

## РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАРТОФЕЛЕСАЖАЛКИ

М.Н. Калимуллин, Р.Р. Багаутдинов, Р.Р. Хамитов,  
Р.М. Латыпов, Р.К. Абдрахманов

**Реферат.** Посадка – одна из основных и наиболее трудоемких операций в технологии возделывания картофеля. Существует проблема создания оптимальной плотности и равномерности размещения клубней при посадке. Для ее решения разработан зубчатый рабочий орган картофелесажалки дискового типа. В статье рассматриваются особенности процесса взаимодействия лезвий зубьев дискового рабочего органа с обрабатываемой почвой. Если учесть тот факт, что параметры интенсивности оказываемого воздействия на почву зубчатым рабочим органом будут зависеть от скорости перемещения, можно будет определить значения скорости произвольной точки лезвия зубьев. В результате математических преобразований и применения метода дифференциации уравнения их перемещения получена формула для вычисления скорости резания для произвольной точки лезвия зубьев дискового рабочего органа. Также определено ускорение рассматриваемых точек и проанализированы зависимости, полученные в результате теоретических исследований. Параметры скорости воздействия и траектории перемещения лезвия напрямую зависят от формы режущей кромки. Также на них оказывают влияние угол атаки, величина наклона по отношению к вертикали и показатели скорости перемещения сажалки. При увеличении скорости движения агрегата от 1 до 5 м/с и увеличении угла атаки от 0 до 30° скорость резания изменяется от 0,1 до 1,5 м/с. При воздействии дискового рабочего органа с зубьями по периметру снижается отбрасывание верхнего слоя почвы в сторону и вынос нижнего слоя на открытую поверхность поля, что наиболее заметно при скорости движения сажалки более 2 м/с. При скорости движения 3 м/с отброс почвы снижается, по сравнению с прототипом СН-4Б, до 30 %.

**Ключевые слова:** зубчатый дисковый рабочий орган, почва, лезвие зуба.

**Введение.** При разработке комбинированных рабочих органов сельскохозяйственных машин необходимо стремиться не к замене отдельных операций, а к их совокупному выполнению на основе использования новых принципов воздействия на обрабатываемую почву, семена и удобрения в соответствии с агротехническими требованиями конкретной культуры [1, 2]. Вместе с тем, новый рабочий орган или прогрессивная технология должны создавать оптимальные условия для прорастания посадочного материала и интенсификации начальной фазы развития растений, надежно обеспечивать их влагой, теплом, воздухом и питательными веществами [3, 4].

Исследованиями воздействия на почву ротационных рабочих органов, в частности дисковых, занимались многие авторы. При этом были рассмотрены их форма, конструктивные параметры и основные элементы [5, 6, 7].

Известно, что интенсивность взаимодействия ротационных рабочих органов с почвой зависит от таких конструктивных и технологических параметров, как скорость движения, которая способствует повышению рыхления (крошения) почвы и уничтожения сорняков; форма режущей кромки и ее элементов, а также угол атаки и наклона к вертикальной оси, значительно влияющие на качественные показатели работы [8, 9, 10].

На основании изложенного, а также учитывая существующую потребность в поиске наиболее близких к оптимальным параметров рабочих органов, необходимо обеспечение роста эффективности процессов, связанных с посадкой картофеля.

Цель исследований – усовершенствование

конструкции рабочих органов устройства для посадки картофеля и оптимизация режимов их работы.

**Условия, материалы и методы.** Для решения поставленной задачи был создан зубчатый рабочий орган дискового типа, который служит конструктивной составляющей сошника комбинированного агрегата для посадки картофеля. Он предназначен для проведения предпосадочной обработки почвы (рис. 1).

