателя расходуется на преодоление сопротивлений перекачивания ведущих колес, трение опорного ползка о почву и сопротивление резанию почвы активными рабочими органами, а часть мощности теряется в трансмиссии. Учитывая специфику особенностей функционирования самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с вертикальной осью вращения активных рабочих органов, а именно его тягово-приводной характер работы, то условием, обеспечивающим его равномерное движение, является уравнение тягового баланса. При перемещении по полю самоходной фрезы между ведущими колесами и почвой возникает сила тяги F_{TK} , которая направлена на преодоление сил сопротивления при перекачивании ведущих колес $F_{СК}$ и на преодоление силы трения $F_{лп}$ опорного ползка с почвой. В процессе обработки почвы ножами роторов возникают силы, $F_{y1}(F_{y2}), F_{x1}(F_{x2})$. На почвообрабатывающий агрегат так же действует сила тяжести F_{gm} , приложенная в центре тяжести, которую можно разложить на составляющие: на силу тяжести $F_{gк}$, приходящуюся на ведущие колеса и на силу тяжести $F_{gф}$, приходящуюся на почвообрабатывающую фрезу. Исходя из анализа сил, действующих на самоходную малогабаритную почвообрабатывающую фрезу с вертикальной осью вращения активных рабочих органов, составлено условие неравномерного движения (устойчивости движения). Решение уравнения относительно количества роторов позволяет получить зависимость их оптимального количества от конструктивных параметров фрезы, режимов работы и почвенных условий.

Ключевые слова: ротор, устойчивость движения, вертикальная почвообрабатывающая фреза, буксование ведущих колес, почва.

Введение. Как показывают исследования в области функционирования средств малой механизации, а именно малогабаритных почвообрабатывающих фрез, фрезерных мотокультиваторов и мотоблоков в агрегате с тяговыми и приводными рабочими органами, одним из основных критериев, характеризующих высокую эффективность работы почвообрабатывающих агрегатов, является обеспечение их условий устойчивости [1, 2].

Вопросы устойчивости движения самоходных малогабаритных машин при их агрегатировании с плугом или почвообрабатывающей фрезой представлены в работе [2]. При этом решение ряда вопросов было дано в общем виде, что не позволяет обеспечить комплексный подход при изучении вопроса устойчивости движения с учетом технологических режимов работы машины и конкретных почвенных условий. Более подробно устойчивость движения самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фрез с ведущими колесами представлены в исследованиях [3, 4, 5]. Исследователями были получены условия обеспечивающие устойчивость движения машины при отсутствии буксования ведущих колес, самопроизвольного перекачивания и качания в продольно вертикальной плоскости. Однако данные условия получены с учетом специфики

взаимодействия активных рабочих органов (АРО), имеющих горизонтальную ось вращения с почвой и заключающихся в подталкивающем и выглубляющем эффекте.

Цель исследования: установление условия устойчивости и определение основных конструктивных параметров самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с вертикальной осью вращения активных рабочих органов при равномерном движении.

Условия, материалы и методы исследований. Опираясь на ранее проведенные теоретические исследования устойчивости движения самоходных малогабаритных машин, предлагается анализ устойчивости движения самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с вертикальной осью вращения АРО.

При выполнении технологического процесса обработки почвы, самоходная фреза перемещается за счет силы сцепления ведущих колес с почвой. При этом мощность двигателя расходуется на преодоление сопротивлений при перекачивании ведущих колес, при трении опорного ползка о почву и сопротивление резанию почвы на АРО, а также часть мощности теряется в трансмиссии [3, 4].

Учитывая специфику особенностей функционирования самоходной малогабаритной

почвообрабатывающей фрезы с вертикальной осью вращения АРО, а именно его тягово-приводной характер работы, то условием, обеспечивающим его равномерное движение, будет, уравнение тягового баланса. Составим расчетную схему сил, действующих на почвообрабатывающую фрезу с вертикальной осью вращения АРО в продольно-вертикальной плоскости (рисунок 1).

