

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/5>

УДК 630*235.2



Моделирование взаимодействия задних вырезных дисков лесного дискового плуга с почвой при работе на вырубках

Александр Г. Князев, ✉ Knjazv-sasha@rambler.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5139-0374>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В работе приведен обзор исследований рабочих процессов дисковых рабочих органов технологических машин, обеспечивающих обработку почвы на разных стадиях ведения сельского и лесного хозяйства. Применяемые конструкции лесных дисковых почвообрабатывающих орудий, имеют существенные недостатки, заключающиеся в недостаточной заглубляемости дисков, из-за чего происходит обработка почвы недостаточного качества, а также высоких динамических нагрузок при встрече с различными препятствиями, которые снижают ресурс агрегата. Задачей представленного исследования является совершенствование рабочих процессов лесных дисковых плугов путем анализа свойств вырезных дисков с гидроприводом с целью увеличить их эффективность. Разработана математическая модель дискового рабочего органа с гидроприводом задних дисков с вырезами для полосной обработки почвы в лесных, корненасыщенных условиях. Выявлены максимальные показатели давлений рабочей жидкости в гидросистема. При изменении угла атаки сферических дисков от 0 до 30° давление рабочей жидкости снижается на 23 %. При дальнейшем увеличении угла атаки до 45° давление рабочей жидкости возрастает на 15 %, что говорит о нелинейной зависимости этих параметров. Максимальное тяговое сопротивление возрастает при изменении угла атаки сферического диска от 0 до 30° и увеличивается на 29 %, а после изменения угла атаки на 45° поднимается на 11 %. По выведенным формулам можно приблизительно определить кинематические и динамические параметры дисковых рабочих органов, имеющих вырезы на режущей поверхности диска.

Ключевые слова: дисковый плуг, гидропривод, вырубки, диск с вырезами, рабочий процесс, математическая модель

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: автор выражает благодарность научному руководителю профессору, д-ру техн. наук Драпалюку М.В., а также профессору кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ д-ру техн. наук Попикову П.И. за консультации при подготовке материала.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Князев, А. Г. Моделирование взаимодействия задних вырезных дисков лесного дискового плуга с почвой при работе на вырубках / А. Г. Князев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 81–94. – Библиогр.: с. 90–94 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/5>.

Поступила 27.11.2023. Пересмотрена 27.12.2023. Принята 16.01.2024. Опубликовано онлайн 20.03.2024.

Article

Modeling the interaction of the rear cut-out discs of a forest disc plow with the soil when working in clearings

Alexander G. Knyazev, ✉ Knjazv-sasha@rambler.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5139-0374>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

The paper provides an overview of studies of the working processes of disk working bodies of technological machines that provide soil cultivation at different stages of agriculture and forestry. The used designs of forest disk tillage implement have significant disadvantages, namely, insufficient depth of the disks, which results in soil cultivation of insufficient quality, as well as high dynamic loads when encountering various obstacles, which reduce the resource of the unit. The objective of the presented research is to improve the working processes of forestry disc plows by analyzing the properties of hydraulically driven cut-out discs in order to increase their efficiency. A mathematical model of a disk working body with hydraulically driven rear discs with cutouts for strip tillage in forest, root-saturated conditions has been developed. The maximum pressure values of the working fluid in the hydraulic system have been identified. When the angle of attack of the spherical disks changes from 0 to 30°, the pressure of the working fluid decreases by 23%. With a further increase in the angle of attack to 45°, the pressure of the working fluid increases by 15%, which indicates a nonlinear dependence of these parameters. The maximum traction resistance increases when the angle of attack of the spherical disk changes from 0 to 30° and increases by 29%, and after changing the angle of attack to 45° it increases by 11%. Using the derived formulas, it is possible to approximately determine the kinematic and dynamic parameters of disk working bodies that have cutouts on the cutting surface of the disk.

Keywords: *disk plow, hydraulic drive, cutting, disk with cutouts, work process, mathematical model*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: the author would like to express their gratitude to their scientific supervisor, Professor M.V. Drapalyuk, as well as to Professor P.I. Popikov, Doctor of Technical Science, of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design at the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, for their consultations during the preparation of this manuscript.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

For citation: Knyazev A. G. (2024). Modeling the interaction of the rear cut-out discs of a forest disc plow with the soil when working in clearings. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 81-94 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/5>.

Received 27.11.2023. **Revised** 27.12.2023. **Accepted** 16.01.2024. **Published online** 20.03.2024.

Введение

При создании новых механизмов для лесного хозяйства, таких как дисковые плуги, необходимо учитывать ряд критически важных показателей, чтобы обеспечить их эффективную работу на стадии производства. Одним из способов достижения мак-

симальной работоспособности такого орудия является использование математической модели, которая описывает процессы, возникающие при его работе. Она позволяет учесть различные факторы, влияющие на работу орудия, и оптимизировать его производительность. Модель может учитывать такие

параметры, как глубина обработки, скорость движения плуга, угол атаки дисков и другие важные характеристики. Одним из преимуществ математической модели является возможность изменения входных данных и получения оптимальных показателей работоспособности дискового плуга. Таким образом, применение математической модели при разработке нового механизма дисковых плугов с принудительным вращением рабочих органов от гидромотора является необходимым шагом для достижения оптимальных показателей работоспособности орудия.

В научных статьях Д.С. Раабе, С.В. Малюкова, В.А. Великанова обоснована актуальность практического применения в сельском и лесном хозяйствах рабочих органов, оснащенных сферическими дисками [1-3]. Особенно эффективно зарекомендовали себя в комбинированном исполнении с другими рабочими органами, что повышает производительность.

Исследования Е.В. Припорова (2019) [4], проводимые по повышению качества обработки почвы дисковыми рабочими органами, выявили зависимости коэффициента измельчения междискового пространства от угла атаки при использовании орудий батарейного типа.

В результатах исследований С.Н. Долматова и Н.В. Сухенко (2022) [5] были выявлены определённые закономерности, влияющие на кинематические характеристики в процессе обработки лесных почв при использовании дисковых рыхлительных орудий. Определен характер движения пласта почвы по рабочей поверхности дискового рыхлителя. В результате параметры рабочего органа: геометрический анализ процесса образования борозд при обработке почвы дисковым рыхлителем, предлагаются следующие профили борозды с углами наклона 45° ; угол наклона лемешной части рабочей лопатки ножа дискового рабочего органа должен уменьшаться от носка ножа к его тыльной поверхности.