Конструктивно сошник представляет собой стойку 1, на который последовательно устанавливается пара зубчатых дисков 2. Диски установлены под углом атаки по направлению движения. Образователь борозд 3 монтируется таким образом, чтобы иметь возможность последующей его перестановки по высоте расположения путем перемещения оси вращения сферических дисков в отверстиях 8, выполненных на стойке 1 бороздообразователя 3, каждое из которых соответствует определенной глубине бороздообразования. Направитель клубней картофеля 4 располагается прямо за образователем борозд, непосредственно

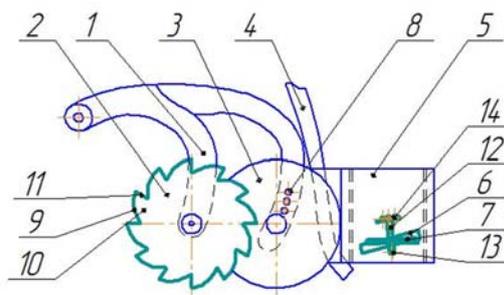


Рис. 1 – Комбинированный сошник для посадки картофеля

между дисками. Корпус пассивного типа 5 жестко соединен с направителем клубней 4. Кроме того, он отличается наличием пары боковин, расположенных на определенном расстоянии одна от другой, которое зависит от физико-механических свойств почвы. На боковине предусмотрено вырезное окно 6, в котором располагается вращающийся зубчатый диск плоской формы 7.

Такое выполнение конструктивных элементов сошника позволяет набирать определенную порцию почвы из стенки борозды, образованной бороздообразователем, пропускать ее через вырезное окно и плавно подавать срезанные порции почвы для укрытия клубней картофеля. Нижний конец клубненаправителя 4 плавно отогнут в сторону, противоположную направлению движения сошника. Это способствует уменьшению скорости падения клубней при посадке, что дает возможность уменьшить травмирование их ростков во время укладки на дно борозды. Кроме того, уменьшается разброс клубней по ширине борозды, а также исключается забивание почвой выходного отверстия клубненаправителя. Все это улучшает качество укладки клубней на дно борозды и их последующую всхожесть.

Передняя режущая кромка 9 каждого зуба 10 плоских дисков 2 выполнена по участку логарифмической спирали и размещена радиально выпуклостью наружу относительно центра дисков, а тыльная кромка 11 каждого зуба 10 выполнена в виде прямой линии, которая соединяет острый конец (точку) носка зуба с центром диска. Кроме того, каждый плоский диск 7 насажен на вертикальную ось 12 посредством подшипника с возможностью регулирования (изменения) его угла наклона относительно вертикали по выполненному в боковине пазу. Диск снабжен трапециевидными зубьями без заточки, причем нижняя часть вертикальной оси выполнена в виде шарнира 13, а верхняя посредством кронштейнов 14 закреплена к боковине пассивного корпуса 5 с ее внутренней стороны (ближе к продольной оси сошника). Угол наклона диска изменяют поворотом вертикальной оси 12 на шарнире 13 относительно вертикальной плоскости по сектору, выполненному над пазом и имеющему градацию величины угла наклона, с фиксацией болтом. Указанная в секторе градация углов наклона вертикальной оси 12, которая изменяется от 0 до 20°, определена экспериментально и прямо пропорциональна массе подаваемой почвы для укрытия клубней картофеля. Изменение угла наклона дисков обеспечивает сохранение толщины слоя почвы над клубнями картофеля при изменении глубины их посадки, регулируемой бороздообразователем.

Подобные конструктивные особенности обеспечивают повышение полноты всходов картофеля. Это объясняется тем, что клубни будут укладываться в разрыхленную почву, после чего укрываться тонким слоем увлажненной почвы.

Несмотря на универсальность и функциональность сошников, отдельно они не могут обеспечить полного выполнения агротехнических требований при посадке картофеля. Поэтому их необходимо использовать в паре с выравнивателем почвы, который необходим как для выравнивания поверхности поля, так и для уплотнения почвы после посадки до необходимого уровня (1,0...1,2 г/см<sup>3</sup> для суглинков, 1,3...1,5 г/см<sup>3</sup> для супесчаных почв).

Зубья, расположенные на диске рабочего органа, совершают сложные пространственные движения. Их лезвия выполнены в форме участка логарифмической спирали. Поэтому каждая точка зубьев по их длине будет двигаться с различной скоростью. С учетом изложенного рассмотрим рабочий орган с зубчатым диском (рис. 2).