При перемещении по полю самоходной фрезы между ведущими колесами и почвой возникает сила тяги F_{TK} , которая направлена на преодоление сил сопротивления перекачиванию ведущих колес $F_{СК}$ и силы трения F_{fn} опорного ползка с почвой. Для управления фрезой оператор прикладывает к органам

управления усилия F_p , в расчетах принимаем равное нулю. Кроме этого, при анализе устойчивого движения самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с вертикальной осью вращения АРО полагаем, что поверхность почвы ровная и горизонтальная.

В процессе обработки почвы ножами роторов возникают силы $F_{y1}(F_{y2}), F_{x1}(F_{x2})$. На почвообрабатывающий агрегат так же действует сила тяжести F_{gm} , приложенная в центре тяжести (т. В), которую можно разложить на составляющие: на силу тяжести $F_{gк}$, приходящуюся на ходовые колеса (приложена в т. А) и на силу тяжести $F_{gф}$, приходящуюся на почвообрабатывающую фрезу (приложена в т. С).

Таким образом, опираясь на схему действующих сил (см. рисунок 1), составим уравнение устойчивости движения самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с вертикальной осью вращения АРО.

Условие устойчивости по отсутствию буксования будет иметь вид:

$$F_{TK} - F_{СК} - F_{fn} - F_{\Sigma x1} + F_{\Sigma x2} \geq 0, \quad (1)$$

где F_{TK} – сила тяги на ведущих колесах, Н; $F_{СК}$ – сила сопротивления перекачиванию ведущих колес, Н; F_{fn} – сила трения опорного ползка с почвой, Н; $F_{x1}(F_{x2})$ – силы сопротивления резанию на ножах отдельного ротора, Н.

Анализ и обсуждение результатов исследований. Для определения силы тяги на ведущих колесах воспользуемся рекомендациями [7], согласно которым силу F_{TK} с достаточной степенью точности можно определить по формуле:

$$F_{TK} = k_c F_{gк}, \quad (2)$$

где k_c – коэффициент сцепления ведущих колес с почвой; $F_{gк}$ – сила тяжести машины на оси ведущих колес, Н.

Учитывая весовые характеристики, а именно массу мотоблока и их компоновку силу $F_{gк}$, можно приложить к центру вращения ведущих колес (т. А) и представить в виде:

$$F_{gк} = m_m g, \quad (3)$$

где g – ускорение сводного падения, m/c^2 ; $g = 9,81 m/c^2$.

Тогда с учетом (3) выражение (2) примет вид:

$$F_{TK} = k_c m_m g. \quad (4)$$

Природу силы сопротивления перекачиванию изучали многие исследователи [7, 8, 9, 10]. Она зависит от различных факторов, основными же являются свойства почвы (структура, механический состав, влажность, сопротивление сжатию и сдвигу, микрорельеф поверхности) и свойства ходового аппарата (у колесных машин – радиус качения, ширина профиля, тип протектора, давление воздуха в шине). Если свойства ходового аппарата стабильны по величине и их можно определить

