



Анализ энергоемкости процесса вспашки почвы мотоблоком в агрегате с лемешно-отвальным плугом

В. Ф. Купряшкин*, **А. С. Уланов**, **Н. И. Наумкин**,
А. В. Безруков, **М. Г. Шляпников**
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)
**kupwff@mail.ru*

Введение. Вспашка почвы является одной из главных операций при возделывании сельскохозяйственных культур. Она представляет собой одну из самых трудоемких операций в растениеводстве, на которую расходуется около 40 % всех энергетических затрат. Основная часть этих издержек приходится на обеспечение мощности, необходимой для эффективного функционирования мотоблока с лемешно-отвальным плугом. Поэтому определение затрачиваемой мощности мотоблока является актуальной задачей.

Материалы и методы. Для решения проблемы определения энергетических характеристик мотоблока при проведении вспашки почвы был проведен теоретический анализ, включающий в себя значение крутящего момента, силу тяги на ходовых колесах, силу сопротивления при их перекачивании, а также силу сопротивления на лемешно-отвальном корпусе плуга с учетом геометрических параметров пахотного агрегата на базе мотоблока. В результате чего были получены искомые зависимости затрачиваемой мощности и удельной энергоемкости, методика нахождения которых изложена в материалах статьи.

Результаты исследования. В результате проведенного анализа баланса были получены зависимости для нахождения потребляемой мощности, а также для удельной энергоемкости вспашки почвы мотоблоком с лемешно-отвальным плугом, позволяющие дать энергетическую оценку функционированию пахотного агрегата.

Обсуждение и заключение. На основании установленных расчетных зависимостей требуемой мощности и удельной энергоемкости с учетом экспериментальных данных взаимодействия плуга с почвой, конструктивных параметров и технологических режимов работы пахотного агрегата, состоящего из мотоблока «Нева» МБ-2С-7,5 Pro и лемешно-отвального плуга П-20/3, были получены их частные решения, способствующие выбору оптимальных режимов его функционирования.

Ключевые слова: почва, мотоблок, лемешно-отвальная плуг, устойчивость движения, мощность, энергоемкость

Финансирование: Работа выполнена при поддержке проекта № 18-013-00342 Российского фонда фундаментальных исследований и гранта № 14181ГУ/2019 Фонда содействия инновациям.

Для цитирования: Анализ энергоемкости процесса вспашки почвы мотоблоком в агрегате с лемешно-отвальным плугом / Купряшкин В. Ф. [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 414–427. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427>

© Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Наумкин Н. И., Безруков А. В., Шляпников М. Г., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Analysis of Energy Consumption during Plowing Using a Motor-Block with Moldboard Plow

V. F. Kupryashkin*, A. S. Ulanov, N. I. Naumkin,
A. V. Bezrukov, M. G. Shlyapnikov

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*kupwfw@mail.ru

Introduction. Plowing the soil is a major operation in the cultivation of crops. It is one of the most labor-intensive operations in crop production, accounting for about 40 % of all energy costs. Most of these costs fall on consumed power, ensuring the effective functioning of the motor-block unit with a moldboard plow. Therefore, estimation of power consumed by motor-blocks is the urgent task.

Materials and Methods. To solve the problem of determining the energy characteristics of the motor-block unit during plowing, a theoretical analysis was carried out, including values of torque, traction force on running wheels, resistance during their rolling and resistance force at the jointers-depleted plow, with the account for the geometry of the plowing unit based on the motor-block. Dependences of power consumption and specific energy consumption were obtained using the method described below.

Results. As a result of our analysis of the power balance, we obtained dependences to find power consumption, as well as the specific energy intensity of plowing the soil with a motor-moldboard plow, which allowed for energy assessment of the functioning of the agricultural unit.

Discussion and Conclusion. On the basis of these dependences of the required power and specific energy consumption, taking into account experimental data on interaction of the plow with the soil, design parameters and technological modes of operation of the agricultural unit consisting of motor unit Neva MB-2S-7,5 Pro and plow P1-20/3, were obtained to facilitate the choice of optimal modes of their functioning.

Keywords: soil, motor-block, moldboard plow, stability of movement, power, energy consumption

Funding: The study was supported by project No. 18-013-00342 from the Russian Foundation for Basic Research and grant No. 14181GU/2019 from the Foundation for Assistance to Innovations.

For citation: Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I., et al. Analysis of Energy Consumption during Plowing Using a Motor-Block with Moldboard Plow. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):414-427. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427>

Введение

Зяблевая вспашка почвы широко применяется в процессе возделывания сельскохозяйственных культур на фермерских и личных подсобных хозяйствах, обеспечивая оптимальные условия для их наилучшего развития и роста. Проведение данного мероприятия, согласно агротехническим требованиям [1; 2], должно строго выполняться в летне-осенний период и способствовать накоплению

и сохранению влаги в почве для отдаче ее в весенний посевной период. При этом обернутый пласт почвы, полученный в результате проведения вспашки, должен по возможности максимально заделывать пожнивные остатки и сорную растительность на дно борозды¹ [3].

Для проведения технологической операции по вспашке почвы, в основной своей массе, широкое применение получили малогабаритные почвообра-

¹ Залигин О. Г., Гусаков С. О., Заборский В. П. Малая механизация в приусадебных и фермерских хозяйствах. Киев: Урожай, 1996. 367 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/471136/> (дата обращения: 13.06.2019).

батывающие машины, к числу которых принято относить мотоблоки в агрегате с плугами². При этом стоит отметить, что основная обработка почвы является одной из самых трудоемких операций при возделывании сельскохозяйственных культур, на которую расходуется практически 40 % всех материальных и энергетических затрат³ [4]. В связи с этим к пахотным агрегатам на базе мотоблоков необходимо предъявлять особые требования, в результате соблюдения которых существенным образом повысится эффективность⁴ их функционирования [5].

Обзор литературы

Перемещение малогабаритных почвообрабатывающих машин при выполнении технологических операций осуществляется за счет сил сцепления их колесных движителей с почвой, затрачивая при этом мощность энергетической установки (двигателя) на преодоление всех сил, действующих на элементы их конструкций и агрегируемые с ними рабочие органы [6; 7].

Анализом потребляемой мощности и удельной энергоемкости средств малой механизации достаточно широко занимались отечественные исследователи В. Ф. Купряшкин⁵, А. В. Безруков и дру-

гие⁶ [8; 9]. В частности, В. Ф. Купряшкиным были получены расчетные зависимости для нахождения величин мощности для обеспечения функционирования почвообрабатывающей фрезы ФС-0,85 (1) и энергоемкости процесса фрезерования почвы (2):

$$P = (2 - \eta_o) \left\{ \frac{M_{кр} n_{\Phi}}{9550} + \left[f(K_1 F_g - F_z) + \sqrt[3]{\frac{F_g^4 (1 - K_1)^4}{q D^2 b_k}} - F_x \right] v_{п} 10^{-3} \right\}, \quad (1)$$

$$E_{уд} = \frac{(2 - \eta_o) 10^{-3}}{3,6 B v_{п} h} \left\{ \frac{M_{кр} n_{\Phi}}{9550} + \left[f(K_1 F_g - F_z) + \sqrt[3]{\frac{F_g^4 (1 - K_1)^4}{q D^2 b_k}} - F_x \right] v_{п} 10^{-3} \right\}, \quad (2)$$

где η_o , $\eta_{оф}$ и $\eta_{ок}$ – соответственно, коэффициент полезного действия (КПД) передаточных частей почвообрабатывающей фрезы, КПД привода фрезбаранов и ходовых колес; F_z – выталкивающая сила на фрезерном рабочем

² Там же; Сельскохозяйственная техника и оборудование для фермерских хозяйств. М.: Информагротех, 1994. 384 с.

³ Кряжнов В. М., Спириин А. П., Сизов О. А. Энергосберегающие технологии в земледелии. М.: Информагротех, 1998. 36 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000578191> (дата обращения: 13.06.2019).

⁴ Уланов А. С. Особенности комплектования состава пахотного агрегата и выбора способа движения мотоблока при вспашке почвы // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы XIII международной научно-практической конференции, посвященной памяти профессора С. А. Лапшина. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 540–545.

⁵ Купряшкин В. Ф. Устойчивость движения и эффективное использование самоходных почвообрабатывающих фрез. Теория и эксперимент. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. 140 с.

⁶ Ладутько С. Н., Заяц Э. В., Эбертс А. А. К определению мощности, потребной для привода вертикальной почвенной фрезы // Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I (25 декабря 2015 г.). Ч. I. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. С. 57–62. URL: <http://nauka.vsu.ru/wp-content/uploads/2016/05/13506.pdf> (дата обращения: 13.06.2019).

органе (ФРО), Н; F_x – подталкивающая сила на ФРО, Н; $M_{кр}$ – крутящий момент на валу фрезерных рабочих органов, (Н·м); F_g – сила тяжести почвообрабатывающей фрезы ФС-0,85, $F_g = 1716$ Н; K_1 – коэффициент учитывающий геометрические параметры почвообрабатывающей фрезы, $K_1 = 0,174$; q – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м³; b_k и D_k – ширина обода и диаметр ходовых колес, соприкасающихся с почвой, соответственно, м; h – фрезерования почвы, м; q – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м³; $v_{п}$ – поступательная скорость фрезы ФС-0,85, м/с; f – коэффициент трения опорного полозка о почву, $f = 0,41$; B – ширина захвата почвообрабатывающего агрегата, м.

Вышеуказанные исследования В. Ф. Купряшкина, легли в основу анализа баланса потребляемой мощности и энергоемкости процесса фрезерования почвы, самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с адаптивным регулированием режима работы (СМПФА), предложенным А. В. Безруковым [8]. В этом случае расчетные зависимости требуемой мощности (3) и энергоемкости процесса обработки почвы (4) были получены с учетом специфики конструкции и особенностей работы СМПФА:

$$P = (2 - \eta_o) \left\{ \frac{M_{кр} n_{ф}}{9550} + \left[f(K_1 F_g - F_z) + \sqrt[3]{\frac{F_g^4 (1 - K_1)^4}{q D_k^2 b_k}} - F_x + F_{рез} \right] v_{п} 10^{-3} \right\}, \quad (3)$$

$$E_{уд} = \frac{(2 - \eta_o) 10^{-3}}{3,6 B v_{п} h} \left\{ \frac{M_{кр} n_{ф}}{9550} + \left[f(K_1 F_g - F_z) + \sqrt[3]{\frac{F_g^4 (1 - K_1)^4}{q D_k^2 b_k}} - F_x + F_{рез} \right] v_{п} 10^{-3} \right\}, \quad (4)$$

где $F_{рез}$ – сила резания сканера в почве, кВт.

Отличительной особенностью расчетных зависимостей (3) и (4) от зависимостей (1) и (2) является присутствие в последних величины силы резания сканера в почве $F_{рез}$. Ее появление обусловлено наличием в конструкции почвообрабатывающей фрезы, сканера почвы, позволяющего определять ее твердость.

Однако необходимо отметить, что полученные расчетные зависимости (1), (2), (3) и (4) применимы к почвообрабатывающим машинам с активными рабочими органами, в частности к малогабаритной почвообрабатывающей фрезе ФС-0,85 и ее модификациям.

В исследованиях других авторов И. И. Гуреева [9] и С. Н. Ладутько⁶ в области энергозатрат, были рассмотрены вопросы, касающиеся требуемой мощности и энергоемкости для функционирования вертикальной почвообрабатывающей фрезы. Так, ими использовалась зависимости:

$$P = \frac{K_o a v_a D^2}{413,8}, \quad (5)$$

$$E_{уд} = 191 - \frac{4,99}{v} V_o + \frac{0,791}{v^2} V_o^2, \quad (6)$$

где K_o – приведенный коэффициент объемного смятия, Н/см³; a – глубина фрезерования, см; v_a – скорость агрегата, м/с; D – диаметр фрезы, см; v – поступательная скорость фрезы, м/с; V_o – скорость отбрасываемой почвы, м/с.

Однако зависимости (5) и (6) справедливы для конкретных почвообрабатывающих машин, агрегируемых с тракторами тягового класса 0,9 и выше, что делает невозможным их применение с целью определения энергетических показателей малогабаритных почвообрабатывающих машин, в частности мотоблоков, так как они не учитывают особенности конструкции

их приводов⁷ [5], комплектования пахотного агрегата на их базе, специфику их функционирования и агротехнических требований, предъявляемых ко вспашке почвы¹.

Основываясь на том, что указанные исследования и полученные на их основе результаты, а именно расчетные зависимости для определения требуемой мощности функционирования почвообрабатывающих машин и энергоемкости обработки почвы, применимы только для машин с активными рабочими органами, необходимо провести теоретические изыскания по определению энергетических показателей почвообрабатывающих агрегатов, скомплектованных на базе средств малой механизации и тяговых рабочих органов и являющихся основой для дальнейшего выбора наиболее оптимальных режимов их функционирования.

Материалы и методы

При работе мотоблока с лемешно-отвальным плугом требуемая мощность для обеспечения технологического процесса вспашки почвы P (кВт) определяется формулой:

$$P = P_{\text{ТЯГ}} + P_{\text{ПЕР}} + P_{\text{ТР}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{ТЯГ}}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил сопротивления на рабочем органе (лемешно-отвальном плуге), кВт; $P_{\text{ПЕР}}$ – мощность, затрачиваемая на перекатывание ходовых колес, кВт; $P_{\text{ТР}}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в приводе ходовых колес, кВт.

Здесь $P_{\text{ТЯГ}} + P_{\text{ПЕР}}$ определяет мощность, затрачиваемую на создание тягового усилия на ходовых колесах $P_{\text{Т}}$, т. е. $P_{\text{Т}} = P_{\text{ТЯГ}} + P_{\text{ПЕР}}$.

Мощность $P_{\text{Т}}$ будет определяться зависимостью:

$$P_{\text{Т}} = M_{\text{КРК}} \omega_{\text{к}} 10^{-3}, \quad (8)$$

где $M_{\text{КРК}}$ – крутящий момент на ходовых колесах, Н·м; $\omega_{\text{к}}$ – угловая скорость ходовых колес, рад/с.

Учитывая действующие на мотоблок силы для крутящего момента $M_{\text{КРК}}$, получим расчетную зависимость:

$$M_{\text{КРК}} = F_{\text{ТКС}} \frac{D_{\text{к}}}{2}, \quad (9)$$

где $F_{\text{ТКС}}$ – суммарная сила тяги на колесах, Н; $D_{\text{к}}$ – диаметр колеса, м.

Приняв во внимание условие устойчивости движения мотоблока по критерию отсутствия буксования ходовых колес с почвой, преобразуем выражение (5):

$$M_{\text{КРК}} = (F_{\text{СКΣ}} + R_{\text{Х}} + F_{\text{ЛП}} + F_{\text{ЛД}}) \frac{D_{\text{к}}}{2}, \quad (10)$$

где $F_{\text{СКΣ}}$ – сила сопротивления при перекатывании ходовых колес по почве, Н; $R_{\text{Х}}$ – сила сопротивления на лемешно-отвальном плуге, действующая в продольной плоскости, Н; $F_{\text{ЛП}}$ – сила трения опорной пятки о дно борозды, Н; $F_{\text{ЛД}}$ – сила трения полевой доски о стенку борозды, Н.

Если учесть зависимости, определяющие $F_{\text{СКΣ}}$, $F_{\text{ЛП}}$, $F_{\text{ЛД}}$, выражение (10) примет вид:

$$M_{\text{КРК}} = \left\{ \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{\text{гМ}} + F_{\text{гБ}})^4}{(0,044p + 0,0038) D_{\text{к}}^2 b_{\text{к}} 10^9} + R_{\text{Х}} + f(K_2 F_{\text{гМ}} + K_3 R_{\text{З}} - K_4 R_{\text{Х}}) + f[K_5 R_{\text{Х}} + K_6 R_{\text{Y}} + (K_7 F_{\text{г}} + K_8 F_{\text{гБ}}) k_{\text{СБ}}]} \right\} \frac{D_{\text{к}}}{2}, \quad (11)$$

⁷ К вопросу классификации приводов технологических машин и особенностей определения общего коэффициента полезного действия / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем: материалы всерос. науч.-техн. конф. (19–23 октября 2009 г.). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. С. 360–364. URL: <https://docplayer.ru/105315539-Povyshenie-effektivnosti-funkcionirovaniya-mehnicheskikh-i-energeticheskikh-sistem.html> (дата обращения: 13.06.2019).

где $F_{гМ}$ – сила тяжести мотоблока, Н; $F_{гБ}$ – сила тяжести балласта, Н; D_k – диаметр колеса, м; $b_{к\kappa}$ – суммарная ширина ходовых колес, м; $k_{СБ}$ – коэффициент бокового сцепления ходовых колес с почвой; f – коэффициент трения; K_1, \dots, K_8 – коэффициенты, характеризующие геометрические параметры мотоблока.

Затем после подстановки (11) в (8) получаем:

$$P_T = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_k^2 b_{к\kappa} 10^9} + R_x +} \\ + f(K_2 F_{гМ} + K_3 R_Z - K_4 R_X) + \\ + f[K_5 R_X + K_6 R_Y + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ}) k_{СБ}] \end{array} \right\} \frac{D_k}{2} \omega_k 10^{-3}. \quad (12)$$

Если определить поступательную скорость движения мотоблока $v_{п}$ (км/ч) через угловую скорость ω_k , то уравнение (12) примет окончательный вид:

$$P_T = 3,6v_{п} 10^{-3} \left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_k^2 b_{к\kappa} 10^9} + R_x +} \\ + f(K_2 F_{гМ} + K_3 R_Z - K_4 R_X) + \\ + f[K_5 R_X + K_6 R_Y + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ}) k_{СБ}] \end{array} \right\}. \quad (13)$$

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в приводе $P_{тр}$, определяется зависимостью:

$$P_{тр} = (1 - \eta_o) P_T, \quad (14)$$

где η_o – общий КПД передаточной части.

Учитывая особенности трансмиссии мотоблока⁸, значение η_o можно определить по формуле:

$$\eta_o = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n, \quad (15)$$

где $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_n$ – КПД отдельных элементов привода.

С учетом полученной ранее зависимости (13) уравнение (14) будет иметь следующий вид:

$$P_{тр} = 3,6v_{п}(1 - \eta_o)10^{-3} \times \left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_k^2 b_{к\kappa} 10^9} + R_x +} \\ + f(K_2 F_{гМ} + K_3 R_Z - K_4 R_X) + \\ + f[K_5 R_X + K_6 R_Y + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ}) k_{СБ}] \end{array} \right\}. \quad (16)$$

Подставляя установленные ранее зависимости (13), (15) в (7) с учетом ряда преобразований, получим уравнение для расчета требуемой мощности двигателя мотоблока при его агрегатировании с лемешно-отвальным плугом:

$$P = 3,6v_{п}(2 - \eta_o)10^{-3} \times \left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_k^2 b_{к\kappa} 10^9} + R_x +} \\ + f(K_2 F_{гМ} + K_3 R_Z - K_4 R_X) + \\ + f[K_5 R_X + K_6 R_Y + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ}) k_{СБ}] \end{array} \right\}. \quad (17)$$

⁸ Там же; **Купряшкин В. Ф.** Особенности определения коэффициента полезного действия в машинных агрегатах // Физическое образование: проблемы и перспективы развития: материалы 9-й межд. науч.-метод. конф. М., Рязань: РИЦ РГУ, 2010. С. 43–46; **Наумкин Н. И.** Теория механизмов и машин. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2008. 188 с.

Энергоемкость процесса обработки почвы определяется зависимостью:

$$E_{уд} = \frac{P}{W_V}, \quad (18)$$

где $E_{уд}$ – удельная энергоемкость, кВт·ч/м³; W_V – производительность в единицу объема обрабатываемой почвы, м³/ч. Объемная производительность W_V в нашем случае будет определяться зависимостью:

$$W_V = Bv_n h 10^3, \quad (19)$$

где B – ширина захвата рабочего органа, плуга, м; v_n – поступательная скорость движения мотоблока, км/ч; h – глубина обработки, м.

Тогда, с учетом (17) и (19) выражение (18) примет вид:

$$E_{уд} = \frac{3,6(2 - \eta_o)10^{-6}}{h} \times \left\{ \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{gM} + F_{gB})^4}{(0,044p + 0,0038) D_{\kappa}^2 b_{\kappa\kappa} 10^9}} + R_x + \right. \\ \left. + f(K_2 F_{gM} + K_3 R_z - K_4 R_x) + \right. \\ \left. + f[K_5 R_x + K_6 R_y + (K_7 F_{gM} + K_8 F_{gB})k_{CB}] \right\}. \quad (20)$$

Полученные уравнения (17) и (20) отражают зависимости в общем виде, соответственно, потребляемой мощности и удельной энергоемкости при совершении вспашки почвы пахотным агрегатом на базе мотоблока с учетом его конструктивно-технологических параметров и свойства обрабатываемой среды.

Результаты исследования

Из полученных уравнений (17) и (20) видно, что для их решения необходимо определить ряд силовых характеристик, влияющих на работу мотоблока при проведении вспашки. Анализ исследований работы малогабаритных почвообрабатывающих машин [10; 11] выявил, что рабочий орган, в частности лемешно-отвалный плуг, представляет собой один из главных объектов возмущения при проведении вспашки [12]. Это происходит в результате действия на его криволинейную поверхность (культурный отвал) сил R_x , R_y и R_z , действующих на плуг в продольно-вертикальной, горизонтальной и поперечно-вертикальной плоскостях соответственно. Как показывают результаты исследований [13–15], указанные силовые факторы с большой степенью точности можно определить только в ходе проведения пространственного динамометрирования плужного корпуса, а для этого необходимо использовать специальные приспособления⁹ [16; 17]. Для решения этой задачи на производственных площадках кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина при помощи экспериментального стенда [18], позволяющего имитировать реальные условия эксплуатации, были проведены лабораторные испытания плуга П1-20/3, агрегатируемого с мотоблоком «Нева» МБ-2С-7,5 Pro [19], в ходе которых были получены регрессионные модели силовых характеристик R_x , R_y и R_z процесса взаимодействия лемешно-отвалного корпуса плуга мотоблока с почвой в виде уравнений в зависимости от варьируемых факторов: твердость почвы – p (МПа)

⁹ Гусев А. Ю., Ромашкин Д. В., Терехин Е. Ю., Четверов Н. А. Анализ существующих конструкций экспериментальных стендов для динамометрирования лемешно-отвалного корпуса плуга // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузовский сборник научных трудов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 244–256.

и скорость движения v_n (км/ч)¹⁰, которые имеют следующий вид:

$$R_x = 185,3 - 7,7p - 65,6v_n + 116,1pv_n, \quad (21)$$

$$R_y = 49,1 + 3,5p - 17,1v_n + 32,7pv_n, \quad (22)$$

$$R_z = 37,0 - 1,8p - 14,1v_n + 23,9pv_n. \quad (23)$$

Полученные уравнения регрессионных моделей справедливы для условий, определяемых твердостью почвы в интервале от 0,65 до 1,65 МПа и скоростью движения пахотного агрегата в интервале от 1 до 4 км/ч. Данные условия были приняты на основании того, что мотоблоки в агрегате с лемешно-отвальными плугами могут эксплуатироваться только на легких и средних типах почвы, при которых значение твердости не превышает 1,7 МПа [20; 21], а скорости движения определяются условиями безопасной эксплуатации мотоблоков¹¹.

Для оценки энергетических показателей функционирования мотоблока с лемешно-отвальным плугом подставим зависимости (21), (22) и (23) в уравнения (17) и (20). В результате получим следующие расчетные зависимости мощности и энергоёмкости:

$$P = 3,6v_n(2 - \eta_0)10^{-3} \times$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_{к\Sigma}^2 b_{к\Sigma} 10^9} + R_x} + \\ & + f \left[\begin{aligned} & K_2 F_{гМ} + K_3 (K_{0z} - K_{1z}p - K_{2z}v_n + K_{12z}pv_n) - \\ & - K_4 (K_{0x} - K_{1x}p - K_{2x}v_n + K_{12x}pv_n) \end{aligned} \right] + \\ & + f \left[\begin{aligned} & K_5 (K_{0x} - K_{1x}p - K_{2x}v_n + K_{12x}pv_n) + \\ & + K_6 (K_{0y} + K_{1y}p - K_{2y}v_n + K_{12y}pv_n) + \\ & + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ})_{сБ} \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

$$E_{\text{ян}} = \frac{3,6(2 - \eta_0)10^{-6}}{h} \times$$

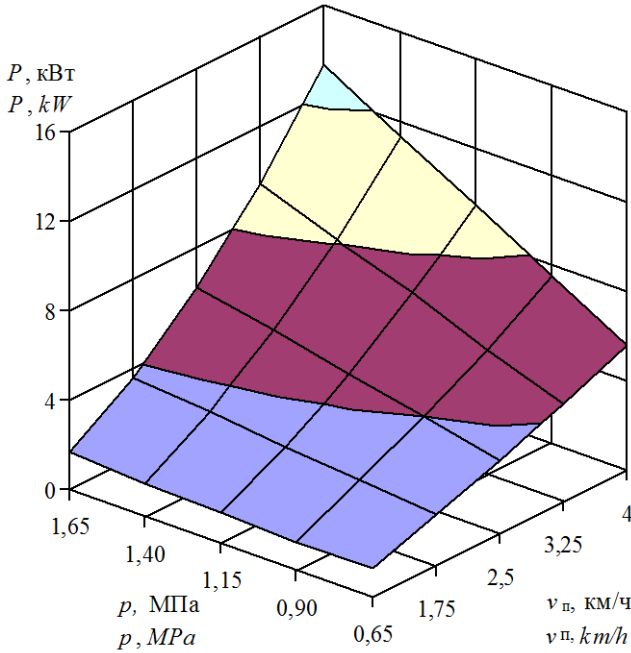
$$\left\{ \begin{aligned} & \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_{к\Sigma}^2 b_{к\Sigma} 10^9} + R_x} + \\ & + f \left[\begin{aligned} & K_2 F_{гМ} + K_3 (K_{0z} - K_{1z}p - K_{2z}v_n + K_{12z}pv_n) - \\ & - K_4 (K_{0x} - K_{1x}p - K_{2x}v_n + K_{12x}pv_n) \end{aligned} \right] + \\ & + f \left[\begin{aligned} & K_5 (K_{0x} - K_{1x}p - K_{2x}v_n + K_{12x}pv_n) + \\ & + K_6 (K_{0y} + K_{1y}p - K_{2y}v_n + K_{12y}pv_n) + \\ & + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ})_{сБ} \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (25)$$

Таким образом, установленные зависимости требуемой мощности (24) и энергоёмкости (25) позволяют оценить затраты мощности и удельную энергоёмкость при вспашке почвы мотоблоком с лемешно-отвальным плугом с учетом его режимов работы и конструктивных параметров, а также твердости почвы.

Далее, учитывая конструктивные параметры мотоблока «Нева» МБ-2С-7,5 Рго и лемешно-отвального плуга П1-20/3, а именно его основные геометрические параметры, характеризующиеся коэффициентами $K_1 = 0,975$, $K_2 = 0,015$, $K_3 = 0,65$, $K_4 = 1,1$, $K_5 = 0,11$, $K_6 = 0,92$, $K_7 = 0,016$ и $K_8 = 0,016$, диаметром $D_{к\Sigma} = 0,5$ м и суммарной шириной $b_{к\Sigma} = 0,4$ м его ходовых колес, силу тяжести $F_{гМ} = 1197$ Н и принятые коэффициенты $k_{сБ} = k_c = 0,3$, $f = 0,41$, $\eta_0 = 0,8$, а также значения коэффициентов уравнений регрессионных моделей силовых характеристик R_x , R_y , R_z с учетом ряда преобразований, уравнения (24) и (25) примут следующие виды:

¹⁰ Уланов А. С., Купряшкин В. Ф. Результаты лабораторных исследований взаимодействия плуга мотоблока с почвой и их анализ // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материалы междунар. науч.-практ. конф. / редкол.: П. В. Сенин [и др.]; отв. за вып. О. А. Кувшинова. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2018. С. 46-52.

¹¹ Руководство по эксплуатации мотоблока «Нева» МБ-2 и его модификаций: ЗАО «Красный Октябрь-Нева», 2013. 33 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/1041562/> (дата обращения: 13.06.2019); Романов Ф. Ф., Козин В. А., Ножнин С. Р. Концепция малогабаритного трактора // Актуальные проблемы агропромышленного комплекса: сб. докл. науч.-практ. конф. Вологда: ВМИ, 1993. С. 14-15; ГОСТ 12.2.140-2004. Тракторы малогабаритные. Общие требования безопасности.



Р и с. 1. Модель требуемой мощности двигателя P от скорости движения мотоблока и твердости почвы

Fig. 1. Model of the dependence of the required engine power P from the speed of the motor unit and the hardness of the soil

$$P = 3,6v_n(2-\eta_o)10^{-3} \times \left[215 - 6,6p - 72,9v_n + 129,2pv_n + 87,2(p+0,086)^{\frac{1}{3}} \right], \quad (26)$$

$$E_{уд} = \frac{3,6(2-\eta_o)10^{-6}}{Bh} \times \left[215 - 6,6p - 72,9v_n + 129,2pv_n + 87,2(p+0,086)^{\frac{1}{3}} \right]. \quad (27)$$

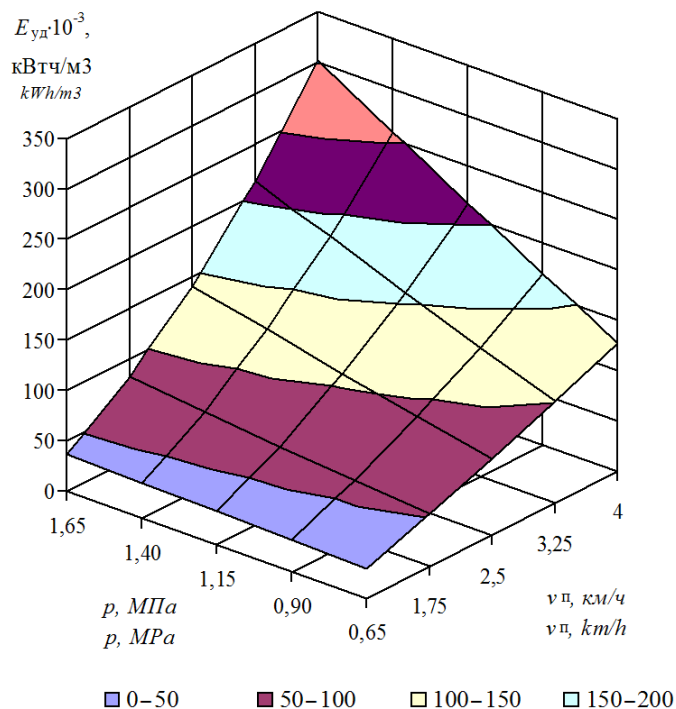
Подставленные значения твердости почвы $p = 0,65 \dots 1,65$ МПа и скоростных режимов движения $v_n = 1 \dots 4$ км/ч в условия (26) и (27) значений твердости почвы $p = 0,65 \dots 1,65$ МПа и скоростных режимов движения $v_n = 1 \dots 4$ км/ч, позволили получить графические интерпретации требуемой мощности для функционирования мотоблока с лемешно-отвальным плугом

и энергоемкости процесса вспашки почвы, в зависимости от конкретных условий эксплуатации (1 и 2).

Полученные модели $P = f(p; v_n)$ и $E_{уд} = f(p; v_n)$ наглядно демонстрируют изменение энергетических параметров пахотного агрегата на базе мотоблока с лемешно-отвальным плугом.

Из анализа рисунка 1 следует, что значение требуемой мощности двигателя P изменяется в пределах от 1,3 до 13,3 кВт в интервале значений твердости почвы от 0,65 до 1,65 МПа и скорости движения мотоблока от 1 до 4 км/ч. При этом более интенсивный рост требуемой мощности наблюдается с увеличением скорости движения мотоблока.

Аналогично анализируя график удельной энергоемкости $E_{уд}$ (рис. 2), можно сделать выводы, что в указанных пределах изменения твердости почвы и скорости движения пахотного агрегата



Р и с. 2. Модель удельной энергоёмкости обработки почвы $E_{уд}$ от скорости движения мотоблока и твердости почвы

Fig. 2. Model of specific energy intensity of soil tillage $E_{уд}$ from the speed of the motor unit and the hardness of the soil

та значение $E_{уд}$ изменяется в пределах от $28,7 \cdot 10^{-3}$ до $301,6 \cdot 10^{-3}$ кВт·ч/м³. При этом, как в случае с требуемой мощностью двигателя, с увеличением скорости движения мотоблока наблюдается более интенсивный рост значений энергоёмкости процесса обработки почвы.

Обсуждение и заключение

Полученные уравнения расчета требуемой мощности для обеспечения работоспособности мотоблока в агрегате с лемешно-отвальным плугом (17) и энергоёмкости процесса вспашки почвы (20) с использованием регрессионных моделей (21), (22) и (23) силовых характеристик взаимодействия его корпуса с почвой R_x , R_y и R_z позволяют оценить энергетические затраты при функционировании мотоблока, приняв во

внимание его конструктивные параметры и технологические режимы работы.

Кроме этого, учитывая состав пахотного агрегата, состоящего из мотоблока «Нева» МБ-2С-7,5 Pro и лемешно-отвального плуга П1-20/3, были получены их частные решения, способствующие выбору оптимальных режимов его функционирования.

Также из анализа полученных графических зависимостей (рис. 1 и 2) следует, что в интервале значений твердости почвы от 0,65 до 1,65 МПа и скорости движения мотоблока от 1 до 4 км/ч значения требуемой мощности двигателя P изменяются в пределах от 1,3 до 13,3 кВт, а удельной энергоёмкости $E_{уд}$ изменяются в пределах от $28,7 \cdot 10^{-3}$ до $301,6 \cdot 10^{-3}$ кВт·ч/м³.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Василенко В. В., Коржов С. И., Василенко С. В., Хахулин А. Н.** Способы повышения качества отвальной вспашки // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2014. № 3. С. 118–122. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243>
2. Integrated Farm Management for Sustainable Agriculture: Lessons for Knowledge Exchange and Policy / D. C. Rose [et al.] // Land use Policy. 2019. Vol. 81. Pp. 834–842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.001>
3. **Causarano Н.** Factors Affecting the Tensile Strength of Soil Aggregates // Soil and Tillage Research. 1993. Vol. 28, Issue 1. Pp. 15–25. URL: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=NL9306567> (дата обращения: 13.06.2019).
4. **Kim J. H., Kim K. U., Wu Y. G.** Analysis of Transmission Loads of Agricultural Tractors // Journal of Terramechanics. 2000. Vol. 37, Issue 3. Pp. 113–125. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(99\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(99)00022-1)
5. **Купряшкин В. Ф., Наумкин Н. И., Фирстов А. Ф., Уланов А. С.** Анализ динамических нагрузок в приводе машины для обработки почвы в теплицах МПТ-1,2 // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5, ч. 1. С. 94–100. URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=33725> (дата обращения: 13.06.2019).
6. **Мингалимов Р. Р., Мусин Р. М.** Исследования процесса образования и использования дополнительной движущей силы машинно-тракторного агрегата в результате применения движителей-рыхлителей // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 1. С. 126–132. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-protssessa-obrazovaniya-i-ispolzovaniya-dopolnitelnoy-dvizhuschey-sily-mashinno-traktornogo-agregata-v-rezultate> (дата обращения: 13.06.2019).
7. **Донцов И. Е., Лысыч М. Н., Шабанов М. Л.** Результаты лабораторных исследований силовых параметров почвообрабатывающих рабочих органов // Лесотехнический журнал. 2017. Вып. 7, № 2. С. 166–175. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5967eaca8aa488.95157042
8. **Безруков А. В., Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф., Еремкин И. В.** Анализ баланса мощности, расходуемой самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезой с автоматическим регулированием режимов работы // Машиноведение. 2015. Вып. 1. С. 37–42. URL: <http://imash.kg/index.php/zhurnal-mashinovedenie-2015-vypusk-1> (дата обращения: 13.06.2019).
9. **Гуреев И. И., Климов Н. С.** Минимизация энергоемкости фрезерной обработки почвы // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 1. С. 64–67. DOI: <https://doi.org/10.18551/issn1997-0749.2018-01>
10. **Мяснишев Д. Г.** Проектирование мотоблоков с учетом требований эргономики // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1996. № 12. С. 15–20. URL: <http://www.tismash.ru> (дата обращения: 13.06.2019).
11. **Mattetti M., Varani M., Molari G., Morelli F.** Influence of the Speed on Soil-Pressure over a Plough // Biosystems Engineering. 2017. Vol. 156. Pp. 136–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.009>
12. **Horn R. F., Taubner H., Wuttke M., Baumgartl T.** Soil Physical Properties Related to Soil Structure // Soil and Tillage Research. 1994. Vol. 30, Issue 2. Pp. 187–216. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90005-1)
13. **Шмонин В. А.** Теория, конструкция и расчет ротационных почвообрабатывающих машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 7. URL: <https://rucont.ru/efd/356670> (дата обращения: 13.06.2019).
14. **Мударисов С. Г.** Моделирование процесса взаимодействия рабочих органов с почвой // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. № 7. С. 27–30. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200507.htm> (дата обращения: 13.06.2019).
15. **Girma G.** Dynamic Effects of Speed, Depth and Soil Strength Upon Forces on Plough Components // Journal of Agricultural Engineering Research. 1992. Vol. 51. Pp. 47–66. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(92\)80025-N](https://doi.org/10.1016/0021-8634(92)80025-N)
16. **Донцов И. Е., Лысыч М. Н.** Установака для объемного динамометрирования почвообрабатывающих рабочих органов и результаты ее использования // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2017. № 2. С. 9–18. URL: <https://www.rucont.ru/efd/623597> (дата обращения: 13.06.2019).

17. **Мяленко В. И., Маринов Н. А.** Пространственное динамометрирование рабочих органов почвообрабатывающих орудий // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 5. С. 22–26. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-5-22-26>

18. **Овчинников В. А., Чаткин М. Н., Овчинникова А. В.** Оптимизация параметров и режимов работы дискового высевающего аппарата по критерию равномерности высева // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 379–388. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.379-388>

19. **Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Наумкин Н. И.** Обоснование конструкции динамометрического модуля для исследования лемешно-отвального плуга мотоблока и его практическая апробация с использованием технологий реверс-инжиниринга // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 400–415. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.400-415>

20. **Смагин В. П., Заздравный А. Н.** Агрономическое значение твердости почв // Почвоведение. 1981. № 2. С. 138–141. URL: http://www.pochva.com/index.php?content=5&journal=%CF%E5%F7%E2%E5%E2%E5%E4%E5%ED%E8%E5&year=1981&number=2&number_id=622 (дата обращения: 13.06.2019).

21. Method and System of Plowing Depth Online Sensing for Reversible Plough / Yin Yanxin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, Issue 17. Pp. 326–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.199>

Поступила 28.02.2019; принята к публикации 11.04.2019; опубликована онлайн 30.09.2019

Об авторах:

Купряшкин Владимир Федорович, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, г. Саранск, р. п. Ялга, ул. Российская, д. 5), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: L-5153-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, kupwf@mail.ru

Уланов Александр Сергеевич, инженер кафедры основ конструирования механизмов и машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, г. Саранск, р. п. Ялга, ул. Российская, д. 5), ResearcherID: L-4662-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Наумкин Николай Иванович, заведующий кафедрой основ конструирования механизмов и машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, г. Саранск, р. п. Ялга, ул. Российская, д. 5), доктор педагогических наук, кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: L-4643-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, naumN@yandex.ru

Безруков Анатолий Владимирович, доцент кафедры основ конструирования механизмов и машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, г. Саранск, р. п. Ялга, ул. Российская, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: N-5459-2016, bezrukow157@yandex.ru

Шляпников Михаил Геннадьевич, аспирант кафедры основ конструирования механизмов и машин, институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, г. Саранск, р. п. Ялга, ул. Российская, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4784-4695>, mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. Ф. Купряшкин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формирование выводов, теоретическое обоснование конструкции модуля для динамометрирования; А. С. Уланов – литературный анализ, проведение лабораторных исследований лемешно-отвального плуга мотоблока, обработка результатов эксперимента, редактирование текста; Н. И. Наумкин – участие в теоретических исследованиях, проведение критического анализа исследования и доработка текста; А. В. Безруков – компьютерные работы и верстка текста; М. Г. Шляпников – визуализация текста, обработка результатов эксперимента.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Vasilenko V.V., Korzhov S.I., Vasilenko S.V., Khakhulin A.N. Ways to Quality Improvement of Moldboard Plowing. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Voronezh State Agrarian University Bulletin*. 2014; (3):118-122. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243>
2. Rosea D.C., Sutherlandb W.J., Barnes A.P., Borthwickc F., et al. Integrated Farm Management for Sustainable Agriculture: Lessons for Knowledge Exchange and Policy. *Land Use Policy*. 2019; 81:834-842. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.001>
3. Caसारano H. Factors Affecting the Tensile Strength of Soil Aggregates. *Soil and Tillage Research*. 1993; 28(1):15-25. Available at: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=NL9306567> (accessed 13.06.2019). (In Eng.)
4. Kim J.H., Kim K.U., Wu Y.G. Analysis of Transmission Load of Agricultural Tractors. *Journal of Terramechanics*. 2000; 37(3):113-125. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(99\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(99)00022-1)
5. Kupryashkin V.F., Naumkin N.I., Firstov A.F., Ulanov A.S. Analysis of Dynamic Loads in the Drive of a Machine for Tillage in Greenhouses MPT-1,2. *Sovremennyye naukoemkie tehnologii = Modern High Technologies*. 2014; (5):94-100. Available at: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=33725> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
6. Mingalimov R.R., Musin R.M. Studies of the Process of Formation and Use of Additional Driving Force of Machine-Tractor Unit as a Result of Application of Propulsion-Rippers. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskohozyaystvennoy akademii = Ulyanovsk State Agricultural Academy Bulletin*. 2015; (1):126-132. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-protssessa-obrazovaniya-i-ispolzovaniya-dopolnitelnoy-dvizhushchey-sily-mashinno-traktornogo-agregata-v-rezultate> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
7. Dontsov I.Ye., Lysykh M.N., Shabanov M.L. Results of Laboratory Studies of Power Parameters of Tillage Workers. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forest Engineering Journal*. 2017; 7(2):166-175. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.12737/artide_5967eaca8aa488.95157042
8. Bezrukov A.V., Naumkin N.I., Kupryashkin V.F., Eremkin I.V. Analysis of the Balance of Power Consumed by a Self-Propelled Small-Sized Tillage Cutter with Automatic Control of Operating Modes. *Mashinovedenie = Mechanical Science*. 2015; (1):37-42. Available at: <http://imash.kg/index.php/zhurnal-mashinovedenie-2015-vypusk-1> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
9. Gureev I.I., Klimov N.S. Minimizing the Energy Intensity of Milling Tillage. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskohozyaystvennoy akademii = Vestnik of the Kursk State Agricultural Academy*. 2016; (1):64-67. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18551/issn1997-0749.2018-01>
10. Myasishchev D.G. Design of Motor-Blocks with Regard to the Requirements of Ergonomics. *Traktory i selskohozyaystvennyie mashiny = Tractors and Agricultural Machines*. 1996; (12):15-20. Available at: <http://www.tismash.ru> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
11. Mattetti M., Varani M., Molari G., Morelli F. Influence of the Speed on Soil-Pressure over a Plough. *Bio-systems Engineering*. 2017; 156:136-147. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.009>
12. Horn R.F., Taubner H., Wuttke M., Baumgartl T. Soil Physical Properties Related to Soil Structure. *Soil and Tillage Research*. 1994; 30(2):187-216. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90005-1)
13. Shmonin V.A. Theory, Design and Calculation of Rotary Tillage Machines. *Traktory i selskohozyaystvennyie mashiny = Tractors and Agricultural Machines*. 2008; (7). Available at: <https://rucont.ru/efd/356670> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
14. Mudarisov S.G. Modeling the Process of Interaction of Working Bodies with the Soil. *Traktory i selskohozyaystvennyie mashiny = Tractors and Agricultural Machines*. 2005; (7):27-30. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200507.htm> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
15. Girma G. Dynamic Effects of Speed, Depth and Soil Strength upon Forces on Plough Components. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1992; 51:47-66. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(92\)80025-N](https://doi.org/10.1016/0021-8634(92)80025-N)
16. Dontsov I.Ye., Lysykh M.N. Installation for Three-Dimensional Dynamic Measurement of the Tilling Tools and the Results of Its Use. *Traktory i selskohozyaystvennyie mashiny = Tractors and Agricultural Machines*. 2017; (2):9-18. Available at: <https://www.rucont.ru/efd/623597> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)

17. Myalenko V.I., Marinov N.A. Spatial Dynamometering of Working Tools of Agricultural Implements. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2017; (5):22-26. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-11-5-22-26>

18. Ovchinnikov V.A., Chatkin M.N., Ovchinnikova A.V. Optimization of Parameters and Operating Modes of Disc Sowing Device According to Seeding Uniformity Criterion. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):379-388. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.379-388>

19. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I. Design of a Dynamometric Module for Studying a Motoblock Share-Moldboard Plow and Its Practical Testing by Using Reverse Engineering. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):400-415. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.400-415>

20. Smagin V.P., Zazdravny A.N. Agronomical Significance of Soil Hardness. *Pochvovedenie* = Soil Science. 1981; (2):138-141. Available at: http://www.pochva.com/index.php?content=5&journal=%CF%EE%F7%E2%EE%E2%E5%E4%E5%ED%E8%E5&year=1981&number=2&number_id=622 (accessed 13.06.2019). (In Russ.)

21. Yin Y., Guo S., Meng Z., Qin W., et al. Method and System of Plowing Depth On-line Sensing for Reversible Plough. *IFAC-PapersOnLine*. 2018; 51(17):326-331. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.199>

Received 28.02.2019; revised 11.04.2019; published online 30.09.2019

About authors:

Vladimir F. Kupryashkin, Head of Chair of Mobile Energy Facilities and Agricultural Machinery, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Yalga, Saransk 430904, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ResearcherID: L-5153-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, kupwf@mail.ru

Aleksandr S. Ulanov, Engineer of Chair of Design Principles of Machines and Mechanisms, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Yalga, Saransk 430904, Russia), ResearcherID: L-4662-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Nikolay I. Naumkin, Head of Chair of Basic Design of Mechanisms and Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Yalga, Saransk 430904, Russia), D.Sc. (Pedagogy), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: L-4643-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, naumn@yandex.ru

Anatoliy V. Bezrukov, Associate Professor of Chair of Basic Design of Mechanisms and Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Yalga, Saransk 430904, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: N-5459-2016, bezrukow157@yandex.ru

Michail G. Shlyapnikov, Postgraduate Student of Chair of Basic Design of Mechanisms and Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Yalga, Saransk 430904, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4784-4695>, mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. F. Kupryashkin – scientific management, formulation of the main concept of a research, writing the draft and drawing the conclusions, theoretical justification of a design of the module for dynamometer test; A. S. Ulanov – review of the relevant literature, carrying out laboratory researches of the motor-block moldboard plow, processing the results of the experiment, text editing; N. I. Naumkin – participation in theoretical studies, critical analysis of the study and revision of the text; A. V. Bezrukov – word processing, M. G. Shlyapnikov – visualization, processing of the results of the experiment.

All authors have read and approved the final manuscript.