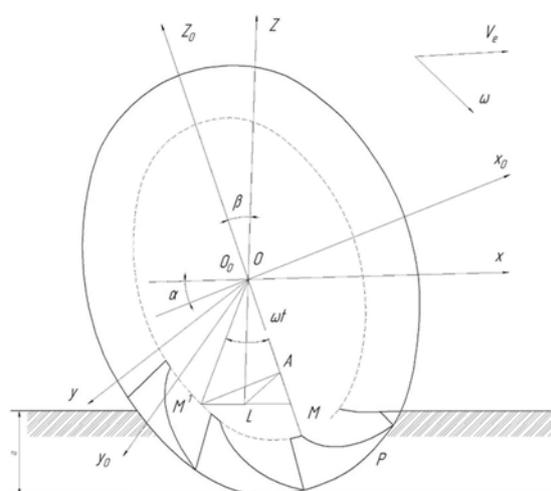


Рис. 2 – Зубчатый дисковый рабочий орган в системе координат OXYZ

**Результаты и обсуждение.** Исходя из анализа множества научных трудов, можно прийти к заключению, что лезвия зубьев рабочих органов ротационного типа должны иметь форму особой кривой с целью обеспечения возможности срезания почвенного слоя с эффектом скольжения и скалывания. Кроме того, они должны деформировать почвенный слой с минимальными усилиями, исключать вероятность повышения плотности на дне борозды, а также минимизировать отброс обрабатываемой почвы [11, 12, 13].

С учетом изложенного и приведенных в исследованиях различных ученых данных [4], целесообразно придавать лезвиям зубьев рабочего органа форму логарифмической спирали. Она может быть достаточно просто построена при использовании известных методик [14, 15].

При изучении особенностей воздействия зубчатого лезвия на слой почвы необходимо воспользоваться аналитическим выражением, представляющим возможность определения расположения произвольной его точки *M* в процессе пространственного перемещения [16, 17, 18]. При этом, как известно из теоретической механики, результирующую силу *R* точки *M* можно определить по формуле:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} \quad (1)$$

где  $R_x, R_y, R_z$  – проекция силы на оси X, Y и Z соответственно, Н.

Отсюда, скорость резания любой точки лезвия зуба  $V_p$  определяется как:

$$V_p = \sqrt{\left(\frac{dX}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dY}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{dt}\right)^2}, \quad (2)$$

Для определения величины  $V_p$  используем полученные нами уравнения точек и лезвия зубчатого дискового рабочего органа [14] в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} x &= V_e t + \rho_0 e^{f\left(\gamma_i + \frac{2\pi}{z}\right)} \cdot [\sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos(\alpha - \gamma_i) - \cos\alpha \cdot \sin(\alpha - \gamma_i)] \\ y &= \rho_0 e^{f\left(\gamma_i + \frac{2\pi}{z}\right)} \cdot [\sin\alpha \cdot \sin(\alpha - \gamma_i) + \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos(\alpha - \gamma_i)] \\ z &= -\rho_0 e^{f\left(\gamma_i + \frac{2\pi}{z}\right)} \cdot \cos\beta \cdot \cos(\alpha - \gamma_i) \end{aligned} \right\} (3)$$

где  $\gamma$  – текущий полярный угол радиус-вектора, рад;

$V_e$  – поступательная скорость агрегата, м/с;

$t$  – время, с;

$\rho_0$  – начальный радиус-вектор, мм;

$f$  – коэффициент трения;

$e$  – основание натурального логарифма;

$\alpha$  – угол атаки, град;

$\beta$  – угол наклона к вертикальной оси,

град.