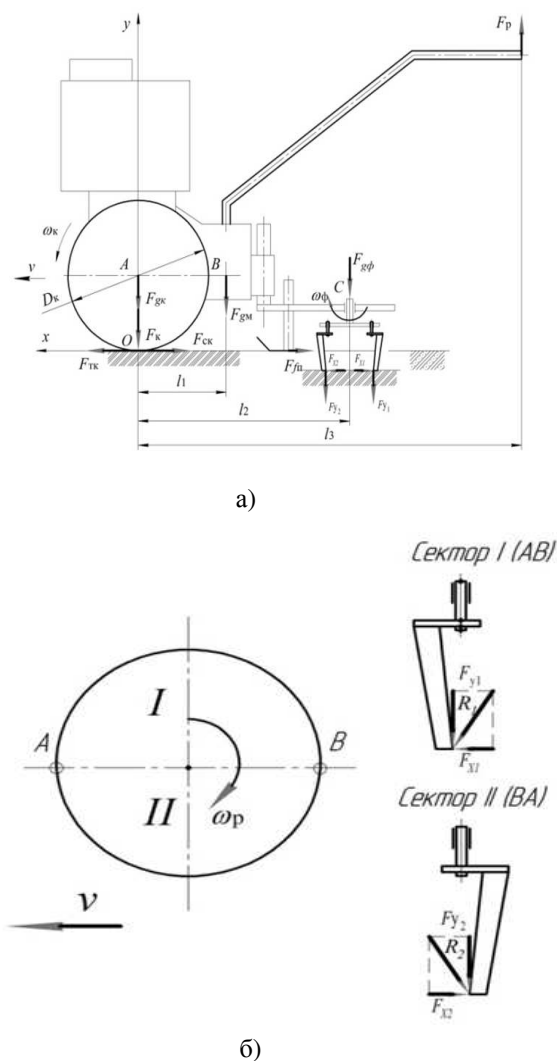


Рисунок 1 – Силы, действующие на самоходную малогабаритную почвообрабатывающую фрезу с вертикальной осью вращения АРО в продольно-вертикальной плоскости

заранее, то свойства почвы имеют вероятностный характер, и их влияние на силу сопротивления перекачиванию в большинстве случаев можно определить только во время взаимодействия ходового аппарата с почвой. В силу этого можно утверждать, что и сила сопротивления перекачиванию будет иметь вероятностную составляющую.

Силу сопротивления перекачиванию ведущих колес согласно рекомендациям [7, 8, 9] и схемы сил (см. рисунок 1) можно определить по формуле:

$$F_{CK} = \mu F_{gk}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент сопротивления качению ходовых колес.

Для определения коэффициента μ согласно [10, 11, 12] рекомендуется применять формулу Гранвуане-Горячкина, которая имеет следующий вид:

$$\mu = \sqrt[3]{\frac{F_{gk}}{qD_k^2 b_k}}, \quad (6)$$

где q – объемный коэффициент смятия почвы, Н/м³; b_k – ширина обода колеса, контактирующего с почвой, м.

Объемный коэффициент смятия почвы можно представить в виде [3]:

$$q = (0,044p + 0,0038)10^9 \quad (7)$$

Таким образом, после подстановки (6) в (5) с учетом (3), (7) и ряда преобразований получим:

$$F_{CK} = \sqrt[3]{\frac{(m_M g)^4}{(0,044p + 0,0038)10^9 D_k^2 b_k}}. \quad (8)$$

Силу F_{fn} определим из рисунка 1, т.е.

$$F_{fn} = f(F_{g\phi} + F_{\sum y_1} + F_{\sum y_2}) \quad (9)$$

где f – коэффициент трения опорного ползка о почву; $F_{g\phi}$ – сила тяжести мотоблока, приходящаяся на фрезу, Н, F_y – заглубляющие силы на ножах отдельного ротора, Н.

Учитывая ограничения, накладываемые на оператора, работающего с мотоблоком [6] выразим значение силы $F_{g\phi}$ через максимально возможное усилие рабочего на органах управления $[F_p]$. Тогда исходя из схемы сил (см. рисунок 1) получим:

$$F_{g\phi} = [F_p] \frac{l_3}{l_2}, \quad (10)$$

где $[F_p]$ – максимально возможное усилие рабочего на органах управления, Н; l_3 и l_2 – расстояние между осью ведущих колес и точками приложения сил F_p и $F_{g\phi}$ соответственно, м.

$$F_{\sum y_{1(2)}} = F_{y_{1(2)}} n, \quad (11)$$

где n – количество роторов.

После последовательной подстановки (10) и (11) в (9) получим:

$$F_{fn} = f \left\{ [F_p] \frac{l_3}{l_2} + n(F_{y_1} + F_{y_2}) \right\}. \quad (12)$$

Силу сопротивления резания ножей ротора можно представить в виде:

$$F_{\sum x_{1(2)}} = F_{x_{1(2)}} n \quad (13)$$

Таким образом, полученные зависимости (4), (8), (12) и (13) подставляем в (1) и получаем условие устойчивости самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с вертикальной осью вращения АРОВ продольно-вертикальной плоскости при условии обеспечения ее равномерного движения в развернутом виде:

$$k_c m_M g - \sqrt[3]{\frac{(m_M g)^4}{(0,044p + 0,0038)10^9 D_k^2 b_k}} - f \left\{ [F_p] \frac{l_3}{l_2} + n(F_{y_1} + F_{y_2}) \right\} - (F_{x_1} n) + (F_{x_2} n) \geq 0 \quad (14)$$