В работе С.В. Зимарина и И.В. Четвериковой (2021) [6] рассмотрены процессы схода почвопласта с поверхности диска. Определены зависимости, оказывающие влияние на параметры дискового корпуса плуга и смещение частицы от края борозды. При изменении величины повышения почвенного пласта

по плоскости диска, не допуская их начала движения схода при угле ϕ больше 100° , будет предотвращаться падение земли в борозду. Полученные уравнения позволяют определять эксплуатационные характеристики рабочего органа. Дисковые рабочие органы получили широкое распространение при использовании их на нераскорчёванных вырубках. Для того чтобы предохранить рабочий орган от забивания почвой и другими материалами, их корпуса соединяются с рамой агрегата по отдельности.

Для ускорения процесса исследования применяют системы автоматизированного проектирования. М.Н. Лысыч (2020) [7] выявил воздействие угла атаки рабочего органа на силовые параметры, такие как силу тяги, тяговую мощность и т.п.

В работах В.П. Горобей (2019) и К.С. Перфильевой (2022) [8, 15] рассмотрено тяговое сопротивление дискового рабочего органа в зависимости от угла атаки и высоты зубцов при зубчатом дисковом ноже. Они выявили, что если угол атаки больше 35° , то обработка почвы будет значительно лучше, чем при угле атаки 15° . При угле атаки до 25° тяговое сопротивление увеличивается по прямолинейной зависимости, а при дальнейшем увеличении по криволинейной зависимости с максимальным значением при угле атаки 35° . При использовании зубчатых дисков с увеличением глубины зубьев диска тяговое сопротивление уменьшается по обратной зависимости. Так же они выявили, что оптимальной высотой зуба является высота, равная 3 см. Для того чтобы еще снизить энергозатраты авторы предлагают использовать такой диск, как режущий нож, установленный перед основными рыхлительными рабочими органами.

Проанализировали перемещение грунта по предплужнику и кинематический анализ дискового рабочего органа В.И. Коновалов и соавторы (2023); И.С. Крук (2022) [9, 12] Автор выявил параметры движения пласта с учетом конструктивных, технологических свойств предплужника и физико-механических свойств почвы. На расстояние отбрасывания частиц грунта от предплужника большее значение оказывает угол крена диска и угол атаки, соответственно, чем выше значения этих параметров, тем на большее расстояние отбрасывается грунт. Вектор абсолютной скорости свободной точки при

любом угле поворота диска ускоряется за счет увеличения поступательной линейной скорости диска, при этом ускоренный вектор становится наиболее активным при углах поворота $\pi/2$ до $2\pi/3$. Участок внутренней рабочей поверхности, с которого удаляется грунт, расположен в том же месте. Проанализировав эти зависимости пришли к выводу, что для обеспечения качественной вспашки при любом состоянии почвы можно еще на стадии проектирования агрегата, а также за счет обоснования оптимальных параметров установки дисковых предплужников на раме плуга.

В работе Князева А.Г. и др. (2020) представлена математическая модель взаимодействия рабочих органов грунтометателя с грунтом [10]. Эта математическая модель позволяет исследовать эффективность машины на основе компьютерных экспериментов. Цель данного исследования заключалась в теоретическом анализе процессов формирования почвенного потока, его передвижения в воздухе и его воздействия на распространение лесных пожаров. Для достижения этой цели была разработана специальная модель, которая позволяет изучить влияние основных параметров рабочих органов на производительность, качество и энергопотребление определенного типа грунтомета. В рамках данного исследования также была разработана компьютерная программа, которая позволяет провести подробный анализ указанных параметров и установить их влияние на эксплуатационные характеристики этого грунтомета. Оптимальную скорость шнека можно рекомендовать в диапазоне $3,0-3,5 \text{ с}^{-1}$. В этом диапазоне в грунтовом потоке содержится растительных остатков менее 15%, производительность составляет более 40 кг/с, средняя дальность метания грунта более 11 м, потребляемая мощность менее 11 кВт.

Работа С.В. Зимарина (2018) [11], проводимая по исследованию дискатора, позволила определить оптимальный диапазон отношений радиуса отверстия сферического диска к его наружному радиусу, который составил 0,65/0,8. При увеличении угла атаки и диаметра диска увеличивается радиус кривизны отвала.

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить выражение, которое помогает сформировать идеальные параметры корпуса дискатора. Исследование также показало, как от конструктивно – технологических характеристик орудия зависит угол неустойчивого равновесия пласта. Это позволяет более точно настроить орудие и достичь требуемых результатов при обработке почвы. Были выведены формулы С. Г. Рудневым и соавторами (2021) [13], определяющие связь гребнистости дна борозды и поперечного сечения пласта с параметрами рабочего органа дискового плуга. Установил, что гребнистость профиля дна борозды не зависит от глубины вспашки, а определяется радиусом диска, расстановкой смежных дисков, углами постановки дисков.

П.И. Попиков и соавторы (2021) [14] представили результаты моделирования гидропривода во время использования шнекового лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя. Получив необходимые характеристики и данные при работе агрегата на участке с препятствиями, они выявили, что при прохождении неровности высотой 0,1 м достигается максимальное среднее значение равное 1468,49 Н×м. при этом скорость вращения шнека составляла 400 мин^{-1} . Работоспособность гидропривода не нарушается за счет срабатывания предохранительного клапана.

Другим важным аспектом является оптимизация параметров циклического резания грунта. Применяя методику оптимизации, можно определить конкретные показатели параметров в процессе оборота ротора орудия. Для определения факторов, которые влияют на работу орудия такие как: масса сдвигаемого грунта, сила необходимая для смещения почвы активным рабочим органом и др., необходимо строить графики зависимости параметров резания грунта от угла поворота орудия.

López-Vázquez A. и соавторы (2019) [16] рассмотрели, как оказывает влияние на производительность и плотность почвообрабатывающих систем количество затраченной энергии при работе на песчаном грунте. Он выявил что экономия увеличивается примерно в 1,6 - 1,9 раз, при условии использования сеялки (CHDP) и безотвальной обработки почвы.