Тогда при условии  $V_e = const$ , после дифференцирования уравнений (3) получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V_e - \rho_0 \omega \cdot [\sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin(\alpha - \gamma_i) - \cos\alpha \cdot \cos(\alpha - \gamma_i)] \\ \frac{dy}{dt} &= \rho_0 \omega \cdot [\sin\alpha \cdot \cos(\alpha - \gamma_i) - \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin(\alpha - \gamma_i)] \\ \frac{dz}{dt} &= \rho_0 \omega \cdot \cos\beta \cdot \sin(\alpha - \gamma_i) \end{aligned} \right\} (4)$$

Затем, на основании формулы (4), после преобразований, получим выражение для определения скорости резания любой точки лезвия зуба дискового рабочего органа:

$$V_p = \sqrt{V_e^2 - \omega \rho_0 e^{f\left(\gamma_i + \frac{2\pi}{z}\right)} \cdot \left[ 2V_e B + \omega \rho_0 e^{f\left(\gamma_i + \frac{2\pi}{z}\right)} \right]} \quad (5)$$

где:

$$B = \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin(\alpha - \gamma_i) + \cos\alpha \cdot \cos(\alpha - \gamma_i)$$

Исходя из изложенного, полное ускорение рассматриваемой точки  $M$  можно определить по формуле:

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2} \quad (6)$$

где  $W_x, W_y$  и  $W_z$  – соответственно ускорение точки  $M$  по осям координат:

$$\left. \begin{aligned} W_x &= -\rho_0 \omega^2 \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos(\alpha - \gamma_i) + \rho_0 \omega^2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin(\alpha - \gamma_i) \\ W_y &= -\rho_0 \omega^2 \cdot \sin\alpha \cdot \sin(\alpha - \gamma_i) - \rho_0 \omega^2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos(\alpha - \gamma_i) \\ W_z &= \rho_0 \omega^2 \cdot \cos\beta \cdot \cos(\alpha - \gamma_i) \end{aligned} \right\} (7)$$

После дифференцирования уравнения (5) можно получить касательное ускорение лезвия зуба дискового рабочего органа:

$$W_t = \frac{V_e \omega \rho_0}{V_p} [\cos\alpha \cdot \sin(\alpha - \gamma_i) - \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos(\alpha - \gamma_i)] \quad (8)$$

При этом нормальное ускорение произвольной точки  $M$  лезвия зуба дискового рабочего органа определяется из выражения:

$$W_n = \sqrt{\frac{\omega^4 \rho_0^2}{V_p^2} - V_e^2 \omega^2 \rho_0^2 \cdot [\cos\alpha \cdot \sin(\alpha - \gamma_i) - \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos(\alpha - \gamma_i)]^2} \quad (9)$$

Представленные уравнения демонстрируют, что параметры скорости воздействия и траектории перемещения лезвия напрямую зависят от формы режущей кромки. Кроме того, на них оказывают влияние угол атаки, величина наклона по отношению к вертикали и показатели скорости перемещения сошника. Это подтверждают графики, построенные на основе соответствующих зависимостей (рис. 3). График  $V_p = f(V_e)$  построен с учетом прохождения в исходный момент времени всей длины лезвия зубьев в почве через вертикаль,  $\alpha - \gamma_i = 0$ , а отношение окружной скорости к поступательной принято приближенным к единице.

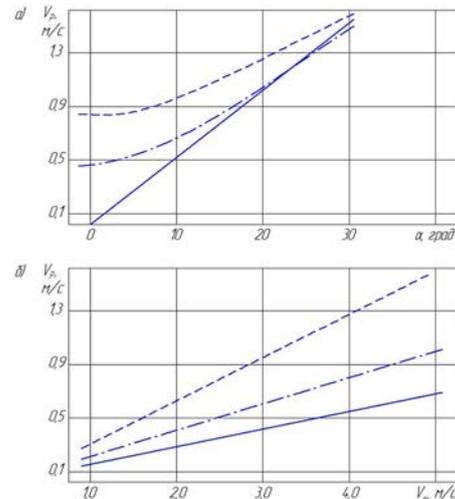


Рис. 3 – Изменение скорости резания лезвием зуба дискового рабочего органа в зависимости от угла атаки (а) и скорости движения (б)

Анализ графиков (см. рис. 3) свидетельствует о том, что параметры скорости резания в крайних и средней точках лезвия будут варьировать. Поэтому в зависимости от высоты зуба будет изменяться значение отбрасывания почвы при входе и выходе лезвия из почвенного слоя. При увеличении скорости движения агрегата от 1 до 5 м/с и угла атаки от 0 до 30° скорость резания изменяется от 0,1 до 1,5 м/с. Эффект снижения скорости резания и, следовательно, отброса почвы с стороны наиболее заметен при скорости движения сажалки более 2 м/с. При скорости движения 3 м/с отброс почвы снижается до 30 %, по сравнению с прототипом СН-4Б.