или:

$$k_c m_M g - \sqrt[3]{\frac{(m_M g)^4}{(0,044p + 0,0038)10^9 D_k^2 b_k}} - f \left\{ [F_p] \frac{l_3}{l_2} + n(F_{y_1} + F_{y_2}) \right\} - n(F_{x_1} - F_{x_2}) \geq 0 \quad (15)$$

Дальнейшее решение уравнения (15) относительно количества роторов (рисунок 2) позволяет получить зависимости их оптимального количества в зависимости от конструктивных параметров фрезы, режимов работы и

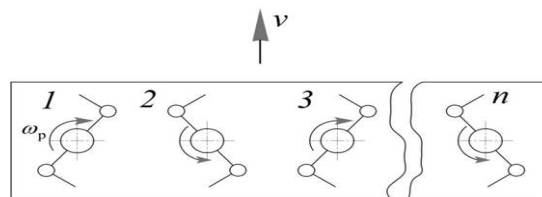


Рисунок 2 – Схема компоновки роторов универсального адаптивного энергоэффективного модуля с вертикальными активными рабочими органами

$$n \leq \frac{k_c m_M g - \sqrt[3]{\frac{(m_M g)^4}{(0,044p + 0,0038)10^9 D_k^2 b_k}} - f [F_p] \frac{l_3}{l_2}}{f(F_{y_1} + F_{y_2}) + (F_{x_1} - F_{x_2})} \quad (16)$$

почвенных условий.

Таким образом, полученные уравнения (15) и (16) характеризуют условие устойчивости самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с вертикальной осью вращения АРО и количество роторов при условии ее равномерного движения и связывает между собой основные силовые факторы взаимодействия роторов при обработке почвы, режимы

работы с весовыми характеристиками, конструктивными параметрами машины и почвенными условиями.

Выводы. 1. Получено уравнение устойчивости самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с вертикальной осью вращения АРО продольно-вертикальной плоско-

сти при условии ее равномерного движения.

2. Получена зависимость оптимального количества роторов самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с вертикальной осью вращения АРО от конструктивных параметров машины и почвенных условий.

Литература

1. Уланов А. С., Шляпников М. Г., Гусев А. Ю., Купряшкин В. В. К вопросу устойчивости работы мотоблока в агрегате с плугом // XII Международ. науч.-практ. конф. в рамках XVIII Междунар. агропромыш. выст. «Агроуниверсал – 2016»: Сб. науч. ст. под общ. ред. А. Т. Лебедева. – Ставрополь: АГРУС Ставропольского ГАУ, 2016. – С. 144–15
2. Купряшкин В. Ф. Устойчивость движения и эффективное использование самоходных почвообрабатывающих фрез. Теория и эксперимент : монография / В. Ф. Купряшкин. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – 140 с.
3. Безруков А.В. Повышение эффективности функционирования самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы за счет адаптации ее режимов к условиям работы : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Безруков. – Саранск, 2016. – 18 с.
4. Tarverdyan. A. P. Results of the study of kinematic and dynamic parameters of the tillage machine with a vertical axis of rotation in the cultivation of garden crops A. P. Tarverdyan, S. F. Sargsyan, A.V. Altunyan Annals of agricultural science, Volume 15, Issue 2, June 2017, Pages 163-168.
5. Фирстов А. Ф. Самоходная почвообрабатывающая фреза с комбинированными рабочими органами / А. Ф. Фирстов, А. С. Уланов, В. Н. Купряшкина [и др.] // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – С. 383 – 389.
6. ГОСТ 12.2.140–2004. Тракторы малогабаритные. Общие требования безопасности. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 12 с.
7. Наумец Н. И. К определению тяговых усилий, необходимых для передвижения тракторов / Н. И. Наумец // Тракторы и сельхозмашины. – 1958. – № 1. – С. 7 – 8.
8. Нафиков М. З. Расчет сопротивления движению трактора / М. З. Нафиков, И. С. Поляков // Тракторы и сельхозмашины. – 1968. – № 1. – С. 14 – 16.
9. Полетаев А. Ф. Качение ведущего колеса / А. Ф. Полетаев // Тракторы и сельхозмашины. – 1964. – № 1. – С. 11 – 15.
10. Синеоков Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.
11. Thakur T. C. Current state of force prediction models for rotary mechanized tillage tools T. C. Thakur, R. J. Godwin Journal of Thermomechanics, Volume 26, Issue 2, 1989, Pages 121-138.
12. Zhiyong Chan. Design and experiments of biomimetic stubble cutter Zhiyong Chan, Wei Liu, Jin Tong, Li Guo, Donghui Chen Journal of bionic engineering, Volume 13, Issue 2, April 2016, Pages 335-343