Сравнительный анализ математических моделей при планировании тягового усилия плуга дискового типа в условиях глинисто – суглинистого грунта провёл в своей работе Shafaei S. и др. (2018) [17]. Результаты моделирования подтвердили, что использование математической модели является эффективным инструментом для определения параметров и прогнозирования работоспособности орудия.

Несколько разновидностей сельскохозяйственных орудий исследовал S.Almaliki (2018) [18]. Используя методику, введенную Джорджем Э.П. Боксом и К.Б. Уилсоном, – методологию поверхности отклика – он рассчитывал тяговое усилие. После проведенных расчетов пришёл к выводу, что отвальный плуг требует самые большие усилия. Динамические характеристики моделей были удовлетворительными, тяговое усилие было предсказано с надёжностью около 95 %. Валидация была допустимой и подходящей.

Отличительной особенностью модели Н. Ю. Юдина и др. (2021) [19] является то, что она позволяет достаточно правильно выбрать типоразмер гидромоторов и рассчитать определенные значения давления в системе и скоростей исполнительных движений гидромоторов. Научная новизна авторского подхода заключается в том, что в результате решения задачи получена математическая модель, объединяющая три одновременно протекающих процесса: изменение давления в гидросистеме; перемещение поршней гидроцилиндров и ротора гидромотора, связанное с изменением давления; возникновение сил инерции, зависящих от ускорений, которые, в свою очередь, являются второй производной перемещения. На основе полученной модели был разработан алгоритм построения программного модуля, обеспечивающий верификацию этой модели. Полученные результаты были сопоставлены с экспериментальными, что позволило сделать вывод.

В итоге было выявлено, что для улучшения качества обработки почвы, необходимо использовать лесные почвообрабатывающие орудия дискового типа с комбинированными вырезными и сплошными дисками.

У большинства уже используемых конструкций лесных плугов, используемых на нераскорчеванных вырубках есть определенные недостатки. Задние диски не используются полностью и их заглубление недостаточное, а также при наезде на препятствие возникают высокие ударные нагрузки.

Задачей представленного исследования является совершенствование рабочих процессов лесных дисковых плугов путем анализа свойств вырезных дисков с гидроприводом с целью увеличить их эффективность.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Прототипом в представленном исследовании послужил дисковый плуг ПЛД-1,2, предназначенный для работ в лесных условиях (рис. 1), имеющий ряд недостатков. Предложена усовершенствованная конструкция за счет использования вырезных дисковых рабочих органов, оборудованных гидроприводом. Это позволит увеличить качество обработки почвы.

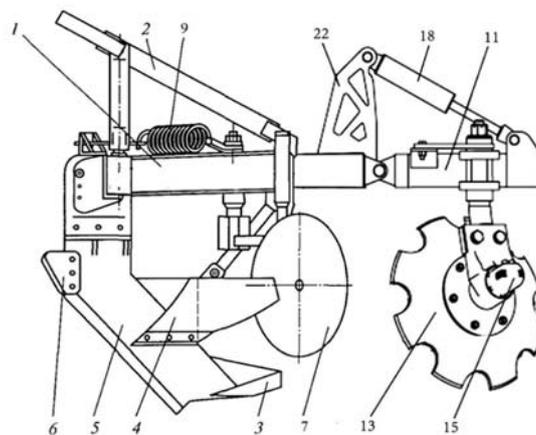


Рисунок 1. Лесной дисковый плуг: 1 – передняя рама; 2 – подвесное устройство; 3 – рыхлительная лапа; 4 – дерносор; 5 – черенковый нож; 6 – лобовик; 7 – передний дисковый корпус; 9 – предохранительная пружина 11 – задняя рама; 13 – задний дисковый корпус; 15 – гидромотор; 18 – гидроцилиндр; 22 – стойка

Figure 1. Forest disk plow: 1 – front frame; 2 – hanging device; 3 – ripper paw; 4 – turf; 5 – cutting knife; 6 – windshield; 7 – front disk housing; 9 – safety spring 11 – rear frame; 13 – rear disk housing; 15 – hydraulic motor; 18 – hydraulic cylinder; 22 – stand

Источник: Собственная композиция автора
Source: Authors' own composition

Предметом исследования является взаимодействие сферических дисков, имеющих вырезы на режущей поверхности с почвой при принудительном вращении от гидромоторов.

Исходя из расчетной схемы заднего сферического диска, имеющего вырезы (рис. 2), была предложена математическая модель, имитирующая взаимодействия почвы с вырезным сферическим диском.

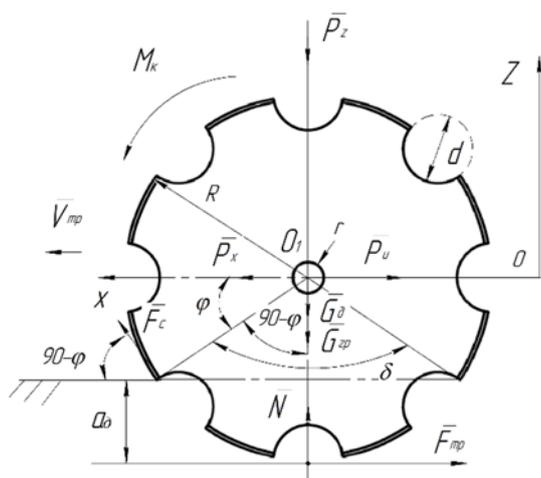


Рисунок 2. Расчетная схема вырезного сферического диска, функционирующего от гидромотора гидропривода трактора:

G_d, G_{gr} -силы тяжести диска и почвы на диске, V_{mp} -скорость трактора, P_z - сила предохранителя, N -реакция поверхности почвы, F_{mp} - сила сопротивления перекачиванию диска, M_k - крутящий момент гидромотора, P_x - тяговая сила, P_u - сила инерции, F_c - сила сопротивления резанию

Figure 2. Design diagram of a cut-out spherical disk operating from a tractor hydraulic motor:

G_d, G_{gr} - gravity force of the disk and soil on the disk, V_{tr} - tractor speed, P_z - force of the fuse spring, N - reaction of the soil surface, F_{tr} - resistance force to the disk rolling, M_k - torque of the hydraulic motor, P_x - traction force, P_i - inertia force, F_c - cutting resistance force