**Выводы.** В результате исследований был разработан зубчатый рабочий орган картофелесажалки дискового типа и выведена формула, с помощью которой можно определить значение скорости резания для любой точки, принадлежащей его лезвию. Кроме того, определены ускорения рассматриваемых точек и проведен анализ полученных зависимостей. Скорость резания при увеличении скорости движения агрегата с 1 до 5 м/с и угла атаки с 0 до 30° изменяется от 0,1 до 1,5 м/с. Эффект

снижения скорости резания и, следовательно, отброса почвы в стороны наиболее заметен при скорости движения сажалки более 2 м/с. Так, при скорости движения 3 м/с отброс почвы снижается до 30 %, по сравнению с прототипом.

В связи с этим при использовании зубчатых дисковых рабочих элементов можно констатировать уменьшение выноса на поверхность нижнего слоя и отброса в стороны верхнего слоя почвы.

#### Литература

1. Калимуллин М. Н., Абдрахманов Р. К., Галиев И. Г. Совершенствование технологии возделывания картофеля // Техника и оборудование для села. 2017. № 4. С. 6–9.
2. Гайнанов Х. С., Макаров П. И. Об уравнениях движения ротационных органов почвообрабатывающих машин // Труды ЧИМЭСХ. Челябинск, 1981. Вып. 167. С. 95–98.
3. Совершенствование технологии и рабочих органов для предпосадочной обработки почвы под картофель / Р. М. Латыпов, С. П. Маринин, П. М. Подолько и др. // Достижения науки и техники АПК. 2006. № 12. С. 41–42.
4. Ahmadi I.A power estimator for an integrated active-passive tillage machine using the laws of classical mechanics // Soil & Tillage Research. 2017. No. 171. P. 1-8. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719871730082X?via%3Dihub> (дата обращения: 05.03.2021)
5. Обоснование параметров валков соломы и рабочих элементов разравнивателя / Р. К. Абдрахманов, М. Н. Калимуллин, Р. М. Сафин, С. М. Архипов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2012. – Т. 7. – № 3(25). – С. 64–67.
6. Желиговский В. А. Элементы теории почвообрабатывающих машин и механической технологии с.-х. материалов. Тбилиси: Изд-во Грузинского СХИ, 1960. 146 с.
7. Modeling the technological process of tillage / S. G. Mudarisov, I. I. Gabitov, Y. P. Lobachevsky et al. // Soil & Tillage Research. 2019. Vol. 190. P. 70–77. doi: 10.1016/j.still.2018.12.004.
8. Оптимизация подготовки почвы под посев пропашных культур / П. А. Смирнов, И. И. Максимов, М. П. Смирнов и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2018. Т. 13. № 4(51). С. 124–129. doi: 10.12737/article\_5c3de343da23a8.16471048.
9. Валиев А. Р. Исследование процесса движения почвы по рабочей поверхности дискового культиватора // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2017. Т. 12. № 3(45). С. 54–60. doi: 10.12737/article\_5a1d9587a0d852.23012684.
10. Синееков Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение, 1977. 328 с.
11. Матяшин Ю. И., Матяшин Н. Ю. Ротационные почвообрабатывающие машины (теория и расчет, эксплуатация). Казань: Издательство Казанского ГАУ, 2008. 204 с.
12. Kinematic analysis of conical rotary subsoil loosener for tillage / I. Mukhametshin, A. Valiev, F. Muhamadyarov, et al. // Engineering for Rural Development. 2021. 19/2020. P. 1946–1952. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF553.
13. To question of determining design parameters of working body of rotary chopper of tops / M. Kalimullin, D. Ismagilov, R. Abdrakhmanov, et al. // Engineering for Rural Development. 2021. 19/2020. P. 1224–1229. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF294.
14. Кинематика движения зубчатого ротационного рабочего органа / Г.Г. Булгариев, М.Н. Калимуллин, Р.К. Абдрахманов и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11. № 3(41). С. 68–71. doi: 10.12737/22679.
15. Булгариев Г. Г., Юнусов Р. Г. Обоснование и определение основных параметров спирально-пластинчатого рабочего органа // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2013. Т. 8. № 3(29). С. 57–62.
16. Валиев А. Р., Мухамадьяров Ф. Ф., Зиганшин Б. Г. Обоснование конструктивно-технологических параметров нового дискового культиватора // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 1. С. 58–61.
17. Мухаметшин И. С., Валиев А. Р. К анализу кинематики ротационного рабочего органа конусной формы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 2(34). С. 179–182. doi: 10.18286/1816-4501-2016-2-179-182.
18. Абдрахманов Р. К., Калимуллин М. Н., Авдеев А. В. Кинематический анализ работы ротационного рабочего органа с вертикальной осью вращения // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2007. Т. 2. № 2(6). С. 111–112.

#### Сведения об авторах:

Калимуллин Марат Назипович – доктор технических наук, профессор, e-mail: marat-kmn@yandex.ru  
 Багаутдинов Рамис Рифанович – аспирант, e-mail: bagautdinovramis@mail.ru  
 Хамитов Радик Рамилевич – аспирант, e-mail: khamitov.apple@mail.ru  
 Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия;  
 Латыпов Рафкат Мирхатович – доктор технических наук, профессор, e-mail: latypov\_rm\_74@mail.ru  
 Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Троицк, Россия  
 Абдрахманов Ринат Кадырович – доктор технических наук, профессор, e-mail: rinatkadyrovich@mail.ru;  
 Татарский институт переподготовки кадров агробизнеса, г. Казань, Россия

#### DEVELOPMENT AND SUBSTANTIATION OF DESIGN AND MODE PARAMETERS OF A POTATO PLANTER

M.N.Kalimullin, R.R.Bagautdinov, R.R.Khamitov, R.M.Latypov, R.K.Abrakhmanov

**Abstract.** Planting is one of the main and most labor-intensive operations in potato cultivation technology. There is

a problem of creating optimal density and uniformity of tuber placement during planting. To solve it, a toothed working unit of a disk-type potato planter has been developed. The article discusses the features of the process of interaction of the blades of the teeth of the disk working unit with the cultivated soil. If we take into account the fact that the parameters of the intensity of the impact on the soil by the gear working unit will depend on the speed of movement, it will be possible to determine the speed values of an arbitrary point of the teeth blade. As a result of mathematical transformations and the application of the method of differentiation of the equation of their displacement, a formula was obtained for calculating the cutting speed for an arbitrary point of the blade of the teeth of the disk working unit. The acceleration of the points under consideration is also determined and the dependences obtained as a result of theoretical studies are analyzed. The parameters of the impact speed and the trajectory of the blade movement directly depend on the shape of the cutting edge. They are also influenced by the angle of attack, the amount of inclination with respect to the vertical, and the speed indicators of the planter. With an increase in the speed of the unit from 1 to 5 m/s and an increase in the angle of attack from 0 to 30, the cutting speed changes from 0.1 to 1.5 m/s. When exposed to a disk working unit with teeth around the perimeter, the topsoil is thrown to the side and the lower layer is carried out to the open field surface, which is most noticeable when the planter moves at a speed of more than 2 m/s. At a travel speed of 3 m/s, soil ejection is reduced, compared to the SN-4B prototype, by up to 30%.