Сведения об авторах:

Купряшкин Владимир Федорович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А.И. Лещанкина, e-mail: kupwf@mail.ru

Шляпников Михаил Геннадьевич – аспирант 3 года обучения, Институт механики и энергетики, e-mail: mix.shlyarnickoff2015@yandex.ru

Чаткин Михаил Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А.И. Лещанкина, Институт механики и энергетики, e-mail: kupwf@mail.ru

Готов Сергей Викторович – доктор технических наук, Институт механики и энергетики, e-mail: kupwf@mail.ru

Купряшкин Владимир Владимирович – магистрант, Институт механики и энергетики, e-mail: kupwf@mail.ru

Четверов Николай Александрович – магистрант, Институт механики и энергетики, e-mail: kupwf@mail.ru
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», г. Саранск, Россия.

THEORETICAL STUDY OF TERMS FOR ENSURING AN UNIFORM MOVEMENT AND SUBSTANTIATION OF BASIC PARAMETERS OF A SELF-PROPELLED SMALL-SIZED ROTARY TILLER WITH A VERTICAL AXIAL FOR HANDLING

Kupryashkin V.F., Shlyapnikov M.G., Chatkin M.N., Glotov S.V., Kupryashkin V.V., Chetverov N.A.

Abstract. When performing the technological process of soil cultivation, a self-propelled rotary tiller moves due to the adhesion force of the drive wheels to the soil. Engine power is spent on overcoming rolling resistance of driving wheels, friction of the support slide on the soil and resistance to soil cutting by active working elements, and part of the power is lost in the transmission. Given the specific features of the functioning of a self-propelled small-sized rotary tiller with a vertical axis of rotation of active working units, namely its traction-drive nature of work, the equation for traction balance

is a condition ensuring its uniform movement. When moving around the field of a self-propelled rotary tiller between the drive wheels and the soil, an F_{TK} traction force arises, which is aimed at overcoming the drag forces when rolling the drive wheels F_{CK} and overcoming the friction force F_{fn} of the support runner with the soil. In the process of tillage with rotor knives, forces arise, $F_{y1}(F_{y2}), F_{x1}(F_{x2})$. The force of gravity F_{gm} applied at the center of gravity also acts on the tillage aggregate, which can be decomposed into components: gravity F_{gk} , attributable to the drive wheels and gravity $F_{g\phi}$ attributable to the rotary tiller. Based on the analysis of the forces acting on a self-propelled small-sized rotary tiller with a vertical axis of rotation of active working elements, the condition for uneven movement (stability of movement) is made. The solution of the equation regarding the number of rotors allows us to obtain the dependence of their optimal number on the design parameters of the cutter, operating conditions and soil conditions.

Key words: rotor, stability of movement, vertical tillage mill, slipping of driving wheels, soil.