Источник: Собственные композиции автора

Source: Authors' own calculation

Теоретические предпосылки

Рабочий процесс дискового плуга в представленном исследовании описан в виде системы дифференциальных уравнений, содержащей в себе уравнение поступательного (1) движения и уравнение

вращательного (2) движения сферического диска. В этой системе дополнительно рассмотрено уравнение расхода рабочей жидкости в гидроприводе рабочего органа (3):

$$\left\{ \begin{aligned} (M_d + M_{gr}) \frac{d^2 x}{dt^2} &= P_x - [G_d + G_{gr} + P_z] f + \\ &+ 0,5 k_{y\phi} \cdot \left[R^2 \left(\frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5 \pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \\ &\cdot \cos(90^0 - \varphi); \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} I_{pr} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= \frac{q_m}{2\pi} \cdot p - [G_d + G_{gr} + P_z] R f - \\ &- \left[0,5 k_{y\phi} \cdot R^2 \left(\frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5 \pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot R; \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} q_n n_n &= \frac{q_m}{\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + a_y \cdot p + K_p \cdot \frac{dp}{dt} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где G_d, G_{gr} - силы тяжести диска и почвы, налипшей на диск, Н;

I_{pr} - приведенный момент инерции к валу гидромотора, кг·м²;

M_d, M_{gr} - масса диска и почвенного пласта на диске, кг;

R - радиус диска, м;

f - коэффициент трения скольжения;

d - диаметр выреза диска;

r - радиус ступицы, м;

t - время, с;

h - шаг интервала, с;

t - время, с;

b - ширина рабочей грани выреза на диске, м;

α - угол атаки сферического диска, рад;

δ - угол заглублиения диска в почву;

φ - угол поворота вала на диске, рад;

β - угол заточки выреза на диске, град;

p - давление рабочей жидкости в гидросистеме, Па;

n_n - частота вращения насоса, с⁻¹;

a_y - коэффициент утечек рабочей жидкости, м³/(с·Па);

q_n, q_m - рабочие объемы насоса и гидромотора, м³/об;

$\varphi_{тр}$ - угол трения почвы о поверхность сферического диска, град;

$K_{уд}$ - удельное сопротивление резанию сферического диска с вырезами;

K_p - коэффициент податливости упругих элементов гидропривода, м⁵/(Н·с).

Рассматривается задача Коши на участках (4):

$$\begin{aligned} (M_d + M_{gr}) \frac{d^2 x}{dt^2} &= P_x - [G_d + G_{gr} + P_z] f + \\ &+ 0,5k_{y0} \cdot \left[R^2 \left(\frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \\ &\cdot \cos(90^0 - \varphi); \\ I_{pr} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= \frac{q_m}{2\pi} \cdot p - [G_d + G_{gr} + P_z - F_c \cos \varphi] Rf - \\ &- \left[0,5k_{y0} \cdot R^2 \left(\frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot R; \end{aligned} \quad (4)$$

$$q_n n_n = \frac{q_m}{\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + a_y \cdot p + K_p \cdot \frac{dp}{dt}$$

$$x(t_0) = x^0, x'(t_0) = x^1$$

$$\varphi(t_0) = \varphi^0, \varphi'(t_0) = \varphi^1$$

$$p(t_0) = p^0$$

Для решения поставленной задачи необходимо аппроксимировать производные конечными разностями, при этом отрезок $[t_0; t_{end}]$ разобьём на n узловых точек t_i с шагом h : $t_{i+1} = t_i + h$; следовательно, величина шага будет равняться $h = (t_{end} - t_0) / n$. Выбор шага производим так, чтобы уравнение $h \neq K_p a_y^{-1}$ соблюдалась. В обозначениях, $x_i = x(t_i)$, $\varphi_i = \varphi(t_i)$, $p_i = p(t_i)$ имеем (5):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &\approx \frac{x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i}{h^2}, \\ \frac{d\varphi}{dt} &\approx \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{h}, \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \approx \frac{\varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + \varphi_i}{h^2}, \quad (5) \\ \frac{dp}{dt} &\approx \frac{p_{i+1} - p_i}{h}. \end{aligned}$$

Тогда систему уравнений (5) можно записать таким образом (6), выделив значение φ_{i+2} в первом уравнении и по аналогии φ_{i+2} во втором и умножив каждое на h^2 [20, 21]:

$$\begin{aligned} (M_d + M_{gr}) x_{i+2} &= 2(M_d + M_{gr}) x_{i+1} - \\ &- (M_d + M_{gr}) x_i + 2(M_d + M_{gr}) x_{i+1} - \\ &- (M_d + M_{gr}) x_i + h^2 P_x - h^2 (G_d + G_{gr} + P_z) f + \\ &+ h^2 0,5k_{y0} \cdot \left[R^2 \left(\frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \\ &\cdot \cos(90^0 - \varphi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{pr} \varphi_{i+2} &= 2I_{pr} \varphi_{i+1} - I_{pr} \varphi_i + h^2 \frac{q_m}{\pi} p_i - \\ &- h^2 \left[0,5k_{y0} \cdot R^2 \left(\frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \\ &\cdot R + h^2 Rf \cdot (G_d + G_{gr} + P_z - F_c \cos \varphi); \end{aligned}$$

(6)

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{q_m}{\pi} \varphi_{i+1} - \frac{q_m}{\pi} \varphi_i + K_p p_{i+1} + \\ &+ (ha_y - K_p) p_i - hq_n n_n. \end{aligned}$$

Рассмотрим второе и третье соотношения системы отдельно и запишем их в векторной форме (7-11):

$$Ay_{i+2} = By_{i+1} + F_i, \quad (7)$$

с операторами $A, B: R^2 \rightarrow R^2$

$$A = \begin{pmatrix} l_{pr} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 2l_{pr} & 0 \\ \frac{q_m}{\pi} & K_p \end{pmatrix}, \quad (8)$$

и вектор-последовательностями

$$y_i = \begin{pmatrix} \varphi_i \\ p_i \end{pmatrix}, F_i = \begin{pmatrix} F_i^{(1)} \\ F_i^{(2)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

в обозначениях:

$$\begin{aligned} F_i^{(1)} &= -l_{pr} \varphi_i + h^2 \frac{q_m}{2\pi} p_i - h^2 \cdot \\ &\cdot \left[0,5k_{y0} \cdot R^2 \left(\frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \\ &\cdot R + h^2 Rf (G_d + G_{gr} + P_z - F_c \cos \varphi_i), \end{aligned} \quad (10)$$

$$F_i^{(2)} = \frac{-q_m}{\pi} \varphi_i + (ha_y - K_p) p_i - hq_n n_n. \quad (11)$$

Дизайн эксперимента

В результате решений дифференциальных уравнений процесса работы лесного дискового орудия выведены и решены конечные формулы кинематических и динамических параметров диска с вырезами на режущей поверхности: ускорение поступательного движения сферического диска с вырезами,

поступательной скорости движения вдоль оси x , угла поворота сферического диска с вырезами, углового ускорения, давления рабочей жидкости в гидросистеме рабочего органа, силы тягового сопротивления при его взаимодействии с грунтом. При использовании программного обеспечения MS Excel визуализированы осциллограммы кинематических и динамических параметров рабочего процесса сферического диска с вырезами.

Проведя анализ этих осциллограмм сделаны общие графики зависимостей максимальных давлений в гидроприводе и тяговые усилия сферического диска с вырезами от угла атаки.

Анализ данных

На основании результатов компьютерного эксперимента с помощью программы MS Excel построили осциллограммы кинематических и динамических параметров работы дискового корпуса плуга, имеющего вырезы на режущей поверхности диска и принудительно вращающегося от гидромотора, с указанием уравнения регрессии коэффициента достоверности аппроксимации R^2 .

Результаты

Решение x_i вдоль оси OX т.е. прямолинейного поступательного движения сферического диска, имеющего вырезы с начальными значениями $x_0 = x^0$ и x_1 , определяемым формулой (12), равно:

$$x_i = x^0 + x^1 i h + \frac{h^2}{M_d + M_{gr}} \sum_{l=0}^{i-2} (i-l-1) \xi_l, \quad (12)$$

$i = 2, 3, \dots$

где $x_0 = x^0$, $x_1 = x^0 + x^1 h$.

$$\begin{aligned} \xi_l = & P_x - (G_d + G_{gr} + P_z) f + \\ & + 0,5k_{y\delta} \cdot \left[R^2 \left(\frac{\pi\delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \cos(90 - \varphi); \end{aligned} \quad (13)$$

Поступательная скорость движения сферического диска с вырезами в направлении оси ox можно определить по формуле (14):

$$\frac{dx}{dt}(t_i) \approx x^1 + \frac{h}{M_d + M_{gr}} \sum_{l=0}^{i-1} \xi_l, \quad (14)$$

Тогда ускорение движения сферического диска вдоль оси ox находится по формуле (15):

$$\frac{d^2x}{dt^2}(t_i) \approx \frac{1}{M_d + M_{gr}} \sum_{l=0}^{i-1} \xi_l, \quad (15)$$

Формулы (16-18) для нахождения величины давления рабочей жидкости в гидроприводе сферического диска $p = p(t_i)$:

$$p_i = p^0 (1 - hK_p^{-1} a_y)^i - \eta_{i-1} + \sum_{l=0}^{i-1} (1 - hK_p^{-1} a_y)^{i-1-l} \eta_l, \quad (16)$$

$i = 2, 3, \dots,$

где $p_0 = p^0$,

$$p_1 = p^0 (1 - hK_p^{-1} a_y) - K_p^{-1} \frac{q_m}{\pi} \varphi^1 h + hK_p^{-1} q_n n_n, \quad (17)$$

$$\eta_l = (1 - hK_p^{-1} a_y)^{-1} \left(-K_p^{-1} \frac{q_m}{\pi} \varphi_{l+1} + hK_p^{-1} q_n n_n \right) \quad (18)$$

Конечные формулы (19) для угла поворота вырезного сферического диска $\varphi = \varphi(t_i)$:

$$\begin{aligned} \varphi_{i+2} = & 2\varphi_{i+1} - \varphi_i + h^2 I_{pr}^{-1} \frac{q_m}{2\pi} p_i - h^2 I_{pr}^{-1} 0,5k_{y\delta} \cdot \\ & \cdot \left[R^2 \left(\frac{\pi\delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot R + \\ & + h^2 R f (G_d + G_{gr} + P_z - F_c \cos \varphi_i); \end{aligned} \quad (19)$$

$i = 0, 1, 2, \dots,$

где $\varphi_0 = \varphi^0$, $\varphi_1 = \varphi^0 + \varphi^1 h$.

в связи с этим, решение $x(t)$, $\varphi(t)$, $p(t)$ задач вычисляется приблизительно в виде показателей x_i , φ_i , p_i в каждой из точек t_i .

В процессе вычислительного эксперимента были получены осциллограммы изменения давления для различных углов атаки. После обработки осциллограмм выбраны максимальные давления в гидроприводе диска с вырезами и построена их зависимость от углов атаки, которая усреднена линией тренда (рис. 3).

Проведя расшифровку представленного графика (рис. 3) можно сделать выводы о изменениях давления рабочей жидкости в гидросистеме. При увеличении угла атаки от 0 до 30° показатели максимального давления рабочей жидкости снижаются на значения в диапазоне от 17 до 13 МПа. Регрессионный анализ и уравнение прогнозирования показывают ($R^2 = 0.9295$; $y = 0,0063x^2 - 0,349x + 18,395$). При увеличении угла атаки от 30 до 45° давление

поднимается до 15 МПа, что говорит о повышении нагрузки на гидропривод.

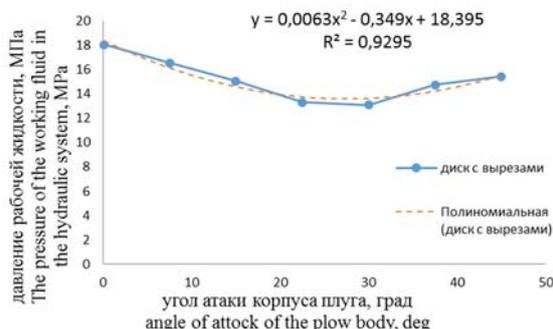


Рисунок 3. Общий график давления в гидроприводе диска

Figure 3. General graph of pressure in the hydraulic drive of the disk

Источник: Собственная композиция автора
Source: Authors' own calculation

В процессе обработки полученных осциллограмм выведен общий график (рис. 4) максимальных показателей тяговых усилий от угла атаки дисков с вырезами на режущей поверхности, статистически усредненная линией тренда.

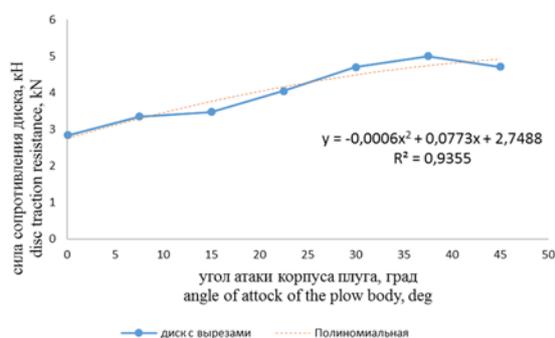


Рисунок 4. Зависимости тягового сопротивления диска от угла атаки

Figure 4. Dependence of the traction resistance of the disk on the angle of attack

Источник: Собственная композиция автора
Source: Authors' own calculation

Проведя расшифровку графика влияния угла атаки дисков с вырезами на максимальные значения тяговых усилий (рис. 4), можно сказать о том, что максимальное тяговое сопротивление за счет увеличения угла атаки дисков от 0 до 30° поднимается в диапазоне от 3 до 4,2 кН. Регрессионный показатель и уравнение тренда равно ($R^2 = 0,9355$;

$y = -0,0006x^2 + 0,0773x + 2,7488$). С последующим увеличением угла атаки до 45° значение максимального усилия становится 4,7 кН, что говорит о прямой зависимости угла атаки и тягового сопротивления.

Обсуждение

Проблематикой повышения качества обработки почвы дисковыми орудиями как в сельском, так и в лесном хозяйствах занимаются много ученых.

Особую роль занимает энергетическая составляющая процесса обработки почвы. Исследования по снижению тяговых сопротивлений занимают особую роль в этом направлении. В работе В.П. Горобей (2019) [8] исследуется тяговое сопротивление зубчатого дискового рабочего органа на различных скоростях движения агрегата. В процессе эксперимента выявлена закономерность между тяговым сопротивлением и высотой зуба. При увеличении высоты зуба тяговое сопротивление снижается в 3 раза с 300 до 100 Н ($R^2 = 0,93$). В работе также исследовались частотные колебания и связь их с графиком тяговых усилий. В работе рекомендовано устанавливать рабочие органы с амортизирующими механизмами для защиты орудия от разрушения.

В настоящем не учитывался колебательный (частотный) процесс, который оказывает большое влияние на долговечность агрегата.

Научные исследования К.С. Перфильевой (2022) [15] проводились над дисковым орудием батарейного типа луцильник ЛДГ-10. Рассчитывалась площадь поверхности контакта с почвой при углах атаки 15 и 35 градусов. Выведены конечные графики зависимостей тяговых сопротивлений дисков от углов атаки при глубине хода орудия 60 мм, 90 мм, 120 мм. Видно, что при увеличении угла атаки, сопротивление возрастает прямолинейно до угла атаки равным 25 градусов, а при последующем увеличивается угла атаки, криволинейно в 35 градусов.

Исследование показывает схожесть закономерностей в результатах, что подтверждается независимыми исследованиями при различных условиях и с учетом того, что исследовался процесс с принудительным вращением от гидромотора вырезного диска.

В результате исследования по кинематическому анализу процесса работы диска, имеющего

переменную кривизну рабочей поверхности, В.И. Коновалов, С.И. Коновалов, А.Г. Коновалов (2023) [9] сделали вывод, что поступательная скорость диска и угол атаки оказывает большое влияние на величину и направление абсолютной скорости точки. В связи с этим перемещение пласта вдоль рабочей поверхности приводит к повышению его крошения.

Отличительной особенностью этого исследования от представленного в статье является то, что здесь исследуется взаимодействие пласта почвы на внутренней поверхности диска с переменной кривизной профиля. Точка находится в свободном положении. Текущие допущения при математическом моделировании подразумевали контакт с почвой на режущей грани диска с учетом вырезов и принудительного вращения диска.

При использовании вырезных дисков в батаре [4] угол атаки вырезного диска изменялся от 12 градусов и до 24 градусов. Исследовалась зависимость ширины обработки почвы от угла атаки для двух диаметров диска 0,8 и 0,66 м. Выявлено, что диск диаметром 0,8 м имеет большую площадь обработки от 0,076 до 0,14 м развивающуюся по линейной зависимости, но при этом в междурядной обработке коэффициент измельчения междискового пространства ниже, чем у диска диаметром 0,66 м. При этом коэффициент рыхления почвы в междисковом пространстве для диска диаметром 0,66 м развивается по линейной зависимости от 0,6 до 1,2, что на 0,1 выше, чем у диска диаметром 0,8.

Коэффициент крошения почвы и ширина обработки полосы будут определены в будущих экспериментах.

Исследования диска на дальность отбрасывания почвогрунта И. С. Крук и соавторов (2022) [12]

показали зависимость дальности отбрасывания почвогрунта от угла крена γ в пределах от 30 до 48 градусов и угла атаки α в диапазоне от 10 до 18 градусов при диаметре диска 0,45 м и радиусе кривизны диска 0,65 м. Выявлена линейная зависимость между этими величинами. При увеличении угла крена и угла атаки дальность отбрасываемого пласта почвы возрастает от 0,25 до 0,86 м. Эти качественные показатели также планируется измерить в будущем экспериментально.

Заключение

Проведенный обзор исследований рабочих процессов дисковых рабочих органов технологических машин показал, что применяемые лесные дисковые почвообрабатывающие орудия, имеют существенные недостатки, заключающиеся в недостаточной заглубляемости дисков, из-за чего снижается качество обработки почвы, а также в высоких динамических нагрузках при встрече с различными препятствиями, которые снижают ресурс агрегата. Разработана математическая модель рабочих процессов гидропривода задних дисков с вырезами для полосной обработки почвы. Выявлены максимальные показатели давлений рабочей жидкости в гидросистемах. При изменении угла атаки сферических дисков от 0 до 30° давление рабочей жидкости снижается на 23 %. При дальнейшем увеличении угла атаки до 45° давление рабочей жидкости возрастает на 15 %, что говорит о нелинейной зависимости этих параметров. Максимальное тяговое сопротивление возрастает при изменении угла атаки сферического диска от 0 до 30° и увеличивается на 29 %, а после изменения угла атаки на 45° поднимается на 11 %. По выведенным формулам можно предварительно оценить кинематические и динамические параметры дисковых рабочих органов, имеющих вырезы на режущей поверхности диска.

Список литературы

1. Раабе Д.С., Бегунов М.А., Коваль В.С., Черняков А.В., Коростелев Д.Н. Анализ дисковых орудий для поверхностной обработки почвы. Современное научное знание в условиях системных изменений, материалы Пятой национальной научно-практической конференции. 2021: 136-145. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46544756>
2. Малюков С. В., Лысыч М. Н., Бухтояров Л. Д., Поздняков Е. В., Гнусов М. А., Шавков М. В., Петков А. Ф. Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий. Лесотехнический журнал. 2023; 2 (50): 128–141 – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7>.

3. Великанов В.А., Филичкин А.Е., Головин А.Ю. Анализ основных параметров дисковых рабочих органов. Сборник IV Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. 2023: 29-32. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50436770>
4. Припоров Е.В. Анализ полноты обработки почвы в междисковом пространстве двухследного дискового орудия. Известия оренбургского государственного аграрного университета. 2019: 85-88. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37013939>
5. Долматов С. Н., Сухенко Н. В. Влияние параметров рабочего органа дискового рыхлителя на технологический процесс нарезки борозд при лесовосстановлении. Хвойные бореальной зоны. 2022: 529–537. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50097037>
6. Зимарин С. В., Четверикова И. В. Исследование процесса оборота почвенного пласта новым корпусом дискатора на нераскорчеванных вырубках. Resources and Technology. – 2021; 18 1: 53-65. DOI:<https://doi.org/10.15393/j2.art.2021> .
7. Лысыч М.Н. Исследование процесса обработки почвы дисковым культиватором с использованием метода дискретных элементов. Современные наукоемкие технологии. 2020: 59-64. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42596711>
8. Горобей В.П. Исследование тягового сопротивления рабочего органа почвообрабатывающего орудия с зубчатым дисковым ножом. Машиностроение: инновационные аспекты развития, материалы II международной научно-практической конференции. 2019; 90-93. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37355236>
9. Коновалов В.И., Коновалов С.И., Коновалов А.Г. Кинематический анализ дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны. Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. 2023: 22-34. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50232296>
10. Князев А.Г., Камалова Н.С., Юдин Р.В. Системный подход к сравнительному анализу плугов для обработки почв при лесовосстановлении. Воронежский научно-технический Вестник. – 2020; 4(34): 23-29. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2021-4-4-23-29>
11. Зимарин С.В. Новая конструкция корпуса дискатора. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018: 315-321. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36676661>
12. Крук И.С. [и др.] Определение кинематических параметров движения пласта почвы по рабочей поверхности дискового предплужника. Агропанорама. 2022; 4: 14-18. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49437343>
13. Руднев С.Г., Тарасенко Б. Ф., Дробот В. А., Сарксян М. Д. Определение удельного сопротивления дискового плуга. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021; 6(92): 141-146. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47395390>
14. Попиков П. И., Поздняков А. К., Усков В. И. [и др.] Теоретическое исследование кинематических и динамических характеристик шнекового рабочего органа лесопожарной грунтометательной машины. Лесотехнический журнал. 2021; 3(43): 140-151. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/12>
15. Перфильева К.С. Тяговое сопротивление дискового рабочего органа. Студенческая наука об актуальных проблемах и перспективах инновационного развития регионального АПК. Материалы XXI научно-практической конференции обучающихся. 2022: 112-116. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48465955>
16. López-Vázquez A., Cadena-Zapata M., Campos-Magaña S., Zermeño-Gonzalez A., Mendez-Dorado. M. Comparison of energy used and effects on bulk density and yield by tillage systems in a semiarid condition of Mexico. Agronomy. 2019; 9 (4): 189. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy9040189>.
17. Shafaei S. M., Loghavi M., Kamgar S. A. A comparative study between mathematical models and the ANN data mining technique in draft force prediction of disk plow implement in clay loam soil. Agricultural Engineering International CIGR Journal. 2018; 20(2): 71-79.

18. Almaliki S. Simulation of draft force for three types of plow using response surface method under various field conditions. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*. 2018; 49(6): 1123-1124. DOI: <https://doi.org/10.36103/ijas.v49i6.151>.
19. Yudina N.Yu., Yudin R.V., Maksimenkov A.I. Simulation of loading dynamics and hydrodynamics of drives of forest machine working bodies. В сборнике: *ИОП Conference Series: Earth and Environmental Science*. Сер. "International Forestry Forum "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions" 2021: 12060. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012060>.
20. Uskov V. I. Initial-Boundary Value Problem for Perturbed Third Order Partial Differential Equations. *Journal of Mathematical Sciences*. 2021; 255(6): 779-789. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05415-1>.
21. Zubova, S.P., Uskov, V.I. Asymptotic Solution of the Cauchy Problem for a First-Order Equation with a Small Parameter in a Banach Space. The Regular Case. *Math Notes*. 2018; 103: 395–404. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001434618030069>.

References

1. Raabe D.S., Begunov M.A., Koval' V.S., CHernyakov A.V., Korostelev D.N. Analiz diskovyh orudij dlya poverhnostnoj obrabotki pochvy. [Analysis of disk tools for surface tillage]. *Sovremennoe nauchnoe znanie v usloviyah sistemnyh izmenenij, materialy Pyatoy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern scientific knowledge in the context of systemic changes, materials of the Fifth National Scientific and Practical Conference*. 2021: 136-145. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46544756>
2. Malyukov S. V., Lysych M. N., Buhtoyarov L. D., Pozdnyakov E. V., Gnusov M. A., Shavkov M. V., Petkov A. F. Analiz diskovyh rabochih organov lesnyh pochvoobrabatyvayushchih orudij. [Analysis of disk working bodies of forest soil-cultivating implements]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2023 2 (50): 128-141. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7>
3. x Velikanov A. F., Filichkin A.E., Golovin A.YU. Analiz osnovnyh parametrov diskovyh rabochih organov. [Analysis of the main parameters of disk working bodies]. *Sbornik IV Vserossijskoj (nacional'noj) nauchno-prakticheskoy konferencii. =Collection of the IV All-Russian (national) Scientific and Practical Conference*. 2023: 29-32. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50436770>
4. Priporov E.V. Analiz polnoty obrabotki pochvy v mezhdiskovom prostranstve dvuhslednogo diskovogo orudiya. [Analysis of the completeness of soil cultivation in the interdisc space of a double-track disc implement]. *Izvestiya orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = News of the Orenburg State Agrarian University*. 2019: 85-88. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37013939>
5. Dolmatov S. N., Suhenko N. V. Vliyanie parametrov rabocheho organa diskovogo ryhlitel'ya na tekhnologicheskij process narezki borozd pri lesovosstanovlenii. [Influence of the parameters of the working body of the disk ripper on the technological process of cutting furrows during reforestation]. *Hvojnye boreal'noj zony = Conifers of the boreal zone*. 2022: 529-537. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50097037>
6. Zimarin N. V., Chetverikova I. V. Issledovanie processa oborota pochvennogo plasta novym korpusom diskatora na neraskorchevannyh vyrubkah. [Study of the process of turnover of the soil layer with a new diskator body in ungrazed fellings]. *Resources and Technology*. 2021; 18: 53-65. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021>
7. Lysych M.N. Issledovanie processa obrabotki pochvy diskovym kul'tivatorom s ispol'zovaniem metoda diskretnyh elementov. [Study of the process of tillage with a disc cultivator using the discrete element method]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technology*. 2022: 59-64. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42596711>
8. Gorobej V.P. Issledovanie tyagovogo soprotivleniya rabocheho organa pochvoobrabatyvayushchego orudiya s zubchatym diskovym nozhom. [Study of the traction resistance of the working body of a soil-cultivating implement with a toothed disc blade]. *Mashinostroenie: innovacionnye aspekty razvitiya, materialy II mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Mechanical engineering: innovative aspects of development, materials of the II international scientific and practical conference*. 2019: 90-93. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37355236>

9. Konovalov V.I., Konovalov S.I., Konovalov A.G. Kinematicheskij analiz diskovogo rabocheho organa s izmenyayushchimsya radiusom krivizny. [Kinematic analysis of a disk working body with a varying radius of curvature]. Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic network electronic scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2023; 22-34. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50232296>
10. Knyazev A. G., Kamalova N. S., Yudin R. V. Sistemnyj podhod k sravnitel'nomu analizu plugov dlya obrabotki pochv pri lesovosstanovlenii. [A systematic approach to the comparative analysis of plows for soil cultivation during reforestation]. Voronezhskij nauchno-tekhnicheskij Vestnik = Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2023; 34: 23-29. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2021-4-4-23-29>
11. Zimarin S.V. Novaya konstrukciya korpUSA diskatora. [New design of the disk drive housing]. Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika = Current directions of scientific research of the 21st century: theory and practice. 2018: 315-321. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36676661>
12. Kruk I.S. [i dr.] Opredelenie kinematicheskikh parametrov dvizheniya plasta pochvy po rabochej poverhnosti diskovogo predpluzhnika. [Determination of kinematic parameters of the movement of the soil layer along the working surface of the disc skimmer]. Agropanorama = Agropanorama. 2022; 4: 14-18. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49437343>
13. Rudnev S. G., Tarasenko B. F., Drobot V. A., Sarksyán M. D. Opredelenie udel'nogo soprotivleniya diskovogo pluga. [Determination of the resistivity of a disc plow]. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = News of the Orenburg State Agrarian University. 2021; 6(92) : 141-146. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47395390>
14. Popikov P. I., Pozdnyakov A. K., Uskov V. I. [i dr.]. Teoreticheskoe issledovanie kinematicheskikh i dinamicheskikh harakteristik shnekovogo rabocheho organa lesopozharnoj gruntometatel'noj mashiny. [Theoretical study of the kinematic and dynamic characteristics of the auger working body of a forest fire soil-throwing machine]. Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering journal. 2021; 3(43): 140-151. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/12>
15. Perfil'eva K.S. Tyagovoe soprotivlenie diskovogo rabocheho organa. [Traction resistance of the disk working body]. Studencheskaya nauka ob aktual'nykh problemah i perspektivah innovacionnogo razvitiya regional'nogo APK, Materialy XXI nauchno-prakticheskoy konferencii obuchayushchihhsya = Student science on current problems and prospects for innovative development of the regional agro-industrial complex, Materials of the XXI scientific and practical conference of students. 2022: 112-116. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48465955>
16. López-Vázquez A., Cadena-Zapata M., Campos-Magaña S., Zerméño-Gonzalez A., Méndez-Dorado. M. Comparison of energy used and effects on bulk density and yield by tillage systems in a semiarid condition of Mexico. Agronomy. 2019; 9 (4): 189. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy9040189>
17. Shafaei S. M., Loghavi M., Kamgar S. A. A comparative study between mathematical models and the ANN data mining technique in draft force prediction of disk plow implement in clay loam soil. Agricultural Engineering International CIGR Journal. 2018; 20(2): 71-79.
18. Almaliki S. Simulation of draft force for three types of plow using response surface method under various field conditions. Iraqi Journal of Agricultural Sciences. 2018; 49(6): 1123-1124. DOI: <https://doi.org/10.36103/ijas.v49i6.151>
19. Yudina N.Yu., Yudin R.V., Maksimenkov A.I. Simulation of loading dynamics and hydrodynamics of drives of forest machine working bodies. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Forestry Forum "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions" 2021: 12060. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012060>
20. Uskov V. I. Initial-Boundary Value Problem for Perturbed Third Order Partial Differential Equations. Journal of Mathematical Sciences. 2021; 255(6): 779-789. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05415-1>.

21. Zubova, S.P., Uskov, V.I. Asymptotic Solution of the Cauchy Problem for a First-Order Equation with a Small Parameter in a Banach Space. The Regular Case. Math Notes. 2018; 103: 395–404. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001434618030069>

Сведения об авторе

✉ *Князев Александр Геннадьевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5139-0374>, e-mail: Knjazv-sasha@rambler.ru.

Information about the author

✉ *Alexander G. Knyazev* – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5139-0374>, e-mail: Knjazv-sasha@rambler.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author