**Key words:** toothed disk working unit, soil, tooth blade.

#### References

1. Kalimullin MN, Abdrakhmanov RK, Galiev IG. [Improving the technology of potato cultivation]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2017; 4. 6-9 p.
2. Gaynanov KhS, Makarov PI. [On the equations of motion of rotary units of soil-cultivating machines]. *Trudy ChIMESKh. Chelyabinsk*. 1981; 167. 95-98 p.
3. Latypov RM, Marinin SP, Podol'ko PM. [Improving the technology and working units for preplant soil cultivation for potatoes]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2006; 12. 41-42 p.
4. Ahmadi I. A power estimator for an integrated active-passive tillage machine using the laws of classical mechanics. [Internet]. *Soil & tillage research*. 2017; 171. 1-8 p. [cited 2021, March 5]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719871730082X?via%3Dihub>
5. Kalimullin MN, Abdrakhmanov RK, Safin RM, Arkhipov SM [Justification of the parameters of straw rolls and leveller working elements ] // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2012. – vol. 7. – № 3(25). – P. 64-67.
6. Zheligovskii VA. *Elementy teorii pochvoobrabatyvayushchikh mashin i mekhanicheskoi tekhnologii s.-kh. materialov*. [Elements of the theory of tillage machines and mechanical technology of agricultural materials]. Tbilisi: Izd-vo Gruzinskogo SKhI. 1960; 146 p.
7. Mudarisov SG, Gabitov II, Lobachevsky YP. Modeling the technological process of tillage. *Soil & tillage research*. 2019; Vol. 190. 70-77 p. doi: 10.1016/j.still.2018.12.004.
8. Smirnov PA, Maksimov II, Smirnov MP. [Optimization of soil preparation for sowing tilled crops]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018; 13. 4 (51). 124-129 p. doi: 10.12737/article\_5c3de343da23a8.16471048.
9. Valiev AR. [Study of the process of soil movement along the working surface of a disc cultivator]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017; 12. 3 (45). 54-60 p. doi: 10.12737/article\_5a1d9587a0d852.23012684.
10. Sineokov GN. *Teoriya i raschet pochvoobrabatyvayushchikh mashin*. [Theory and calculation of soil-cultivating machines]. Moscow: Mashinostroenie. 1977; 328 p.
11. Matyashin YuI, Matyashin NYu. *Rotatsionnye pochvoobrabatyvayushchie mashiny (teoriya i raschet, ekspluatatsiya)*. [Rotary tillage machines (theory and calculation, operation)]. Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo GAU. 2008; 204 p.
12. Mukhametshin I, Valiev A, Muhamadyarov F. Kinematic analysis of conical rotary subsoil loosener for tillage. *Engineering for rural development*. 2021; 19/2020. 1946-1952 p. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF553.
13. Kalimullin M, Ismagilov D, Abdrakhmanov R. To question of determining design parameters of working unit of rotary chopper of tops. *Engineering for rural development*. 2021; 19/2020. P. 1224-1229 p. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF294.
14. Bulgariev GG, Kalimullin MN, Abdrakhmanov RK. [Kinematics of a toothed rotary working unit movement]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016; 11. 3 (41). 68-71 p. doi: 10.12737/22679.
15. Bulgariev GG, Yunusov RG. [Substantiation and determination of the main parameters of the spiral-lamellar working unit]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2013; 8. 3 (29). 57-62 p.
16. Valiev AR, Mukhamad'yarov FF, Ziganshin BG. [Substantiation of the design and technological parameters of a new disc cultivator]. *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka*. 2017; 1. 58-61 p.
17. Mukhametshin IS, Valiev AR. [On the analysis of the kinematics of a rotary working unit of a cone shape]. *Vestnik Ul'yanovskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2016; 2 (34). 179-182 p. doi: 10.18286/1816-4501-2016-2-179-182.
18. Abdrakhmanov RK, Kalimullin MN, Avdeev AV. [Kinematic analysis of the operation of a rotary working unit with a vertical axis of rotation]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2007; 2. 2(6). 111-112 p.

#### Authors:

Kalimullin Marat Nazipovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: marat-kmn@yandex.ru  
 Bagautdinov Ramis Rifanovich – postgraduate student, e-mail: bagautdinovramis@mail.ru  
 Khamitov Radik Ramilevich – postgraduate student, e-mail: khamitov.apple@mail.ru  
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia  
 Latypov Rafkat Mirkhatovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: latypov\_rm\_74@mail.ru  
 South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia  
 Abdrakhmanov Rinat Kadyrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: rinatkadyrovich@mail.ru  
 Tatar Institute for the Retraining of Agribusiness Personnel, Kazan, Russia