References

1. Ulanov A. S., Shlyapnikov M. G., Gusev A.Yu., Kupryashkin V.V. *K voprosu ustoychivosti raboty motobloka v agregate s plugom.* // XII Mezhdunarod. nauch.-prakt. konf. v ramkakh XVIII Mezhdunar. agropromysh. vyst. "Agrouniversal – 2016": Sb. nauch. st. pod obsch. red. A.T. Lebedeva. (On the stability of the motoblock in an aggregate with a plow. // XII International scientific and practical conference in the framework of XVIII International agricultural exhibition "Agrouniversal – 2016": Collection of scientific articles under the general edition of A.T. Lebedev). Stavropol: AGRUS Stavropol'skogo GAU, 2016. P. 144–15
2. Kupryashkin V.F. *Ustoychivost dvizheniya i effektivnoe ispolzovanie samokhodnykh pochvoobrabatyvayuschikh frez. Teoriya i eksperiment: monografiya.* [Stability of movement and effective use of self-propelled tillage mills. Theory and experiment: monograph]. / V. F. Kupryashkin. – Saransk : Izd-vo Mordov. un-ta, 2014. – P. 140.
3. Bezrukov A.V. *Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya samokhodnoy malogabaritnoy pochvoobrabatyvayuschey frezy za schet adaptatsii ee rezhimov k usloviyam raboty: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk.* (Improving the functioning of a self-propelled small-sized tillage cutter by adapting its modes to working conditions: abstract. dis. ... cand. tech. sciences). / A. V. Bezrukov. – Saransk, 2016. – P. 18.
4. Tarverdyan. A. P. Results of the study of kinematic and dynamic parameters of the tillage machine with a vertical axis of rotation in the cultivation of garden crops A. P. Tarverdyan, S. F. Sargsyan, A.V. Altunyan *Annals of agricultural science*, Volume 15, Issue 2, June 2017, P. 163-168.
5. Firstov A. F. *Samokhodnaya pochvoobrabatyvayuschaya freza s kombinirovannymi rabochimi organami.* // *Resursosoberegayushchie ekologicheski bezopasnye tekhnologii proizvodstva i pererabotki sel'skokhozyaystvennoy produktsii : materialy XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (Self-propelled tillage mill with combined working units. / A. F. Firstov, A. S. Ulanov, V. N. Kupryashkina and others // Resource-saving environmentally friendly technologies for the production and processing of agricultural products: proceedings of XI International scientific and practical conference). – Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2015. – P. 383 – 389.
6. GOST 12.2.140–2004. *Traktory malogabaritnye. Obschie trebovaniya bezopasnosti.* [Tractors are small-sized. General safety requirements]. – M.: Izd-vo standartov, 2005. – P. 12.
7. Naumets N. I. To the determination of traction required for the movement of tractors. [K opredeleniyu tyagovykh usilii, neobkhodimyykh dlya peredvizheniya traktorov]. / N. I. Naumets // *Traktory i sel'khoz mashiny. - Tractors and agricultural machinery.* – 1958. – № 1. – P. 7-8.
8. Nafikov M. Z. Calculation of resistance to the movement of the tractor. [Raschet soprotivleniya dvizheniya traktora]. / M. Z. Nafikov, I. S. Polyakov // *Traktory i sel'khoz mashiny. - Tractors and agricultural machinery.* – 1968. – № 1. – P. 14-16.
9. Poletaev A.F. Rolling of the driving wheel. [Kachenie veduschego koleasa]. / A. F. Poletaev // *Traktory i sel'khoz mashiny. - Tractors and agricultural machinery.* – 1964. – № 1. – P. 11-15.
10. Sineokov G.N. *Teoriya i raschet pochvoobrabatyvayuschikh mashin.* [Theory and calculation of tillage machines]. / G.N. Sineokov, I.M. Panov. - M.: Mechanical Engineering. – M. : Mashinostroenie, 1977. – P. 328.
11. Thakur T. C. Current state of force prediction models for rotary mechanized tillage tools T. C. Thakur, R. J. Godwin *Journal of Thermomechanics*, Volume 26, Issue 2, 1989, Pages 121-138.
12. Zhiyong Chan. Design and experiments of biomimetic stubble cutter Zhiyong Chan, Wei Liu, Jin Tong, Li Guo, Donghui Chen *Journal of bionic engineering*, Volume 13, Issue 2, April 2016, Pages 335-343

Authors:

Kupryashkin Vladimir Fedorovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Mobile Energy Means and Agricultural Machines named after Professor A.I. Leschankin, e-mail: kupwf@mail.ru
 Shlyapnikov Mikhail Gennadevich – post-graduate 3 year student, Institute of Mechanics and Energy, e-mail: mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru
 Chatkin Mikhail Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Mobile Energy Means and Agricultural Machines named after Professor A.I. Leschankin, Institute of Mechanics and Energy, e-mail: kupwf@mail.ru
 Glotov Sergey Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Institute of Mechanics and Energy, e-mail: kupwf@mail.ru
 Kupryashkin Vladimir Vladimirovich – master student, Institute of Mechanics and Energy, e-mail: kupwf@mail.ru
 Chetverov Nikolay Aleksandrovich – master student, Institute of Mechanics and Energy, e-mail: kupwf@mail.ru
 National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia.